

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Rafal MICKEVIČ

KELIO DANGOS VOLUOJAMOJO BETONO
ANT HIDRAULINIAIS RIŠIKLIAIS SURIŠTO
GRUNTO PAGRINDO STIPRUMO IR
DEFORMACIJŲ TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (T 002)

Vilnius, 2025

Disertacija rengta 2020–2025 m. Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

prof. dr. Audrius VAITKUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Statybos inžinerija – T 002).

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

Pirmininkas

doc. dr. Šarūnas SKUODIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Statybos inžinerija – T 002).

Nariai:

habil. dr. Piotr JASKULA (Gdansko technikos universitetas, Lenkija, Statybos inžinerija – T 002),

dr. Sigitas KILIKEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, Transporto inžinerija – T 003),

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

prof. habil. dr. Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Statybos inžinerija – T 002).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2025 m. gegužės 14 d. 10 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto *Aula Doctoralis* posėdžių salėje.

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

Tel.: (0 5) 274 4956; faksas: (0 5) 270 0112; el. paštas: doktor@vilniustech.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2025 m. balandžio 11 d.

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

Vilniaus Gedimino technikos universiteto 2025-016-M mokslo literatūros knyga

<https://doi.org/10.20334/2025-016-M>

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2025

© Rafal Mickevič, 2025

rafal.mickevic@vilniustech.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Rafal MICKEVIČ

INVESTIGATIONS ON THE STRENGTH
AND DEFORMATIONS OF ROLLER-
COMPACTED CONCRETE PAVEMENT ON
SOIL BASE BOUNDED WITH HYDRAULIC
BINDERS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (T 002)

Vilnius, 2025

The doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2020–2025.

Supervisor

Prof. Dr Audrius VAITKUS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

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

Chairman

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

Members:

Dr Habil. Piotr JASKULA (Gdansk University of Technology, Poland, Civil Engineering – T 002),

Dr Sigitas KILIKEVIČIUS (Kaunas University of Technology, Transport Engineering – T 003),

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

Prof. Dr Habil. Henrikas SIVILEVIČIUS (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 *Aula Doctoralis* Meeting Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **10 a.m. on 14 May 2025**.

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

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

A notification on the intended defence of the dissertation was sent on 11 April 2025. A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Vilnius Gediminas Technical University repository <https://etalpykla.vilniustech.lt/> and the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziუმė

Disertacijoje nagrinėjami voluojamojo betono dangos konstrukcijos, įrengtos ant hidrauliniais rišikliais surišų gruntų pagrindo, įtempiai, deformacijos ir nuovargis.

Disertacijos tikslas – iširti voluojamojo betono dangos, įrengtos ant pagrindo sluoksnio iš gruntų, surišų hidrauliniais rišikliais ir kitais priedais, nuovargio funkcijų parametrus bei parengti voluojamojo betono dangos konstrukcijų racionalius sprendinius ir technines specifikacijas. Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados ir rekomendacijos, literatūros šaltinių ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas, santrauka anglų kalba. Įvade aptarta tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašyti tyrimų objektai, metodai, suformuluotas darbo tikslas ir uždaviniai, mokslinis naujumas, praktinė darbo rezultatų reikšmė, ginamieji teiginiai bei darbo struktūra. Pirmajame disertacijos skyriuje pateikiama literatūros analizė apie voluojamojo betono dangos konstrukcijų funkcionavimą, skaičiavimo metodus ir jų algoritmuose taikomas nuovargio funkcijas, nuovargio funkcijų kintamuosius. Skyriaus pabaigoje suformuluojami pagrindiniai disertacijos uždaviniai. Antrajame skyriuje analizuojama hidroterminio poveikio įtaka voluojamojo betono dangos konstrukcijai, nustatomi faktiniai įtempiai voluojamojo betono sluoksnio apačioje. Taip pat analizuojamas deformacinių siūlių apkrovos perdavimas ir pagrindo erozijos modelis. Trečiajame skyriuje pateikiama skaičiuojamoji dangos konstrukcijos schema, grindžiama faktinėmis dangos konstrukcijos mechaninėmis savybėmis, nustatytomis atliktais eksperimentiniais tyrimais bei vykdyta dangos konstrukcijos sluoksnių įrengimo kontrole, statant objektą. Pateikiami rekomendaciniai voluojamojo betono dangos konstrukcijų variantai. Skyriuje taip pat pateikiami dangos konstrukcijos sluoksniams ir dangos konstrukcijos sluoksnių įrengimo kontrolei keliami reikalavimai.

Disertacijos tema yra atspausdinti 3 moksliniai straipsniai mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Web of Science* duomenų bazę. Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti trijose tarptautinėse mokslinėse konferencijose.

Abstract

The dissertation examines the stresses, deformations, and fatigue of roller-compacted concrete pavement structures installed on the base of soils bounded with hydraulic binders.

The dissertation aims to investigate the fatigue function parameters of roller-compacted concrete pavements installed on a base layer of soils bound with hydraulic binders and other additives and to develop rational solutions and technical specifications for roller-compacted concrete pavement structures. 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 dissertation, as well as a summary in English. The introduction discusses the research problem and the relevance of the dissertation, describes the research objects, and formulates the purpose and tasks of the dissertation, scientific novelty, the practical significance of the dissertation results, defensive statements, and the research methodology. The first chapter of the dissertation presents a literature analysis on the performance of roller-compacted concrete pavement structures, calculation methods and fatigue functions applied in their algorithms, and variables of fatigue functions. At the end of the chapter, the main objectives of the dissertation are formulated. The second chapter analyses the influence of hydrothermal effects on the structure of the roller-compacted concrete pavement and determines the actual stresses at the bottom of the roller-compacted concrete layer. It also analyses the joint load transfer and base erosion models. The third chapter presents the computational scheme of pavement structure, which is based on the actual mechanical properties of the pavement structure, determined by the experimental studies and the control of the installation of the pavement structure layers during the reconstruction. Also, it provides recommended variants of pavement structures based on the computational scheme. The third chapter also provides requirements for pavement structure layers and controls for installing pavement structure layers.

Three scientific articles were published on the topic of the dissertation in scientific journals included in the *Web of Science* database. The results of the research conducted in the dissertation were presented at three international conferences.

Žymėjimai

Simboliai

C_0 – tanklumas (angl. *degree of compactability*);

C_1 – koeficientas, įvertinantis pagrindo medžiagiškumą (angl. *coefficient that evaluates the materiality of the base*);

C_2 – koeficientas, įvertinantis betono krašto praplatinimą (angl. *coefficient that evaluates the widening of the concrete edge*);

C30/37 – betono gniuždymo stiprio klasė (angl. *compressive strength class*);

d_l – apkrautos plokštės įlinkis, μm (angl. *deflection of a loaded plate*);

$D_{\text{max } 16}$ – stambiausios dalelės dydis, mm (angl. *largest particle size*);

D_{Pr} – sutankinimo rodiklis, % (angl. *degree of compaction*);

d_u – neapkrautos plokštės įlinkis, μm (angl. *deflection of an unloaded plate*);

d_0 – normalizuotasis įlinkis apkrovos centre, μm (angl. *normalized deflection at the load center*);

$d_{0,m}$ – matavimais nustatytas įlinkis apkrovos centre, μm (angl. *measured deflection at the load center*);

d_1 ir d_2 – bandinio skerspjūvio matmenys, mm (angl. *cross-sectional dimensions of the specimen*);

E – standumo modulis, MPa (angl. *modulus of elasticity*);

E_0 – ekvivalentinis standumo modulis, MPa (angl. *equivalent modulus of elasticity*);

E_{v2} – deformacijos modulis, nustatytas antruoju apkrovimo ciklu spaudžiant sluoksnį plokštė pagal LST 1360-5:2019, MPa (angl. *modulus of deformation*);

F – didžiausioji apkrova, N (angl. *maximum load*);

F_d – apkrovos impulso standartas, kN (angl. *load impulse standard*);

F_m – apkrovos impulsas matavimo metu, kN (angl. *load pulse during measurement*);

$f_{ct,fl}$ – lenkiamasis stipris, MPa (angl. *flexural strength*);

f_{ct} – skeliamasis stipris, MPa (angl. *tensile strength*);

FT2 – betono dangos atsparumo lukštenimuisi klasė (angl. *category for freeze/thaw resistance*);

F300 – atsparumo šalčiui markė (angl. *frost resistance classification*);

h – plokštės storis, m (angl. *slab thickness*);

k – sluoksnių, esančių po betonu, atspara, MPa/m (angl. *k value*);

l – reliatyvusis standumas, m (angl. *relative stiffness*);

m_{28} – masės nuostolis po 28 šaldymo ir šildymo ciklų, kg/m² (angl. *mass loss after 28 freezing and thawing cycles*);

m_{56} – masės nuostolis po 56 šaldymo ir šildymo ciklų, kg/m² (angl. *mass loss after 56 freezing and thawing cycles*);

N_f – leistinasis apkrovų pasikartojamumas (angl. *permissible load repetition rate*);

P – laikomosios gebos koeficientas (angl. *rate of power*);

w_0 – įlinkis plokštės centre, μm (angl. *deflection in the center of the plate*);

XR2 – betono mišinio šarminės korozijos klasė (angl. *alkaline corrosion class*);

XF4 – betono mišinio aplinkos poveikio klasė (angl. *exposure class*);

ε – deformacija, $\mu\varepsilon$ (angl. *deformation*);

σ_i – didžiausias normalinis įtempis, MPa (angl. *maximum normal stress*);

σ – normalinis įtempis, MPa (angl. *normal stress*);

ν – Puasono koeficientas (angl. *Poisson's ratio*).

Sąvokos

Apkrovos perdavimo koeficientas – koeficientas, įvertinantis apkrovos perdavimo efektyvumą tarp gretimai esančių apkrautos ir neapkrautos plokščių (angl. *load transfer coefficient*).

Daugiasluoksniškumo teorija – teorija, grindžiama prielaidomis: visi sluoksniai yra tiesiškai tamprūs, horizontalia kryptimi neriboti; išskyrus paskutinį sluoksnį, yra pastovaus storio; visas sluoksnių paviršiaus plotas turi vienodas sukibimo ir trinties sąlygas; nevertinamas savasis konstrukcijos svoris ir pirminiai įtempiai ir deformacijos; apkrova į viršutinio sluoksnio paviršį paskirstoma apskritimo plote (angl. *multilayer theory*).

Hidroterminis režimas – režimas, kai dangos konstrukcija periodiškai drėksta, džiūsta, šyla ir šąla (angl. *hydrothermal regime*).

Leistinasis apkrovų pasikartojamumas – leistinas projektinių apkrovų pasikartojimo skaičius, nepasireiškus dangos konstrukcijos ribiniam būviui būdingiems požymiams (angl. *permissible load repetition rate*).

Mechanistinis-empirinis dangų konstravimo metodas – dangų konstravimo metodas, kuris grindžiamas apskaičiuotomis dangos reakcijomis (įtempiais, deformacijomis) į sukeliamas apkrovas, kurios naudojamos dangos konstrukcijos nuovargio vertinimo algoritmuose (angl. *mechanistic-empirical pavement design method*).

Mechanistiniai komponentai – mechanistinio-empirinio dangų konstravimo metodo įvesties parametrai (angl. *mechanistic components*).

Minerio sąlyga – santykis tarp suminės projektinės ir ribinės apkrovų, įvertinantis dangos konstrukcijos nuovargio (degradacijos) poveikį (angl. *Miner's rule*).

Natūralusis trūkis – voluojamojo betono dangose nenumačius deformacinių siūlių, danga natūraliai sutrūkinėja, t. y. atsiranda natūralūs trūkliai. Priklausomai nuo voluojamojo betono mechaninių savybių, natūralūs trūkliai įprastai susiformuoja 6,1–18,3 m atstumais (angl. *natural crack*).

Nepalankusis hidroterminis režimas – režimas, kuomet pavasario polaidžio laikotarpiu (įprastai vasario 15 d. – balandžio 30 d.) dangos konstrukcijoje yra padidėjęs drėgnis (angl. *unfavorable hydrothermal regime*).

Neutralusis hidroterminis režimas – režimas, kuomet dangos konstrukcija nėra papildomai drėkinama išorės veiksnių (įprastai gegužės 1 d. – vasario 14 d.) (angl. *neutral hydrothermal regime*).

Nuovargis – reiškinys, kai dėl pasikartojančių apkrovos ciklų medžiagoje pasireiškia susilpnėjimas (angl. *fatigue*).

Nuovargio funkcija – reiškinio, kai dėl pasikartojančių apkrovos ciklų medžiagoje pasireiškia susilpnėjimas, elgsenos matematinė išraiška (angl. *fatigue function*).

Pagrindo erozija – pagrindo sluoksnio stabilumo praradimas ir degradacija (išplovimas, nelygumai, tuštymės) (angl. *base erosion*).

Praplatintas betono kraštas – betono dangos pločio (įprastai 0,6–1,2 m) padidėjimas, kad betono kraštas nebūtų tiesiogiai veikiamas apkrovos (angl. *widened concrete edge*).

Ribinis būvis – ribiniu vadinamas toks būvis, kurį peržengus konstrukcija neatitinka projekto numatytų reikalavimų (angl. *limit state*).

Slankusis betonas – betono mišinys, turintis slankiąsias savybes, kurio didžiausią mišinio dalį sudaro stambusis užpildas. Įprastai klojamas slankiaisiais klojiniais ir tankinamas giluminiais vibratoriais (angl. *slip-form concrete*).

Šiluminio plėtimosi koeficientas – koeficientas, nurodantis medžiagos ilgio, ploto ar tūrio pokytį kintant temperatūrai, bet esant pastoviam slėgiui (angl. *thermal expansion coefficient*).

Tanklumas – aukščių, prieš tankinant betoną ir užbaigus tankinimą, santykis (angl. *degree of compactability*).

Tempiamasis skelo modulis – normalinio įtempio ir atitinkamos deformacijos santykis tempimo įtempiams (angl. *tensile modulus of elasticity*).

Teoriniai įtempiai – įtempiai, nustatyti pagal sudarytą skaičiuojamąją schemą (angl. *theoretical stresses*).

Voluojamasis betonas – betono mišinys, turintis slankiojo (įprasto) betono sudedamąsias dalis, tačiau, pakeitus jų proporcingumą, įgavęs kitokių savybių. Voluojamajame betono mišinyje didesnė smulkiojo užpildo dalis, todėl voluojamojo betono mišinys yra tanklus, kurį voluojant galima pasiekti didelį betono tankį ir konsolidaciją (angl. *roller-compacted concrete*).

Santrumpos

A – projektinė apkrova (angl. *design load*);

ACPA – Amerikos betoninių dangų asociacija (angl. *American Concrete Pavement Association*);

AŠAS – apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis (angl. *frost-resistant layer*);

ATLaS30 – sunkiasvorių transporto priemonių apkrovos imitavimo įrenginys (angl. *heavy vehicle load simulator*);

CBR – Laikomosios gebos Kalifornijos rodiklis (angl. *California bearing ratio*);

CTB – viršutinis pagrindo sluoksnis iš gruntų, surištų hidrauliniais rišikliais ir kitais priedais (angl. *upper base layer of soils bound with cement and additives*);

CTS – apatinis pagrindo sluoksnis iš gruntų, surištų hidrauliniais rišikliais ir kitais priedais (angl. *lower base layer of soils bound with cement and additives*);

DK – dangos konstrukcija (angl. *pavement structure*);

ESAs – ekvivalentinių standartinių (10 t svorio) ašių apkrovų bendroji suma (angl. *total sum of equivalent standard (10 t weight) axle loads*);

FWD – krintančiojo svorio deflektometras (angl. *falling weight deflectometer*);

fr. – frakcija (angl. *fraction*);

LTE – apkrovos perdavimo efektyvumas (angl. *load transfer efficiency*);

PCA – Portlando cemento asociacijos (angl. *Portland Cement Association*);

PK – piketas (angl. *chainage*);

PCC – nearmuotasis slankusis betonas (angl. *unreinforced slip-form concrete*);

RCC – voluojamasis betonas (angl. *roller-compacted concrete*);

R2 – determinacijos koeficientas (angl. *coefficient of determination*);

SN – standartinis nuokrypis (angl. *standard deviation*);

SPS – skaldos pagrindo sluoksnis (angl. *crushed aggregates layer*);

SR – įtempių santykis (angl. *stress ratio*);

V/C – vandens ir cemento santykis (angl. *water-cement ratio*);

ŽS – žemės sankasa (angl. *subgrade*);

Q3 – apatinis kvartilis (angl. *lower quartile*).

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	1
Tyrimų objektas.....	2
Darbo tikslas.....	2
Darbo uždaviniai	2
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	4
Disertacijos struktūra.....	5
Padėka	5
1. MOKSLO DARBŲ, SKIRTŲ VOLUOJAMOJO BETONO TYRIMAMS KELIO DANGOJE, ANALIZĖ	7
1.1. Voluojamojo betono dangos konstrukcijų elgsenos samprata	7
1.2. Eksperimentinių tyrimų, nustatant voluojamojo betono dangos įtempius, deformacijas ir nuovargį, analizė.....	12
1.3. Automatizuotų daugiasluoksniškumo ir tamprumo teorijomis grindžiamų skaičiavimo metodų taikymas, parenkant betono dangos konstrukcijas.....	21
1.4. Nuovargio funkcijos ir jų kintamieji	22
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	27

2. VOLUOJAMOJO BETONO DANGOS ELGSENOS EKSPERIMENTINIS TYRIMAS	29
2.1. Eksperimentinio tyrimo planas	29
2.1.1. Hidroterminio poveikio analizės tyrimo vieta ir planas.....	30
2.1.2. Deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos eksperimentinio tyrimo vieta ir planas.....	33
2.2. Eksperimentinio tyrimo metodika	35
2.2.1. Hidroterminio poveikio ir plyšių analizės tyrimo metodika	36
2.2.2. Skaičiuojamoji įtempių voluojamajame betone nustatymo metodika	38
2.2.3. Voluojamojo betono dangos konstrukcijos laikomosios gebos tyrimų krintančiojo svorio deflektometru metodika	40
2.2.4. Deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos eksperimentinio tyrimo metodika	41
2.3. Eksperimentinio tyrimo rezultatai	44
2.3.1. Hidroterminis režimas voluojamojo betono dangos konstrukcijoje.....	44
2.3.2. Hidroterminis poveikis betono dangos konstrukcijos laikomajai gebai	50
2.3.3. Deformacijų ir įtempių voluojamojo betono sluoksnio apačioje tyrimo rezultatai	53
2.3.4. Deformacinių siūlių apkrovos perdavimo tyrimo rezultatai	55
2.3.5. Pagrindo erozijos tyrimo rezultatai.....	57
2.4. Antrojo skyriaus išvados	60
3. VOLUOJAMOJO BETONO DANGOS ANT HIDRAULINIAIS RIŠIKLIAIS SURIŠTŲ GRUNTŲ PAGRINDO SLUOKSNIO ĮTEMPIŲ IR DEFORMACIJŲ RIBINIAI BŪVIAI	61
3.1. Skaičiuojamosios dangos konstrukcijos schemos sudarymas ir vietinės reikšmės kelio Nr. 130 teorinių įtempių apskaičiavimas	62
3.1.1. Apatinio pagrindo sluoksnio skaičiuojamųjų parametru įvertinimas	62
3.1.2. Viršutinio pagrindo sluoksnio skaičiuojamųjų parametru įvertinimas	63
3.1.3. Teorinių įtempių apskaičiavimas.....	64
3.2. Voluojamojo betono dangos ant viršutinio pagrindo sluoksnio iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, nuovargio funkcijų sukūrimas remiantis eksperimentinio tyrimo rezultatais	66
3.2.1. Deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos nuovargio funkcija... ..	70
3.3. Voluojamojo betono dangos konstrukcijų sprendiniai ir sluoksniams keliami reikalavimai	70
3.3.1. Voluojamojo betono dangos konstrukcijos.....	71
3.3.2. Apatiniam pagrindo sluoksniui keliami reikalavimai	74
3.3.3. Viršutiniam pagrindo sluoksniui keliami reikalavimai.....	75
3.3.4. Voluojamajam betonui keliami reikalavimai	80
3.3.5. Voluojamojo betono dangos konstrukcijos įrengimo kontrolė	81
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	82
BENDROSIOS IŠVADOS	85

REKOMENDACIJOS	87
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	91
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS ...	97
SUMMARY IN ENGLISH.....	99

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem.....	1
Relevance of the dissertation.....	1
Research object	2
Aim of the dissertation	2
Tasks of the dissertation	2
Research methodology	3
Scientific novelty of the dissertation	3
Practical value of the research findings.....	4
Defended statements	4
Approval of research findings	4
Structure of the dissertation.....	5
Acknowledgement.....	5
1. ANALYSIS OF SCIENTIFIC WORKS ON THE RESEARCH OF ROLLER-COMPACTED CONCRETE PAVEMENTS	7
1.1. Concept of the behaviour of roller-compacted concrete pavement structures.....	7
1.2. Analysis of the performed experimental studies in determining the stresses, deformations and fatigue of the roller-compacted concrete.....	12
1.3. Application of automated calculation methods based on theories of multi-layering and elasticity to the selection of concrete pavement structures.....	21
1.4. Fatigue functions and their variables.....	22

1.5. Conclusions of the First Chapter and formulation of dissertation tasks	27
2. EXPERIMENTAL STUDY OF THE BEHAVIOUR OF ROLLER-COMPACTED CONCRETE PAVEMENT	29
2.1. Parts of an experimental study	29
2.1.1. Hydrothermal impact and fracture analysis research site and plan.....	30
2.1.2. Location and plan of experimental study of joint deformations and base erosion	33
2.2. Experimental research methodology	35
2.2.1. Hydrothermal impact and fracture analysis research methodology	36
2.2.2. Computational methodology for determining stresses in roller-compacted concrete pavement.....	38
2.2.3. Methodology for testing the bearing capacity of roller-compacted concrete pavement structures using a falling weight deflectometer	40
2.2.4. Methodology for experimental investigation of joint deformations and base erosion	41
2.3. Experimental study results	44
2.3.1. Hydrothermal regime in roller-compacted concrete pavement construction	44
2.3.2. Hydrothermal effects on the bearing capacity of concrete pavement structures	50
2.3.3. Results of the study of deformations and stresses at the bottom of the roller-compacted concrete layer	53
2.3.4. Results of the load transfer study of expansion joints	55
2.3.5. Base erosion study results	57
2.4. Conclusions of the Second Chapter.....	60
3. STRESS AND DEFORMATION LIMITS OF ROLLER-COMPACTED CON- CRETE PAVEMENT ON SOILS BONDED WITH HYDRAULIC BINDERS	61
3.1. Creation of a computational pavement structure model and calculation of empirical stresses of local road No. 130.....	62
3.1.1. Estimation of computational parameters of the lower base layer	62
3.1.2. Estimation of computational parameters of the upper base layer	63
3.1.3. Calculation of theoretical stresses	64
3.2. Application of fatigue functions of roller-compacted concrete pavement on the base layer of soils bound with hydraulic binders and other additives based on the results of an experimental study	66
3.2.1. Fatigue function of joint deformation and base erosion	70
3.3. Roller-compacted concrete pavement structural solutions and requirements for layers.....	70
3.3.1. Roller-compacted concrete pavement structures	71
3.3.2. Requirements for lower base layer	74
3.3.3. Requirements for upper base layer	75

3.3.4. Requirements for roller-compacted concrete.....	80
3.3.5. Control of the installation of roller-compacted concrete pavement structures	81
3.4. Conclusions of the Third Chapter.....	82
 GENERAL CONSLUSIONS	85
 RECOMMENDATIONS	87
 REFERENCES	91
 LIST OF THE SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION.....	97
 SUMMARY IN ENGLISH.....	99

Įvadas

Problemos formulavimas

Kelio dangos konstrukcijos sluoksnių nuovargis yra pagrindinė ribinė sąlyga, projektuojant dangos konstrukcijas. Nuovargis, išreikštas nuovargio funkcija, grindžiamas empiriniais duomenimis, siejant juos su įtempių ir deformacijų dydžiu nuo projektinės apkrovos. Problema yra ta, kad iki šiol pasaulyje nėra žinomos ir neištyrinėtos voluojamojo betono dangos, įrengtos ant pagrindo sluoksnių iš gruntų, surištų hidrauliniais rišikliais ir kitais priedais, taip pat įtempių ir deformacijų ribinės vertės, nežinomas tokio tipo dangos konstrukcijos jautrumas hidroterminiam režimui.

Darbo aktualumas

Lietuvoje vis dažniau taikomos individualiai suprojektuotos voluojamojo betono dangos konstrukcijos, įrengtos ant pagrindo sluoksnių iš gruntų, surištų hidrauliniais rišikliais ir kitais priedais. Šios dangos konstrukcijos įprastai taikomos didelių apkrovų zonose, pavyzdžiui, intermodaliniuose terminaluose, Klaipėdos, Akmenės laisvojoje ekonominėje zonoje, kur vyrauja didelės ašinės apkrovos.

Voluojamojo betono dangos taip pat naudojamos mažo intensyvumo kelių ruožuose ir kituose susisiekimo statiniuose, nereikalaujančiuose didelio dangos lygumo bei estetiškumo.

Voluojamojo betono dangos konstrukcijos yra projektuojamos visuotinai pripažintu mechanistiniu-empiriniu metodu, kuriame įvertinamas dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagiškumas, veikiančios apkrovos ir taikomos nuovargio funkcijos, kurios ne visai pritaikytos konkrečiai šaliai, regionui, betono tipui ir dangos konstrukcijos sandarai. Lietuvoje nėra atlikta mokslinių tyrimų, nustatant įtempius ir deformacijas tiek voluojamojo betono sluoksnio apačioje, tiek hidrauliniu rišikliu bei jonų mainus gerinančiu priedu sustipruntų gruntų sluoksnio apačioje. Dangos konstrukcijos įlinkiai, įtempiai ir deformacijos, susidaranti voluojamojo betono sluoksnio apačioje, yra kritinis veiksnys, projektuojant dangos konstrukciją, parenkant racionalius dangos konstrukcijos sprendinius ir prognozuojant dangos konstrukcijos funkcionavimą projektiniu naudojimo laikotarpiu.

Tyrimų objektas

Šio darbo tyrimo objektas – voluojamojo betono dangos, įrengtos ant pagrindo sluoksnio iš gruntų, surišių hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, laikomoji geba, įtempių ir deformacijų ribinės sąlygos ir hidroterminio režimo įtaka dangos konstrukcijos elgsenai.

Darbo tikslas

Šio darbo tikslas – ištirti voluojamojo betono dangos, įrengtos ant pagrindo sluoksnio iš gruntų, surišių hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, nuovargio funkcijų parametrus ir parengti voluojamojo betono dangos konstrukcijų racionalius sprendinius ir technines specifikacijas.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti sprendžiami šie uždaviniai:

1. Atlikti hidroterminio režimo poveikio eksperimentiniame ruože įrengtos ant pagrindo sluoksnio iš gruntų, surišių hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, voluojamojo betono dangos konstrukcijos analizę. Šiam tikslui panaudoti drėgnio bei temperatūros kitimo

duomenis, nuskaitytus iš temperatūros ir drėgnio jutiklių, įrengtų voluojamojo betono ir pagrindo sluoksnio iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, sluoksnio apačioje.

2. Atlikti įtempių ir deformacijų, pasireiškiančių voluojamojo betono sluoksnio apačioje, veikiant projektinei 50 kN automobilio rato apkrovai bei tipinei orlaivio 200 kN apkrovai, eksperimentinį tyrimą.
3. Atlikti voluojamojo betono deformacinių siūlių apkrovos perdavimo tarp įpjovomis padalintų plotų ir įlinkių plokščių kampe eksperimentinį tyrimą, veikiant projektinei 50 kN automobilio rato ir tipinei karinio mobilumo 100 kN apkrovoms.
4. Atsižvelgiant į eksperimentiniame ruože nustatytas dangos konstrukcijos deformacijų vertes, perskaičiuotus sluoksnių standumo modulius ir kitas dangos konstrukcijos sluoksnių mechanines savybes, nustatytas objekto rekonstravimo metu, sudaryti skaičiuojamąją dangos konstrukcijos schemą.
5. Sudaryti voluojamojo betono, įrengto ant viršutinio ir apatinio pagrindo sluoksnio iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, technines specifikacijas ir sluoksnių įrengimo reikalavimus.

Tyrimų metodika

Darbe buvo naudojamas natūrinių voluojamojo betono dangų konstrukcijų, įrengtų ant hidrauliniiais rišikliais surišto pagrindo sluoksnio, apkrovimas, suteikiant krintančiojo svorio deflektometru dinaminę apkrovą. Atlikti šios apkrovos sukiamų įtempių ir deformacijų, fiksuotų deformacijų jutikliais, įrengtais dangos ir pagrindo sluoksnių sandūroje, tyrimo duomenų sisteminimas, grupavimas, lyginimas ir statistinė analizė.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją, gauti šie statybos inžinerijos mokslui nauji ir reikšmingi rezultatai:

1. Atsižvelgiant į atliktus voluojamojo betono dangos konstrukcijos, įrengtos ant pagrindo sluoksnio iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, laikomosios gebos, įtempių ir deformacijų tyrimų re-

zultatus, sudaryta skaičiuojamoji voluojamojo betono dangos konstrukcijos schema ir nustatyti skaičiuojamieji nuovargio funkcijos parametrai.

2. Remiantis kitų šalių praktika, mokslininkų patirtimi ir atliktais asmeniniais tyrimais, pasiūlyti voluojamojo betono dangos konstrukcijos sprendiniai, reikalavimai voluojamojo betono dangai bei viršutiniam ir apatiniam pagrindo sluoksniui iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Priklausomai nuo projektinės apkrovos A, darbe pateikiamos voluojamojo betono dangos konstrukcijos ant hidrauliniiais rišikliais surištų gruntų pagrindo arba skaldos pagrindo sluoksnio, kurios grindžiamos nuovargio funkcijomis ir yra pritaikytos Lietuvos klimatinėms, hidrologinėms bei geologinėms sąlygoms. Taip pat darbe pateikiami reikalavimai voluojamojo betono dangai ir hidrauliniiais rišikliais surištų gruntų pagrindo sluoksniui. Darbe pateikti dangos konstrukcijos sprendiniai ir dangos konstrukcijos sluoksniams keliami reikalavimai gali būti taikomi projektuojant bei parenkant racionalius voluojamojo betono dangos konstrukcinius sprendinius.

Ginamieji teiginiai

1. Faktiniai įtempiai ir deformacijos, susidarantys voluojamojo betono dangoje, įrengtoje ant hidrauliniiais rišikliais surištų gruntų pagrindo, yra vienodi arba mažesni už įtempius ir deformacijas, nustatytas skaičiuojamąja schema.
2. Voluojamojo betono dangos deformacinės (skersinės) siūlės, kurios suformuotos įpjauant 1/3 dangos storio, užtikrina ne mažesnę kaip 70% apkrovos perdavimo koeficientą, kuris prilygsta siūlės su metaliniais įdėklais apkrovos perdavimo laipsniui.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra atspausdinti 2 moksliniai straipsniai mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Web of Science* duomenų bazę (Vaitkus, Gražulytė, Kravcovas et al., 2021; Vaitkus, Gražulytė, Šernas et al., 2021; Mickevič & Vaitkus, 2024).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti trijose tarptautinėse mokslinėse konferencijose:

- tarptautinėje konferencijoje „Baltic Road Conference“, 2021 m. Rygoje, Latvijoje;
- tarptautinėje konferencijoje „International Conference on Road and Rail Infrastructure“, 2022 m. Puloje, Kroatijoje;
- tarptautinėje konferencijoje „Environmental Engineering“, 2023 m. Vilniuje, Lietuvoje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, rekomendacijos, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Darbo apimtis yra 129 puslapiai, tekste panaudota 18 numeruotų formulių, 30 paveikslų ir 30 lentelių. Rašant disertaciją, remtasi 82 literatūros šaltiniais.

Padėka

Nuoširdžiai dėkoju moksliniam vadovui prof. dr. Audriui Vaitkui už skirtą laiką, kantrybę ir profesionalias išvalgas, kurios buvo neįkainojamos rengiant šią disertacijos darbą. Esu be galo dėkingas savo šeimai už nuolatinį palaikymą, tikėjimą ir padrąsinančius žodžius šitoje mokslinėje kelionėje. Taip pat esu dėkingas disertacijos ekspertams už vertingas pastabas ir komentarus bei VILNIUS TECH Kelių tyrimo instituto ir Automobilių kelių mokslo laboratorijos kolegoms už palaikymą ir pagalbą studijų metu. Ačiū visiems, kurie vienaip ar kitaip prisidėjo prie šios disertacijos rengimo ir mano akademinio kelio.

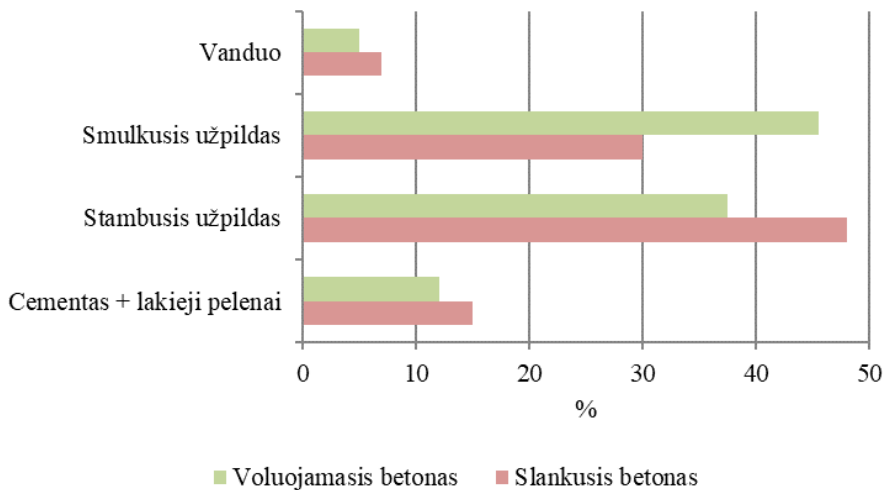
Mokslo darbų, skirtų voluojamojo betono tyrimams kelio dangoje, analizė

Šiame skyriuje pateikiami duomenys apie voluojamojo betono dangos, įrengtos ant skirtingo medžiagiškumo ir mechaninių savybių pagrindo sluoksnio, funkcionavimą, įtempius, deformacijas bei dangos konstrukcijos skaičiavimuose naudojamas nuovargio funkcijas. Atliekama hidroterminio režimo įtakos, įtempių ir deformacijų, nustatytų voluojamojo betono sluoksnio ir pagrindo sluoksnio apačioje, tyrimų apžvalga. Skyriaus tematika paskelbti 2 straipsniai (Vaitkus et al., 2021a, 2021b).

1.1. Voluojamojo betono dangos konstrukcijų elgsenos samprata

Voluojamasis betonas (toliau – RCC) – vienas iš betono tipų, kurio mišinys pasižymi didesniu smulkaus užpildo kiekiu. RCC dėl savo išskirtinės mišinio sudėties yra neslankus ir gali būti įrengiamas asfalto klotuvu, o tankinamas volais. Toks įrengimo būdas supaprastina sluoksnio įrengimo technologiją, sumažina

įrengimo laiką bei kaštus, palyginti su slankiojo betono įrengimu. RCC dangos konstrukcijų tarnavimo laikotarpis yra tiesiogiai susijęs su nuovargiu, kuris eksploatacijos metu susidaro nuo dangos konstrukciją veikiančių apkrovų. Dangos konstrukcijos sluoksniuose nuo šių apkrovų susidaro įtempiai ir deformacijos, kurios yra pagrindinė dangos konstrukcijos nuovargio priežastis. RCC dangos sluoksnis yra labai svarbi dangos konstrukcijos sudedamoji dalis, kadangi būtent šitas sluoksnis turi būti pakankamai atsparus įtempiams, deformacijoms bei nuovargiui (Mohammed et al., 2018). Įtempių, deformacijų ir nuovargio dydis RCC apačioje priklauso nuo RCC mechaninių savybių. Svarbiausios betono mechaninės savybės: gniuždomasis stipris, lenkiamasis stipris ir skeliamasis stipris (Vaitkus et al., 2020). Tipinio sukietėjusio betono lenkiamasis stipris po 28 parų – 4,5–5,2 MPa, gniuždomasis – 27,5–40 MPa (Vaitkus et al., 2019). RCC mechaninėms charakteristikoms įtakos turi voluojamojo betono mišinio sudėtis. Pagrindinės RCC mišinio sudedamosios dalys: skalda, smėlis, cementas, kurio dalį gali sudaryti lakieji pelenai, vanduo ir priedai (Harrington et al., 2010). Tipinė RCC mišinio sudėtis pavaizduota 1.1 paveiksle.



1.1 pav. Tipinė RCC mišinio sudėtis

Fig. 1.1. Typical RCC concrete mixture

RCC palyginimas su slankiuoju betonu pateiktas 1.1 lentelėje (Harrington et al., 2010).

1.1 lentelė. RCC ir slankiojo betono palyginimas**Table 1.1.** Comparison of RCC and traditional concrete

Medžiagos ir įrengimas	RCC	Slankusis betonas
Mišinio sudėties proporcijos	Stambusis ir smulkusis užpildai sudaro 75–85 % mišinio. Mišiniai yra sausesni už slankiojo betono mišinius dėl didesnio smulkiųjų dalelių kiekio ir mažesnio cemento bei vandens kiekio.	Stambusis ir smulkusis užpildai sudaro 60–75 % mišinio. Įprastas vandens ir cemento santykis 0,40–0,45. Cemento tešla pakankamai drėgna, kad gerai padengtų užpildo daleles ir užpildytų tarpus tarp dalelių.
Apdirbamumas (angl. <i>workability</i>)	Mišinio konsistencija yra drėgnų, tankių užpildų. Mišinys santykinai sausas ir standus, todėl negali būti įrengiamas tradiciniais betono klojimo klotuvais.	Mišinys yra plastiškas, takus (slankus) ir santykinai standus, kad paskleidus išlaikytų formą.
Klojimas	Transportuojamas savivarčiais. Klojamas asfalto klotuvu, naudojant didelio tankio vieno arba dviejų tamperių strypų lygintuvą. Tankinamas volais.	Klojamas slenkančiais klojiniais, išlyginamas ir sutankinamas giluminiais vibratoriais.
Konsolidacija	Konsolidacija atliekama išoriškai, tankinant volais, įprastai per pirmąsias 60 min po sumaišymo (prieš pradėdant tešlai kietėti).	Konsolidacija vyksta viduje, iš pradžių klojimo klotuvo vidiniais ir paviršiniai vibratoriais. Išspaudus betoną iš klotuvo, dar neįvykus pradiniam kietėjimui, įvyksta papildoma konsolidacija dėl cemento ir užpildų nusėdimo ir vandens judėjimo aukštyn į paviršių.
Užbaigimas (angl. <i>finishing</i>)	Paviršius yra atviros tekstūros (panašiai kaip asfaltas). Naudojant mažesnės frakcijos užpildus ir (arba) papildomą cementą, galima sukurti tankesnį paviršių (artimesnį slankiajam betonui). Paviršius gali būti tekstūruojamas šlifuojant.	Užbaigimas atliekamas prieš pradinį kietėjimą. Įprastai tam, kad pagerintų sukibimą, sukuriamas paviršiaus tekstūra..

1.1 lentelės pabaiga

Medžiagos ir įrengimas	RCC	Slankusis betonas
Hidratacija	Tinkamas betono mišinio drėkinimas labai svarbus ilgalaikiam betono dangos patvarumui. Kad įvyktų hidratacija, reikalingas kietinimo procesas (angl. <i>curing</i>).	Tinkamas betono mišinio drėkinimas labai svarbus ilgalaikiam betono dangos patvarumui. Kad įvyktų hidratacija, reikalingas kietinimo procesas (angl. <i>curing</i>).
Kietinimo procesas (angl. <i>curing</i>)	Kietinimas turi būti atliekamas iš karto po atlikto volavimo. Tai labai svarbu norint kontroliuoti vandens išgaravimą nuo betono paviršiaus (tam, kad vyktų cemento ir vandens hidratacija).	Kietinimas turi būti atliekamas iš karto po paviršiaus užbaigimo proceso (angl. <i>finishing</i>). Tai labai svarbu norint kontroliuoti vandens išgaravimą nuo betono paviršiaus (tam, kad vyktų cemento ir vandens hidratacija).
Plyšiai, apkrovos perdavimas, armavimas	Jeigu nėra keliami estetiniai reikalavimai, deformacinės siūlės įprastai nėra įrengiamos, o dangai leidžiama natūraliai sutrūkinėti. Nenumačius deformacinių siūlių, priklausomai nuo RCC mechaninių savybių, natūralūs trūkiai susiformuoja 6,1–18,3 m atstumais. Žingsnis tarp RCC deformacinių siūlių yra didesnis negu tarp slankiojo betono deformacinių siūlių. Deformacinės siūlės įrengiamos be jungiamųjų įdėklų (kaiščių) (angl. <i>dowels</i>) bei jungiamųjų strypų (angl. <i>tiebars</i>).	Plyšiai kontroliuojami įrengiant deformacines siūles. Deformacinėse siūlėse skersine kryptimi įrengiami jungiamieji įdėklai (kaiščiai) (angl. <i>dowels</i>), o išilgine – jungiamieji strypai (angl. <i>tiebars</i>).

RCC dangos konstrukcijų, kaip ir kitų tipų dangos konstrukcijų, funkcionavimas priklauso nuo dangos konstrukcijos laikomosios gebos kitimo ir priklausomybės nuo hidroterminio poveikio. Skirtingais metu laikais dangos konstrukcijos pagrindo sluoksniuose ir žemės sankasoje vyksta drėgnio kitimas, kuris turi įtakos dangos konstrukcijos laikomajai gebai. Hidroterminis režimas skirtingai veikia skirtingo medžiagiškumo ir mechaninių savybių dangos konstrukcijų pagrindo

sluoksnius. Tinkamam dangos konstrukcijos funkcionavimui siektina, kad dangos konstrukcijos drėgnis būtų kuo mažesnis ir pastovesnis. Bendruoju atveju drėgnio kaitai dangos konstrukcijoje turi įtaką kapiliarinių jėgų poveikis, medžiagų horizontalusis ir vertikalusis pralaidumas vandeniui, vandens užšalimas dangos konstrukcijoje, garavimas ir drenažo sistemų buvimas (Zubeck & Doré, 2009). Kuo didesnis drėgnis pagrindo sluoksniuose ir (arba) žemės sankasoje, tuo mažesnis sluoksniuose (žemės sankasos) laikomoji geba. Dangos konstrukcijos laikomoji geba mažėja esant pavasario polaidžiui ir (arba) lietingu rudens sezono metu, tam turi įtakos drėgnio didėjimas pagrindo sluoksniuose ir/ (arba) žemės sankasoje bei gruntinio vandens lygio kitimas. Žiemos drėgnio kitimo metu dangos konstrukcijos laikomoji geba labai padidėja ir pasiekia didžiausią vertę. Pagrindinė žiemos metu padidėjusios dangos konstrukcijos laikomosios gebos priežastis – dangos pagrindo sluoksniuose ir žemės sankasoje esantis itin mažas (apie 0 %) nesusalęs vandens kiekis. Pažymėtina, kad sušalęs gruntas ir į ledo kristalus pavirtęs vanduo pasižymi dideliu stiprumu. Tuo tarpu pavasario drėgnio kitimo metu dangos konstrukcijos pasižymi žemiausia laikomąja geba ir dažnai nebeatitinka keliamų projektinių reikalavimų. Tokią situaciją lemia pavasario polaidžio metu įmirkstantys dangos konstrukcijos sluoksniai. Esant įmirkusiems pagrindo sluoksniuams ir (arba) žemės sankasai, dangos konstrukcijos laikomoji geba sudaro vos 20–30 % reikalaujamos projektinės vertės (Zubeck & Doré, 2009). St-Laurent ir Roy (1995) nustatė, kad pavasario polaidžio metu tiriamuosiuose ruožuose dangos konstrukcijai poveikis nuo tokio pat dydžio apkrovos buvo apie 1,5–3,0 karto didesnis negu vidutinis metinis dangos konstrukcijai tenkantis tokios apkrovos poveikis. Doré ir Savard (1998) atlikti stebėjimai parodė, kad tiriamajame objekte daugiau kaip 90 % nuovargio plyšių susiformavo būtent pavasario polaidžio metu. Analogiškas išvadas pateikė Zhang ir Macdonald (2000): 60–75 % dangos konstrukcijos liekamųjų deformacijų susidaro pavasario polaidžio metu. Pasišalinant drėgniui, dangos konstrukcijos laikomoji geba laipsniškai didėja.

Standžiosiose dangos konstrukcijose temperatūros gradientas lemia ne tik betono plokščių išsigaubimo ir įsigaubimo įtempius, bet ir betono plokštės bei dangos pagrindo sąlytį. Dienos metu betono plokštės viršuje yra aukštesnė temperatūra negu jos apačioje, todėl pastaroji išsigaubia, – tai lemia betono plokštės vidurio ir dangos pagrindo sąlyčio netekimą. Nakties metu vyrauja priešinga situacija, t. y. betono plokštės viršuje yra žemesnė temperatūra negu jos apačioje, todėl pastaroji įsigaubia, – tai lemia betono plokštės kraštų bei kampų ir dangos pagrindo sąlyčio netekimą. Bet koks betono plokštės ir dangos pagrindo sąlyčio netekimas lemia įtempių persiskirstymą tiek betono plokštėje, tiek pagrindo sluoksnyje (Siddique et al., 2005).

Skirtingai negu slankiojo betono atveju, RCC yra įrengiamas be kaiščių ir armatūros. Betono dangos sudalijimas, įrengiant deformacines siūles, taip pat nėra būtinas. Siekiant sumažinti voluojamojo betono dangos deformacijas ir įtempius

betono sluoksnyje, kurie gali atsirasti dėl plonas plokštės veikiančio aplinkos poveikio, kai priklausomai nuo oro temperatūros betono plokštėje atsiranda tempimo įtempiai viršutinėje arba apatinėje dalyje, o atsiradus tokiems įtempiams gali susidaryti netaisyklingos formos dangos trūkiai, gali būti numatomas betono dangos sudalijimas, t. y. deformacinės siūlės. Betono dangos sudalijimas atliekamas įprastai įpjaunant 1/3–1/2,5 dangos storio (Harrington et al., 2010).

Betono dangoms svarbu turėti tinkamo stiprumo ir atsparos pagrindo sluoksnį, taip sumažinant dangos konstrukcijos paviršiaus įlinkius ir kartu įtempius, susidarančius betono sluoksnio apačioje. Be to, tinkamos atsparos pagrindo sluoksniai taip pat turi įtakos betono deformacinių siūlių funkcionavimui ir apkrovos perdavimui (Harrington et al., 2010; Sadeghi & Hesami, 2018; Yaqoob, 2024).

Apkrovos perdavimo efektyvumas (LTE) apskaičiuojamas pagal (1.1) formulę (AASHTO, 1993):

$$\text{LTE}_{\delta} = \frac{d_u}{d_l} \cdot 100 \% , \quad (1.1)$$

čia d_u – įlinkis neapkrautoje plokštėje, μm ; d_l – įlinkis apkrautoje plokštėje, μm .

RCC dangose, apkrovos tarp sudalintų betono dangos plotų yra perduodamos tik per susiformavusią stambiojo užpildo sukibtį (angl. *aggregate interlock*) (Mohammed et al., 2019). RCC dangų deformacinių siūlių ir (arba) natūralių įtrūkių apkrovos perdavimo efektyvumas svyruoja nuo 22 % iki 89 % (Pittman, 1996). Pasak Portlando cemento asociacijos PCA (angl. *Portland Cement Association*), RCC deformacinių siūlių apkrovos perdavimo efektyvumas yra 60 %, tuo tarpu natūralių įtrūkių – 60–90 % (Griffiths & Thom, 2007).

1.2. Eksperimentinių tyrimų, nustatant voluojamojo betono dangos įtempius, deformacijas ir nuovargį, analizė

Siekiant sumažinti šiltnamio efektą ir prisidėti prie žiedinės ekonomikos koncepcijos, statybos sektoriuje vis dažniau naudojamos kartotinio panaudojimo statybinės medžiagos (toliau – RC medžiagos). RCC panaudojimas kelių ir gatvių statyboje nėra išimtis. Projektuojant voluojamojo betono mišinio sudėtį, gali būti naudojamos RC medžiagos, kurios gali pakeisti skaldą, smėlį arba cemento dalį projektuojamame voluojamojo betono mišinyje. Courard ir kt. (2010) atliko RCC, kurio sudėtyje vietoje skaldos buvo panaudotos skaldytos betono plokštės, mechaninių charakteristikų tyrimą. Atsižvelgiant į gautus rezultatus, buvo nustatyta, jog RCC mišinio su skaldytomis betono plokštėmis gniuždomasis stipris po 7 parų yra 44 % mažesnis, palyginti su voluojamojo betono mišiniu,

kuriame buvo naudotos tradicinės sudedamosios medžiagos, po 28 parų – 40 % mažesnis (Courard et al., 2010). Be to, autoriai pažymi, jog tiek RCC mišinio su skaldytomis betono plokštėmis, tiek RCC mišinio su tradicinėmis medžiagomis sutankinimo ir sutankinimo efektyvumo rodikliai buvo beveik vienodi (Courard et al., 2010).

Eldin ir kt. (1993) atliko betono mišinių mechaninių savybių tyrimą, kuriame buvo panaudotos perdirbtos padangų gumos granulės. Šios perdirbtos padangų gumos granulės pakeitė 25, 50, 75 ir 100 % mineralinių medžiagų betono mišinyje. Tyrime taip pat buvo naudojamos skirtingo dydžio perdirbtos padangų gumos granulės, t. y. 0/19, 0/25 ir 0/38 frakcijos. Nustatė betono gniuždomąjį ir skeliamąjį stiprį, buvo pastebėta, jog tiek gniuždomasis, tiek skeliamasis stipris sumažėjo nuo 25 iki 100 %, palyginti su referencinių bandiniu (Eldin & Senouci, 1993).

Fattuhi ir Clark (1996) nustatė betono mišinio gniuždomąjį stiprį, kuriame buvo pakeista nuo 10 % iki 50 % cemento perdirbtomis padangų gumos 0/5 ir 0/16 frakcijos granulėmis. Tyrimo rezultatai parodė nuo 10 % iki 50 % sumažėjusį gniuždomąjį stiprį (Fattuhi & Clark, 1996).

Ganjian ir kt. (2009) atliko tyrimus, kuriuose buvo nustatytos betono mišinio, kuriame buvo pridėta nuo 5 % iki 10 % perdirbtų padangų gumos, mechaninės savybės. Viename iš tyrimų, perdirbtų padangų guma pakeitė dalį skaldos, kitame – dalį cemento. Pastebėta, kad, didinat perdirbtų padangų gumos kiekį betono mišinyje, sumažėja betono mechaninės savybės, tokios kaip gniuždomasis stipris, lenkiamasis stipris, stipris skeliant, standumo modulis. Pakeitus betono mišinyje dalį skaldos, betono gniuždomasis stipris po 28 parų sumažėjo nuo 10 % iki 23 %, o pakeitus dalį cemento betono – gniuždomasis stipris sumažėjo nuo 20 % iki 40 %. Ganjian ir kt. (2009) taip pat nustatė, kad, panaudojus perdirbtų padangų gumą betono mišinyje, nuo 17 % iki 25 % sumažėja betono standumo modulis. Pasak Ganjian ir kt. (2009), betono mišinyje panaudojus perdirbtų padangų gumą, labiausiai sumažėja betono stipris skeliant. Pakeitus betono mišinyje dalį skaldos, betono stipris skeliant sumažėjo nuo 30 % iki 60 %, o pakeitus dalį cemento betono stipris skeliant sumažėjo nuo 15 % iki 30 %. Taip pat buvo nustatytas lenkiamojo stiprio sumažėjimas apie 37 %, pakeitus betono mišinyje dalį skaldos ir apie 29 % dalį cemento (Ganjian et al., 2009). Panašias betono mechaninių savybių sumažėjimo tendencijas nustatė Mavroulidou ir Figueiredo (2010). Pakeitus dalį skaldos betono mišinyje perdirbtų padangų gumą, betono gniuždomasis stipris sumažėjo 40 %, stipris skeliant sumažėjo apie 32,5 % (Mavroulidou & Figueiredo, 2010).

Da Silva ir kt. (2015) bei Moustafa ir Elgawady (2015) atliko tyrimą, kuriame perdirbtų padangų gumos milteliai pakeitė betono mišinyje nuo 10 % iki 100 % smėlio užpildą. Da Silva ir kt. (2015) bei Moustafa ir Elgawady (2015) tyrimo rezultatai koreliuoja su kitų mokslininkų atliktais rezultatais: didinant perdirbtų

padangų gumos kiekį betono mišinyje, mažėja betono gniuždomasis stipris (Da Silva et al., 2015; Moustafa & Elgawady, 2015).

Benazzouk ir kt. (2007), nagrinėdamas betono mišinių, kuriuose perdirbtų padangų guma pakeitė dalį cemento, pastebėjo, kad, didėjant perdirbtų padangų gumos kiekiui, mažėja betono gniuždomasis stipris. Tačiau, priešingai nei kiti mokslininkai, pastebėjo, kad perdirbtų padangų gumos kiekis nuo 20 % iki 30 % padidina betono lenkiamąjį stiprį po 28 parų apie 18 % (Benazzouk et al., 2007). Lenkiamąjo stiprio padidėjimą, pakečiant betono mišinyje dalį cemento perdirbtų padangų gumos milteliais taip pat savo tyrimuose pastebėjo Al-Akhras ir Smadi (2004). Al-Akhras ir Smadi (2004) atliko tyrimus, kuriuose perdirbtos padangų gumos milteliai pakeitė 2,5, 5, 7,5 ir 10 % cemento kiekio betono mišinyje. Lenkiamasis ir gniuždomasis stipris buvo nustatyti tiek po 7, tiek po 28 parų. Pasak Al-Akhras ir Smadi (2004) atlikto tyrimo, betono mišinyje pakeitus dalį cemento perdirbtų padangų gumos milteliais, betono lenkiamasis stipris padidėjo nuo 10 % iki 28 % po 7 parų ir nuo 12 % iki 43 % po 28 parų. Tuo tarpu gniuždomasis stipris padidėjo nuo 9 % iki 35 % po 7 parų ir nuo 12 % iki 40 % po 28 parų (Al-Akhras & Smadi, 2004).

Sengun ir kt. (2021), nagrinėdamas RCC dangos konstrukcijos nuovargį, išskyrė lenkiamąjį stiprį kaip vieną iš svarbiausių kritinių aspektų, turinčių įtakos projektuojamam RCC sluoksnio storiui (Sengun, Alam, Yaman, et al., 2021).

Shiraz ir kt. (1987) vieni iš pirmųjų mokslininkų, kurie pradėjo nagrinėti RCC nuovargį. Shiraz ir kt. (1987) atliktų tyrimų tikslai:

- RCC mechaninių savybių įvertinimas;
- mišinio proporcijų įvertinimas;
- RCC patvarumo įvertinimas;
- RCC dangos konstrukcijų projektinio storio nustatymas.

Shiraz ir kt. (1987) atliko RCC stiprio gniuždant, lenkiant, skeliant standumo modulio ir nuovargio tyrimus (Tayabji & Okamoto, 1987). Laboratorijoje buvo suformuoti keturių skirtingų RCC mišinių bandiniai. RCC mišiniai buvo suprojektuoti panaudojant vienodą cemento kiekį, tačiau skirtingas stambiojo užpildo proporcijas bei vandens ir cemento santykius. Mišinių gamyboje buvo naudojamas pirmojo tipo cementas (CEM I), F klasės lakieji pelenai, žvyras ir smėlis (Tayabji & Okamoto, 1987). RCC mišinių proporcijos:

- cementas 167 kg/m³;
- stambusis užpildas 52–59 %;
- smulkusis užpildas 23–28 %;
- lakiųjų pelenų ir cemento santykis 0–20 %;
- vandens ir cemento kartu su lakiaisiais pelenais santykis 0,55–0,60.

Shiraz ir kt. (1987) atliktų RCC mechaninių savybių rezultatai parodė, kad optimalus RCC mišinys, kuriame yra 55 % stambiojo ir atitinkamai 45 % smulkiojo užpildo (Tayabji & Okamoto, 1987). Projektinis RCC mišinio

gniuždomasis stipris po 28 parų buvo 21 MPa, o faktinis gniuždomasis stipris po 28 parų 28–35 MPa. Taip pat buvo padaryta išvada, kad lakieji pelenai neturi pastebimo poveikio RCC mišinio gniuždomajam stipriui (Tayabji & Okamoto, 1987).

Shiraz ir kt. (1987) taip pat atliko keturių atrinktų RCC mišinių tyrimus lauko sąlygomis, įrengiant 4,1 m pločio, 3,7 m ilgio ir 20 cm storio RCC plokštes. Naudoti RCC mišiniai ir jų proporcijos patiekti 1.2 lentelėje (Tayabji & Okamoto, 1987).

1.2 lentelė. RCC mišinių sudėtis (Shiraz et al., 1987)

Table 1.2. RCC mixture consistency (Shiraz et al., 1987)

	Mišinys			
	A	B	C	D
Stambusis užpildas kg/m ³	1622	1631	1516	1606
Smulkusis užpildas kg/m ³	619	622	686	634
Cementas kg/m ³	169	144	158	156
Lakieji pelenai kg/m ³	0	29	32	27
Vanduo kg/m ³	91	83	97	85
Lakieji pelenai/Cementas	0	0,2	0,2	0,17
Vanduo/ lakieji pelenai ir cementas	0,53	0,48	0,5	0,46

Shiraz ir kt. (1987) nustatė RCC mechanines savybes tiek iš eksperimentinio ruožo imant bandinius, tiek eksperimentinio ruožo įrengimo metu suformuojant bandinius. Gniuždomojo stiprio rezultatai parodė, jog visais atvejais gniuždomasis stipris, bandinių, paimtų iš įrengtos dangos, buvo mažesnis negu statybos metu suformuotų bandinių gniuždomasis stipris. Po 7 parų bandinių, paimtų iš dangos, gniuždomasis stipris buvo nuo 12,4 MPa iki 24,9 MPa, po 28 parų gniuždomasis stipris – nuo 17,1 MPa iki 30,3 MPa. Lenkiamasis stipris po 28 parų buvo nustatytas nuo 3,3 MPa iki 4,6 MPa. Atitinkamai mokslininkų nustatytas nagrinėtųjų bandinių standumo modulis siekė 19 100–29 600 MPa (Tayabji & Okamoto, 1987).

Nuovargio tyrimai buvo atlikti siekiant nustatyti RCC lenkimo nuovargio charakteristikas. Nuovargio tyrimams, kuriuos atliko Shiraz ir kt. (1987) buvo naudojamos išpjautos iš eksperimentinio ruožo sijos (15×15×76 cm). Nuovargio tyrimai buvo atlikti praėjus 7 mėn. po eksperimentinio ruožo įrengimo. Nuovargio bandymo metu sijoms, atremtoms trijuose taškuose, buvo suteikiama ciklinė apkrova. Apkrovos parinktos taip, kad sukurtų įtempių ir lenkiamojo stiprio santykį nuo 0,5 iki 0,95. Tyrimo metu apkrovos dažnis buvo 10 ciklų per sekundę.

Nuovargio bandymai buvo nutraukiami, kai sija įtrūkdavo (Tayabji & Okamoto, 1987). Shiraz ir kt. (1987) po atliktų nuovargio tyrimų suprojektavo kreivinę priklausomybę tarp įtempių koeficiento ir reikiamo apkrovimo skaičiaus. Minėtoji priklausomybė iki šių dienų taikoma Portlando cemento asociacijos PCA (angl. *Portland Cement Association*) sukurtoje betono sluoksnio storio skaičiavimo metodikoje.

Kanados cemento asociacija (angl. *Canadian Cement Association*) 2003 m. atliko RCC mechaninių savybių tyrimą, kurio tiklas buvo nustatyti skirtingų RCC mišinių mechanines savybes ir palyginti jas su slankiojo betono mechaninėmis savybėmis nuovargio aspektu (Yaman et al., 2021). Nuovargis vertintas atliekant 3 taškų lenkimo bandymus. Bandymai buvo atliekami, kol bandinys suyra arba kai yra pasiektas apkrovimo ciklų skaičius – vienas milijonas. Tyrimo rezultatai parodė, jog RCC mišinių atsparumas nuovargiui po vieno milijono apkrovimo ciklų sudarė 60 % jo statinio lenkiamojo stiprio, slankiojo betono 50 %, t. y. tyrimais buvo nustatytas didesnis RCC atsparumas nuovargiui negu slankiojo betono.

Amerikos betoninių dangų asociacija ACPA (angl. *American Concrete Pavement Association*) 2013 m. sukūrė nuovargio modelį RCC dangoms projektuoti. RCC nuovargio modelis buvo sukurtas atsižvelgiant į 141 mokslininkų atliktą RCC nuovargio tyrimą. Sukurtas RCC nuovargio modelis, palyginti su PCC nuovargio modeliu, kuris buvo naudojamas automatizuotose skaičiavimo programose, parodė reikšmingus skirtumus. Todėl nerekomenduojama naudoti įprastą PCC nuovargio modelį, projektuojant RCC dangas (Roden, 2014).

Vieną iš naujausių RCC nuovargio tyrimų atliko Sengun ir kt. (2021). RCC nuovargio tyrime (Sengun et al., 2021) buvo naudojamas – CEM I 42.5 R tipo cementas, kalkakmenio skalda. Mokslininkai, atlikdami nuovargio tyrimą, naudojo tris skirtingus RCC mišinius. Skyrėsi RCC mišiniuose tik rišiklio kiekis, t. y. naudota 200 kg/m^3 , 400 kg/m^3 ir 600 kg/m^3 , taip pat visur buvo naudojamas 0/12 frakcijos užpildas. Atliekant RCC nuovargio tyrimus (Sengun et al., 2021), vienas iš tikslų buvo orientuotas į plonasluoksnės RCC dangas, kadangi, įrenginėjant dideles apkrovas atlaikančias gana storas RCC dangas ($\geq 20 \text{ cm}$), sunku tinkamai sutankinti tokių jų storį. Tam tikslui pasiekti buvo naudojamas iki minėtųjų 600 kg/m^3 padidintas rišiklio kiekis, kurį sudarė:

- 400 kg/m^3 cementas;
- 180 kg/m^3 lakieji pelenai;
- 20 kg/m^3 silicio dioksidas.

Sengun ir kt. (2021) RCC mišiniuose taip pat naudojo 55 % smulkiojo užpildo (0–5 mm) ir 45 % stambiojo užpildo (5–12 mm). Stambusis užpildas 5–12 mm pasirinktas siekiant išgauti lygesnį RCC paviršių ir sumažinti segregacijos riziką. RCC mišinių sudėtis yra pateikta 1.3 lentelėje.

1.3 lentelė. RCC mišinių sudėtis (Yaman et al., 2021)**Table 1.3.** RCC mixture consistency (Yaman et al., 2021)

Mišinio Nr.	C	LP	SD	Vanduo	V/C	Smulkusis užpildas fr 0/5	Stambusis užpildas fr 5/12
1	200	–	–	117	0,58	1157	974
2	400	–	–	128	0,32	1048	883
3	400	180	20	169	0,28	863	727

Pastabos: Medžiagų kiekiai pateikti kg/m³; Lentelėje C – cementas; LP – lakieji pelenai; SD – silicio dioksidas.

Tam, kad būtų imituojamos lauko sutankinimo sąlygos, mokslininkai tyrime panaudojo naują savo sukurtą sutankinimo procedūrą (Kesehatan, 2019; Sengun et al., 2021). Pagaminus RCC mišinį, betonas buvo pilamas vienu sluoksniu ant plieninės plokštės ir RCC mišiniams buvo pritaikyta dviejų etapų tankinimo procedūra. Kadangi buvo žinoma, kad asfalto klotuvai yra aprūpinti vibracine plokšte, kuri užtikrina pradinį sutankinimą, tyrimo metu naudotas vibracinės plokštės tankintuvas, kurio dugno plokštės matmenys 35×45 cm ir 18 kN vibracinė jėga. Po išankstinio sutankinimo, kurį atliko vibracinės plokštės tankintuvas, RCC mišiniai buvo nedelsiant sutankinti 700 kg svorio vibraciniu volu ir 3900 vibracijų per minutę pajėgumu, kurį užtikrino du vibraciniai cilindrai, kurių kiekvieno plotis 65 cm, skersmuo – 40 cm (Yaman et al., 2021).

Šiame tyrime naudojamas tankinimo metodas buvo nuoseklus, pradedant dviem pravažiavimais su vibracinės plokštės tankintuvu, paskui dviem vibraciniu volu pravažiavimais be vibracijos, du kartus iš plokštės centro su vibracija, dviem pravažiavimais iš kiekvienos plokštės pusės su vibracija ir keturiais be vibracijos. Užbaigus betono liejimą, mišiniai buvo sukietinami formoje po šlapiu drėgnu medžiaginiu apklotu. Kai betonas tapo pakankamai standus, iš plokštės buvo išpjauti sijos bandiniai (10×15×35 cm) ir uždengti drėgnu medžiaginiu apklotu kietėjimui iki bandymo (Yaman et al., 2021).

Sengun ir kt. (2021) atliekant RCC nuovargio bandymus, pirmiausia nustatė pagamintų RCC mišinių ribinius lenkiamuosius stiprius, kurie buvo nustatyti atliekant trijų taškų lenkimo bandymus. Siekiant nustatyti didžiausius nuovargio įtempius, gautos lenkiamojo stiprio reikšmės buvo padaugintos iš įtempių koeficientų (55 %, 62,5 %, 70 %, 77,5 %, 85 %). Bandymo metu minimali nuovargio apkrova sudarė 20 % didžiausio lenkiamojo stiprio. Nustatytos lenkiamojo stiprio reikšmės ir įtempių koeficientai pavaizduoti 1.4 lentelėje (Yaman et al., 2021). Atliktais tyrimais nustatyta, jog, dvigubai padidinus cemento kiekį (mišinys

Nr. 3), lenkiamasis stipris padidėjo apie 26 %, palyginti su mišiniu Nr. 1. Papildomas lakiųjų pelenų ir silicio dioksido įtraukimas į mišinio sudėtį reikšmingos įtakos lenkiamajam stipriui neturėjo.

1.4 lentelė. RCC mėinių nuovargio tyrimų įtempių koeficientai (Yaman et al., 2021)

Table 1.4. Stress ratios for RCC fatigue tests (Yaman, et al., 2021)

Mišinio Nr.	Lenkiamasis stipris po 28 parų, MPa	Bandinių skaičius	Įtempių koeficientas
1	4,00	3	0,550
		4	0,625
		5	0,700
		6	0,775
		6	0,850
2	5,06	4	0,625
		5	0,700
		5	0,775
		5	0,850
3	5,16	3	0,550
		5	0,625
		5	0,700
		5	0,775

Nustačius apkrovos parametrus, atliktas trijų taškų lenkimo nuovargio bandymas su apkrovos kontrole. Bandymų metu taikyta 10 Hz dažnio (10 ciklų per sekundę) ciklinė apkrova, o nuovargio bandymas buvo tęsiamas tol, kol bandinys suirs arba bus pasiekti du milijonai apkrovos ciklų, – tai paprastai pakankamas ciklų skaičius, norint nustatyti nuovargio stiprumą slankiojo betono tyrimuose.

Sengun ir kt. (2021) išvesta RCC nuovargio funkcija ($R^2 = 0,80$) (1.2) formulė:

$$SR = 0,911 - 0,047 \log(N), \quad (1.2)$$

čia N – leistinasis apkrovų pasikartojamumas; SR – įtempių santykis.

Mahdi ir kt. (2020) atliko eksperimentinį RCC dangos konstrukcijos nuovargio tyrimą, kurio metu lauko sąlygomis buvo įrengtos dvi skirtingos RCC dangos konstrukcijos. Dangos konstrukciją sudarė 20,3 cm storio RCC sluoksnis, įrengtas ant 30,5 cm stabilizuoto pagrindo sluoksnio arba 21,6 cm storio cementu

pagerintų gruntų ir 25,4 cm storio sustiprintos žemės sankasos (Mahdi et al., 2020). RCC dangos konstrukcijoje buvo įmontuota polimerinė plokštė. Polimerinėje plokštėje skirtinguose gyliuose buvo išdėstyta 16 deformacijų jutiklių ir 3 temperatūros jutikliai. Apkrovos sukeltos deformacijos buvo išmatuotos naudojant *ATLaS30* dvigubą padangų apkrovą, esant skirtingam apkrovos dydžiui tiek statinės, tiek dinaminės apkrovos sąlygomis. Statinei apkrovai *ATLaS30* dvigubos padangos buvo rankiniu būdu pastatytos ant plokštės ir apkrova buvo hidrauliškai veikiamą RCC dangos ruožė, esant keturiems skirtingiems apkrovų lygiams (40, 72, 89 ir 112 kN). Dinaminei apkrovai *ATLaS30* dvigubos padangos apkrovos buvo taikomos abiem kryptimis 6,5 kilometrų per valandą greičiu kelis kartus pravažiavus su skirtingais apkrovos dydžiais. Užregistruoti duomenys buvo naudojami sukuriant įlinkio dubenius skirtingomis apkrovos sąlygomis. Mahdi ir kt. (2020) panaudojo baigtinių elementų modelį, analizuojant sukonstruotų dangos konstrukcijų funkcionavimą. Baigtinių elementų modelis buvo naudojamas nustatant kritinius RCC sluoksnio įtempius, veikiant dinaminei apkrovai (Mahdi et al., 2020). Sudarant sukonstruotų dangos konstrukcijų baigtinių elementų modelį, RCC sluoksnis buvo vertinamas kaip tamprus, jam pritaikyti standumo moduliai, apskaičiuoti atliekant atgalinį perskaičiavimą iš pamatuotų dangos paviršiaus įlinkių su krintančiojo svorio deflektometru (HWD). Tyrimo metu buvo palygintos deformacijos, nustatytos iš dangos konstrukcijoje įrengtų deformacijos jutiklių su deformacijomis, nustatytomis panaudojant baigtinių elementų modelį. Atlikus palyginimą, buvo nustatyti nežymūs skirtumai (Mahdi et al., 2020). Mahdi ir kt. (2020) taip pat nustatė įrengtų dangos konstrukcijų kritinius įtempius RCC sluoksnio apačioje, apkraunant plokštės centrą bei kraštą. Panaudojus nuovargio modelį (Titus-Glover et al., 2005) buvo nustatyta, kiek pasikartojančiųjų apkrovų atlaikys dangos konstrukcijos (Mahdi et al., 2020). Mahdi ir kt. (2020) nustatė, kad, dangos konstrukciją apkrovus 112 kN apkrova, RCC sluoksnio apačioje susidaro 140 $\mu\epsilon$ deformacijos, nuo 72 kN apkrovos – 60 $\mu\epsilon$.

Park ir kt. (2020) atliko RCC nuovargio tyrimą. RCC dangos konstrukcijos bandomasis ruožas buvo įrengtas natūrinėmis sąlygomis Yeosu mieste, Pietų Korėjoje. Bendrasis RCC dangos konstrukcijos ruožo ilgis – 144 m, plotis – 4 m, RCC storis – 0,2 m. RCC bandiniai nuovargio tyrimui buvo paruošti išpjaunant 20 m RCC plokštes iš įrengto bandomojo ruožo (Park et al., 2020). RCC mišinys buvo parinktas atsižvelgiant į optimalų vandens kiekį taip, kad būtų pasiektas maksimalus tankis ir optimalus tanklumas. Mišinio gamyboje buvo išlaikytas stambiojo ir smulkiojo užpildo santykis 50/50 %, naudotas fr. 0/19 stambusis užpildas ir smulkusis – smėlis (Park et al., 2020). Nustatytas RCC mišinio gniuždomasis stipris po 28 parų siekė 49,8 MPa, lenkiamasis stipris po 28 parų –

6,9 MPa (Park et al., 2020). Nustatytas lenkiamasis stipris atitinka tipinį RCC lenkiamojo stiprio intervalą 5,5–7,5 MPa. Park ir kt. (2020) tyrime naudoto RCC mišinio sudėtis pateikta 1.5 lentelėje.

1.5 lentelė. RCC mišinių sudėtis (Park et al., 2020)

Table 1.5. RCC mixture consistency (Park et al., 2020)

Cementas, kg/m ³	Stambusis užpildas, kg/m ³	Smulkusis užpildas, kg/m ³	Vanduo, kg/m ³	V/C	Orą įtraukiantis priedas, kg/m ³	Superplastikis, kg/m ³
300	1045	974	99,8	0,33	0,3	0,3

Park ir kt. (2020), atlikdamas RCC nuovargio tyrimą, naudojo apkrovos ciklo amplitudę nuo 0,2 iki 0,5 ir taikė 3 Hz ciklą per minutę apkrovos greitį. RCC nuovargio bandymas buvo sustabdytas, kai plokštės bandinys įtrūko. Pagal Wöhlerio lygtį, įtempių lygis apskaičiuojamas padalijus sukuriama įtempį iš plyšimo modulio, kuris apskaičiuojamas atliekant 3 taškų lenkimo bandymus (Park et al., 2020). Tačiau šiame tyrime nebuvo įmanoma išmatuoti stiprio lenkiant, kad būtų atsižvelgta į lauko sąlygas. Be to, kadangi nebuvo galimybės naudoti 3 taškų lenkimo bandymų duomenų, įtempių lygiai ir nuovargio bandymas buvo taikomas, atliekant didžiausio tempimo įtempio analizę baigtinių elementų metodu (FEM), naudojant didžiausią statinės apkrovos bandymo apkrovą iki suirimo (Park et al., 2020). Atlikus skaičiavimus baigtinių elementų metodu (FEM), nustatyti didžiausi tempimo įtempiai – 3,47 MPa. Baigtinių elementų metodu (FEM) nustatyti didžiausi tempimo įtempiai buvo palyginti su teoriniais tempimo įtempiais, kurie atitinka 3,38 MPa ir buvo apskaičiuoti pagal Westergaard'o (1.3) formulę (Park et al., 2020):

$$\sigma_i = \frac{3(+v)P}{2\pi h^2} \cdot \left(\ln \frac{l}{b} + 0,6159 \right), \quad (1.3)$$

čia σ_i – didžiausi įtempiai; MPa; v – Puasono koeficientas; P – apkrova, N; h – plokštės storis, m; $b = a$ (kontakto spindulys), kai $a \geq 1,724 h$; $b = (1,6 a^2 + h^2)^{0,5} - 0,675 h$, kai $a < 1,724 h$; l – reliatyvusis standumas, m.

Park ir kt. (2020) sudaryta tiesinės regresijos (1.4) lygtis:

$$\log N = 11,668 - 12,511 (SR), \quad (1.4)$$

čia N – leistinasis apkrovų pasikartojamumas; SR – įtempių santykis.

Park ir kt. (2020) atliktame tyrime įtempių santykis, esant 1 mln. apkrovos kartojimo ciklų, buvo 0,45. PCA pasiūlytos nuovargio funkcijos atveju įtempių

santykis yra 0,38. Iš šio tyrimo gauta nuovargio lygtis rodo, kad apkrovos pasikartojimų, sukeliančių nuovargį, esant tam pačiam įtempimo lygiui, skaičius yra šiek tiek didesnis nei PCA (angl. *Portland Cement Association*) nuovargio lygties.

1.3. Automatizuotų daugiasluoksniškumo ir tamprumo teorijomis grindžiamų skaičiavimo metodų taikymas, parenkant betono dangos konstrukcijas

Betoninėms dangoms projektuoti naudojami nuovargio modeliai, tokie kaip PCA modelis (Portlando cemento asociacija) (Packard & Tayabji, 1985), MEPDG (mechanistinis empirinis dangos projektavimo vadovas), mechanistinis kalibruotas modelis (JAV armijos inžinierių korpusas) (Yang, 2004) ir nulinės priežiūros modelis (Federalinė greitkelių administracija) (Yang, 2004; Ruiz-Valencia et al., 2017).

Vienas iš naudojamų betono dangos projektinio sluoksnio storio nustatymo metodų yra pateiktas techniniame reglamente *Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen RDO Beton 24*. Atliekant skaičiavimus pagal *RDO Beton 24* metodiką, pagrindinės betono mechaninės savybės, kurios yra įvertinamos skaičiavimo metu, yra šios:

- tempiamasis elastingumo modulis;
- skeliamasis stipris.

Tempiamasis elastingumo modulis yra susijęs su tamprumo moduliu gniuždant, kuris perskaičiuojamas iš gniuždomojo stiprio. Vadovaujantis *RDO Beton 24*, atliekant skaičiavimus, daroma prielaida, kad tempiamasis elastingumo modulis yra apie 1,15 karto didesnis negu tamprumo modulis gniuždant. Skaičiavimuose taip pat naudojamas šiluminio plėtimosi koeficientas, kuris įvertina temperatūros sukeltą lenkimo momentą. Atsižvelgiant į kitų autorių atliktus betono sluoksnio storio nustatymo tyrimus, šiluminio plėtimosi koeficientas neturi didelės reikšmės betono dangos storiui, kadangi temperatūros sukeltas lenkimo momentas nelemia dangos konstrukcijos veikimo (Vaitkus et al., 2021).

Jungtinėse Amerikos Valstijose, nustatant betono dangos storį, plačiai naudojamos automatizuotos skaičiavimo programos, tokios kaip FAARFIELD (Airport Pavement..., 2021) arba *StreetPave* (Use of..., 2012). Mінėtųjų automatizuotų skaičiavimo programų pagrindinė betono mechaninė savybė, kuri taikoma atliekant skaičiavimus ir nuo kurios priklauso betono sluoksnio storis, yra lenkiamasis stipris.

Automatizuota skaičiavimo programa FAARFIELD (Airport Pavement..., 2021) pritaikyta betono dangos konstrukcijų skaičiavimams nuo orlaivių apkrovų. Atliekant betono dangos konstrukcijos skaičiavimus su automatizuota skaičiavimo programa FAARFIELD (Airport Pavement..., 2021), nustatomi ribiniai

įtempiai, dėl kurių susiformuoja nuovargio plyšiai betono dangoje. Nuovargio plyšiai kontroliuojami ribojant betono sluoksnio apačioje susidarančius įtempius.

Skaičiavimo programos *StreetPave* (Use of..., 2012) betono dangos konstrukcijos skaičiavimai paremti mechanistiniu-empiriniu dangos projektavimo metodu. Skaičiavimams naudojami mechanistiniai komponentai, tokie kaip apkrova, įtempiai, deformacijos, ir empiriniai stebėjimai (Packard & Tayabji, 1985; Use of..., 2012). Dangos konstrukcijos skaičiavimais patikrinamos nuovargio ir erozijos sąlygos. Nuovargio analizė įvertina betono sluoksnio nuovargį plokštės viduryje ir krašte. Pagal *StreetPave* (Use of..., 2012) naudojamą projektavimo metodiką, nuovargio analizės procedūra tikrina Minerio sąlygą. Erozijos analizė patikrina dangos konstrukcijos pagrindo sluoksnių atsparumą erozijai ir betono plokščių suirimą ties deformacinėmis siūlėmis, kuris grindžiamas betono plokštės įlinkiais kampuose (Use of..., 2012).

1.4. Nuovargio funkcijos ir jų kintamieji

Nuovargis – reiškinys, kai dėl pasikartojančių apkrovos ciklų medžiagoje pasireiškia susilpnėjimas (American Concrete Institute, 2017). Dangos konstrukcijos nuolat veikiamos ciklinių apkrovų, kurias sudaro transporto priemonių eismas (Papagiannakis & Masad, 2012). Betono dangos konstrukcijos, betono sluoksnis atlieka pagrindinį vaidmenį perduodant ir sugeriant dėl apkrovų atsirandančius įtempius. Įtempiai, pasireiškiantys betono sluoksnyje, būna dvejų tipų – gniuždomieji ir lenkiamieji (Papagiannakis & Masad, 2012). Projektuojant betono dangų konstrukcijas, įtempiai, atsirandantys dėl lenkimo momento betono sluoksnio apačioje, yra kritiškiausi, kadangi betono lenkiamasis stipris įprastai yra apie 6 kartus mažesnis už gniuždomąjį. Projektuojant ir skaičiuojant betono dangų konstrukcijas, labai svarbu tinkamai įvertinti susidarančius įtempius ir deformacijas betono sluoksnio apačioje (KICI et al., 2018). Pasikartojantys lenkimo įtempiai betono sluoksnio apačioje turi įtakos laipsniškam betono laikomųjų savybių praradimui (Lee & Barr, 2004; Vassilopoulos, 2010). Betono dangų konstrukcijų skaičiavimai pagrįsti nuovargio funkcijomis, kuriomis tikrinamos ribinės dangos konstrukcijos sąlygos. Priklausomai nuo taikomų skaičiavimo metodų naudojamos skirtingos nuovargio funkcijos (Titus-Glover et al., 2005).

Pirminiai slankiojo betono nuovargio tyrimai pradėti prieš daugelį metų. Daug mokslininkų atliko išsamius slankiojo betono nuovargio tyrimus, panaudodami skirtingas betono mišinio sudėtis ir medžiagas. Voluojamojo betono nuovargis nėra taip gerai ištirtas mokslininkų. Mokslininkų atlikti voluojamojo betono nuovargio tyrimai rodo skirtingus rezultatus. Vieni tyrimai rodo vo-

luojamojo betono panašias nuovargio savybes kaip ir slankiojo betono, kiti tyrimai rodo didesnę voluojamojo betono atsparumą nuovargio formavimuisi. Susistemintos nuovargio funkcijos pateiktos 1.6 lentelėje.

1.6 lentelė. Susistemintos nuovargio funkcijos

Table 1.6. Systemised fatigue functions

Šaltinis	Funkcija	Pagrindinė mechaninė savybė	Analizė
Portlando cemento asociacija (PCA, 1999)	$\log N_f = 11,737 - 12,077 \cdot SR$, for $SR \geq 0,55$ $N_f = \frac{4,2577}{SR - 0,4325}$, for $0,45 < SR < 0,55$ $N_f = \text{neribotas}$, for $SR \leq 0,45$	Lenkiamasis stipris	Nuovargio plyšių
	$\log N_f = 14,524 - 6,777 \cdot (C_1 \cdot P - 9)^{0,103}$	Įlinkis plokštės kampe	Deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos
Amerikos betoninių dangų asociacija (ACPA) Roden, 2014	$\log N_f = 14,524 - 6,777 \cdot (C_1 \cdot P - 9)^{0,103} - \log C_2$	Įlinkis plokštės kampe	Deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos
	$\log N_f = \left[\frac{-SR^{-10,24} \cdot \log(1-P)}{0,0112} \right]^{0,217}$	Lenkiamasis stipris	Nuovargio plyšių
Okamoto, 1999	$\log N_f = 17,61 - 17,61 \cdot SR$	Lenkiamasis stipris	Nuovargio plyšių
Parker et al., 1979	$\log N_f = 2,13 \cdot SR - 1,2$	Lenkiamasis stipris	Nuovargio plyšių
Thompson et al., 1990	$\log N_f = -1,7136 \cdot SR + 4,284$, for $SR > 1,25$ $\log N_f = 2,8127 \cdot 1,2214 SR$, for $SR < 1,25$	Lenkiamasis stipris	Nuovargio plyšių
Modarres & Hosseini, 2014	$SR = 0,965 - 0,025 \log(N_f)$, $R^2 = 0,94$	Lenkiamasis stipris	Nuovargio plyšių

1.6 lentelės pabaiga

Šaltinis	Funkcija	Pagrindinė mechaninė savybė	Analizė
Graeff et al., 2012	$SR = 1,268 - 0,1219\log(N_f), R^2 = 0,77$	Lenkiamasis stipris	Nuovargio plyšių
Sun et al., 1998	$SR = 0,986 - 0,0693\log(N_f), R^2 = 0,97$	Lenkiamasis stipris	Nuovargio plyšių
Sengun et al., 2021	$SR = 0,911 - 0,047\log(N_f), R^2 = 0,80$	Lenkiamasis stipris	Nuovargio plyšių

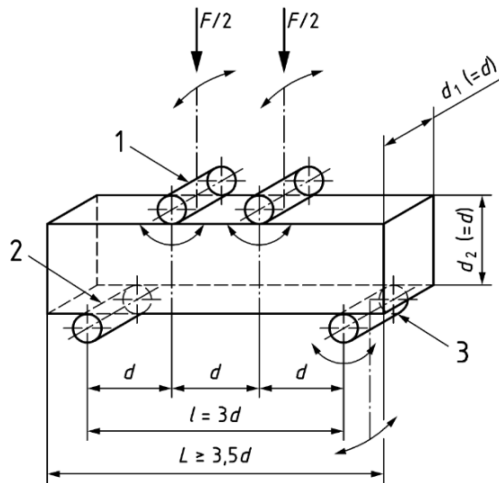
Atsižvelgiant į 1.6 lentelėje pateiktą nuovargio funkcijų analizę, pagrindinė ir dažniausiai nuovargio funkcijose naudojama mechaninė betono savybė – lenkiamasis stipris. Lenkiamasis stipris – išmatuotas didžiausias betono mišinio arba dangos bandinio atsparumas lenkimo apkrovai (American Concrete Institute, 2017). Lenkiamasis stipris nustatomas vadovaujantis LST EN 206:2013 + A2:2021 bei LST EN 12390-5:2019 nuostatomis. Naudojami du metodai lenkiamajam stipriui nustatyti:

- dviejų taškų apkrovimas;
- centrinio taško apkrovimas.

Nustatant lenkiamąjį stiprį dviejų taškų apkrovimu, suformuojamas stačiakampio formos bandinys, kurio aukštis ir plotis yra vienodi, o ilgis yra ne mažesnis kaip 3,5 aukščio (pločio). Lenkiamajam stipriui nustatyti naudojamas prietaisas, atitinkantis EN 12390-4:2025 reikalavimus ir susidedantis iš dviejų metalinių atraminių ritinėlių bei dviejų metalinių viršutinių ritinėlių. Suformuotas bandinys įstatomas į prietaisą taip, kad atstumas tarp atraminių metalinių ritinėlių būtų 3 kartus didesnis už bandinio aukštį (plotį). Apkrova padalijama per pusę ir suteikiama per du viršutinius metalinius ritinėlius, kurie yra nutolę nuo atraminių metalinių ritinėlių per bandinio aukštį (plotį) (1.2 pav.). Apskaičiuojamas lenkiamasis stipris pagal (1.5) formulę:

$$f_{ct,fl} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2}, \quad (1.5)$$

čia $f_{ct,fl}$ – lenkiamasis stipris, MPa; F – didžiausioji apkrova, N; l – atstumas tarp apatinių atramų, mm; d_1 ir d_2 – bandinio skerspjūvio matmenys, mm.



1.2 pav. Lenkiamojo stiprio nustatymo modelis, taikant dviejų taškų apkrovimą (EN 12390-4:2025)

Fig. 1.2. Model for evaluating flexural strength with two-point load (EN 12390-4:2025)

Nustatant lenkiamąjį stiprį centrinio taško apkrovimu, bandymo eiliškumas yra identiškas dviejų taškų apkrovimui, tačiau apkrova suteikiama per vidurį atraminių metalinių ritinėlių (1.3 pav.). Apskaičiuojamas lenkiamasis stipris pagal (1.6) formulę:

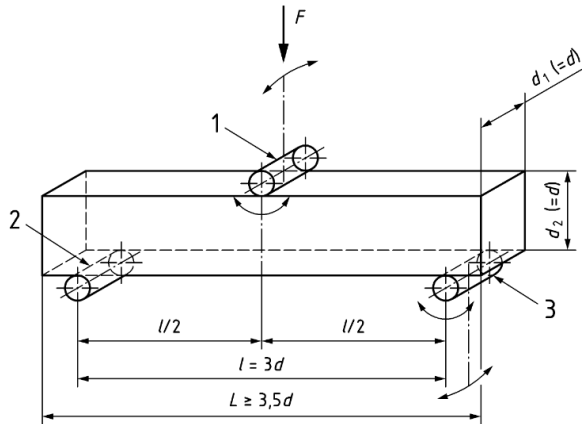
$$f_{ct,fl} = \frac{3F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2}, \quad (1.6)$$

čia $f_{ct,fl}$ – lenkiamasis stipris, MPa; F – didžiausioji apkrova, N; l – atstumas tarp apatinių atramų, mm; d_1 ir d_2 – bandinio skerspjūvio matmenys, mm.

Betono nuovargio funkcijose rečiau yra taikomas tempiamasis elastingumo modulis ir stipris skeliant. Tokios mechaninės betono charakteristikos taikomos *RDO Beton 24* nuovargio funkcijose. Betono stipris skeliant – betono tempiamasis stipris, nustatytas atliekant skilimo tempimo bandymą (American Concrete Institute, 2017). Betono stipris skeliant nustatomas vadovaujantis LST EN 206:2013 + A2:2021 bei LST EN 12390-6:2024 nuostatomis. Bandomas cilindrinio skerspjūvio betono bandinys. Betono bandinys testuojamas specialiaame įrenginyje, kuris turi atitikti EN 12390-4:2025 keliamus reikalavimus (1.4 pav.). Apskaičiuojamas stipris skeliant pagal (1.7) formulę:

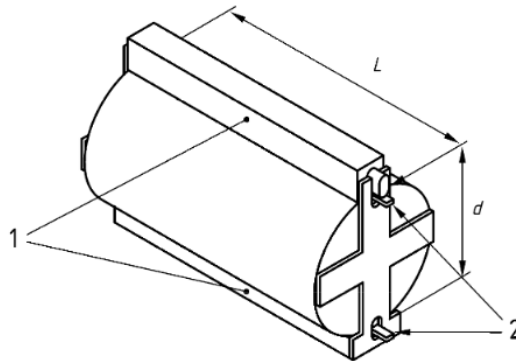
$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi \cdot L \cdot D}, \quad (1.7)$$

čia f_{ct} – stipris skeliant, MPa; F – didžiausioji apkrova, N; l – bandinio kontakto ploto ilgis, mm; d – bandinio skersmuo, mm.



1.3 pav. Lenkiamojo stiprio nustatymo modelis, taikant centrinio taško apkrovimą (EN 12390-4: 2025)

Fig. 1.3. Model for evaluating flexural strength with centre-point load (EN 12390-4: 2025)



1.4 pav. Skeliamojo stiprio nustatymo modelis (LST EN 12390-6:2024)

Fig. 1.4. Model for evaluating tensile splitting strength (LST EN 12390-6:2024)

Atsižvelgiant į 1.6 lentelėje pateiktas deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos analizės funkcijas, pagrindinis funkcijos kintamasis yra laikomosios gebos koeficientas P (angl. *rate of power*). Laikomosios gebos koeficientas P (angl. *rate of power*) apskaičiuojamas pagal (1.8) formulę (Yang, 2004):

$$P = 268,7 \cdot \frac{(k \cdot w)^2}{hk^{0,73}}, \quad (1.8)$$

čia P – laikomosios gebos koeficientas (angl. *rate of power*); w – įlinkis plokštės kampe, m; h – betono plokštės storis, m; k – reikšmė, įvertinanti sluoksnių, esančių po betono plokšte, stiprumą, MPa/m.

Yang (2004) pateiktoje betono plokštės įlinkių analizėje nustatyta, jog 20,3 cm storio betono plokštės kampas (pagrindo k reikšmė – 80 MPa/m) nuo 80 kN apkrovos įlinksta 0,897 mm, nuo 160 kN – 1,16 mm. Pasak Yang (2004), betono plokštės storio padidinimas iki 25,4 cm gali 18 % sumažinti įlinkius plokštės kampe. Taip pat Yang (2004) nustatė, kad daugiausia įtakos įlinkiams plokštės kampe turi pagrindo, esančio po betono plokšte, stiprumas, ir teigė, jog, trigubai padidinus k reikšmę, galima dvigubai sumažinti įlinkius plokštės kampe.

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Iš atliktos betono dangos konstrukcijų projektavimo ir projektavimo algoritmuose naudojamų nuovargio funkcijų analizės išskiriami du pagrindiniai betono dangų konstravimo atvejai – plyšių analizė ir deformacinių siūlių deformacijų bei pagrindo erozijos analizė. Plyšių analizėje pagrindinis ir svarbiausias parametras yra įtempiai betono plokštės apačioje, kurie tiesiogiai susiję su betono mechanine savybe – lenkiamuoju stipriu. Deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos analizėje svarbiausias parametras yra įlinkis betono plokštės kampe, kurio dydis priklauso nuo visos dangos konstrukcijos laikomosios gebos.
2. Atsižvelgiant į betono dangos konstrukcijų projektavimo algoritmuose naudojamų nuovargio funkcijų modelių įvesties parametrus, kritiškiausias yra deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos analizės modelis. Jo veikimas priklauso ne tik nuo betono mechaninių savybių, kaip tai yra plyšių analizės modelyje, bet ir nuo pagrindo sluoksnių mechaninių (stipruminių) savybių ir tinkamo deformacinių siūlių funkcionavimo (apkrovos perdavimo).
3. Išanalizavus deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos analizės modelio fizikinę prasmę, siekiant sumažinti pažaidų, susijusių su šio modeliu atsiradimo riziką, turi būti užtikrinama tinkama pagrindo sluoksnio laikomoji geba, numatant pagrindo sluoksniui k reikšmės ir (arba) ekvivalentinio standumo modulio E_0 reikalavimus ir kontrolę.

4. Skirtingai negu slankusis betonas, RCC yra įrengiamas be kaiščių ir armatūros. Betono dangos sudalijimas, įrengiant deformacines siūles, taip pat nėra būtinas, tačiau, siekiant sumažinti RCC dangos deformacijas, įtempius bei sukontroliuoti netaisyklingos formos dangos trūkių atsiradimo riziką, betono danga gali būti sudalijama, t. y. įrengiamos deformacinės siūlės. Betono dangos sudalijimas atliekamas įpjaunant $1/3$ – $1/2,5$ dangos storio. RCC dangose apkrovos tarp sudalintų betono dangos plotų yra perduodamos per susiformavusią stambiojo užpildo sukibtį (angl. *aggregate interlock*). RCC dangų deformacinių siūlių ir (arba) natūralių trūkių apkrovos perdavimo efektyvumas svyruoja nuo 22 % iki 89 %.

Atsižvelgiant į literatūros analizės išvadas, RCC dangos ant hidraulinio rišikliu surištų gruntų pagrindo nuovargio funkcijų, grindžiamų eksperimentiniais įtempių ir deformacijų tyrimais, pritaikymui būtina išspręsti šiuos uždavinius:

1. Atlikti hidroterminio režimo poveikio eksperimentiniame ruože įrengtos ant pagrindo sluoksnio iš gruntų, surištų hidrauliniais rišikliais ir kitais priedais, voluojamojo betono dangos konstrukcijos analizę. Šiam tikslui panaudojant drėgnio bei temperatūros kitimo duomenis, nuskaitytus iš temperatūros ir drėgnio jutiklių, įrengtų voluojamojo betono ir pagrindo sluoksnio iš gruntų, surištų hidrauliniais rišikliais ir kitais priedais, sluoksnio apačioje.
2. Alikti įtempių ir deformacijų, pasireiškiančių voluojamojo betono sluoksnio apačioje, veikiant projektinei 50 kN automobilio rato apkrovai ir tipinei orlaivio 200 kN apkrovai, eksperimentinį tyrimą.
3. Atlikti voluojamojo betono deformacinių siūlių apkrovos perdavimo tarp įpjovomis sudalintų plotų ir įlinkių plokščių kampe eksperimentinį tyrimą, veikiant projektinei 50 kN automobilio rato apkrovai ir tipinei karinio mobilumo 100 kN apkrovai.
4. Atsižvelgiant į eksperimentiniame ruože nustatytas dangos konstrukcijos deformacijų vertes, perskaičiuotus sluoksnių standumo modulius ir kitas dangos konstrukcijos sluoksnių mechanines savybes, nustatytas objekto rekonstravimo metu, sudaryti skaičiuojamąją dangos konstrukcijos schemą.
5. Sudaryti voluojamojo betono, įrengto ant viršutinio ir apatinio pagrindo sluoksnio iš gruntų, surištų hidrauliniais rišikliais ir kitais priedais, technines specifikacijas ir sluoksnių įrengimo reikalavimus.

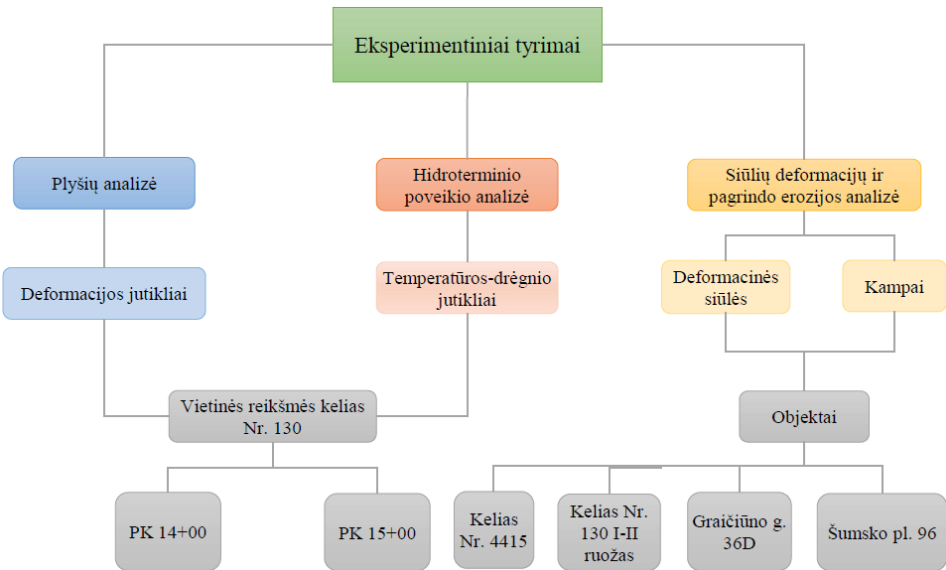
Voluojamojo betono dangos elgsenos eksperimentinis tyrimas

Šiame skyriuje pateikiami duomenys apie eksperimentinio tyrimo objektus, tyrimo planą ir metodiką. Taip pat pateikiami duomenys apie dangos konstrukcijoje įrengtus jutiklius, jų kiekį, specifikacijas ir įrengimo vietas. Pateikiami laikomosios gebos, hidroterminio režimo, deformacinių siūlių apkrovos perdavimo ir matavimų plokščių kampuose tyrimų rezultatai. Skyriaus tematika paskelbti 3 straipsniai (Mickevič & Vaitkus, 2022, 2023, 2024).

2.1. Eksperimentinio tyrimo planas

Eksperimentinis tyrimas susideda iš trijų dalių (2.1 pav.).

1. Hidroterminio poveikio analizė – hidroterminio režimo poveikis voluojamojo betono dangos konstrukcijai, įrengtai ant pagrindo sluoksnio iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais. Poveikis įvertinamas atliekant dangos konstrukcijos laikomosios gebos tyrimus krintančiojo svorio deflektometru neutraliomis ir nepalankiomis hidrologinėmis sąlygomis. Taip pat atliekama temperatūros ir dregmės jutiklių, įrengtų vietinės reikšmės kelyje Nr. 130, analizė (2.1 pav.).



2.1 pav. Eksperimentinių tyrimų planas

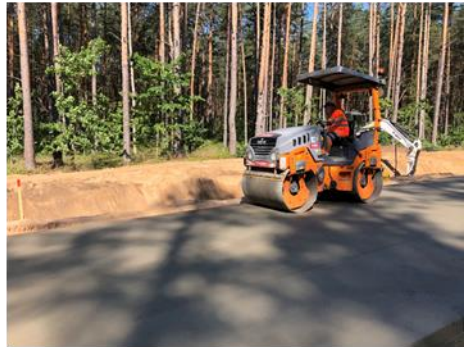
Fig. 2.1. Plan of the experiments

2. Plyšių analizė – įtempių, susidarantių voluojamojo betono sluoksnio apačioje, palyginimas su teoriniais apskaičiuotais, tokiai dangos konstrukcijai būdingais įtempiais. Įtempiai nustatomi imituojant transporto priemonių apkrovas krintančiojo svorio deflektometru ties vietinės reikšmės kelio Nr. 130 dangos konstrukcijoje įrengtais deformacijų jutikliais (2.1 pav.).
3. Deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos analizė – deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos įvertinimo voluojamojo betono dangos konstrukcijoms su skirtingų mechaninių savybių pagrindo sluoksniais. Tyrimas atliekamas nustatant voluojamojo betono deformacinių siūlių apkrovos perdavimo koeficientą ir įlinkius plokščių kampuose, palyginant juos su teoriniais nuovargio skaičiavimo algoritmais (2.1 pav.).

2.1.1. Hidroterminio poveikio analizės tyrimo vieta ir planas

Voluojamojo betono dangos, įrengtos ant hidrauliniu rišikliu ir jonų mainus gerinančiu priedu sistiprintų gruntų sluoksnio, eksperimentinis ruožas yra Švenčionių raj. sav., Pabradės sen. vietinės reikšmės kelyje Nr. 130. Vietinės reikšmės kelio

Nr. 130 ruožas buvo rekonstruotas 2021 m. birželio–rugsjūčio mėnesiais (2.2 pav.).

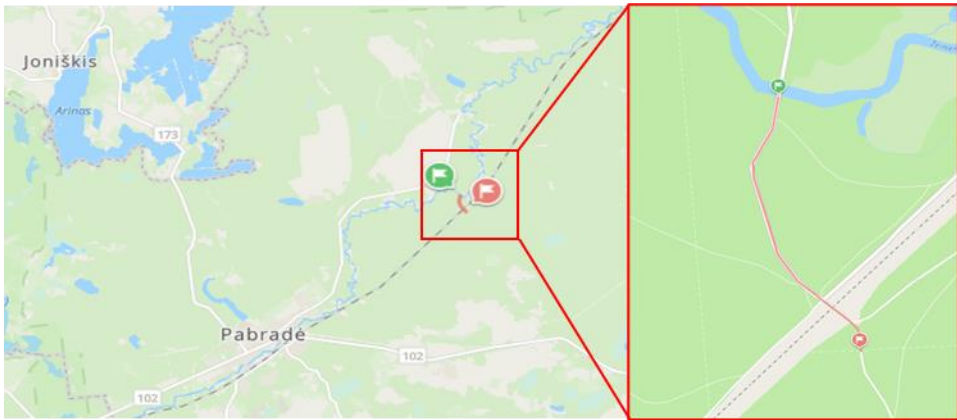


2.2 pav. Vietinės reikšmės kelio Nr. 130 (eksperimentinio ruožo) rekonstrukcija
Fig. 2.2. Reconstruction of local road No. 130 (experimental section)

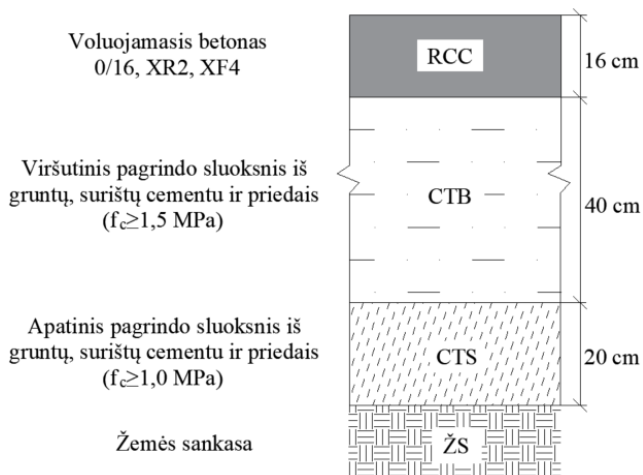
Eksperimentinis ruožas prasideda už tilto per Žeimenos upę (PK 11+50), pasibaigia už pervažos, ties PK 18+49 (2.3 pav.). Eksperimentinio ruožo ilgis 700 m, betono dangos plotis – 10 m, kelkraščių plotis – 1 m.

Dangos konstrukciją sudaro (2.4 pav.):

- 16 cm voluojamojo betono sluoksnis;
- 40 cm viršutinis pagrindo sluoksnis iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir jonų mainus gerinančiu priedu;
- 20 cm apatinis pagrindo sluoksnis iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir jonų mainus gerinančiu priedu;
- natūrali žemės sankasa.



2.3 pav. Vietinės reikšmės kelio Nr. 130 (eksperimentinio ruožo) rekonstrukcija
Fig. 2.3. Reconstruction of local road No. 130 (experimental section)



2.4 pav. Eksperimentinio ruožo dangos konstrukcijos detalė
Fig. 2.4. Detail of experimental pavement structure

Voluojamojo betono mišinys buvo pagamintas mobilioje betono gamykloje. Voluojamojo betono mišinio sudėtis:

- skaldos mišinio fr. 4/16 (48,8 %);
- smėlio fr. 0/4 (30,9 %);
- cemento (14,7 %);
- vandens (5,5 %);
- plastiklio (0,07 %).

Viršutinio pagrindo sluoksnio iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, sudėtis:

- 5 % cementas;
- jonų mainus gerinantis priedas (0,2 l į 1 m³ grunto);
- vanduo;
- gruntas.

Reikalavimai viršutinio pagrindo sluoksnio iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais:

- gniuždomasis stipris po 28 parų ne mažesnis kaip 1,5 MPa;
- bandinių po šaldymo ir atšildymo ciklų bei referencinių bandinių (po 28 parų) stiprio gniuždant santykis ne mažesnis kaip 0,6;
- sutankinimo rodiklis $D_{Pr} \geq 98$ %.

Apatinio pagrindo sluoksnio iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, sudėtis:

- 3 % cementas;
- jonų mainus gerinantis priedas (0,2 l į 1 m³ grunto);
- vanduo;
- gruntas.

Reikalavimai apatiniam pagrindo sluoksnio iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais:

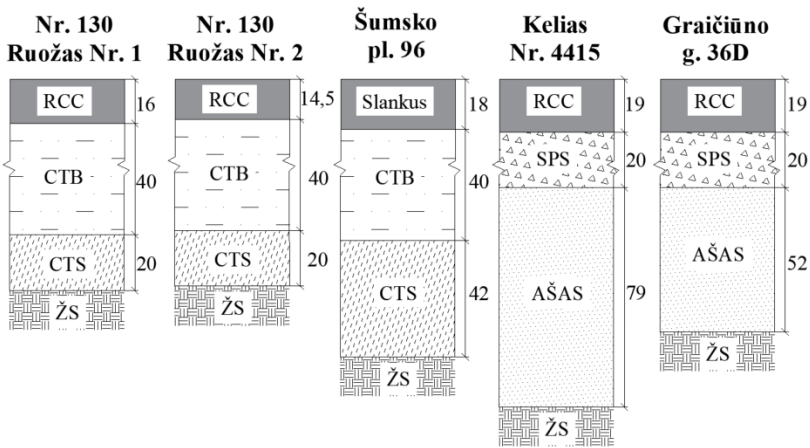
- gniuždomasis stipris po 28 parų ne mažesnis kaip 1,0 MPa;
- deformacijos modulis $E_{v2} \geq 100$ MPa;
- sutankinimo rodiklis $D_{Pr} \geq 98$ %.

2.1.2. Deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos eksperimentinio tyrimo vieta ir planas

Konstruojant betono dangas, labai svarbu įvertinti deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos riziką (angl. *faulting/erosion analysis*), kadangi tai turi reikšmingos įtakos tiek dangos konstrukcijos eksploatacijos laikotarpiui, tiek statinio naudotojų saugumui ir komfortui. Eksperimentiniam deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos tyrimui pasirinkti 2021–2023 m. rekonstruoti arba naujai pastatyti susisiekiimo komunikacijų statiniai, kuriuose įrengtos voluojamojo arba slankiojo betono dangos konstrukcijos. Įvertinant tai, jog deformacinių siūlių betono dangose funkcionavimui turi įtakos pagrindo sluoksnio medžiagiškumas, storis, stipruminės charakteristikos, kurių dėka yra sumažinami dangos konstrukcijos įlinkiai ir tuo pačiu įtempiai betono sluoksnio apačioje. Pasirenkant objektus eksperimentiniam tyrimui, atsižvelgta į skirtingo medžiagiškumo, savybių ir storio pagrindo sluoksnius. Deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos eksperimentiniam tyrimui pasirinkti keturi skirtingi objektai:

- vietinės reikšmės kelio Nr. 130 ruožas Nr. 1;
- vietinės reikšmės kelio Nr. 130 ruožas Nr. 2;
- Šumsko pl. 96;
- valstybinės reikšmės rajoninis kelias Nr. 4415 Pabradė–Meškerinė (toliau – kelias Nr. 4415);
- Graičiūno g. 36D.

Ekspimentinio deformacinių siūlių deformacijų ir erozijos tyrimo dangos konstrukcijų sudėtis ir sluoksnių storiai centimetais pateikti 2.5 paveiksle.



2.5 pav. Dangos konstrukcijos deformacinių siūlių deformacijoms ir erozijai tirti
Fig. 2.5. Pavement structures of faulting/erosion experiment

2.1 lentelė. Deformacinių siūlių deformacijų ir erozijos tyrimo dangos konstrukcijų sluoksnių savybės

Table 2.1. Properties of pavement structure of faulting/erosion experiment

Sluoksnis		Savybė	Nr. 130 ruožas Nr. 1 ir Nr. 2	Šumsko pl. 96 ¹⁾	Kelias Nr. 4415	Graičiūno g. 36D
Dangos	RCC	Medžiagos tipas ir markė	C30/37 (D_{\max} 16), XF4	C30/37 (D_{\max} 16), XR2, XF4		
		Lenkiamasis stipris, MPa	5,5	7	6,5	6,5
		Gniuždomasis stipris, MPa	37	45	37	37
Pagrind	CTB	Gniuždomasis stipris, MPa	1,5	1,5		

2.1 lentelės pabaiga

Sluoksnis	Savybė	Nr. 130 ruožas Nr. 1 ir Nr. 2	Šumsko pl. 96 ¹⁾	Kelias Nr. 4415	Graičiū- no g. 36D			
	Bandinių po šaldymo ir atšildymo ciklą bei referencinių bandinių (po 28 parų) stiprio gniuždant santykis	–	0,7	X	X			
	Deformacijos modulis E_{v2} , MPa	500	400					
	CTS	Gniuždomasis stipris, MPa	1,0			1,0		
		Deformacijos modulis E_{v2} , MPa	100			120		
	SPS	Deformacijos modulis E_{v2} , MPa	X			X	180	180
	AŠAS	Deformacijos modulis E_{v2} , MPa					120	120
Žemės sankasa	ŽS	Sutankinimo rodiklis D_{Pr} , %	–	97	–	–		
		Deformacijos modulis E_{v2} , MPa	–	45	45	45		

Pastabos: Šumsko pl. 96 objekte įrengtas slankusis betonas.

Eksperimentinio deformacinių siūlių deformacijų ir erozijos tyrimo dangos konstrukcijų sluoksnių savybės ir įrengimo reikalavimai pateikti 2.1 lentelėje.

2.2. Eksperimentinio tyrimo metodika

Šiame poskyriuje detalizuojamos hidroterminio poveikio, plyšių analizės bei deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos analizės eksperimentinių tyrimų metodikos.

2.2.1. Hidroterminio poveikio ir plyšių analizės tyrimo metodika

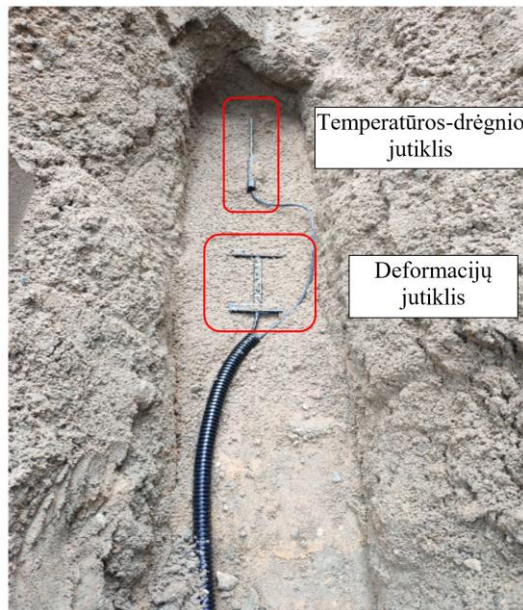
Eksperimentinio ruožo rekonstravimo metu ties PK 14+00 ir PK 15+00 dangos konstrukcijoje įrengti temperatūros ir drėgno bei deformacijų jutikliai. Šie jutikliai įrengti kairėje važiuojamosios dalies pusėje, dešiniojo rato riedėjimo trajektorijoje (2,5 m nuo kelio ašies).

Ties PK 14+00 įrengtas (2.6 pav.):

- voluojamojo betono sluoksnio apačioje (16 cm gylyje nuo dangos paviršiaus) deformacijų jutiklis bei temperatūros ir drėgno jutiklis;
- viršutinio pagrindo iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, sluoksnio apačioje (56 cm gylyje nuo dangos paviršiaus) deformacijų jutiklis bei temperatūros ir drėgno jutiklis.

Ties PK 15+00 įrengtas (2.6 pav.):

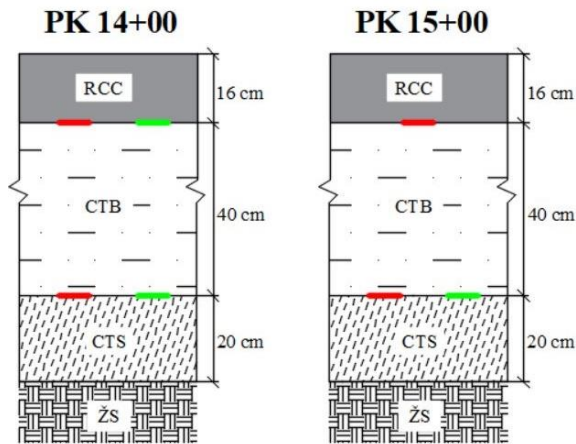
- voluojamojo betono sluoksnio apačioje (16 cm gylyje nuo dangos paviršiaus) deformacijų jutiklis;
- viršutinio pagrindo iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, sluoksnio apačioje (56 cm gylyje nuo dangos paviršiaus) deformacijų jutiklis bei temperatūros ir drėgno jutiklis.



2.6 pav. Jutiklių įrengimas dangos konstrukcijoje
Fig. 2.6. Installation of sensors in the pavement structure

Deformacijų (H formos) bei temperatūros ir drėgnio jutikliai įrengti skersine kryptimi transporto priemonių eismo atžvilgiu. Eksperimentinio ruožo jutiklių išdėstymas ir įrengimas pavaizduoti 2.7 paveiksle.

Kitoje griovio pusėje, ties įrengtais jutikliais, įrengtos dėžės, kuriuose yra išvesti jutiklių laidai, įrengti duomenų kaupikliai. Temperatūros ir drėgnio duomenys yra fiksuojami ir įrašomi kas valandą. Deformacijos voluojamojo betono sluoksnio apačioje ir viršutinio pagrindo iš gruntų, surišėtų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, sluoksnio apačioje fiksuojamos tyrimo metu, kai yra suteikiama apkrova dangos konstrukcijai.



2.7 pav. Jutiklių pozicijos dangos konstrukcijoje (raudonai pažymėti deformacijų jutikliai, žaliai – temperatūros ir drėgnio jutikliai)

Fig. 2.7. Locations of sensors in the pavement structure (deformation sensors are marked in red, temperature-humidity sensors – in green)

Pagrindinės deformacijų jutiklio specifikacijos pateiktos 2.2 lentelėje. Deformacijos jutiklis yra „H“ formos, skirtas nestandžiųjų (asfalto) ir standžiųjų (betono) dangų deformacijoms matuoti. Deformacijų jutiklio tarnavimo laikas viršija 36 mėn. ir 100 000 000 nuovargio ciklų.

2.2 lentelė. Deformacijų jutiklio specifikacijos
Table 2.2. Specifications of the strain gauge

Tipas	PAST II (skirtas AC arba PCC)
Diapazonas	Iki 1500 $\mu\epsilon$
Konfigūracija	Vieno įtempio matuoklis

2.2 lentelės pabaiga

Tipas	PAST II (skirtas AC arba PCC)
Medžiaga	Epoksidas–Stiklo pluoštas
Padengimas	Epoksidas–Silikonas–PFT–Titanas
Atsparumas	120 $\Omega \pm 1,0 \%$; GF = 2,0
Įtampa	Iki 12V
Temperatūra	–30° iki 150 °C
ΣE -modulis	≈ 2200 MPa
Skerspjūvis	$n \approx 0,5$ cm ²
Jėga	0,110 N/ $\mu\epsilon$
Nuovargio ciklų skaičius	Teoriškai iki 108 ciklų
Tarnavimo laikotarpis	Įprastai >36 mėn.

2.3 lentelė. Temperatūros ir drėgnio jutiklio specifikacijos**Table 2.3.** Specifications of the temperature-humidity sensor

Matavimo dažnis	>150 MHz
Matavimo principas	TDT (laiko srities perdavimas)
Matavimo signalas	Simetrinis, bipolinis, diferencinis
Matavimo diapazonas	0–100 % VWC (tūrinis vandens kiekis)
Grunto drėgnio matavimo tikslumas	Įprastai +/- 2 % etaloniniame grunte iki 50 % VWC
Grunto drėgnio matavimo tikslumas	Įprastai +/- 3 % etaloniniame grunte iki 100 % VWC
Temperatūros matavimo tikslumas	Įprastai +/- 0,5 °C

Pagrindinės temperatūros ir drėgnio jutiklio specifikacijos pateiktos 2.3 lentelėje. Temperatūros ir drėgnio jutiklyje naudojama laiko srities perdavimo technologija, skirta tiksliai, patikimai išmatuoti temperatūrai ir drėgniui. Temperatūros ir drėgnio jutiklis gali būti taikomas tiek moksliniais tikslais, tiek atliekant hidrologinius matavimus, žemės ūkyje ir kt.

2.2.2. Skaičiuojamoji įtempių voluojamajame betone nustatymo metodika

Įprastai dangos konstrukcijos projektuojamos tam tikrai projektinei apkrovai A , kuri yra išreikšta 10 t ekvivalentinės standartinės ašies apkrovos pravažiavimų skaičiumi, t. y. ribiniam pasikartojančiųjų apkrovų skaičiui (KPT SDK 19). Tam yra taikomi visuotinai pripažinti mechanistiniai-empiriniai dangų konstravimo metodai, kuriais nuo projektinės vieno rato, t. y. 5 t apkrovos, yra nustatomi teoriniai įtempiai kritiniuose dangos konstrukcijos sluoksnių taškuose. Apskaičiuoti teoriniai įtempiai naudojami nuovargio funkcijose, kuriomis apskaičiuojamas ribinis dangos konstrukcijos naudojimo laikotarpis, atsižvelgiant į projektinių apkrovų pasikartojamumą.

Siekiant įvertinti įtempių, susidarančių vietinės reikšmės kelyje Nr. 130 įrengtoje voluojamojo betono dangoje, atitikimą teoriniams bei kartu įvertinti voluojamojo betono dangos funkcionavimą nuovargio plyšių vystymosi atžvilgiu, atlikta teorinių įtempių ir įtempių, nustatytų natūriniame objekte, analizė.

Teoriniai įtempiai apskaičiuoti taikant MN LAYER (Khazanovich & Wang, 2008) programą, priimant šias prielaidas:

- dangos konstrukcijos sluoksnių storiai yra tolygūs;
- visi sluoksniai horizontaliąja kryptimi neriboti;
- sluoksniuose medžiagų savybės homogeniškos ir izotropiškos;
- voluojamojo betono sluoksnis ir hidrauliniams rišikliams surišti sluoksniai turi pilną sukibimą, tačiau tarp hidrauliniams rišikliams surišto sluoksnio ir nesurیشto sluoksnio yra dalinis sukibimas;
- Puasono koeficientas pastovus, voluojamam betonui – 0,15 (Use of..., 2012), hidrauliniams rišikliams surištiems sluoksniams – 0,25 (pagal RDO – Asphalt 09), nesurیشtiems sluoksniams – 0,45 (Maher & Bennert, 2008);
- dangos konstrukcijos reakcija skaičiuota nuo pavienio rato, veikiamo 50 kN jėga, kurio kontakto ploto spindulys 15 cm.

Atliekant teorinius įtempių skaičiavimus, naudoti dangos konstrukcijų sluoksnių standumo moduliai E apskaičiuoti vietinės reikšmės kelyje Nr. 130 atliekant atgalinį skaičiavimą (angl. *backcalculation*). Dangos konstrukcijos sluoksnių standumo moduliai E apskaičiuoti atsižvelgiant į dangos konstrukcijos įlinkius, nustatytus atliekant laikomosios gebos matavimus krintančiojo svorio deflektometru vietinės reikšmės kelyje Nr. 130. Atgalinis dangos konstrukcijos sluoksnių standumo modulių skaičiavimas (angl. *backcalculation*) atliktas automatizuota skaičiavimo programa ELMOD6, taikant „Deflection Basin Fit“ skaičiavimo algoritmą (Backcalculation of..., 2021). Taikant šį algoritmą, apskaičiuojamas teorinis įvestos dangos konstrukcijos įlinkio dubuo. Tuomet įvertinama paklaida tarp išmatuotųjų ir apskaičiuotųjų įlinkių. Konstrukcijos moduliai šiek tiek padidinami (sumažinami) (įprastai 10 %). Jeigu kurio nors iš šių dubenų paklaida mažesnė nei pradinio dubens, tas dubuo laikomas

tinkamesniu sprendimu. Šis procesas kartojamas tol, kol nustatoma minimali paklaida tarp apskaičiuotojo ir išmatuotojo įlinkio dubens (Backcalculation of..., 2021).

2.2.3. Voluojamojo betono dangos konstrukcijos laikomosios gebos tyrimų krintančiojo svorio deflektometru metodika

Natūriniame objekte, atliekant įtempių ir deformacijų voluojamojo betono sluoksnio apačioje ir viršutinio pagrindo iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, sluoksnio apačioje, tyrimus, transporto priemonių apkrovos imituotos krintančiojo svorio deflektometru (2.8 pav.). Dangos konstrukcijos laikomosios gebos tyrimas neardančiaisiais metodais pagrįstas smūginės apkrovos suteikimu į dangos konstrukciją ir dangos įlinkio (reakcijos) matavimu jutikliais, pridėtais ant dangos paviršiaus. Šiems matavimams dažniausiai taikomi deflektometrai, sukuriantys pulsinę apkrovą. Eksperimentiniai voluojamojo betono dangos tyrimai natūriniame objekte atlikti nustatant voluojamojo betono dangos, įrengtos ant pagrindo iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, sluoksnių, įtempius ir deformacijas, esant neutralioms bei nepalankioms hidrologinėms sąlygoms, panaudojant krintančiojo svorio deflektometro skirtingus apkrovų lygius ir standartinę (50 kN) rato apkrovą sukeliančią transporto priemonę. Tyrimo duomenys nuskaityti iš jutiklių, įrengtų voluojamojo betono dangos sluoksnio apačioje bei viršutinio pagrindo iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, sluoksnio apačioje. Eksperimentiniame ruože gauti įtempių ir deformacijų rezultatai palyginti su teoriniais įtempiais, kurie apskaičiuoti dangos konstrukcijos projektavimo metu.



2.8 pav. Laikomosios gebos matavimai vietinės reikšmės kelyje Nr. 130
Fig. 2.8. Bearing capacity measurements on local road No. 130

Dangos konstrukcijos laikomosios gebos matavimai krintančiojo svorio deflektometru vietinės reikšmės kelyje Nr. 130 taip pat atlikti 2021 m. rugpjūčio mėn. (28 dienos po rekonstrukcijos) ir 2022 m. kovo mėn. Matavimai atlikti kiekvienoje eismo juostoje, dešiniojo rato riedėjimo trajektorijoje. Laikomosis gebos matavimai 2021 m. rugpjūčio mėn., atlikti kas 20 m, 2022 m. kovo mėn. – kas 5 m. Matavimus atlikti neutraliomis (2021 m. rugpjūčio mėn.) ir nepalankiomis (2022 m. kovo mėn.) hidrologinėmis sąlygomis, imituojant 200 kN ir standartinę 50 kN (rato) apkrovą krintančiojo svorio deflektometru.

Dangos konstrukcijos laikomosios gebos rodikliai analizuoti po apkrovos normalizavimo centriniame geofone. Centriniame deformacijos jutiklyje (geofone) faktiniam apkrovos impulsui išmatuotas įlinkis normalizuotas, esant standartinei apkrovai, pagal (2.1) formulę (*European Commission Directorate-General for Mobility and Transport, 2005*):

$$d_0 = d_{0,m} \cdot \frac{F_d}{F_m}, \quad (2.1)$$

čia d_0 – normalizuotas įlinkis apkrovos centre, μm ; $d_{0,m}$ – matavimais nustatytas įlinkis apkrovos centre, μm ; F_m – apkrovos impulsas matavimo metu, kN; F_d – apkrovos impulso standartas 50, 100 arba 200 kN.

Matavimų metu apkrova į paviršių kito ± 5 kN diapazone, todėl taikytas dangos įlinkio normalizavimas, konvertuojant išmatuotąjį įlinkį prie pastovios 50, 100 arba 200 kN apkrovos.

2.2.4. Deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos eksperimentinio tyrimo metodika

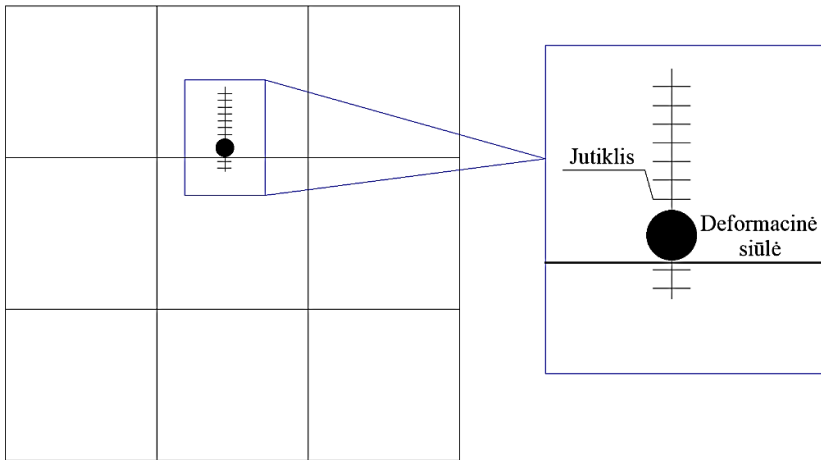
Atliekant deformacinių siūlių deformacijų ir erozijos tyrimus, sunkiųjų transporto priemonių apkrovos imituotos krintančiojo svorio deflektometru (2.8 pav.), apkraunant voluojamojo betono dangos konstrukcijas:

- I apkrovos lygis – 50 kN;
- II apkrovos lygis – 100 kN.

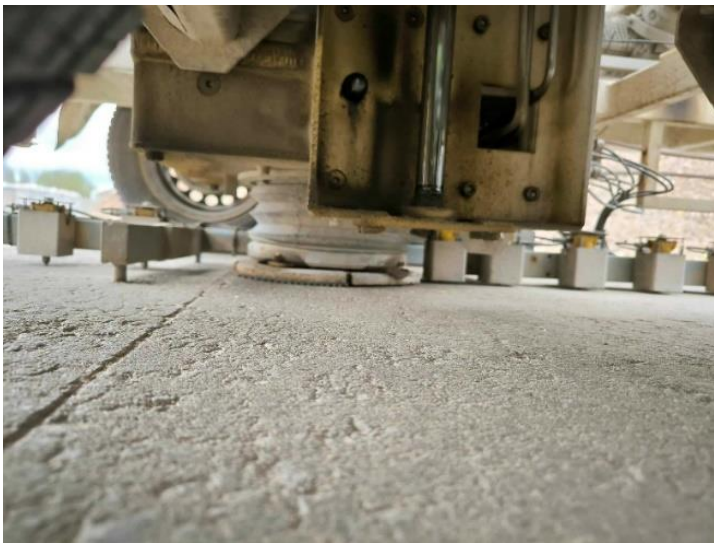
Matavimai atlikti:

- plokštės centre (A);
- plokštės kampe (B);
- ties deformacine siūle (C).

Kiekvienam apkrovos lygiui kiekvienoje pozicijoje (centre, kampe, ties deformacine siūle) pamatuota po 10 taškų. Su kiekvienu apkrovos lygiu matavimai atlikti tose pačiose plokštėse (taškuose). Matavimo taškų išsidėstymas (padėtis) plokštėje pateiktas 2.9 paveiksle.



2.9 pav. FWD matavimo taškų pozicijos plokštėje
Fig. 2.9. Position of FWD measurement points on slab



2.10 pav. Deformacinių siūlių apkrovos perdavimo koeficiento matavimai krintančiojo svorio deflektometru (FWD)

Fig. 2.10. Measurements of deformation joint load transfer efficiency with falling weight deflectometer (FWD)

Voluojamojo betono deformacinių siūlių funkcionavimas įvertintas apskaičiuojant apkrovos perdavimo koeficientą tarp apkrautos ir neapkrautos plokščių

(2.10 pav.). Apkrovos perdavimo koeficientas apskaičiuotas pagal išmatuotus dangos paviršiaus įlinkių duomenis. Skaičiavimuose naudoti įlinkiai, užfiksuoti krintančiojo svorio deflektometro daviklyje, esančiame apkrautoje ir neapkrautoje (gretimoje) plokštėse. Apkrovos perdavimo koeficientas apskaičiuotas pagal (2.2) formulę:

$$\begin{aligned} \text{Apkrovos perdavimo koeficientas} = \\ \frac{\text{Neapkrautos plokštės įlinkis}}{\text{Apkrautos plokštės įlinkis}} \cdot 100 \% \end{aligned} \quad (2.2)$$

Deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos pažaidos yra susijusios su dangos įlinkiais plokščių kampuose. Projektuojant betonines dangas naudojamo PCA deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos nuovargio modelio pagrindiniai įvesties parametrai yra įlinkis plokštės kampe ir k reikšmė, kuri įvertina sluoksnių, esančių po betono plokšte, stiprumą. PCA deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos nuovargio modelis (2.3) (Roden, 2014):

$$\log N_f = 14,524 - 6,777 \cdot (C_1 \cdot P - 9)^{0,103} - \log C_2, \quad (2.3)$$

čia N_f – leistinasis apkrovų pasikartojamumas; C_1 – koeficientas, įvertinantis pagrindo medžiagiškumą (nesurištojo pagrindo atveju C_1 yra lygus 1, surištojo pagrindo atveju – 0,9); C_2 – koeficientas, įvertinantis betono krašto praplatinimą (esant praplatintam betono kraštui C_2 , yra lygus 0,94; esant nepraplatintam betono kraštui – 0,06); P – laikomosios gebos koeficientas (angl. *rate of power*).

Laikomosios gebos koeficientas (angl. *rate of power*) apskaičiuojamas pagal (2.4) formulę (Roden, 2014):

$$P = 268,7 \cdot \frac{(k \cdot w)^2}{hk^{0,73}}, \quad (2.4)$$

čia P – laikomosios gebos koeficientas (angl. *rate of power*); w – įlinkis plokštės kampe, m; h – betono plokštės storis, m; k – reikšmė, įvertinanti sluoksnių, esančių po betono plokšte, stiprumą, MPa/m.

Deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos analizė atlikta atsižvelgiant į laikomosios gebos tyrimų duomenis, t. y. išmatuotus įlinkius plokščių kampuose. Įlinkiai plokščių kampuose išmatuoti, imituojant 50 kN ir 100 kN apkrovą krintančiojo svorio deflektometru.



2.11 pav. *k* reikšmės tyrimai vietinės reikšmės kelyje Nr. 130
Fig. 2.11. *k* value investigation of local road No. 130

Dangos konstrukcijos sluoksnių, esančių po betono sluoksniu, *k* reikšmė vietinės reikšmės kelyje Nr. 130 nustatyta objekto rekonstravimo metu atlikus *k* reikšmės tyrimus (2.11 pav.), kitiems analizuojamiems objektams apskaičiuota teorinė *k* reikšmė, įvertinant dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagiškumą ir mechanines savybes.

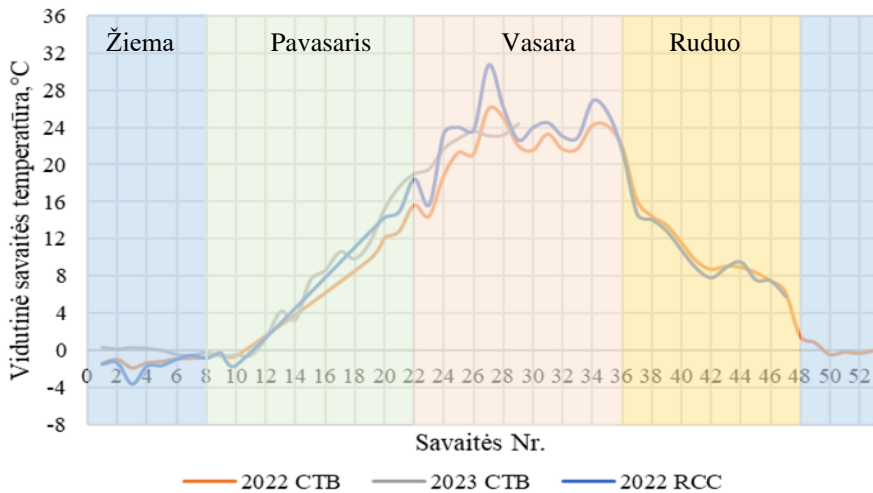
2.3. Eksperimentinio tyrimo rezultatai

Šiame poskyriuje pateikiami hidroterminio poveikio, plyšių analizės bei deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos analizės eksperimentinių tyrimų rezultatai.

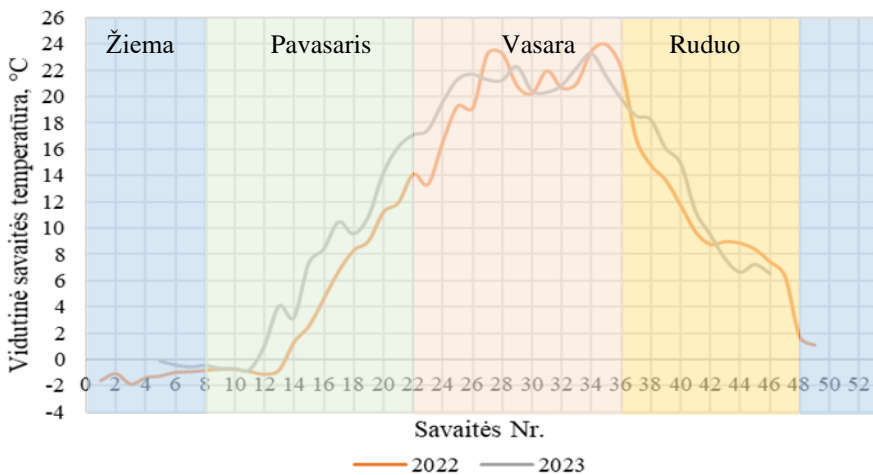
2.3.1. Hidroterminis režimas voluojamojo betono dangos konstrukcijoje

Hidroterminio poveikio dangos konstrukcijai analizėje panaudoti temperatūros ir drėgnio duomenys, stebėti dvejus metus (2022 m. ir 2023 m.) bei dviejose skirtingose vietinės reikšmės kelio Nr. 130 vietose (PK 14+00 ir PK 15+00). Temperatūros ir drėgnio duomenys registruoti kiekvieną valandą ir kiekvieną dieną su nežymiais tarpais dėl techninių kliūčių. Be to, po RCC sluoksniu įrengtas temperatūros ir drėgnio jutiklis nustojo funkcionuoti maždaug po vienerių metų eksploatavimo, todėl šiame tyrime duomenų apie 2023 m. temperatūrą ir drėgmę RCC sluoksnio apačioje nėra pateikta. Dėl gausių gautų duomenų buvo atlikta duomenų analizė, skaičiuojant vidutines temperatūras ir drėgmę. Vidutinė savaitės temperatūra viršutinio pagrindo sluoksnio iš gruntų, surišų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais (CTB), apačioje ir

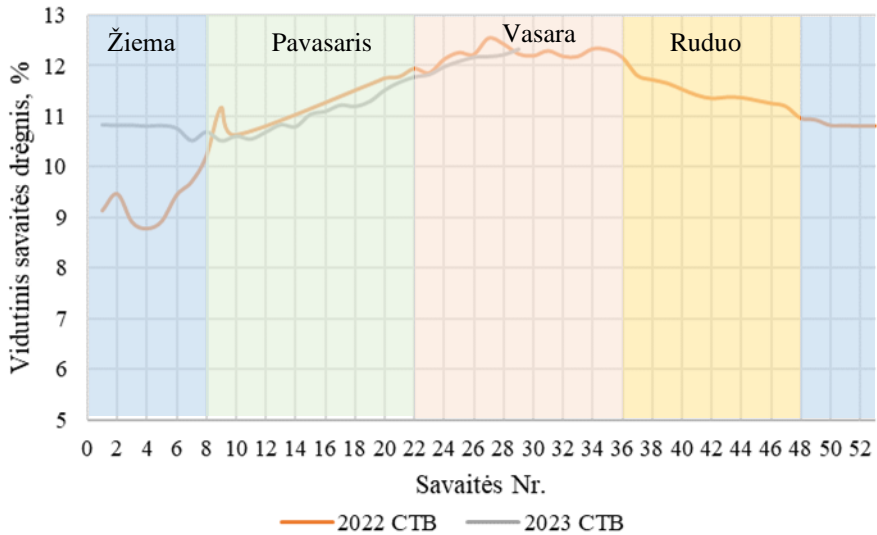
voluojamojo betono (RCC) apačioje ties PK 14+00 pateikta 2.12 paveiksle, PK 15+00 – 2.13 paveiksle. Vidutinis savaitės drėgnis viršutinio pagrindo sluoksnio iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais (CTB), apačioje ties PK 14+00 pateikta 2.14 paveiksle, PK 15+00 – 2.15 paveiksle.



2.12 pav. Vidutinė savaitės temperatūra CTB ir RCC apačioje (PK 14+00)
Fig. 2.12. Average weekly temperatures at the bottom of the CTB and RCC (PK 14+00)

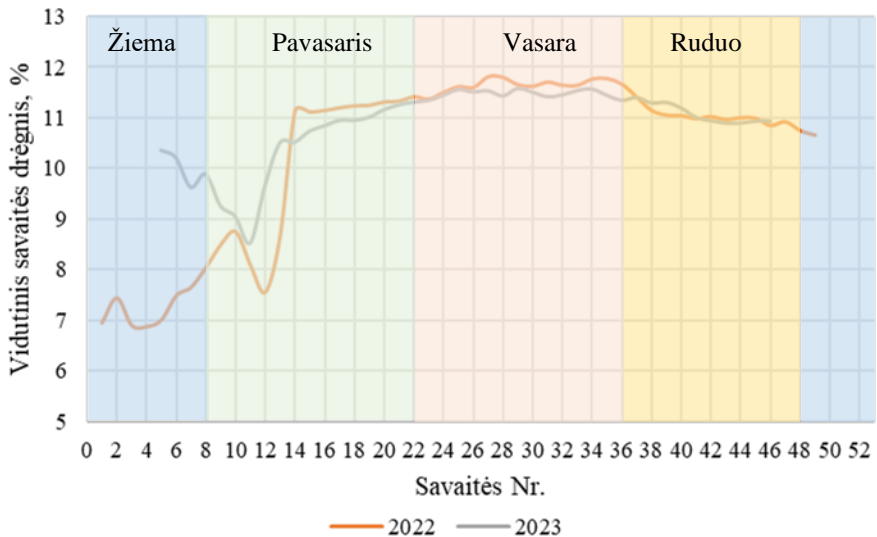


2.13 pav. Vidutinė savaitės temperatūra CTB apačioje (PK 15+00)
Fig. 2.13. Average weekly temperatures at the bottom of the CTB (PK 15+00)



2.14 pav. Vidutinis savaitės drėgnis CTB apačioje (PK 14+00)

Fig. 2.14. Average weekly humidities at the bottom of the CTB (PK 14+00)



2.15 pav. Vidutinis savaitės drėgnis CTB apačioje (PK 15+00)

Fig. 2.15. Average weekly humidities at the bottom of the CTB (PK 15+00)

Statistiniai užfiksuotų vidutinių temperatūrų ir drėgnio rodikliai pateikti 2.4–2.7 lentelėse. Lietuvos hidrologijos tarnybos duomenimis, 2023 m. pirmąsias 10 savaitių oro temperatūra buvo aukštesnė nei 0 °C, o 2022 m. pirmąsias 10 savaitių oro temperatūra buvo žemesnė nei 0 °C. Atšilimas prasidėjo anksčiau 2023 m., todėl 2023 m. drėgnis didesnis negu 2022 m. CTB apačioje.

2.4 lentelė. Skirtingais metų laikais užfiksuotų vidutinių temperatūrų statistiniai rodikliai (PK 14+00)

Table 2.4. Statistical indicators of the monitored average seasonal temperatures (PK 14+00)

Metų laikas	2022								2023			
	Temperatūra CTB apačioje, °C				Temperatūra RCC apačioje, °C				Temperatūra CTB apačioje, °C			
	Min.	Max.	Vid.	SN	Min.	Max.	Vid.	SN	Min.	Max.	Vid.	SN
Pavasaris	-0,80	16,93	11,02	5,44	-2,18	20,08	12,73	6,54	-0,77	19,46	7,52	6,30
Vasara	14,17	27,67	22,25	2,72	15,71	31,74	24,36	3,21	17,37	25,98	22,39	1,82
Ruduo	0,97	21,32	9,64	4,54	2,82	19,31	10,22	3,30	–	–	–	–
Žiema	-2,94	1,00	-0,68	0,60	-7,34	-0,22	-1,39	1,23	-0,76	0,32	-0,11	0,36

2.5 lentelė. Skirtingais metų laikais užfiksuotų vidutinių temperatūrų statistiniai rodikliai (PK 15+00)

Table 2.5. Statistical indicators of the monitored average seasonal temperatures (PK 15+00)

Metų laikas	2022				2023			
	Temperatūra CTB apačioje, °C							
	Min.	Max.	Vid.	SN	Min.	Max.	Vid.	SN
Pavasaris	-1,17	14,97	5,50	5,41	-0,89	17,34	7,04	5,88
Vasara	13,20	25,32	20,93	2,79	15,86	24,45	20,90	1,71
Ruduo	0,94	21,61	9,74	4,65	5,80	20,92	12,92	5,14
Žiema	-2,99	1,22	-1,09	0,51	-0,67	-0,15	-0,50	0,14

2.6 lentelė. Skirtingais metų laikais užfiksuotų vidutinio drėgnio statistiniai rodikliai (PK 14+00)

Table 2.6. Statistical indicators of the monitored average seasonal humidities (PK 14+00)

Metų laikas	2022				2023			
	Drėgnis CTB apačioje, %							
	Min.	Max.	Vid.	SN	Min.	Max.	Vid.	SN
Pavasaris	10,00	12,04	11,59	0,56	10,30	11,80	11,04	0,39
Vasara	11,84	12,64	12,26	0,16	11,68	12,45	12,09	0,18
Ruduo	10,93	12,12	11,42	0,27	–	–	–	–
Žiema	8,38	11,26	10,03	0,88	10,34	10,83	10,75	0,11

2.7 lentelė. Skirtingais metų laikais užfiksuotų vidutinio drėgnio statistiniai rodikliai (PK 15+00)

Table 2.7. Statistical indicators of the monitored average seasonal humidities (PK 15+00)

Metų laikas	2022				2023			
	Drėgnis CTB apačioje, %							
	Min.	Max.	Vid.	SN	Min.	Max.	Vid.	SN
Pavasaris	7,53	11,48	10,39	1,45	8,48	11,32	10,40	0,91
Vasara	11,36	11,91	11,67	0,12	10,99	11,71	11,47	0,13
Ruduo	10,03	11,65	11,01	0,28	10,61	11,47	11,12	0,22
Žiema	6,39	10,81	7,59	0,76	9,56	10,37	9,91	0,29

Vidutinės temperatūros ir drėgnio, užfiksuotų skirtingais metų laikais ties PK 14+00, palyginimas pateiktas 2.8 lentelėje. Palyginimas parodė, kad vidutinė CTB apačios temperatūra pavasarį 2022 m. buvo 1,47 karto aukštesnė nei 2023 m. pavasarį, 2022 m. vasarą praktiškai nekito, žiemą – 6,42 karto aukštesnė. Vidutinis CTB apačios drėgnis 2022 m. pavasarį buvo 1,05 karto didesnis nei 2023 m., vasarą praktiškai nekito, žiemą buvo 0,93 karto mažesnis.

Vidutinės temperatūros ir drėgnio, užfiksuotų skirtingais metų laikais ties PK 15+00, palyginimas pateiktas 2.9 lentelėje. Palyginimas parodė, kad vidutinė CTB apačios temperatūra pavasarį 2022 m. buvo 0,78 karto žemesnė nei 2023 m. pavasarį, 2022 m. vasarą ir 2023 m. vasarą vidutinės temperatūros buvo vienodos, 2022 m. rudenį – 0,75 karto žemesnė, 2022 m. žiemą – 2,17 karto aukštesnė. Vidutinis CTB apačios drėgnis 2022 m. pavasarį ir 2023 m. pavasarį buvo

vienodas, 2022 m. vasarą buvo 1,02 karto didesnis nei 2023 m. vasarą, rudenį praktiškai nekito, žiemą buvo 0,77 karto mažesnis.

2.8 lentelė. Skirtingais metų laikais užfiksuotų vidutinių temperatūrų ir vidutinio drėgno palyginimas (PK 14+00)

Table 2.8. Comparison of average temperatures and humidities of different seasons (PK 14+00)

Metų laikas	PK 14+00	
	Temperatūra CTB apačioje (2022/2023)	Drėgnis CTB apačioje (2022/2023)
Pavasaris	1,47	1,05
Vasara	0,99	1,01
Ruduo	–	–
Žiema	6,42	0,93

Skirtingose vietose (PK 14+00 ir PK 15+00) užfiksuotų vidutinių temperatūrų palyginimas pateiktas 2.10 lentelėje. Atsižvelgiant į atliktą palyginamąją analizę, vidutinė temperatūra CTB apačioje ties PK 14+00 2022 m. pavasarį buvo 2 kartus aukštesnė nei ties PK 15+00, 2022 m. vasarą vidutinė temperatūra buvo 1,06 karto aukštesnė, ties PK 14+00, 2022 m. rudenį praktiškai nekito, 2022 m. žiemą buvo 0,62 karto žemesnė nei ties PK 15+00. Vidutinė temperatūra CTB apačioje ties PK 14+00 2023 m. pavasarį ir vasarą buvo 1,07 karto aukštesnė nei ties PK 15+00, 2022 m. žiemą – 0,21 karto žemesnė nei ties PK 15+00.

2.9 lentelė. Skirtingais metų laikais užfiksuotų vidutinių temperatūrų ir vidutinio drėgno palyginimas (PK 15+00)

Table 2.9. Comparison of average temperatures and humidities of different seasons (PK 15+00)

Metų laikas	PK 15+00	
	Temperatūra CTB apačioje (2022/2023)	Drėgnis CTB apačioje (2022/2023)
Pavasaris	0,78	1,00
Vasara	1,00	1,02
Ruduo	0,75	0,99
Žiema	2,17	0,77

2.10 lentelė. Vidutinių temperatūrų ir drėgnio palyginimas tarp PK 14+00 ir PK 15+00
Table 2.10. Comparison of average temperatures and humidities at PK 14+00 and PK 15+00

Parametras	2022				2023			
	Metų laikas				Metų laikas			
	Pavasaris	Vasara	Ruduo	Žiema	Pavasaris	Vasara	Ruduo	Žiema
Temperatūra CTB apačioje (PK 14+00/PK 15+00)	2,00	1,06	0,99	0,62	1,07	1,07	–	0,21
Drėgnis CTB apačioje (PK 14+00/PK 15+00)	1,12	1,05	1,04	1,32	1,06	1,05	–	1,09

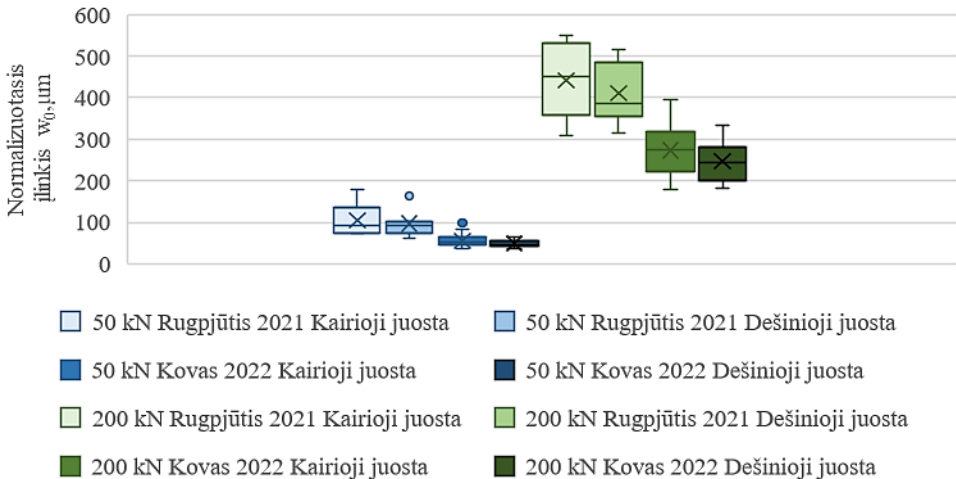
CTB apačioje užfiksuoto drėgnio palyginamoji analizė ties PK 14+00 ir PK 15+00 nustatė, kad RCC dangos konstrukcijoje su pagrindo sluoksniu iš gruntų, surištų hidrauliniais rišikliais ir kitais priedais, drėgnis yra stabilus ištisus metus ir yra apie 12 %, išskyrus žiemos sezoną, kai drėgnis nukrenta iki maždaug 9,5 %. Drėgnio CTB apačioje svyravimui gali turėti įtakos ankstyvas (vėlyvas) atšilimo laikotarpis.

Skirtingose vietose (PK 14+00 ir PK 15+00) užfiksuotų vidutinio drėgnio palyginimas pateiktas 2.8 lentelėje. Atsižvelgiant į atliktą palyginamąją analizę, vidutinis drėgnis CTB apačioje ties PK 14+00 2022 m. pavasarį buvo 1,12 karto didesnis nei ties PK 15+00, 2022 m. vasarą vidutinis drėgnis – 1,05 karto didesnis ties PK 14+00, 2022 m. rudenį – 1,04 karto didesnis nei ties PK 14+00, 2022 m. žiemą – 1,32 karto didesnis ties PK 14+00. Vidutinis drėgnis CTB apačioje ties PK 14+00 2023 m. pavasarį buvo 1,06 karto didesnis nei ties PK 15+00, 2023 m. vasarą vidutinis drėgnis ties PK 14+00 buvo 1,05 karto didesnis, 2023 m. žiemą – 1,09 karto didesnis ties PK 14+00.

2.3.2. Hidroterminis poveikis betono dangos konstrukcijos laikomajai gebai

Dangos konstrukcijos laikomosios gebos tyrimais nustatyta, kad 2021 m. rugpjūčio mėn. dangos paviršiaus normalizuotasis įlinkis w_0 nuo 50 kN apkrovos kairėje eismo juostoje kito nuo 72 μm iki 180 μm , vidurkis buvo 105 μm , standartinis nuokrypis – 41 μm , dešinėje juostoje normalizuotasis paviršiaus įlinkis w_0 kito nuo 63 μm iki 164 μm , vidurkis buvo 97 μm , standartinis nuokrypis – 32 μm . Atsižvelgiant į 2022 m. kovo mėn. atliktą dangos konstrukcijos laikomosios gebos tyrimą, dangos

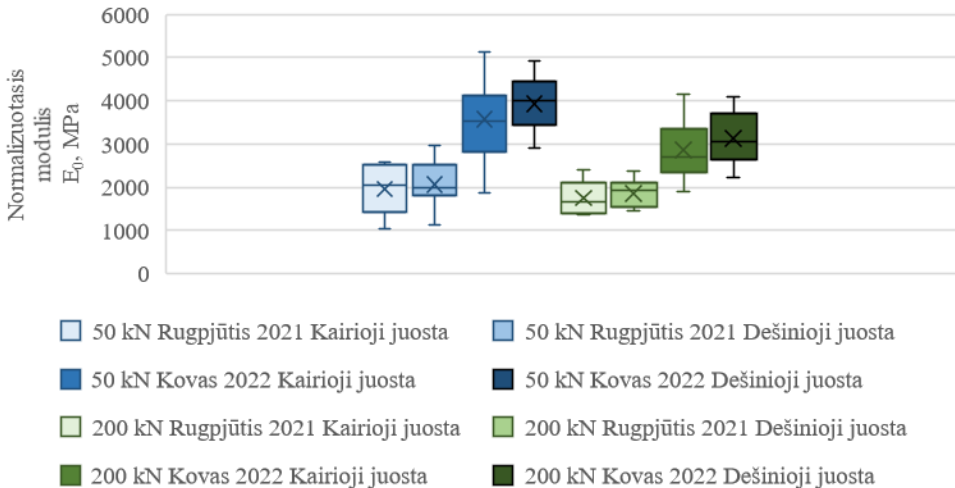
paviršiaus normalizuotasis įlinkis w_0 nuo 50 kN apkrovos kairėje eismo juostoje kito nuo 36 μm iki 99 μm , vidurkis buvo 55 μm , standartinis nuokrypis – 15 μm , dešinėje juostoje normalizuotasis paviršiaus įlinkis w_0 kito nuo 38 μm iki 64 μm , vidurkis buvo 49 μm , standartinis nuokrypis – 8 μm (2.15 pav.). Dangos konstrukciją apkrovus 200 kN apkrova, 2021 m. rugpjūčio mėn. dangos paviršiaus normalizuotasis įlinkis w_0 kairėje eismo juostoje kito nuo 309 μm iki 551 μm , vidurkis buvo 442 μm , standartinis nuokrypis – 89 μm , dešinėje juostoje normalizuotasis paviršiaus įlinkis w_0 kito nuo 315 μm iki 516 μm , vidurkis buvo 411 μm , standartinis nuokrypis – 71 μm . Tuo tarpu 2022 m. kovo mėn. dangos paviršiaus normalizuotasis įlinkis w_0 , nuo 200 kN apkrovos kairėje eismo juostoje kito nuo 179 μm iki 394 μm , vidurkis buvo 273 μm , standartinis nuokrypis – 62 μm , dešinėje juostoje normalizuotasis paviršiaus įlinkis w_0 kito nuo 182 μm iki 333 μm , vidurkis buvo 247 μm , standartinis nuokrypis – 48 μm (2.16 pav.).



2.16 pav. Normalizuotojo dangos paviršiaus įlinkio w_0 stačiakampės diagramos
Fig. 2.16. Box plot diagram of normalised pavement surface deflection w_0

Dangos konstrukcijos laikomosios gebos tyrimais nustatyta, kad 2021 m. rugpjūčio mėn. normalizuotasis dangos standumo modulis E_0 nuo 50 kN apkrovos kairėje eismo juostoje kito nuo 1035 MPa iki 2574 MPa, vidurkis buvo 1959 MPa, standartinis nuokrypis – 596 MPa, dešinėje juostoje normalizuotasis dangos standumo modulis E_0 kito nuo 1138 MPa iki 2957 MPa, vidurkis buvo 2061 MPa, standartinis nuokrypis – 567 MPa. Atsižvelgiant į 2022 m. kovo mėn. atliktą dangos konstrukcijos laikomosios gebos tyrimą, normalizuotasis dangos standumo modulis E_0 , nuo 50 kN apkrovos kairėje eismo juostoje kito nuo

1876 MPa iki 5139 MPa, vidurkis buvo 3573 MPa, standartinis nuokrypis – 869 MPa, dešinėje juostoje normalizuotasis dangos standumo modulis E_0 kito nuo 2913 MPa iki 4914 MPa, vidurkis buvo 3925 MPa, standartinis nuokrypis – 606 MPa (2.16 pav.). Dangos konstrukciją apkrovus 200 kN apkrova, 2021 m. rugpjūčio mėn. normalizuotas dangos standumo modulis E_0 kairėje eismo juostoje kito nuo 1353 MPa iki 2408 MPa, vidurkis buvo 1752 MPa, standartinis nuokrypis – 381 MPa, dešinėje juostoje normalizuotasis dangos standumo modulis E_0 kito nuo 1443 MPa iki 2362 MPa, vidurkis buvo 1859 MPa, standartinis nuokrypis – 322 MPa. Tuo tarpu 2022 m. kovo mėn. normalizuotasis dangos standumo modulis E_0 nuo 200 kN apkrovos kairėje eismo juostoje kito nuo 1888 MPa iki 4165 MPa, vidurkis buvo 2863 MPa, standartinis nuokrypis – 639 MPa, dešinėje juostoje normalizuotasis dangos standumo modulis E_0 kito nuo 2235 MPa iki 4099 MPa, vidurkis buvo 3121 MPa, standartinis nuokrypis – 592 MPa (2.17 pav.).

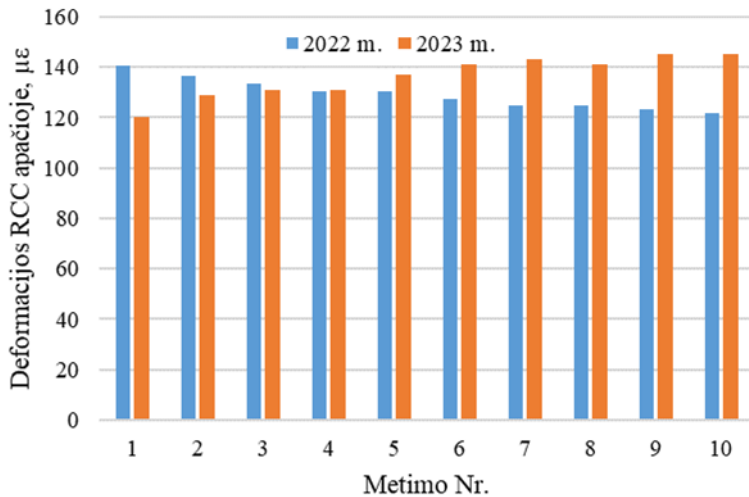


2.17 pav. Normalizuotojo standumo modulio E_0 stačiakampės diagramos
Fig. 2.17. Box pot diagram of normalised modulus E_0

Remiantis dvejų metų matavimais galima teigti, kad hidroterminės sąlygos neturi įtakos voluojamojo betono dangos konstrukcijos su pagrindo sluoksniu iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, laikomajai galiai. Mažesnis paviršiaus įlinkis w_0 , praėjus 9 mėn. po rekonstrukcijos, parodė, kad dangos konstrukcijos laikomoji geba padidėjo. Pagrindinė to priežastis yra tai, jog betono dangų mechaninės savybės dėl vis dar vykstančio hidratacijos proceso dažniausiai didėja su betono amžiumi, kol galiausiai pasiekia maksimalias reikšmes.

2.3.3. Deformacijų ir įtempių voluojamojo betono sluoksnio apačioje tyrimo rezultatai

Deformacijos tyrimas voluojamojo betono apačioje atliktas imituojant 200 kN apkrovą krantinčiojo svorio deflektometru ties PK 15+00 dangos konstrukcijoje įrengtu deformacijų jutikliu. Tyrimas atliktas 2022 m. lapkričio mėn. ir 2023 m. lapkričio mėn. Bandymo metu dangos konstrukcija buvo apkrauta 10 kartų su 200 kN apkrova ir kiekvieno apkrovimo metu fiksuotos deformacijos. Deformacijų jutiklio duomenys fiksuoti 0,001 sek. ciklu. Užfiksuotos deformacijos pateiktos 2.18 paveiksle. Deformacijų tyrimo metu 2022 m. lapkričio mėn. CTB sluoksnio apačioje temperatūra buvo 7,90 °C, drėgnis – 11,14 %, 2023 m. lapkričio mėn. temperatūra CTB apačioje buvo 6,31 °C, drėgnis – 10,95 %.



2.18 pav. Deformacijos RCC apačioje (PK 15+00)

Fig. 2.18. Strains at the bottom of RCC (PK 15+00)

2.11 lentelė. Deformacijų tyrimo statistiniai rodikliai (PK 15+00)

Table 2.11. Statistical indicators of the deformation testing (PK 15+00)

Metai	Min.	Maks.	Vid.	SN
2022	122	141	129	6
2023	120	145	136	8

Statistiniai deformacijų tyrimo rodikliai pateikti 2.11 lentelėje. 2022 m. lapkričio mėn. deformacijos voluojamojo betono apačioje nuo 200 kN apkrovos, imituotos krantinčiojo svorio deflektometru, kito nuo 122 µε iki 141 µε,

vidurkis buvo 129 $\mu\epsilon$, o standartinis nuokrypis – 6 $\mu\epsilon$, 2023 m. lapkričio mėn. deformacijos voluojamojo betono apačioje nuo 200 kN apkrovos kito nuo 120 $\mu\epsilon$ iki 145 $\mu\epsilon$, vidurkis buvo 136 $\mu\epsilon$, o standartinis nuokrypis – 8 $\mu\epsilon$.

Literatūros analizės duomenimis, vienas iš pagrindinių nuovargio plyšių analizės funkcijų komponentų yra įtempių santykis (SR), kurį galima nustatyti betono sluoksnio apačioje esančius įtempius dalijant iš betono stiprio lenkiant. Dangos konstrukcijos, kurios skirtos transporto apkrovoms, skaičiuojamos atsižvelgiant į ekvivalentinę standartinės ašies apkrovą, kuri Lietuvoje yra 10 t. Įtempiai voluojamojo betono sluoksnio apačioje apskaičiuoti pagal (2.5) formulę:

$$\sigma = E \cdot \epsilon, \quad (2.5)$$

čia σ – įtempiai, MPa; E – standumo modulis, MPa; ϵ – deformacija.

Atliekant faktinių įtempių skaičiavimus, naudotas voluojamojo betono 37 800 MPa standumo modulis E , kuris apskaičiuotas atsižvelgiant į lenkiamąjį stiprį ir standumo modulio koreliaciją pagal (2.6) formulę:

$$E = 6750 \cdot f_{ct,fl}, \quad (2.6)$$

čia E – standumo modulis, MPa; $f_{ct,fl}$ – lenkiamasis stipris, MPa.

Voluojamojo betono lenkiamasis stipris nustatytas vietinės reikšmės kelio Nr. 130 rekonstravimo metu, suformuojant betono klojimo bandinius (sijas) ir juos bandant po 28 parų. Nustatyto lenkiamąjį stiprį statistiniai rodikliai pateikti 2.12 lentelėje. Standumo modulis apskaičiuotas atsižvelgiant į 5,6 MPa lenkiamąjį stiprį, kuris apskaičiuotas nuo vidurkio atėmus vieną standartinį nuokrypį.

2.12 lentelė. Lenkiamąjį stiprį statistiniai rodikliai nustatyti vietinės reikšmės kelio Nr. 130 rekonstravimo metu

Table 2.12. Statistical indicators of RCC flexural strength of local road No. 130 determined during reconstruction

Rodiklis	Min.	Maks.	Vid.	SN
Reikšmė, MPa	5,6	6,3	5,85	0,25

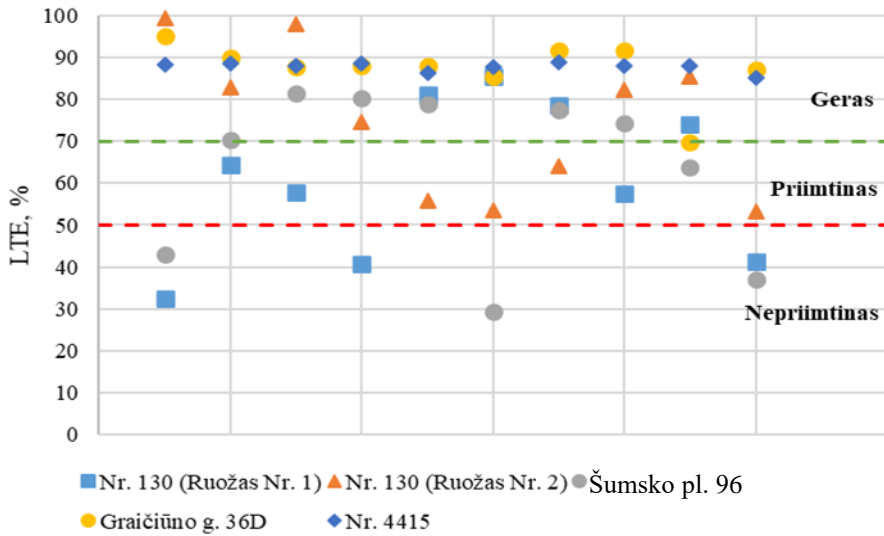
Atsižvelgiant į ekvivalentinį standartinės ašies apkrovos dydį, išmatuotos deformacijos voluojamojo betono sluoksnio apačioje imitavus 50 kN apkrovą (vieno rato apkrovą) krintančiojo svorio deflektometru. Užfiksuota deformacija voluojamojo betono sluoksnio apačioje nuo 50 kN apkrovos, imituotos krintančiojo svorio deflektometru, buvo 37 $\mu\epsilon$. Faktiniai įtempiai voluojamojo betono sluoksnio apačioje – 1,40 MPa.

2.3.4. Deformacinių siūlių apkrovos perdavimo tyrimo rezultatai

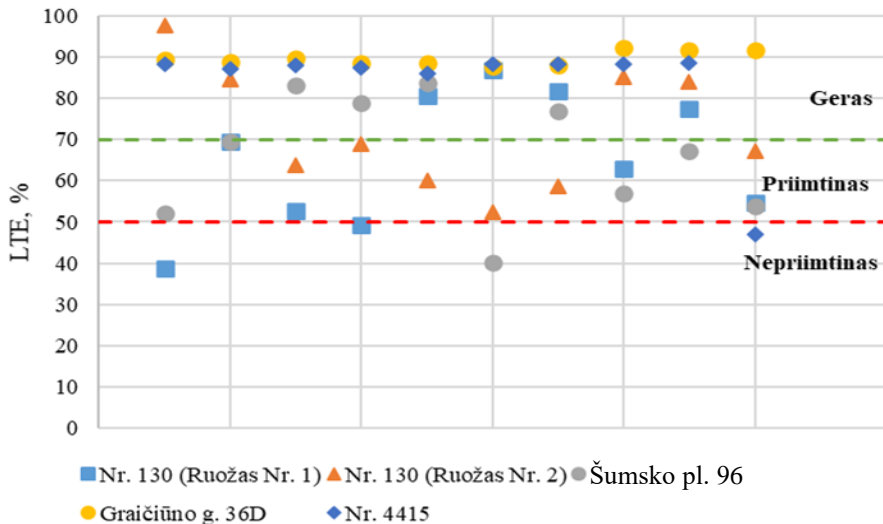
Deformacinių siūlių apkrovos perdavimo koeficientas išreiškiamas procentais. Laikoma, jog, esant apkrovos perdavimo koeficientui lygiam 100 %, deformacinėse siūlėse susiformavusi stambiojo užpildo sukibtis (angl. *aggregate interlock*) pilnai funkcionuoja ir perduoda vienodas apkrovas tarp sudalintų betono plotų. Atsižvelgiant į apkrovos perdavimo koeficiento procentinę išraišką, laikoma, kad apkrovos perdavimas tarp skirtingų plokščių yra:

- geras, apkrovos perdavimo koeficientas ≥ 70 %;
- priimtinas, ≥ 50 % apkrovos perdavimo koeficientas < 70 %;
- nepriimtinas, apkrovos perdavimo koeficientas < 50 %.

Deformacinių siūlių apkrovos perdavimo tyrimas natūrinuose objektuose atliktas 2024 m. balandžio mėn. Tyrimo metu buvo nustatytas ir įvertintas penkių skirtingų dangos konstrukcijų deformacinių siūlių apkrovos perdavimo koeficientas. Tyrimas atliktas dviejuose objektuose, kuriuose buvo įrengta RCC dangos konstrukcija ant skaldos pagrindo sluoksnio (kelias Nr. 4415 ir Graičiūno g. 36D), dviejuose skirtinguose kelio Nr. 130 ruožuose, kuriuose įrengta RCC danga ant hidraulinio rišiklio bei jonų mainus gerinančiu priedu sustiprintų gruntų pagrindo sluoksnio (kelio Nr. 130 ruožas Nr. 1 ir Nr. 2,) ir viename objekte, kuriame įrengta slankiojo betono danga ant hidraulinio rišiklio bei jonų mainus gerinančiu priedu sustiprintų gruntų pagrindo sluoksnio (Šumsko pl. 96). Deformacinių siūlių apkrovos perdavimo efektyvumas patikrintas krintančiojo svorio deflektometru imituojant 50 kN ir 100 kN apkrovas. Deformacinių siūlių apkrovos perdavimo tyrimo rezultatai nuo 50 kN apkrovos pateikti 2.19 paveiksle, nuo 100 kN – 2.20 paveiksle. Atsižvelgiant į atliktą tyrimą, vietinės reikšmės kelio ruože Nr. 1 – nuo 50 kN apkrovos deformacinių siūlių apkrovos perdavimo koeficientas kinta nuo 32 % iki 86 %, vidurkis 61 %, vidutinis standartinis nuokrypis 19 %. Vietinės reikšmės kelio ruože Nr. 2 – nuo 50 kN apkrovos deformacinių siūlių apkrovos perdavimo koeficientas kinta nuo 53 % iki 100 %, vidurkis 75 %, vidutinis standartinis nuokrypis 18 %. Šumsko pl. 96 objekte – nuo 50 kN apkrovos deformacinių siūlių apkrovos perdavimo koeficientas kinta nuo 29 % iki 82 %, vidurkis 64 %, vidutinis standartinis nuokrypis 20 %. Graičiūno g. 36D – nuo 50 kN apkrovos deformacinių siūlių apkrovos perdavimo koeficientas kinta nuo 70 % iki 95 %, vidurkis 87 %, vidutinis standartinis nuokrypis 7 %. Rajoniniame kelyje Nr. 4415 – nuo 50 kN apkrovos deformacinių siūlių apkrovos perdavimo koeficientas kinta nuo 85 % iki 89 %, vidurkis 88 %, vidutinis standartinis nuokrypis 1 %.



2.19 pav. Deformacinių siūlių apkrovos perdavimo efektyvumas nuo 50 kN apkrovos
Fig. 2.19. Load transfer efficiency of deformation joints from 50 kN load



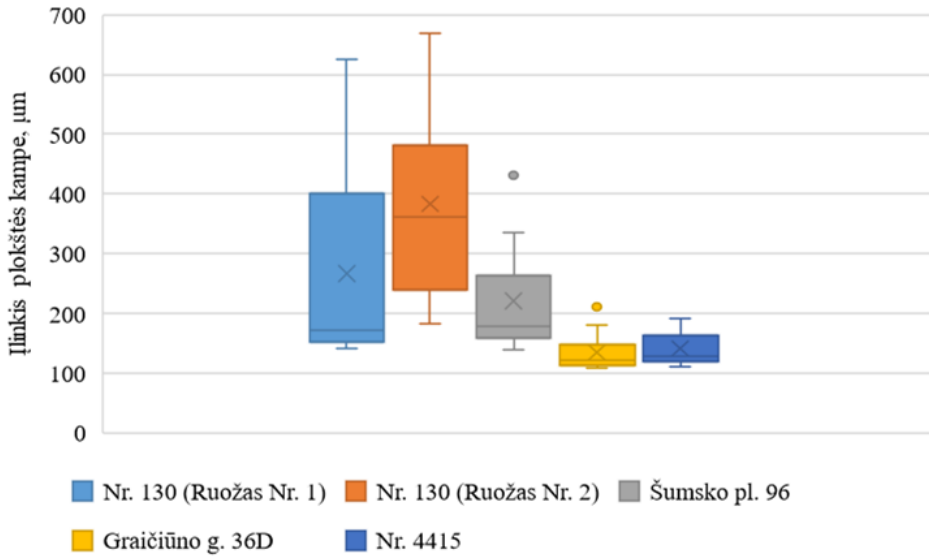
2.20 pav. Deformacinių siūlių apkrovos perdavimo efektyvumas nuo 100 kN apkrovos
Fig. 2.20. Load transfer efficiency of deformation joints from 100 kN load

Atsižvelgiant į atliktą tyrimą, vietinės reikšmės kelio ruože Nr. 1 – nuo 100 kN apkrovos deformacinių siūlių apkrovos perdavimo koeficientas kinta nuo

39 % iki 87 %, vidurkis 65 %, vidutinis standartinis nuokrypis 16 %. Vietinės reikšmės kelio ruože Nr. 2 – nuo 100 kN apkrovos deformacinių siūlių apkrovos perdavimo koeficientas kinta nuo 52 % iki 98 %, vidurkis 72 %, vidutinis standartinis nuokrypis 15 %. Šumsko pl. 96 objekte – nuo 100 kN apkrovos deformacinių siūlių apkrovos perdavimo koeficientas kinta nuo 40 % iki 84 %, vidurkis 66 %, vidutinis standartinis nuokrypis 15 %. Graičiūno g. 36D – nuo 100 kN apkrovos deformacinių siūlių apkrovos perdavimo koeficientas kinta nuo 88 % iki 92 %, vidurkis 90 %, vidutinis standartinis nuokrypis 2 %. Rajoniniame kelyje Nr. 4415 – nuo 100 kN apkrovos deformacinių siūlių apkrovos perdavimo koeficientas kinta nuo 47 % iki 88 %, vidurkis 84 %, vidutinis standartinis nuokrypis 13 %.

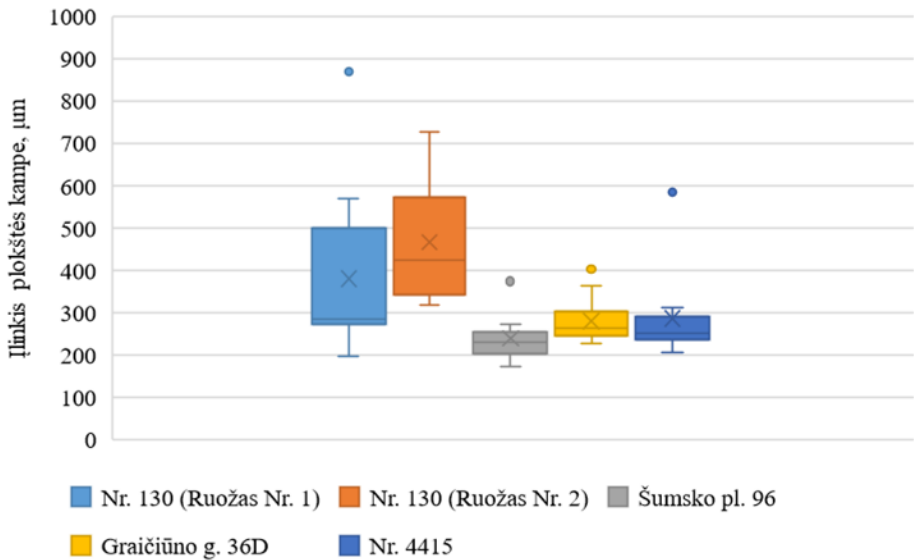
2.3.5. Pagrindo erozijos tyrimo rezultatai

Erozijos pagrindo tyrimas natūriniuose objektuose atliktas 2024 m. balandžio mėn. Tyrimo metu buvo nustatyti dangos paviršiaus įlinkiai betoninių plokščių kampuose. Tyrimas atliktas dviejuose objektuose, kuriuose įrengta RCC dangos konstrukcija ant skaldos pagrindo sluoksnio (kelias Nr. 4415 ir Graičiūno g. 36D), dviejuose skirtinguose kelio Nr. 130 ruožuose, kuriuose įrengta RCC danga ant hidrauliniu rišikliu bei jonų mainus gerinančiu priedu sustiprintų gruntų pagrindo sluoksnio (kelio Nr. 130 ruožas Nr. 1 ir Nr. 2), ir viename objekte, kuriame įrengtas slankiojo betono danga ant hidrauliniu rišikliu bei jonų mainus gerinančiu priedu sustiprintų gruntų pagrindo sluoksnio (Šumsko pl. 96). Paviršiaus įlinkiai betoninių plokščių kampuose išmatuoti krintančiojo svorio deflektometru imituojant 50 kN bei 100 kN apkrovą. Paviršiaus įlinkių betoninių plokščių kampuose tyrimo rezultatai nuo 50 kN apkrovos pateikti 2.21 paveiksle, nuo 100 kN – 2.22 paveiksle. Atsižvelgiant į atliktą tyrimą, vietinės reikšmės kelio ruože Nr. 1 – nuo 50 kN apkrovos dangos paviršiaus įlinkiai betoninių plokščių kampuose kinta nuo 142 μm iki 625 μm , vidurkis 266 μm , vidutinis standartinis nuokrypis 166 μm . Vietinės reikšmės kelio ruože Nr. 2 – nuo 50 kN apkrovos dangos paviršiaus įlinkiai betoninių plokščių kampuose kinta nuo 183 μm iki 668 μm , vidurkis 383 μm , vidutinis standartinis nuokrypis 163 μm . Šumsko pl. 96 objekte – nuo 50 kN apkrovos dangos paviršiaus įlinkiai betoninių plokščių kampuose kinta nuo 138 μm iki 432 μm , vidurkis 221 μm , vidutinis standartinis nuokrypis 94 μm . Graičiūno g. 36D – nuo 50 kN apkrovos dangos paviršiaus įlinkiai betoninių plokščių kampuose kinta nuo 109 μm iki 210 μm , vidurkis 135 μm , vidutinis standartinis nuokrypis 34 μm . Rajoniniame kelyje Nr. 4415 – nuo 50 kN apkrovos dangos paviršiaus įlinkiai betoninių plokščių kampuose kinta nuo 112 μm iki 192 μm , vidurkis 141 μm , vidutinis standartinis nuokrypis 27 μm .



2.21 pav. Betono plokštės kampo įlinkių stačiakampė diagrama (50 kN)

Fig. 2.21. Box plot diagram of concrete slab's corner deflection (50 kN)



2.22 pav. Betono plokštės kampo įlinkių stačiakampė diagrama (100 kN)

Fig. 2.22. Box plot diagram of concrete slab's corner deflection (100 kN)

Atsižvelgiant į atliktą tyrimą, vietinės reikšmės kelio ruože Nr. 1 – nuo 100 kN apkrovos dangos paviršiaus įlinkiai betoninių plokščių kampuose kinta nuo 197 μm iki 869 μm , vidurkis 380 μm , vidutinis standartinis nuokrypis 205 μm . Vietinės reikšmės kelio ruože Nr. 2 – nuo 100 kN apkrovos dangos paviršiaus įlinkiai betoninių plokščių kampuose kinta nuo 318 μm iki 728 μm , vidurkis 466 μm , vidutinis standartinis nuokrypis 148 μm . Šumsko pl. 96 objekte – nuo 100 kN apkrovos dangos paviršiaus įlinkiai betoninių plokščių kampuose kinta nuo 173 μm iki 375 μm , vidurkis 239 μm , vidutinis standartinis nuokrypis 55 μm . Graičiūno g. 36D – nuo 100 kN apkrovos dangos paviršiaus įlinkiai betoninių plokščių kampuose kinta nuo 229 μm iki 402 μm , vidurkis 281 μm , vidutinis standartinis nuokrypis 57 μm . Rajoniniame kelyje Nr. 4415 – nuo 100 kN apkrovos dangos paviršiaus įlinkiai betoninių plokščių kampuose kinta nuo 206 μm iki 584 μm , vidurkis 287 μm , vidutinis standartinis nuokrypis 108 μm .

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Remiantis vietinės reikšmės kelio Nr. 130 dangos konstrukcijoje įrengtų temperatūros ir drėgnio jutiklių 2022–2023 m. laikotarpio duomenų analize, nustatyta, jog vidutinė savaitės temperatūra CTB sluoksnio apačioje kito nuo $-2,99\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $27,67\text{ }^{\circ}\text{C}$, RCC apačioje kito nuo $-7,34\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $31,74\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tuo tarpu vidutinis savaitės drėgnis CTB sluoksnio apačioje kito nuo 6,39 % iki 12,64 %. Temperatūros ir drėgnio duomenys buvo stebėti dvejus metus (2022 m. ir 2023 m.) dviejose skirtingose vietinės reikšmės kelio Nr. 130 vietose (PK 14+00 ir PK 15+00), duomenys buvo registruojami kiekvieną valandą ir kiekvieną dieną su nežymiais tarpais dėl techninių kliūčių.
1. Remiantis vietinės reikšmės kelio Nr. 130 dangos konstrukcijos laikomosios gebos tyrimais, kurie buvo atlikti 2021 m. rugpjūčio ir 2022 m. kovo mėn. nustatyta, kad skirtingų eismo juostų dangos konstrukcijos laikomoji geba skiriasi apie 10 %.
2. Atsižvelgiant į ekvivalentinės standartinės ašies apkrovos dydį, išmatuotos deformacijos voluojamojo betono sluoksnio apačioje imitavus 50 kN apkrovą (vieno rato apkrovą) krintančiojo svorio deflektometru. Užfiksuota deformacija voluojamojo betono sluoksnio apačioje nuo 50 kN apkrovos, imituotos krintančiojo svorio deflektometru, buvo 37 $\mu\text{ε}$. Faktiniai įtempiai voluojamojo betono sluoksnio apačioje yra lygūs 1,40 MPa.
3. Remiantis deformacinių siūlių apkrovos perdavimo keoficiento tyrimais, atliktais 2024 m. pavasarį, keturiuose skirtinguose objektuose

(penkiose skirtingose dangos konstrukcijose) nustatyta, kad voluojamojo betono deformacinių siūlių, suformuotų įpjauant 1/3–1/2,5 dangos storio, apkrovos perdavimo efektyvumas, dangos konstrukciją apkraunant 50 kN apkrova, siekia 32–100 % (SN 17 %); apkraunant 100 kN apkrova – 39–98 % (SN 16%). Tuo tarpu slankiojo betono deformacinių siūlių apkrovos perdavimo efektyvumas, dangos konstrukciją apkraunant 50 kN apkrova, siekia 29–82 % (SN 20 %); apkraunant 100 kN apkrova – 40–84 % (15 %).

4. Remiantis pagrindo erozijos tyrimais, atliktais 2024 m. pavasarį, keturiuose skirtinguose objektuose (penkiose skirtingose dangos konstrukcijose) nustatyta, kad didžiausiais dangos paviršiaus įlinkiais betoninių plokščių kampuose nuo 50 kN apkrovos pasižymėjo vietinės reikšmės kelio Nr. 130 ruožas Nr. 2 (vidurkis 383 μm , vidutinis standartinis nuokrypis 163 μm), mažiausiai – Graičiūno g. 36D (vidurkis 135 μm , vidutinis standartinis nuokrypis 34 μm).

3

Voluojamojo betono dangos ant hidrauliniiais rišikliais surištų gruntų pagrindo sluoksnio įtempių ir deformacijų ribiniai būviai

Šiame skyriuje pateikiama RCC dangos konstrukcijos, įrengtos ant viršutinio pagrindo sluoksnio iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, skaičiuojamoji schema, kuri yra grindžiama faktinėmis dangos konstrukcijos mechaninėmis savybėmis, nustatytais atliktais eksperimentiniais tyrimais bei vykdyta dangos konstrukcijos sluoksnių įrengimo kontrole, statant objektą. Taip pat, atsižvelgiant į pagrindo tipą, pagrindo sluoksnio ir RCC mechanines savybes bei projektinę apkrovą A , yra pateikiami rekomendaciniai RCC dangos konstrukcijų variantai, kurie grindžiami skaičiuojamąja schema. Skyriuje pateikiami reikalavimai dangos konstrukcijos sluoksniams ir kontrolė dangos konstrukcijos sluoksnių įrengimui, užtikrinant dangos konstrukcijos atsparumą bei sumažinant neigiamą deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos poveikį dangos konstrukcijos funkcionavimui projektiniu naudojimo laikotarpiu. Skyriaus tematika paskelbtas 1 straipsnis (Vaitkus et al., 2023).

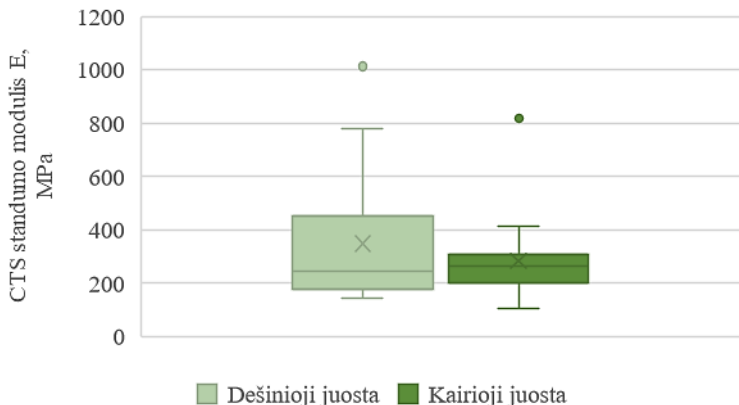
3.1. Skaičiuojamosios dangos konstrukcijos schemos sudarymas ir vietinės reikšmės kelio Nr. 130 teorinių įtempių apskaičiavimas

Teoriniai įtempiai voluojamojo betono sluoksnio apačioje apskaičiuoti taikant MN LAYER (Khazanovich & Wang, 2008) programą. Sudarant skaičiuojamąją dangos konstrukcijos schemą naudoti duomenys:

- projektiniai dangos konstrukcijos sluoksnių storai;
- voluojamojo betono standumo modulis, apskaičiuotas iš faktinio lenkiamojo stiprio, nustatyto objekto rekonstravimo metu;
- apatinio ir viršutinio pagrindo sluoksnio iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais (CTS ir CTB), standumo moduliai, apskaičiuoti atliekant atgalinio dangos konstrukcijos sluoksnių standumo modulių skaičiavimus (angl. *backcalculation*), naudojant vietinės reikšmės kelio Nr. 130 laikomosios gebos matavimų duomenis;
- natūralios žemės sankasos tipinį standumo modulį.

3.1.1. Apatinio pagrindo sluoksnio skaičiuojamųjų parametru įvertinimas

Dangos konstrukcijos laikomosios gebos matavimai ant apatinio pagrindo sluoksnio iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais (CTS), atikti 2021 m. birželio 10 d.



3.1 pav. CTS standumo modulio stačiakampė diagrama
Fig. 3.1. Box plot diagram of CTS modulus of elasticity

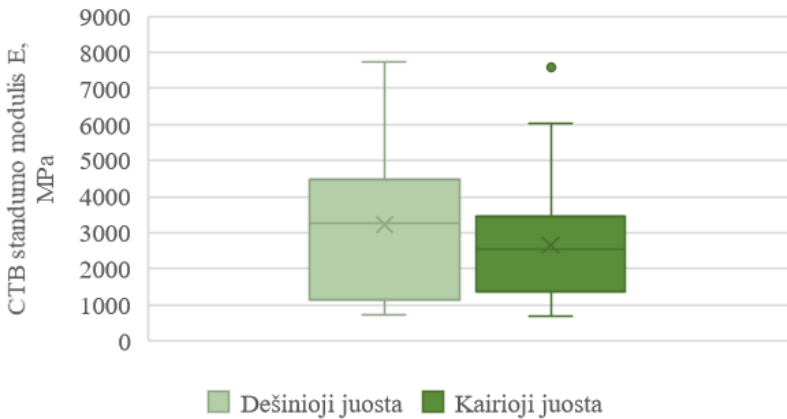
Atliekant tyrimą, laikomoji geba krintančiojo svorio deflektometru pamatuota 48 taškuose. Atsižvelgiant į atliktą tyrimą ir panaudojant išmatuotus įlinkius ant apatinio pagrindo sluoksnio iš gruntų, surištų hidraulinių rišikliais ir kitais priedais (CTS), apskaičiuoti minėtojo sluoksnio standumo moduliai. CTS standumo moduliai apskaičiuoti automatizuota skaičiavimo programa ELMOD6, taikant „*Deflection Basin Fit*“ skaičiavimo algoritmą (Backcalculation of..., 2021). Apskaičiuoto CTS standumo modulio rezultatai pateikti 3.1 paveiksle.

Atsižvelgiant į CTS sluoksnio standumo modulio skaičiavimus, nustatyta, kad nagrinėjamame vietinės reikšmės kelio Nr. 130 ruože CTS sluoksnio standumo modulis kinta nuo 103 MPa iki 1013 MPa, vidurkis – 314 MPa, vidutinis standartinis nuokrypis – 191 MPa. Vadovaujantis atlikta CTS sluoksnio standumo modulio statistinių rodiklių analize, skaičiuojamojoje dangos konstrukcijos schemoje imamas 300 MPa CTS sluoksnio standumo modulis *E*. Atlikus CTS sluoksnio standumo modulio analizę, taip pat nustatyti neįžymūs skirtumai tarp kairiosios ir dešinėsios eismo juostų. Minėtiems skirtumams galėjo turėti įtakos gruntų nehomogeniškumas ir sluoksnio įrengimo technologiskumo vienodumo neužtikrinimas (vandens ir cemento kiekio, gruntų drėgno ir pan.).

3.1.2. Viršutinio pagrindo sluoksnio skaičiuojamųjų parametru įvertinimas

Dangos konstrukcijos laikomosios gebos matavimai ant viršutinio pagrindo sluoksnio iš gruntų, surištų hidraulinių rišikliais ir kitais priedais (CTB), atikti 2021 m. birželio 23 d. Atliekant tyrimą, laikomoji geba krintančiojo svorio deflektometru pamatuota 80 taškų. Atsižvelgiant į atliktą tyrimą, panaudojant išmatuotus įlinkius ant viršutinio pagrindo sluoksnio iš gruntų, surištų hidraulinių rišikliais ir kitais priedais (CTB), apskaičiuoti minėtojo sluoksnio standumo moduliai. CTB standumo moduliai apskaičiuoti automatizuota skaičiavimo programa ELMOD6, taikant „*Deflection Basin Fit*“ skaičiavimo algoritmą (Backcalculation of..., 2021). Apskaičiuoto CTB standumo modulio rezultatai pateikti 3.2 paveiksle.

Atsižvelgiant į CTB sluoksnio standumo modulio skaičiavimus, nustatyta, kad nagrinėjamame vietinės reikšmės kelio Nr. 130 ruože CTB sluoksnio standumo modulis kinta nuo 687 MPa iki 7738 MPa, vidurkis – 2901 MPa, vidutinis standartinis nuokrypis – 1799 MPa. Vadovaujantis atlikta CTS sluoksnio standumo modulio statistinių rodiklių analize, skaičiuojamojoje dangos konstrukcijos schemoje imama 1100 MPa CTB sluoksnio standumo modulio *E* vertė, kuri apskaičiuota nuo vidurkio atėmus vieną standartinį nuokrypį.



3.2 pav. CTB standumo modulio stačiakampė diagrama
Fig. 3.2. Box plot diagram of CTB modulus of elasticity

Atlikus CTB sluoksnio standumo modulio analizę, taip pat nustatyti nežymūs skirtumai tarp kairiosios ir dešinėsios eismo juostų. Minėtiems skirtumams įtakos galėjo turėti gruntų nehomogeniškumas ir sluoksnio įrengimo technologiškumo vienodumo neužtikrinimas (vandens ir cemento kiekio, gruntų drėgno ir pan.).

3.1.3. Teorinių įtempių apskaičiavimas

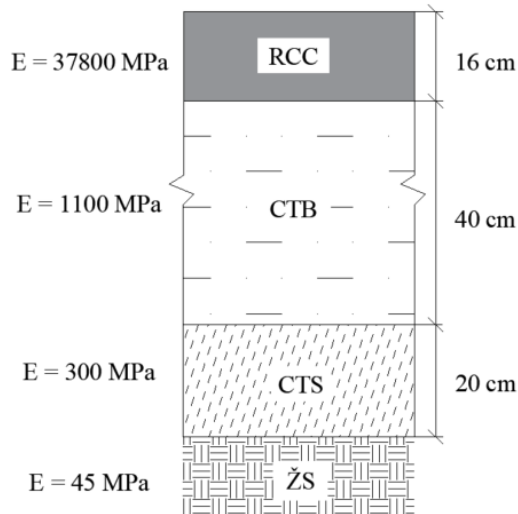
Skaičiuojamoji dangos konstrukcijos schema, sudaryta atsižvelgiant į faktines dangos konstrukcijos mechanines savybes (perskaičiuotus sluoksnių standumo modulius, RCC lenkiamąjį stiprį ir kt.), pateikta 3.3 paveiksle. Skaičiuojamojoje dangos konstrukcijoje pateiktos mechaninės savybės gali būti taikomos dangos konstrukcijos projektavimo metu nepriklausomai nuo statybos rūšies.

Teoriniai įtempiai RCC ir CTB apačioje apskaičiuoti atsižvelgiant į sudarytą skaičiuojamąją dangos konstrukcijos schemą. Teoriniai įtempiai RCC ir CTB apačioje apskaičiuoti taikant MN LAYER (Khazanovich & Wang 2008) programą, rezultatai pateikti 3.1 lentelėje.

Įtempiai voluojamojo betono apačioje apskaičiuoti pagal (3.1) formulę:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (3.1)$$

čia σ – įtempiai, MPa; E – standumo modulis, MPa; ε – deformacija.



3.3 pav. Skaičiuojamoji dangos konstrukcijos schema
Fig. 3.3. Computational scheme of pavement structure

3.1 lentelė. Teorinė schema grįšti įtempiai RCC ir CTB sluoksnio apačioje
Table 3.1. Computational scheme-based stresses at the bottom of RCC and the CTB layer

Apkrova, kN	Įtempiai RCC apačioje, MPa	Įtempiai CTB apačioje, MPa
50	2,03	0,088
100	4,06	0,176
200	8,11	0,351

Atlikus faktinius įtempių, nustatytų iš deformacijų jutiklių, įrengtų vietinės reikšmės kelyje Nr. 130, voluojamojo betono apačioje ir teorinių įtempių, apskaičiuotų pagal sudarytą skaičiuojamąją dangos konstrukcijos schemą, kurios mechaninės savybės yra grindžiamos vietinės reikšmės kelyje Nr. 130 atliktais eksperimentiniais tyrimais, palyginimą, nustatyta, jog nuo 50 kN apkrovos (vieno rato apkrovos) faktiniai įtempiai (1,40 MPa) voluojamojo betono apačioje yra 31 % mažesni negu teoriniai įtempiai (2,03 MPa).

3.2. Voluojamojo betono dangos ant viršutinio pagrindo sluoksnio iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, nuovargio funkcijų pritaikymas remiantis eksperimentinio tyrimo rezultatais

Voluojamojo betono dangos ant viršutinio pagrindo sluoksnio iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, nuovargio funkcijos pritaikytos atsižvelgiant į atliktus eksperimentinius tyrimus vietinės reikšmės kelyje Nr. 130 ir įvertinant įrengtos dangos konstrukcijos projektinius dangos konstrukcijos spredinius.

Vadovaujantis vietinės reikšmės kelio Nr. 130 projektine dokumentacija, dangos konstrukcijos projektinė apkrova *A* apskaičiuota pagal KPT SDK 19 2 metodą ir yra lygi 1,13 mln. ribiniam 10 t ekvivalentinės standartinės ašies apkrovos pravažiavimų skaičiui. Dangos konstrukcijos skaičiavimai buvo atlikti taikant ACPA sukurtą skaičiavimo algoritmą (Roden, 2014), nuovargio plyšių (3.2) funkciją bei deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos (3.3) funkciją.

$$\log N_f = \left[\frac{-SR^{-10,24} \cdot \log(1-P)}{0,0112} \right]^{0,217}, \quad (3.2)$$

čia N_f – leistinasis apkrovų pasikartojamumas; SR – įtempių santykis; P – suirimo tikimybė.

$$\log N_f = 14,524 - 6,777 \cdot (C_1 \cdot P - 9)^{0,103} - \log C_2, \quad (3.3)$$

čia N_f – leistinasis apkrovų pasikartojamumas; C_1 – pagrindo medžiagiškumą įvertinantis koeficientas (nesurištojo pagrindo atveju C_1 yra lygus 1, surištojo pagrindo atveju – 0,9); C_2 – koeficientas, įvertinantis betono krašto praplatinimą (esant praplatintam betono kraštui, C_2 yra lygus 0,94, nepraplatinto betono krašto atveju – 0,06); P – laikomosios gebos koeficientas (angl. *rate of power*).

Laikomosios gebos koeficientas (angl. *rate of power*) apskaičiuojamas pagal (3.4) formulę:

$$P = 268,7 \cdot \frac{(k \cdot w)^2}{hk^{0,73}}, \quad (3.4)$$

čia P – laikomosios gebos koeficientas (angl. *rate of power*); w – įlinkis plokštės kampe, m; h – betono plokštės storis, m; k – reikšmė, įvertinanti sluoksnių, esančių po betono plokšte, stiprumą, MPa.

Vietinės reikšmės kelio Nr. 130 dangos konstrukcijos įvesties duomenys pateikti 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Dangos konstrukcijos įvesties duomenys**Table 3.2.** Input data of the pavement structure

Parametras	Reikšmė
Žemės sankasos CBR	5 %
Nuovargio plyšių kiekis projektinio naudojimo laikotarpio pabaigoje nuo viso dangos ploto ¹⁾	15 %
k reikšmė	209,8 MPa/m
RCC lenkiamasis stipris	5,5 MPa
Projektinis naudojimo laikotarpis	20 m.
Projektinė apkrova A (ekvivalentinių standartinių (10 t svorio) ašių apkrovų)	1,13 mln. ESAs
Kaiščiai	–

*Pastabos:*¹⁾ Priimtas atsižvelgiant į vietinės reikšmės kelio funkcinę paskirtį vadovaujantis *StreetPave* modelio projektavimo gairėmis (Use of..., 2012).

Vietinės reikšmės kelio Nr. 130 dangos konstrukcijos išvesties duomenys pateikti 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. Dangos konstrukcijos išvesties duomenys**Table 3.3.** Output data of the pavement structure

Parametras	Reikšmė
Tikėtinas apkrovos pasikartojimas ¹⁾	0,47 mln.
Įtempių santykis (SR)	0,36
Leistinis apkrovos pasikartojimas pagal nuovargio plyšių analizę	Neribotas
Laikomosios gebos koeficientas (P) ²⁾	59,36
Leistinis apkrovos pasikartojimas pagal deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos analizę	0,54 mln.
Mažiausias reikalaujamas RCC sluoksnio storis	15,5 cm
Projektinis RCC sluoksnio storis	16 cm

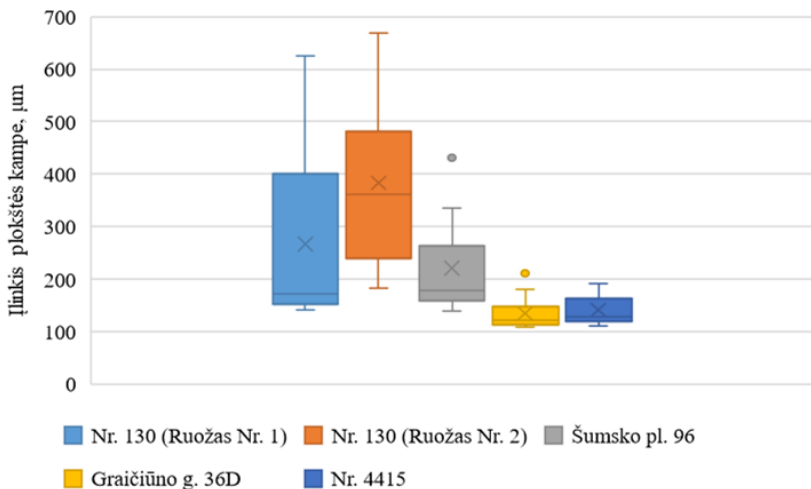
Pastabos: ¹⁾ Tikėtini apkrovos, sukeliančios 2,45 ESA, pasikartojimai per 20 metų projektavimo laikotarpį. ²⁾ Laikomosios gebos koeficientas (P) apskaičiuojamas atsižvelgiant į plokštės įlinkį kampe, plokštės slėgį į pagrindo sluoksnį, betono standumo modulį, betono Puasono koeficientą, k reikšmę.

Atsižvelgiant į vietinės reikšmės kelio Nr. 130 projektinės dangos konstrukcijos duomenis (3.3 lentelė) ir apskaičiuotus teorinius įtempius RCC

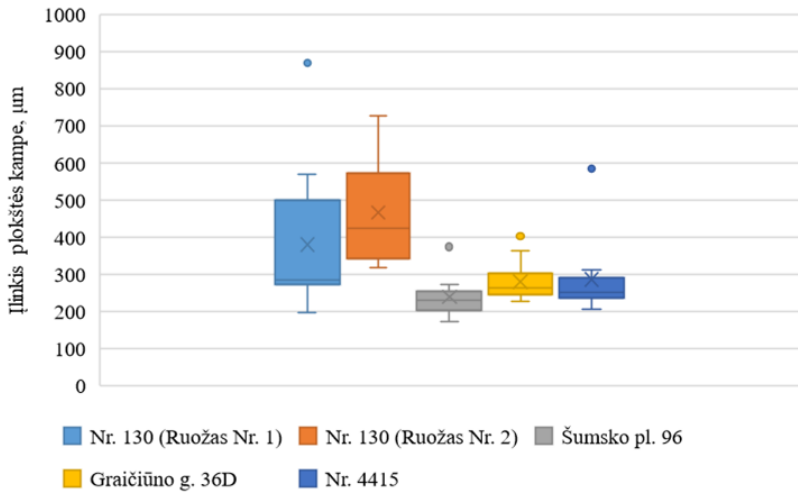
sluoksniu apačioje, galima teigti, kad RCC dangos konstrukcijoms, įrengtoms ant viršutinio pagrindo sluoksniu iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, kritiškiausia yra deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos analizė. Be to, 31 % mažesni faktiniai už teorinius įtempius RCC apačioje sumažina plyšių nuovargio funkcijoje naudojamą įtempių santykį (SR) ir kartu užtikrina didesnę dangos konstrukcijos atsparumą nuovargio plyšių susidarymui. Įvertintinant tai, kas anksčiau išdėstyta, RCC dangoms, įrengtoms ant viršutinio pagrindo sluoksniu iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, nuovargio funkcija pritaikyta nagrinėjamai dangos konstrukcijai, įvertinant tik deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos neigiamą poveikį dangos konstrukcijos funkcionavimui projektiniu naudojimo laikotarpiu.

3.2.1. Deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos nuovargio funkcija

Deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos nuovargio funkcijos esminis kintamasis yra dangos paviršiaus įlinkis plokštės kampe. Atsižvelgiant į ekvivalentinį standartinės ašies apkrovos dydį, krintančiojo svorio deflektometru išmatuoti dangos paviršiaus įlinkiai plokščių kampuose – nuo 50 kN ir 100 kN apkrovos (2.1.2. ir 2.2.5 poskyriai). Deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos tyrimo susisteminti statistiniai rodikliai nuo 50 kN apkrovos pateikti 3.4 pav., nuo 100 kN apkrovos – 3.5 pav.



3.4 pav. Betonų plokštės kampo įlinkių stačiakampė diagrama (50 kN)
Fig. 3.4. Box plot diagram of concrete slab's corner deflection (50 kN)



3.5 pav. Betono plokštės kampe įlinkių stačiakampė diagrama (100 kN)

Fig. 3.5. Box plot diagram of concrete slab's corner deflection (100 kN)

Atsižvelgiant į skirtingą nagrinėjamųjų objektų dangos konstrukcijų sudėtį, medžiagiškumą, sluoksnių mechanines savybes (2.6 pav. ir 2.1 lentelėje) ir apskaičiuotas apatinių kvartilų (Q3) vertes (3.4 ir 3.5 pav.), priimti ribiniai dangos paviršiaus įlinkiai plokštės kampe, kurie panaudoti deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos nuovargio funkcijoje. Ribiniai dangos paviršiaus įlinkiai plokštės kampe, atsižvelgiant į skirtingą dangos konstrukcijos sudėtį ir savybes, pateikti 3.4 lentelėje.

3.4 lentelė. Ribiniai dangos paviršiaus įlinkiai plokštės kampe

Table 3.4. Marginal pavement surface deflection at the corner of the slab

RCC lenkiamasis stipris, MPa	Pagrindo tipas	Ribiniai įlinkiai, µm (50 kN)	Ribiniai įlinkiai, µm (100 kN)
5,6	CTB	358	432
6,5	SPS	156	279
7,0	CTB	235	247

Deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos nuovargio skaičiavimai atlikti įvertinant ribinius dangos paviršiaus įlinkius plokštės kampe, pateiktus 3.4 lentelėje, bei įvertinant tarpinius ribinius įlinkius, apskaičiuotus pagal Yang (2004) išvestas priklausomybes tarp įlinkio plokštės kampe dydžio ir betono sluoksnio storio ir (arba) lenkiamojo stiprio padidėjimo.

3.5 lentelė. Deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos nuovargio funkcijos skaičiavimo rezultatai

Table 3.5. Results of calculation of faulting/erosion fatigue function

Pagrindo sluoksnis	k reikšmė, MPa/m	RCC lenkiamasis stipris, MPa	RCC storis, cm	Ribinis įlinkis, μm		P	
				50 kN	100 kN	50 kN	100 kN
CTB	235	5,5	16	358	432	45,64	66,46
			18	315	380	31,41	45,71
			19	293	358	25,75	38,44
		6,5	16	293	355	30,57	44,88
			18	258	312	21,07	30,81
			19	240	294	17,27	25,92
CTB	235	6,5	16	293	355	30,57	44,88
			18	258	312	21,07	30,81
			19	240	294	17,27	25,92
		7,0	16	265	277	25,01	27,32
			18	235	247	17,48	19,31
			19	217	233	14,12	16,28
SPS	115	5,5	16	207	370	6,15	19,65
			18	184	330	4,32	13,90
			19	174	311	3,66	11,69
		6,5	16	175	313	4,40	14,07
			18	156	279	3,11	9,93
			19	147	263	2,61	8,36
		7,0	16	153	285	3,36	11,66
			18	136	254	2,36	8,23
			19	129	240	2,01	6,96

Deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos nuovargio funkcijos skaičiavimo rezultatai pagal (3.3) formulę pateikti 3.5 lentelėje.

3.3. Voluojamojo betono dangos konstrukcijų sprendiniai ir sluoksniams keliami reikalavimai

Šitame poskyryje pateikti RCC dangos konstrukcijų sprendiniai yra grindžiami atliktais eksperimentiniais tyrimais, įvertinant RCC dangos konstrukcijų, įrengtų ant pagrindo sluoksnio iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, hidroterminio režimo poveikį, RCC atsparumo nuovargio plyšių vystymuisi veikiant transporto priemonių apkrovai, RCC deformacinių siūlių funkcionavimą perduodant apkrovas tarp skirtingų sudalintų plotų ir skirtingo pagrindo medžiagiškumo atsparumą deformacinių siūlių deformacijoms ir pagrindo erozijai.

Poskyryje pateikti RCC dangos konstrukcijų sprendiniai gali būti taikomi didelės apkrovos zonose (pavyzdžiui, intermodaliniuose terminaluose, karinio mobilumo objektuose) ir mažesnio važiavimo komforto lygio statiniuose, užtikrinant dangos lygumą $IRI \leq 2,0$ m/km, tai yra vietinės reikšmės ir valstybinės reikšmės rajoniniai keliai, kurių vidutinis metinis paros eismo intensyvumas (VMPEI) < 1000 transporto priemonės per parą, leistinasis važiavimo greitis ≤ 90 km/h.

3.3.1. Voluojamojo betono dangos konstrukcijos

Priklausomai nuo projektinės apkrovos A ir RCC lenkiamojo stiprio, RCC dangos konstrukcijų ant CTB ir CTS arba AŠAS sluoksnių storiai pateikti 3.6 lentelėje, RCC ant SPS ir AŠAS – 3.7 lentelėje. Pateikti dangos konstrukcijų sprendiniai apima 5,5, 6,5 bei 7,0 MPa RCC lenkiamuosius stiprius, t. y. RCC mišiniams būdingi lenkiamieji stipriai. 3.6 ir 3.7 lentelėse pateikti storiai įvertina tik dangos konstrukcijos laikomąją gebą. Šalčiui atsparios dangos konstrukcijos storis turi būti apskaičiuojamas vadovaujantis KPT SDK 19 nuostatomis. Kada žemės sankasos gruntai šalčiui atsparios dangos konstrukcijos stovyje atitinka F1 jautrumo šalčiui klasę pagal LST 1331:2022, CTS arba AŠAS sluoksniai nebūtini. Be to, atsižvelgiant į projektuojamųjų statinių funkcinę paskirtį, CTB ir CTS sluoksnių atsparumą drėgnio svyravimams ir laikomosios gebos stabilumui nepriklausomai nuo sezoniškumo, išlaikant dangos paviršiaus nelygumą ≤ 10 mm, matuojant pleištu po 3 m ilgio liniuote, gali būti svarstytinas šalčiui atsparios dangos konstrukcijos storio sumažinimas iki 25 %.

3.6 lentelė. Rekomendacinės skaičiuojamąja schema grindžiamos RCC dangos konstrukcijos ant CTB ir CTS arba AŠAS

Table 3.6. Recommended computational scheme-based RCC pavement structures on CTB and CTS or a frost-resistant layer

Eil. Nr.	Dangų konstrukcijų klasė	DK 100	DK 32	DK 10	DK 3	DK 2	DK 1	DK 0,3	DK 0,1
	Projektinė apkrova A (ESAs), mln.	>32	>10–32	>3,0–10	>2,0–3,0	>1,0–2,0	>0,3–1,0	>0,1–0,3	≤0,1 ¹⁾
1.1.	Voluojamojo betono RCC lenkiamasis stipris 5,5 MPa								
	RCC, cm	25	23	21	18	17	16	14	13
	CTB, cm	45	45	45	45	45	45	45	45
	CTS arba AŠAS ²⁾³⁾⁴⁾	Storis parenkamas atsižvelgiant į šalčiui atsparios dangos konstrukcijos storį pagal KPT SDK 19 reikalavimus							
1.2.	Voluojamojo betono RCC lenkiamasis stipris 6,5 MPa								
	RCC, cm	24	22	20	17	17	15	13	12
	CTB, cm	45	45	45	45	45	45	45	45
	CTS arba AŠAS ²⁾³⁾⁴⁾	Storis parenkamas atsižvelgiant į šalčiui atsparios dangos konstrukcijos storį pagal KPT SDK 19 reikalavimus							
1.3.	Voluojamojo betono RCC lenkiamasis stipris 7,0 MPa								
	RCC, cm	24	22	19	17	16	15	13	12
	CTB, cm	45	45	45	45	45	45	45	45
	CTS arba AŠAS ²⁾³⁾⁴⁾	Storis parenkamas atsižvelgiant į šalčiui atsparios dangos konstrukcijos storį pagal KPT SDK 19 reikalavimus							

Pastabos: ¹⁾ Jeigu ESAs <0,05 mln., lengvojo transporto apkrovos zonos (pavyzdžiui, stovėjimo aikštelėse) su pavienėmis aptarnaujančiojo transporto apkrovomis gali būti įrengiamas 9 cm storio RCC sluoksnis. ²⁾ Kai dangos konstrukcija atitinka DK 2–DK 100, šalčiui atsparios dangos konstrukcijos storiui kompensuoti turi būti naudojamas apatinis pagrindo sluoksnis iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais (CTS). ³⁾ Taikant CTS sluoksnį, sluoksnio storis turi būti ne mažesnis kaip 25 cm. ⁴⁾ Taikant CTS sluoksnį, CTB sluoksnio storis gali būti sumažinamas iki 40 cm, padidinant 10 cm CTS sluoksnio storį.

3.7 lentelė. RCC dangos konstrukcijos sprendiniai ant SPS ir AŠAS**Table 3.7.** RCC pavement structures on crushed aggregate base and a frost-resistant layer

Eil. Nr.	Dangų konstrukcijų klasė ¹⁾	DK 100	DK 32	DK 10	DK 3	DK 2	DK 1	DK 0,3	DK 0,1 ²⁾
	Projektinė apkrova A (ESAs), mln.	>32	>10–32	>3,0–10	>2,0–3,0	>1,0–2,0	>0,3–1,0	>0,1–0,3	≤0,1
2.1.	Voluojamojo betono RCC lenkiamasis stipris 5,5 MPa								
	RCC, cm	26	24	21	19	18	16	16	15
	SPS, cm	20	20	20	20	20	20	20	20
	AŠAS	Storis parenkamas atsižvelgiant į šalčiui atsparios dangos konstrukcijos storį pagal KPT SDK 19 reikalavimus							
2.2.	Voluojamojo betono RCC lenkiamasis stipris 6,5 MPa								
	RCC, cm	26	23	21	18	17	16	14	14
	SPS, cm	20	20	20	20	20	20	20	20
	AŠAS	Storis parenkamas atsižvelgiant į šalčiui atsparios dangos konstrukcijos storį pagal KPT SDK 19 reikalavimus							
2.3.	Voluojamojo betono RCC lenkiamasis stipris 7,0 MPa								
	RCC, cm	25	23	20	18	17	16	13	13
	SPS, cm	20	20	20	20	20	20	20	20
	AŠAS	Storis parenkamas atsižvelgiant į šalčiui atsparios dangos konstrukcijos storį pagal KPT SDK 19 reikalavimus							

Pastabos: ¹⁾ Turi būti taikomos KPT SDK 19 nuostatos dėl žemės sankasos gruntų sustiprinimo, pagerinimo ir pakeitimo poreikio. ²⁾ Jeigu ESAs <0,05 mln, lengvojo transporto apkrovos zonoje (pavyzdžiui, stovėjimo aikštelėse) su pavienėmis aptarnaujančio transporto apkrovomis gali būti įrengiamas 11 cm storio RCC sluoksnis.

3.6 ir 3.7 lentelėse pateiktos rekomendacinės skaičiuojamąja schema grindžiamos konstrukcijos, kurių patikimumas yra 80 % bei kurios po tam tikro laiko turi būti patikrintos. Be to, pateikti dangos konstrukcijų sprendiniai suprojektuoti įvertinant įrengto pagrindo sluoksnio laikomosios gebos, parametų variaciją, kada 95 % išmatuotų verčių atitinka keliamus reikalavimus. Tais atvejais, kada 90 % kontrolinių pagrindo sluoksnio laikomosios gebos parametų atitinka

keliamus reikalavimus, klojamo RCC mišinio lenkiamasis stipris turi būti padidintas 1 MPa.

3.3.2. Apatiniam pagrindo sluoksniui keliami reikalavimai

Apatinio pagrindo sluoksnio (CTS) iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, standumo modulis $E \geq 300$ MPa. Įrengiant CTS pagrindo sluoksnį, turi būti vadovaujama įrengimo taisyklėse IT ŽS 17 ir metodiniuose nurodymuose MN GPSR 12 pateiktomis darbų atlikimo nuostatomis. Gruntams apdoroti naudojamas cementas, atitinkantis standarto LST EN 197-1:2012 reikalavimus (tipas – CEM I, stiprumo klasė – 42,5 N, CEM II/A-P, stiprumo klasė – 52,5 N arba lygiavertis). Taip pat turi būti naudojamas grunto jonų mainus gerinantis priedas. Naudojamas skystas koncentruotas preparatas originaliose gamyklinėse pakuotėse, kurį prieš naudojant reikia praskiesti vandeniu pagal pateiktą instrukciją. Įprastai minimalus grynojo priedo kiekis sustiprintame (stabilizuotame) grunte priklausomai nuo grunto rūšies turi būti:

- 0,15 l/m³ grunto (taikomas grunto rūšims pagal LST 1331:2022 – ML, MV, MR).
- 0,2 l/m³ grunto (taikomas grunto rūšims pagal LST 1331:2022 – ŽB, ŽG, ŽP, SB, SG, SP, ŽD, ŽM, SD, SM, ŽD₀, ŽM₀, SD₀, SM₀, DL, DV, DR).

Dangos konstrukcijos reikalavimai apatiniam pagrindo sluoksniui (CTS) iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, pateikti 3.8 lentelėje.

3.8 lentelė. Reikalavimai apatiniam pagrindo sluoksniui (CTS) iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais

Table 3.8. Requirements for the lower base layer (CTS) of soils bound with cement and additives

Savybė	Reikalavimas	Pastabos
Stipris gniuždant	$\geq 1,0$ MPa	Gniuždomasis stipris nustatytas po 28 parų pagal standartą LST EN 13286-41 – bandiniai 14 parų laikomi drėgnoje aplinkoje ir 14 parų vandenyje. Po mirkymo atliekamas stiprio gniuždant bandymas.
Atsparumas šalčiui	Bandinių po šaldymo ir atšildymo ciklų bei referencinių bandinių (po 28 parų)	Atliekant atsparumo šalčiui bandymus, bandiniai laikomi 13 dienų drėgnoje aplinkoje, paskui 1 parą laikomi panardinti kambario temperatūros vandenyje, dar vėliau jiems taikoma 14 užšaldymo ir atšildymo ciklų. Vienu užšaldymo ir atšildymo ciklu bandiniai

3.8 lentelės pabaiga

Savybė	Reikalavimas	Pastabos
Deformacijos modulis E_{v2}	≥ 120 MPa	Deformacijos modulis nustatytas antruoju apkrovimo ciklu, spaudžiant sluoksni plokšte pagal LST 1360-5.
Deformacijos modulio E_{v2}/E_{v1} santykis arba Sutankinimo laipsnis D_{Pr}	$\leq 2,5^{1)}$ $\geq 98 \%^{1) 2)}$	–

Pastabos: ¹⁾ Matavimai atliekami iškart įrengus sluoksni. ²⁾ Gruntai prieš atliekant stabilizavimą turi pasiekti sutankinimo rodiklį $D_{Pr} \geq 100 \%$.

Jeigu statybinių medžiagų mišinių gamybai naudojamas ne geriamasis vanduo, tai statybos darbams atlikti numatomo naudoti vandens tinkamumas turi būti įrodomas. Nustatytu laiku prieš darbų pradžią rangovas turi įrodyti numatytą naudoti statybinių medžiagų ir jų mišinių bei gruntų tinkamumą, pateikdamas tinkamumo bandymų ataskaitą, kurią turi suderinti ir įvertinti techninę priežiūrą vykdančios asmenys. Tinkamumo (cemento kiekio) bandymai turi būti atliekami akredituotoje laboratorijoje. Rangovas pateikia tinkamumo bandymais nustatytą rišiklio kiekį, tuo prisiimdamas atsakomybę už tiesimo darbų kokybę.

3.3.3. Viršutiniam pagrindo sluoksniui keliami reikalavimai

Viršutinio pagrindo sluoksni (CTB) iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, standumo modulis $E \geq 1500$ MPa. Įrengiant CTB pagrindo sluoksni turi būti vadovaujamosi įrengimo taisyklėse IT ŽS 17 ir metodiniuose nurodymuose MN GPSR 12 pateiktomis darbų atlikimo nuostatomis. Gruntams apdoroti naudojamas cementas, atitinkantis standarto LST EN 197-1 reikalavimus (tipas – CEM I, stiprumo klasė – 42,5 N, CEM II/A-P, stiprumo klasė – 52,5 N arba lygiavertis). Taip pat turi būti naudojamas grunto jonų mainus gerinantis priedas. Naudojamas skystas koncentruotas preparatas originaliose gamyklinėse pakuotėse, kurį prieš naudojant reikia praskiesti vandeniu pagal pateiktą instrukciją. Įprastai minimalus grynojo priedo kiekis sustiprintame (stabilizuotame) grunte priklausomai nuo grunto rūšies turi būti:

- $0,2 \text{ l/m}^3$ grunto (taikomas grunto rūšims pagal LST 1331 – ŽB, ŽG, ŽP, SB, SG, SP, ŽD, ŽM, SD, SM, ŽD₀, ŽM₀, SD₀, SM₀, DL, DV, DR).

Dangos konstrukcijos reikalavimai viršutiniam pagrindo sluoksniui (CTB) iš gruntų, surištų hidrauliniiais rišikliais ir kitais priedais, pateikti 3.9 lentelėje.

3.9 lentelė. Reikalavimai viršutiniam pagrindo sluoksniui (CTB) iš gruntų, surištų hidrauliniais rišikliais ir kitais priedais

Table 3.9. Requirements for the upper base layer (CTB) of soils bound with cement and additives

Savybė	Reikalavimas	Pastabos
Stipris gniuždant	$\geq 2,5$ MPa	Gniuždomasis stipris nustatytas po 28 parų pagal standartą LST EN 13286-41 – bandiniai 14 parų laikomi drėgnoje aplinkoje ir 14 parų vandenyje. Po mirkymo atliekamas stiprio gniuždant bandymas.
Atsparumas šalčiui	Bandinių po šaldymo ir atšildymo ciklų bei referencinių bandinių (po 28 parų) gniuždomojo stiprio santykis ne mažesnis kaip 0,7	Atliekant atsparumo šalčiui bandymus, bandiniai laikomi 13 dienų drėgnoje aplinkoje, paskui 1 parą laikomi panardinti kambario temperatūros vandenyje, dar vėliau jiems taikoma 14 užšaldymo ir atšildymo ciklų. Vienu užšaldymo ir atšildymo ciklu bandiniai (ištraukti iš vandens) -23°C temperatūroje 8 val. šaldomi ir 16 val. atšildomi kambario temperatūros vandenyje. Po šaldymo ir atšildymo ciklų pagal standartą LST EN 13286-41 atliekamas stiprio gniuždant bandymas.
Deformacijos modulis E_{v2}	≥ 400 MPa	Deformacijos modulis nustatytas antruoju apkrovimo ciklu, spaudžiant sluoksnį štampu pagal LST 1360-5.
Deformacijos modulio E_{v2}/E_{v1} santykis arba sutankinimo laipsnis D_{Pr}	$\leq 2,3^{1)}$ $\geq 100\%^{1) 2)}$	–

Pastabos: ¹⁾ Matavimai atliekami iškart įrengus sluoksnį. ²⁾ Grantai prieš atliekant stabilizavimą turi pasiekti sutankinimo rodiklį $D_{Pr} \geq 100\%$.

Jeigu statybinių medžiagų mišinių gamybai naudojamas ne geriamasis vanduo, tai statybos darbams atlikti numatomo naudoti vandens tinkamumas turi būti įrodomas. Nustatytu laiku prieš darbų pradžią rangovas turi įrodyti numatytų naudoti statybinių medžiagų ir jų mišinių bei gruntų tinkamumą, pateikdamas tinkamumo bandymų ataskaitą. Tinkamumo bandymai užtrunka ne mažiau kaip 6 savaites dėl specifinių bandymo sąlygų, atliekant sustiprinto grunto atsparumo

šalčiui bandymus, todėl į tai turi būti atsižvelgiama planuojant ir vykdant darbus. Tinkamumo bandymų ataskaitą turi suderinti ir įvertinti techninę priežiūrą vykdančys asmenys. Tinkamumo (cemento kiekio) bandymai turi būti atliekami akredituotoje laboratorijoje. Rangovas pateikia tinkamumo bandymais nustatytą rišiklio kiekį, tuo prisiimdamas atsakomybę už tiesimo darbų kokybę.

3.3.4. Voluojamajam betonui keliami reikalavimai

Turi būti naudojamas projektinis kelių betono mišinys, kuriam išduotas betono mišinio eksploatacinių savybių pastovumo sertifikatas pagal LST EN 206:2013 + A2:2021, LST EN 13877-1:2023 ir LST 1974:2012 standartus (betono mišinio savybės yra patikrintos ir patvirtintos sertifikavimo įstaigos). Reikalavimai voluojamojo betono mišiniui, kurie turi būti patikrinami klojimo metu:

- gniuždomasis stipris (C35/45), bandymai turi būti atliekami pagal LST EN 12390-3:2020 (bandiniai suformuojami betono klojimo metu ir brandinami 28 paras);
- lenkiamasis stipris $\geq 5,5\text{--}7,0$ MPa, bandymai turi būti atliekami pagal standartą LST EN 12390-5:2019 (bandiniai suformuojami betono klojimo metu ir brandinami 28 paras);
- atsparumo šalčiui markė F300 pagal standarto LST 1428-17:2016 punktą 7.11;
- tanklumas C_0 , bandymai turi būti atliekami pagal LST EN 12350-4:2019.

Reikalavimai įrengtai voluojamojo betono dangai, kurie turi būti patikrinami:

- gniuždomojo stiprio CC30 (≥ 30 MPa) klasė pagal standarto LST EN 13877-2:2023 priedą A. Gniuždomojo stiprio bandymai turi būti atliekami pagal LST EN 12390-3:2020 (bandiniai paimami iš dangos gręžiant pagal LST EN 12504-1/AC:2021 ir bandomi po 28 parų);
- betono dangos atsparumas lukštenimuisi (angl. *scaling*) FT2, siektinos reikšmės: $m_{28} < 0,25$ kg/m²; $m_{56} < 0,5$ kg/m²; $m_{56}/m_{28} \leq 2$ pagal standarto LST EN 13877-2:2023 punktą 4.5. Betono dangos atsparumo lukštenimuisi bandymai turi būti atliekami pagal CEN/TS 12390-9:2016 (bandiniai paimami iš dangos gręžiant pagal LST EN 12504-1/AC:2021 ir bandomi po 28 parų);
- bandinių atsparumas šalčiui $\Delta f \leq 5$ %; $\Delta m \leq 3$ %. Atsparumo šalčiui bandymai turi būti atliekami pagal LST 1428-17:2016 (bandiniai paimami iš dangos gręžiant pagal LST EN 12504-1/AC:2021);
- dangos paviršiaus nelygumas $\leq 10,0$ mm matuojant 3 m ilgio liniuote;

- sluoksnio storio aritmetinio vidurkio nuokrypis ≤ 5 mm, sluoksnio storio atskiros vertės nuokrypis ≤ 10 mm. Sluoksnio storio aritmetinio vidurkio matavimai turi būti atliekami pagal LST EN 12697-36:2022/MN SSN 15 (bandiniai paimami iš dangos gręžiant pagal LST EN 12504-1/AC:2021);
- betono dangos dilumas $12 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ pagal LST 1338 *Bohme* (bandiniai paimami iš dangos gręžiant pagal LST EN 12504-1/AC:2021);
- dangos sutankinimo laipsnis ≥ 98 %; 1 m atstumu nuo dangos briaunos ≥ 97 % pagal LST 12390-7:2009 (bandiniai paimami iš dangos gręžiant pagal LST EN 12504-1/AC:2021). Betono mišiniui naudojami užpildai turi atitikti TRA UŽPILDAI 19 arba lygiaverčio nacionalinio techninio dokumento reikalavimus.

Bendruoju atveju voluojamojo betono dangos gręžimai turi būti atliekami $\geq 0,5$ m nuo voluojamojo betono briaunos, technologinių siūlių ar kitokių jungčių. Gręžimai negali būti atliekami rato riedėjimo trajektorijose, t. y. vėžėse. Nustatant voluojamojo betono dangos gniuždomąjį stiprį, esant voluojamojo betono sluoksnio storiui ≥ 16 cm, turi būti gręžiami 150 mm skersmens kernai, < 16 cm – 100 mm skersmens kernai. Taip pat, esant poreikiui, priklausomai nuo išgręžto kerno ilgio ir skersmens santykio, nustatant voluojamojo betono dangos gniuždomąjį stiprį, turi būti taikomas koreliacijos koeficientas pagal LST 13877-2:2023 4 lentelę.

Betono mišiniui naudojami užpildai turi atitikti TRA UŽPILDAI 19 arba lygiaverčio nacionalinio techninio dokumento reikalavimus.

3.3.5. Voluojamojo betono dangos konstrukcijos įrengimo kontrolė

Reikalavimai betono su stabilizuotu pagrindo sluoksniu įrengimo kontrolei parengti atsižvelgiant į gerąją tiek Lietuvos, tiek kitų šalių patirtį, vykdant žemės sankasos, pagrindo ir dangos sluoksnio įrengimo kontrolę. Reikalavimai betono su stabilizuotu pagrindo sluoksniu įrengimo kontrolei pateikti 3.10, 3.11 ir 3.12 lentelėse.

3.10 lentelė. RCC sluoksnio įrengimo kontrolei keliami reikalavimai

Table 3.10. Requirements for control of installation of an RCC layer

Sluoksnis	Bandymo metodas	Bandymo pavadinimas	Bandymo data	Ėminių ėmimo laikas	Ėminių ėmimo dažnis
RCC	LST EN 12390-3	Bandinių gniuždomasis stipris (C35/45)	po 28 parų	Bandiniai suformuojami betono klojimo metu ir brandinami 28 paras	Kas 4500 m^2 , ne mažiau kaip 1 kartą objektui

3.10 lentelės pabaiga

Sluoksnis	Bandymo metodas	Bandymo pavadinimas	Bandymo data	Ėminių ėmimo laikas	Ėminių ėmimo dažnis
	LST EN 12390-5	RCC bandinių lenkiamasis stipris (priklausomai nuo sprendinio $\geq 5,5-7$ MPa)	Po 28 parų	Bandiniai suformuojami betono klojimo metu ir brandinami 28 paras	Kas 4500 m ² , ne mažiau kaip 1 kartą objektui
RCC	LST 1428-17	Bandinių atsparumas šalčiui ($\Delta f \leq 5$ %; $\Delta m \leq 3$ %)	Po 28 parų	Bandiniai paimami iš dangos gręžiant ir bandomi po 28 parų	Ne mažiau kaip 1 kartą objektui
	CEN/TS 12390-9, LST EN 12504-1	Betono dangos atsparumas lukštenimuisi (angl. <i>scaling</i>) FT2 (siektinos reikšmės $m_{28} < 0,25$ kg/m ² ; $m_{56} < 0,5$ kg/m ² ; $m_{56}/m_{28} \leq 2$)	Po 28 parų	Bandiniai paimami iš dangos gręžiant ir bandomi po 28 parų	Kas 9000 m ² , bet ne mažiau kaip 2 kartus objektui
	LST 1338 Bohme	Betono dangos dilumas (12 cm ³ /50 cm ²)	Po 28 parų	Bandiniai paimami iš dangos gręžiant ir bandomi po 28 parų	Ne mažiau kaip 1 kartą objektui
	LST EN 12504-1, LST 12390-7	Dangos sutankinimo laipsnis (≥ 98 %; 1 m atstumu nuo dangos briaunos ≥ 97 %)	Po 28 parų	Bandiniai paimami iš dangos gręžiant ir bandomi po 28 parų	Kas 4500 m ²
	LST EN 13877-2, LST EN 12504-1	Dangos gniuždomasis stipris (CC30)	Po 28 parų	Bandiniai paimami iš dangos gręžiant ir bandomi po 28 parų	Kas 4500 m ²
	LST EN 12697-36/MN SSN 15	Sluoksniu storis (aritm. vidurkio nuokrypis ≤ 5 mm, atskiros vertės nuokrypis ≤ 10 mm)	Darbų atlikimo metu	Bandiniai paimami iš dangos gręžiant	Kas 4500 m ² , ne mažiau kaip 1 kartą objektui

3.11 lentelė. CTB įrengimo kontrolei keliami reikalavimai**Table 3.11.** Requirements for control of installation of a CTB layer

Sluoksnis	Bandymo metodas	Bandymo pavadinimas	Bandymo data	Ėminių ėmimo laikas	Ėminių ėmimo dažnis
CTB	LST EN 13286-41	Bandinių stipris gniuždant ($\geq 2,5$ MPa)	Po 28 parų ¹⁾	Bandiniai suformuojami darbų atlikimo metu ir bandomi po 28 parų brandinimo	Kas 4500 m ²
	–	Panaudotų specialių sluoksnio elastingumą didinančių priedų (pvz., greitinančių jonų mainų reakcijas) kiekis	Darbų atlikimo metu	Darbų atlikimo metu	Ne mažiau kaip vieną kartą per pamainą
	–	Panaudoto cemento kiekis	Darbų atlikimo metu	Darbų atlikimo metu	Kas 2500 m ²
	–	Gruntų drėgnis	Darbų atlikimo metu	Darbų atlikimo metu	Kas 2500 m ²
	LST 1360-5	Dangos sutankinimo laipsnis, išreikštas E_{v2}/E_{v1} santykiu (turi būti ne didesnis kaip 2,3), arba sutankinimo rodiklis $D_{Pr} \geq 100$ %	Iškart įrengus	Iškart įrengus	Kas 3000 m ²
	LST 1360-5 –	Statinis deformacijos modulis E_{v2} (turi būti ≥ 400 MPa) arba ekvivalentinis standumo modulis (turi būti ≥ 500 MPa, išmatuotas su FWD arba lygiaverčiu įrenginiu)	Po 7 parų	Po 7 parų	Kas 3000 m ² Kas 50–100 m ²

Pastabos: ¹⁾ Turint patirtį suformuoti bandiniai gali būti bandomi po 7 parų. Pasiekus 90 % projektinės gniuždomojo stiprio vertės yra laikoma, jog po 28 parų bus pasiektas projektinis gniuždomasis stipris.

3.12 lentelė. CTS ir ŽS įrengimo kontrolei keliami reikalavimai**Table 3.12.** Requirements for control of installation of a CTS layer and subgrade

Sluoksnis	Bandymo metodas	Bandymo pavadinimas	Bandymo data	Ėmimų ėmimo laikas	Ėminių ėmimo dažnis
CTS	LST EN 13286-41	Bandinių gniuždomasis stipris ($\geq 1,0$ MPa)	Po 28 parų ¹⁾	Bandiniai suformuojami darbų atlikimo metu ir bandomi po 28 parų brandinimo	Kas 4500 m ²
	–	Panaudotų specialių sluoksnio elastingumą didinančių priedų (pvz., greičinančių jonų mainų reakcijas) kiekis	Darbų atlikimo metu	Darbų atlikimo metu	Ne mažiau kaip vieną kartą per pamainą
	–	Panaudoto cemento kiekis	Darbų atlikimo metu	Darbų atlikimo metu	Kas 2500 m ²
	–	Gruntų drėgnis	Darbų atlikimo metu	Darbų atlikimo metu	Kas 2500 m ²
	LST 1360-5	Dangos sutankinimo laipsnis, išreikštas E_{v2}/E_{v1} santykiu (turi būti ne didesnis kaip 2,5), arba sutankinimo rodiklis ($D_{Pr} \geq 98$ %)	Iškart įrengus	Iškart įrengus	Kas 3000 m ²
	LST 1360-5	Statinis deformacijos modulis E_{v2} (turi būti ≥ 120 MPa)	Po 7 parų	Po 7 parų	Kas 3000 m ²
ŽS (nesustiprinta) ²⁾	LST 1360-5	Sutankinimo rodiklis D_{Pr} ³⁾	Iškart įrengus	Iškart įrengus	Kas 3000 m ²

Pastabos: ¹⁾ Turint patirtį suformuoti bandiniai gali būti bandomi po 7 parų. Pasiiekus 90 % projekcinės gniuždomojo stiprio vertės, yra laikoma, jog po 28 parų bus pasiektas projektinis gniuždomasis stipris. ²⁾ Kai CTB rengiama stabilizuojant esamą gruntą (nenaudojant atvežtinio, pilamo sluoksniams), po CTB esančio nesustiprintos ŽS deformacijų modulis E_{v2} arba sutankinimo rodiklis D_{Pr} tikrinami iš karto po CTB stabilizavimo, tyrimų vietose per visą storį iškasant CTB sluoksnį ³⁾. Žemės sankasos sutankinimo rodiklis turi atitikti IT ŽS 17 196 punkto reikalavimus.

3.10, 3.11 ir 3.12 lentelėse pateikti reikalavimai pagrindinių RCC dangos konstrukcijų mechaninių charakteristikų kontrolei laiduoja dangos konstrukcijos skaičiavimo metu naudotų savybių kontrolę tačiau neeliminuoja poreikio taikyti kitų normatyvinių techninių dokumentų reikalavimų medžiagoms, sluoksniams, profiliams ir kt.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Skaičiuojamoji dangos konstrukcijos schema sudaryta įvertinus vietinės reikšmės kelio Nr. 130 projektinius sluoksnių storius, RCC standumo modulį (apskaičiuotą iš faktinio lenkiamojo stiprio, nustatyto kelio tiesybos metu), CTS ir CTB standumo modulius (apskaičiuotus atliekant atgalinį dangos konstrukcijos sluoksnių standumo modulį skaičiavimą (angl. *backcalculation*)), žemės sankasos tipinį standumo modulį.
2. Pagal skaičiuojamąją dangos konstrukcijos schemą, kurios mechaninės savybės yra grindžiamos vietinės reikšmės kelyje Nr. 130 atliktais eksperimentiniais tyrimais, apskaičiuoti įtempiai, veikiant 50 kN apkrovai (vieno rato apkrovai), yra lygūs 2,03 MPa.
3. Įvertinus atliktų tyrimų rezultatų visumą ir vietinės reikšmės kelio Nr. 130 projektinius dangos konstrukcijos duomenis, nustatyta, kad RCC dangos konstrukcijoms, įrengtoms ant CTB, kritiškiausias yra deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos analizės modelis.
4. Atsižvelgiant į skirtingų objektų deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos analizės rezultatus, nustatyta, jog tyrime nagrinėtos RCC dangos konstrukcijos su didesniu RCC sluoksnio storiu dažnai pasižymėjo didesniu atsparumu deformacinių siūlių deformacijoms ir pagrindo erozijai negu plonesnės RCC dangos konstrukcijos.
5. Priklausomai nuo RCC lenkiamojo stiprio, pagrindo sluoksnio medžiagiškumo ir apkrovos dydžio (50 ir 100 kN) nustatyti ribiniai dangos paviršiaus įlinkiai plokštės kampe. Kuomet po RCC danga yra CTB, priklausomai nuo RCC lenkiamojo stiprio nustatyti 235–358 μm ribiniai įlinkiai, veikiant 50 kN apkrovai, ir 247–432 μm , veikiant 100 kN apkrovai. SPS pagrindo sluoksnio atveju nustatyti 156 μm ribiniai įlinkiai, veikiant 50 kN apkrovai, ir 279 μm , veikiant 100 kN apkrovai.
6. Atlikus CTB laikomosios gebos analizę, buvo nustatyta didelė laikomoji geba ir aukštas vidutinis standartinis nuokrypis (1799 MPa), nusakantis sluoksnio laikomosios gebos ir kartu mechaninių savybių nepastovumą. CTB sluoksnio mechaninių savybių nepastovumą galėjo lemti sluoksnio įrengimo metu rišiklio (cemento) kiekio kitimas ir gruntų nehomogeniškumas išilgai rekonstruoto kelio. Skaldos pagrindo sluoksniui (SPS) įrengti naudojamos homogeniškos atvežtinės medžiagos, kurių laikomosios gebos rodiklių vidutinis standartinis nuokrypis yra mažesnis. Nepaisant aukšto vidutinio standartinio nuokrypio, CTB sluoksnio laikomosios gebos rodikliai atitinka projektines reikšmes. Projektavimo metu, nustatant skaičiuojamuosius parametrus, reikėtų imti didesnę atsargos koeficientą,

palyginti su SPS skaičiuojamaisiais parametrais. Dangos konstrukcijos su CTB sluoksniu yra tvarios, kadangi naudojami esami gruntai, taip taupomi medžiagų, transportavimo resursai, mažinami įrengimo kaštai ir prisidedama prie CO₂ emisijų mažinimo.

7. Pateikti rekomendaciniai RCC dangos konstrukcijų sprendiniai, grindžiami skaičiuojamąja schema, atliktais eksperimentiniais tyrimais, įvertinant RCC dangos konstrukcijų, įrengtų ant pagrindo sluoksnio iš gruntu, surištų hidraulinius rišiklius ir kitais priedais, hidroterminio režimo poveikį, RCC atsparumą nuovargio plyšių vystymuisi, veikiant transporto priemonių apkrovai, ir skirtingo pagrindo medžiagiškumo atsparumą deformacinių siūlių deformacijoms ir pagrindo erozijai (3.6 ir 3.7 lentelės).
8. Siekiant užtikrinti RCC dangos konstrukcijų, įrengtų ant CTS ir CTB, mechaninių savybių tolygumą ir atitikimą projektinėms reikšmėms, parengtos ir pateiktos RCC, CTS bei CTB techninės specifikacijos (3.3.2., 3.3.3. ir 3.3.4. poskyriai) ir RCC dangos konstrukcijos ant CTB ir CTS įrengimo kontrolės reikalavimai (3.10, 3.11 ir 3.12 lentelės).

Bendrosios išvados

1. Voluojamojo betono dangos konstrukcijoje įrengtų temperatūros ir drėgnio jutiklių, 2022–2023 m. laikotarpio ir skirtingais metų laikais (esant neutraliam ir nepalankiam hidroterminio režimo poveikiui) atliktų laikomosios gebos tyrimų krintančiojo svorio deflektometru duomenų analizė parodė, kad dangos konstrukcijos laikomoji geba laikui bėgant didėjo. Praėjus 9 mėn. nuo dangos konstrukcijos įrengimo, įlinkiai w_0 sumažėjo, o ekvivalentinis standumo modulis E_0 padidėjo.

2. Natūrinėje voluojamojo betono dangos konstrukcijoje faktiniai įtempiai, nustatyti deformacijų jutikliais, įrengtais voluojamojo betono sluoksnio apačioje yra 31 % mažesni už teorinius įtempius, apskaičiuotus pagal sudarytą skaičiuojamąją dangos konstrukcijos schemą. Dėl šio reikšmingo skirtumo faktinių įtempių reikšmės naudojant plyšių nuovargio funkcijoje sumažina įtempių santykį (SR), dėl to reikšmingai didėja skaičiuojamosios konstrukcijos atsparumas nuovargio plyšių susidarymui.

3. Voluojamojo betono dangos deformacinių siūlių apkrovos perdavimo koeficiento tyrimais nustatyta, kad voluojamojo betono deformacinių siūlių, suformuotų įpjauant 1/3–1/2,5 dangos storio, apkrovos perdavimo efektyvumas daugumoje tirtų vietų yra didesnis kaip 80 %. Apkrovos perdavimas tarp skirtingų betonio dangos plokščių yra ypač svarbus, esant didesnėms kaip 10 t ašinėms apkrovoms. Tyrimu nustatyta, jog, veikiant sunkiojo transporto apkrovoms, kai ašies

apkrova ≥ 10 t, 16 cm RCC storis užtikrina viršutinį apkrovos perdavimo kvartilį, kuris nusako gerą arba priimtina apkrovos perdavimą tarp betono plokščių.

4. Sudaryta skaičiuojamoji dangos konstrukcijos schema ir pateikti rekomendaciniai voluojamojo betono dangos konstrukcijų sprendiniai, kurie gali būti taikomi didelės apkrovos zonose (pavyzdžiui, intermodaliniuose terminaluose, kariniam transportui skirtuose keliuose) ir mažesnio važiavimo komforto lygio visuomeniniuose statiniuose, užtikrinant dangos lygumą $IRI \leq 2,0$ m/km. Tai yra vietinės reikšmės ir valstybinės reikšmės rajoniniai keliai, kurių vidutinis metinis paros eismo intensyvumas (VMPEI) < 1000 transporto priemonės per parą, leistinasis važiavimo greitis ≤ 90 km/h (3.6 ir 3.7 lentelės).

5. Siekiant užtikrinti voluojamojo betono dangos konstrukcijų, įrengtų ant CTS ir CTB, mechaninių savybių tolygumą ir atitikimą projektinėms reikšmėms, parengtos ir pateiktos techninės specifikacijos bei betono dangos konstrukcijos įrengimo kontrolės reikalavimai. Sluoksnių techninės specifikacijos ir kontrolės parametrai parinkti atsižvelgiant į mechanistinio-empirinio dangų konstravimo metodo įvesties duomenis (RCC lenkiamąjį stiprį, pagrindo sluoksnių stiprumo charakteristikas), mišinių atitiktį numatyta paskirčiai, sluoksnių įrengimo technologiskumą ir vyraujančias klimato sąlygas.

Rekomendacijos

1. Atliekant dangos konstrukcijos skaičiavimus visuotinai pripažintais mechanistiniais-empiriniais dangų konstravimo metodais, rekomenduojama naudoti disertacijoje pateiktas RCC, CTB ir CTS sluoksnių mechanines savybes ir nuovargio funkcijas.

2. Siekiant sumažinti deformacinių siūlių deformacijų ir pagrindo erozijos rizikas, eismo zonose, kuriose sunkiojo transporto priemonių ašinė apkrova yra ≥ 10 t, rekomenduojama taikyti ne mažesnę kaip 16 cm RCC sluoksnio storį nepriklausomai nuo apskaičiuoto RCC sluoksnio storio.

Literatūra ir šaltiniai

- AASHTO. (1993). *A Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Al-Akhras, N. M., & Smadi, M. M. (2004). Properties of tire rubber ash mortar. *Cement and Concrete Composites*, 26(7), pp. 821–826. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.01.004>
- American Concrete Institute. (2017). ACI Concrete Terminology. In *American Concrete Institute* (p. 76).
- Benazzouk, A., Douzane, O., Langlet, T., Mezreb, K., Roucoult, J. M., & Quéneudec, M. (2007). Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes. *Cement and Concrete Composites*, 29(10), pp. 732–740. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.07.001>
- BN GPR 12. 2012. Gruntų, pagerintų rišikliais, bandymo nurodymai. Vilnius: Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. 18 p.
- CEN/TS 12390-9:2016. Testing hardened concrete – Part 9: Freeze-thaw resistance with de-icing salts - Scaling], European committee for standartization, Brussels. 32 p.
- Courard, L., Michel, F., & Delhez, P. (2010). Use of concrete road recycled aggregates for Roller Compacted Concrete. *Construction and Building Materials*, 24(3), pp. 390–395. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.040>
- Da Silva, F. M., Gachet Barbosa, L. A., Lintz, R. C. C., & Jacintho, A. E. P. G. A. (2015).

- Investigation on the properties of concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber. In *Construction and Building Materials*, 91, pp. 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.027>
- Die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. *Richtlinien Für die Rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen RDO Beton 24*; Die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Köln, 2024. 52 p.
- Doré, G., & Savard, Y. (1998). Analysis of Seasonal Pavement Deterioration. *Transportation Research Board, Preprint No. 981046, Transportation Research Board of the National Academies. Washington, D.C.*
- Eldin, N. N., & Senouci, A. B. (1993). Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 5(4), pp. 478–496. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(1993\)5:4\(478\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(1993)5:4(478))
- Fattuhi, N. I., & Clark, L. A. (1996). Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber. *Construction and Building Materials*, 10(4), pp. 229–236. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(96\)00004-9](https://doi.org/10.1016/0950-0618(96)00004-9)
- Ganjan, E., Khorami, M., & Maghsoudi, A. A. (2009). Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials*, 23(5), pp. 1828–1836. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.020>
- Graeff, A. G., Pilakoutas, K., Neocleous, K., & Peres, M. V. N. N. (2012). Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibres recovered from post-consumer tyres. *Engineering Structures*, 45, pp. 385–395. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.030>
- Griffiths, G., & Thom, N. (2007). Concrete pavement design guidance notes. In *Taylor & Francis e-Library* (p. 193).
- Harrington, D., Abdo, F., Adaska, W., & Hazaree, C. (2010). Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements. *Institute for Transportation, Iowa State University, August* (p. 115).
- Khazanovich, Lev, & Qiang Chuck Wang. 2008. “MnLayer: High-Performance Layered Elastic Analysis Program.” *Transportation Research Record* 2037 (1): 63–75. <https://doi.org/10.3141/2037-06>.
- Kesehatan, K. (2019). *Effects of Mixture Design Parameters and Compaction Methods on the Properties of Roller Compacted Concrete Pavements*. Middle East Technical University (p. 191).
- Kici, A., Tiğdemir, M., & Kalyoncuoğlu, Ş. F. (2018). Parametric Study of The Parameters Affecting Concrete Pavement Thickness. *Iğdir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(3), pp. 145–152. <https://doi.org/10.21597/jist.458614>
- KPT SDK 19. 2019. Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės. Vilnius: Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. 70 p.

- Lee, M. K., & Barr, B. I. G. (2004). An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26(4), pp. 299–305. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00139-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00139-7)
- LST EN 197-1:2012. Cementas. 1 dalis. Įprastinių cementų sudėtis, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai [Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius. 38 p.
- LST EN 1331:2022. Gruntai, skirti kelių statinių statybai. Klasifikacija [Soils for use in roads and roads buildings constructions – Classification], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius. 14 p.
- LST 1974:2012. LST EN 206-1 taikymo taisyklės ir papildomieji nacionaliniai reikalavimai [Rules for the Application LST EN 206-1 and Additional National Requirements], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius. 44 p.
- LST EN 206:2013+A2:2021. Betonas. Specifikacija, eksploatacinės savybės, gamyba ir atitiktis [Concrete – Specification, performance, production and conformity], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius. 102 p.
- LST 1428-17:2016. Betonas. Bandymo metodas. 17 dalis. Atsparumo šalčiui nustatymas tūriniu užšaldymu ir atšildymu [Concrete – Test method – Part 17: Determination of frost resistance to volumetric freezing and thawing], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius. 6 p.
- LST EN 13877-2:2023. Betoninės kelio dangos. 2 dalis. Betoninių kelių dangų funkciniai reikalavimai [Concrete pavements – Part 2: Functional requirements for concrete pavements], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius. 16 p.
- LST EN 12390-3:2020. Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris [Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius. 20 p.
- LST EN 12390-5:2019. Sukietėjusio betono bandymai. 5 dalis. Bandinių lenkimo stipris [Testing hardened concrete – Part 5: Flexural strength of test specimens], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius. 10 p.
- LST EN 12504-1/AC:2021. Betono bandymas konstrukcijoje. 1 dalis. Kernai. Paėmimas, apžiūrėjimas ir bandymas gniuždant [Testing concrete in structures – Part 1: Cored specimens – Taking, examining and testing in compression], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius. 11 p.
- LST EN 12390-7:2009. Sukietėjusio betono bandymai. 7 dalis. Sukietėjusio betono tankis [Testing hardened concrete – Part 7: Density of hardened concrete], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius. 10 p.
- LST EN 1338+AC:2008. Betoninės grindinio trinkelės. Reikalavimai ir bandymo metodai [Concrete paving blocks – Requirements and test methods], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius. 64 p.

- LST EN 12697-36:2022. Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 36 dalis. Bituminės dangos storio nustatymas [Bituminous mixtures – Test methods – Part 36: Determination of the thickness of bituminous pavement], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius. 9 p.
- LST 1360-5:2019. Automobilių kelių gruntai. Bandymo metodai. Statinio apkrovimo plokšte bandymas [Soils for road construction – Testing methods – Static plate loading test], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius. 19 p.
- LST EN 12390-6:2024. Betono bandymas. 6 dalis. Bandinių tempimo stipris skeliant [Testing hardened concrete – Part 6: Tensile splitting strength of test specimens], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius. 11 p.
- LST EN 13286-41:2022. Nesurištieji ir hidrauliškai surišti mišiniai. 41 dalis. Bandymo metodas hidrauliškai surišių mišinių gniuždomajam stipriui nustatyti [Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 41: Test method for the determination of the compressive strength of hydraulically bound mixtures], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius. 11 p.
- Mahdi, M., Liu, Y., Wu, Z., & Rupnow, T. (2020). Experimental investigation of wheel-load induced strain responses in roller compacted concrete pavements. *Lecture Notes in Civil Engineering, 96 LNCE*, pp. 1–10. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55236-7_21
- Mavroulidou, M., & Figueiredo, J. (2010). Discarded tyre rubber as concrete aggregate: A possible outlet for used tyres. *Global Nest Journal, 12*(4), pp. 359–367. <https://doi.org/10.30955/gnj.000617>
- Maher, A., & Bannert, T. (2008). *Evaluation of Poisson's Ratio for Use in the Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)*. Final Report, Dept. of Civil & Environmental Engineering Center for Advanced Infrastructure & Transportation (CAIT) Rutgers, The State University Piscataway (p. 60).
- MN MAS 15. 2015. Automobilių kelių dangos iš minkštojo asfalto sluoksnių įrengimo metodiniai nurodymai. Vilnius: Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. 55 p.
- MN GPSR 12. 2012. Gruntų pagerinimo ir sustiprinimo rišikliais metodiniai nurodymai. Vilnius: Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. 25 p.
- FAA. (2021). Airport Pavement Design and Evaluation. AC No. 150/5320-6G (p. 195).
- FGSV Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht. RDO - Asphalt 09; Köln, 2009. 72 p.
- Minnesota Department of Transportation (2012). Use of Street Pave for Design of Concrete Pavements for Cities and Counties in Minnesota. *Minnesota Department of Transportation: St. Paul, MN, USA*, pp. 1–56.
- Modarres, A., & Hosseini, Z. (2014). Mechanical properties of roller compacted concrete

- containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material. *Materials and Design*, 64, pp. 227–236. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2014.07.072>
- Mohammed, B. S., Adamu, M., & Liew, M. S. (2018). Evaluating the static and dynamic modulus of elasticity of roller compacted rubbercrete using response surface methodology. *International Journal of GEOMATE*, 14(41), pp. 86–192. <https://doi.org/10.21660/2018.41.42833>
- Mohammed, H., Thom, N., & Dawson, A. (2019). Load Transfer Stiffness of Two-layer Roller Compacted Concrete for Pavements. *Journal of Materials and Applications*, 8(2), pp. 65–72. <https://doi.org/10.32732/jma.2019.8.2.65>
- Moustafa, A., & Elgawady, M. A. (2015). Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber. *Construction and Building Materials*, 93, pp. 249–256. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.115>
- Nepal Department of Roads (2021). Backcalculation of Falling Weight Deflectometer deflection data using ELMOD 6 and Theoretical Background. *Dynatest* (p. 184).
- Okamoto, P. A. (1999). Report on Review of Concrete Fatigue Models. *PCA R&D Serial No. 2213. Portland Cement Association, Skokie, Ill.*
- Packard, R. G., & Tayabji, S. D. (1985). New PCA Thickness Design Procedure for Concrete Highways and Street Pavements-1984. *Third International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation* (pp. 225–236). Lafayette, Indiana, USA.
- Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2012). Pavement Design and Materials. *Pavement Design and Materials* (p. 542) <https://doi.org/10.1002/9780470259924>
- Park, J. Y., Lee, S. W., Han, S. H., & Kim, Y. K. (2020). Fatigue behavior of roller-compacted concrete pavement based on full-scale fatigue test. *Journal of Testing and Evaluation*, 48(4), pp. 2895–2907. <https://doi.org/10.1520/JTE20170522>
- Parker, F., Barker, R., & Odom E. (1979). *Development of a Structural Design Procedure for Rigid Airport Pavements. FAARD-77-8 1* (p. 304).
- Pittman, D. W. (1996). Load transfer characteristics of roller-compacted concrete pavement joints and cracks. *Transportation Research Record*, 1525, pp. 1–9. <https://doi.org/10.3141/1525-01>
- Roden, R. (2014). *RCC Fatigue Model Development by the American Concrete Pavement Association (ACPA) – Interim Report.*
- Ruiz-Valencia, D., Rodríguez, F., & León-Neira, M. (2017). Study of fatigue performance of a concrete mix for pavements reinforced with steel fibers. *Revista Ingeniería de Construcción*, 32(2), pp. 45–58. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732017000200004>
- Sadeghi, V., & Hesami, S. (2018). Investigation of load transfer efficiency in jointed plain concrete pavements (JPCP) using FEM. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(3), pp. 245–252. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.10.001>
- Sengun, E., Alam, B., Shabani, R., & Yaman, I. O. (2021). Strength and fracture properties

- of roller compacted concrete (RCC) prepared by an in-situ compaction procedure. *Construction and Building Materials*, 271, 121563. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121563>
- Sengun, E., Alam, B., Yaman, I. O., & Ceylan, H. (2021). A new evaluation of the fatigue design criteria of roller compacted concrete (RCC) pavements. *Construction and Building Materials*, 289, 123195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123195>
- Siddique, Z. Q., Hossain, M., & Meggers, D. (2005). Temperature and curling measurements on concrete pavement. *The 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa* (pp. 1–12).
- St-Laurent, D., & Roy, M. (1995). Évaluation structurale des chaussées souples dans un contexte climatique nordique: une étude avec le FWD (Structural evaluation of flexible pavements in a northern context: A study using the FWD). In *30th Annual Conference of AQTR. Quebec, Canada: Association Québécoise Du Transport et Des Routes*.
- Sun, W., Liu, J., Qin, H., Zhang, Y., Jin, Z., & Qian, M. (1998). Fatigue performance and equations of roller compacted concrete with fly ash. *Cement and Concrete Research*, 28(2), pp. 309–315. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00211-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00211-1)
- Tayabji, S., & Okamoto, P. (1987). Engineering properties of roller-compacted concrete. *Transportation Research Record*, 1136, pp. 33–45.
- Thompson, M. R., J., B. E., Carpenter, S. H., Darter, M. I., Dempsey, B. J., & Ioannides, A. M. (1990). *Calibrated Mechanistic Structural Analysis Procedures for Pavements, Phase 2. Final Report, NCHRP Project 1–26, Vols. 1 and 2. National Cooperative Highway Re-search Program, University of Illinois, Urbana* (p. 793).
- Titus-Glover, L., Mallela, J., Darter, M. I., Voigt, G., & Waalkes, S. (2005). Enhanced Portland Cement Concrete Fatigue Model for StreetPave. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1919(1), pp. 29–37. <https://doi.org/10.1177/0361198105191900104>
- TRA UŽPILDAI 19. 2019. Automobilių kelių užpildų techninių reikalavimų aprašas. Vilnius: Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. 36 p.
- Vaitkus, A., Gražulytė, J., Vorobjovas, V., Šernas, O., & Žalimienė, L. (2020). Cement concrete modular pavement implementation for pedestrian and bicycle path. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 987(1), pp. 1–11. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/987/1/012002>
- Vaitkus, A., Kleizienė, R., Vorobjovas, V., & Čygas, D. (2019). Mixture strength class and slab dimensions' effect on the precast concrete pavement structural performance. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 14(3), pp. 443–471. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2019-14.452>
- Vaitkus, A., Gražulytė, J., Kravcovas, I., & Mickevič, R. (2021). Comparison of the Bearing Capacity of Pavement Structures with Unbound and Cold Central-Plant Recycled Base Courses Based on FWD Data. *Sustainability*, 13(11), 6310. <https://doi.org/10.3390/su13116310>

- Vassilopoulos, A. P. (2010). Fatigue life prediction of composites and composite structures. In *Fatigue Life Prediction of Composites and Composite Structures*, pp. 538–552. <https://doi.org/10.1533/9781845699796>
- Yang, H. H. (2004). Pavement Analysis and Design (Second Edition). In *Education* (p. 775). <http://docshare04.docshare.tips/files/14013/140138713.pdf>
- Yaqoob, S. (2024). A parametric study to investigate the dowel bar load transfer efficiency in the jointed plain concrete pavement using a finite element model. *Buildings* 2024, 14, 1039. <https://doi.org/10.3390/buildings14041039>
- Zhang, W., & Macdonald, R. A. (2000). Response and Performance of a Test Pavement to Freeze-Thaw Cycles in the Danish Road Testing Machine. *The Fifth International Conference on Unbound Aggregates in Roads*. Nottingham, U.K., pp. 77–86.
- Zubeck, H. K., & Doré, G. (2009). Introduction to cold regions pavement engineering. *Proceedings of the International Conference on Cold Regions Engineering*, pp 337–345. [https://doi.org/10.1061/41072\(359\)33](https://doi.org/10.1061/41072(359)33)
- IT ŽS 17. 2017. Automobilių kelių žemės darbų atlikimo ir žemės sankasos įrengimo taisyklės. Vilnius: Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. 74 p.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Mickevič, R., & Vaitkus, A. (2024). Stress and Strain of RCC Pavement with Cement Stabilized Base Depending on Load and Season of the Year. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 19(2), 102–130. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2024-19.638>

Vaitkus, A., Gražulytė, J., Šernas, O., Karbočius, M., & Mickevič, R. (2021). Concrete Modular Pavement Structures with Optimized Thickness Based on Characteristics of High Performance Concrete Mixtures with Fibers and Silica Fume. *Materials*, 14(12), 3423. <https://doi.org/10.3390/ma14123423>

Straipsniai kituose leidiniuose

Mickevič, R., & Vaitkus, A. (2023). Comparison of the performance of flexible and roller-compacted concrete pavement structures. In *12th International conference "Environmental Engineering"*, 27–28 April. Vilnius, Lithuania. p. 1–5. eISSN 2029-7092. DOI: 10.3846/enviro.2023.859

Vaitkus, A., Kilaitė, D., Mickevič, R., & Šernas, O. (2023). The effect of ion-exchange stabilizer and cement amount on improved road subgrade soil laboratory specimens compressive strength and resistance to frost. In *12th International conference "Environmental Engineering"*, 27–28 April. Vilnius, Lithuania. p. 1–6. eISSN 2029-7092. DOI:

10.3846/enviro.2023.874

Vaitkus, A., Mickevič, R., & Šernas, O. (2021). Roller compacted concrete – best practice of Lithuania. In *30th International Baltic Road Conference, 23–24 August*. Riga, Latvia. p. 1–8. eISSN 1757-899X. DOI: 10.1088/1757-899X/1202/1/012010

Mickevič, R., & Vaitkus, A. (2022). Performance of roller-compacted concrete pavement structure with stabilized soil base layers during spring thaw. In *CETRA 2022: 7th International conference on road and rail infrastructure, 11–13 May*. Pula, Croatia. p. 1–8. eISSN 1848-9850. DOI: 10.5592/CO/cetra.2022.1359

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

The fatigue of road pavement structure layers is the main limiting condition in the design of pavement structures. Fatigue expressed as a fatigue function is based on empirical data by associating them with the amount of stresses and deformations from the design load. The problem is the unknown values of stresses and deformations of roller-compacted concrete pavement installed on soils bounded by hydraulic binders and other additives and this type of pavement structures' sensitivity to the hydrothermal regime.

Relevance of the dissertation

Individually designed roller-compacted concrete pavement structures installed on a layer of soil with a hydraulic binder and an additive improving ion exchange are increasingly applied in Lithuania. The above-mentioned pavement structures are usually used in high-load areas, such as Klaipėda and Akmenė Free Economic Zone. They are also used in low-intensity road sections and other communication structures that do not require a small surface unevenness and aesthetics.

Roller-compacted concrete pavement structures are designed using the mechanistic-empirical method, which evaluates the materiality of the pavement structure layers and operating loads and applies fatigue functions, which are not fully adapted to a specific country, region, and type of concrete. In Lithuania, no scientific research has been carried

out to determine the stresses and deformations at the bottom of the roller-compacted concrete layer and the bottom of the soil layer with hydraulic binder and ion exchange improving additive. Pavement structure deflections, stresses, and deformations occurring at the bottom of the roller concrete layer are critical factors in designing the pavement structure while selecting rational pavement structure solutions and predicting the functioning of the pavement structure during the design service life.

Object of research

This research object is bearing capacity, stress and strain boundary conditions and variation of the hydrothermal regime of the roller-compacted concrete pavement installed on the upper base layer of soils bound with hydraulic binders and other additives.

Aim of the dissertation

The dissertation aims to investigate the fatigue function parameters of roller-compacted concrete pavements installed on a base layer of soils bound with hydraulic binders and other additives and develop rational solutions and technical specifications for roller-compacted concrete pavement structures.

Tasks of the dissertation

The following tasks are solved to achieve the goal of the dissertation:

1. To analyse the impact of the hydrothermal regime on the structure of the roller-compacted concrete pavement installed in the experimental section on a base layer of soils bound with hydraulic binders and other additives. Information on humidity and temperature changes was read from temperature-humidity sensors installed at the bottom of the roller-compacted concrete and the base layer of soils bound with hydraulic binders and other additives.
2. To conduct an experimental study of stresses and deformations occurring at the bottom of the roller-compacted concrete layer from a design load of 50 kN (car wheel load) and from a load of 200 kN.
3. To conduct an experimental study of the load transfer of roller-compacted concrete deformation joints between divided areas and at the corner of deflection plates from a design load of 50 kN (car wheel load) and a load of 100 kN.
4. Considering the values of the pavement structure deformations determined in the experimental section, the recalculated layer stiffness moduli and other mechanical properties of the pavement structure layers determined during the reconstruction of the object, the creation of a computational scheme of the pavement structure.
5. To create technical specifications and requirements for the installation of layers of roller-compacted concrete on the upper and lower base layer of soils bound with hydraulic binders and other additives.

Research methodology

In the dissertation the loading of natural roller-compacted concrete pavement structures installed on a base layer bound with hydraulic binders was used, applying a dynamic load using a falling weight deflectometer. The systematization, grouping, comparison and statistical analysis of the research data of the stresses and deformations caused by this load, recorded by deformation sensors installed in the pavement structure.

Scientific novelty of the dissertation

Significant results for the science of construction engineering obtained in the preparation of the dissertation:

1. Considering the results of the bearing capacity, stress and deformation tests of the roller-compacted concrete pavement structure installed on a base layer of soils bound with hydraulic binders and other additives, a calculation scheme was developed for the roller-compacted concrete pavement structure, and the calculation parameters were determined for the fatigue function.
2. Based on the practice of other countries, the experience of scientists and the conducted research, solutions were proposed for the construction of the roller-compacted concrete, requirements for the roller-compacted concrete and the upper and lower base layers of soils bound with cement and additives.

Practical value of the research findings

The dissertation presents structures of roller-compacted concrete pavement on the base of hydraulically bound soils or the base layer of crushed stone, depending on the design load A , following fatigue functions, and adapted to the climatic, hydrological and geological conditions of Lithuania. The dissertation also presents the requirements for the roller-compacted concrete pavement and the base layer of hydraulically bound soils. The pavement construction solutions presented in the dissertation and the requirements for the layers of pavement construction can be applied when designing and selecting rational structural solutions for roller-compacted concrete pavement.

Defended statements

1. The actual stresses and deformations occurring in the roller-compacted concrete pavement installed on the base of soil bounded with hydraulic binders are equal to or lower than the theoretical stresses and deformations.
2. The deformation joints of the roller-compacted concrete pavement, which are formed by cutting $1/3$ of the thickness of the concrete layer, guarantee a load transfer coefficient of no less than 70%, which is equal to the transfer rate of joints with dowels.

Approval of the research findings

The subject of the dissertation was published in two scientific journals included in the Clarivate Analytics Web of Science database (Vaitkus, Gražulytė, Kravcovas et al., 2021; Vaitkus, Gražulytė, Šernas et al., 2021; Mickevič & Vaitkus, 2024).

The results of the research conducted in the dissertation were published at three international scientific conferences:

- at the international conference “Baltic Road Conference”, 2021 in Riga, Latvia;
- at the international conference “International Conference on Road and Rail Infrastructure”, 2022 in Pula, Croatia;
- at the international conference “Environmental Engineering”, 2023 in Vilnius, Lithuania.

Structure of the dissertation

The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions, recommendations, lists of used literature, and the author’s publications dissertation topic. Three annexes are provided as well.

The volume of the dissertation is 129 pages with 18 numbered formulas and 30 figures. Thirty tables are used in the text. The dissertation used 82 literary sources.

Acknowledgements

My sincere gratitude goes to my supervisor, Prof. Dr Audrius Vaitkus, for his time, patience, and professional insights, which were invaluable in preparing this dissertation. I am extremely grateful to my family for their constant support, faith and encouraging words during this scientific journey. I am also grateful to the dissertation experts for their valuable observations and comments and to my colleagues at the VILNIUS TECH Road Research Institute and Road Research Laboratory for their support and assistance during my studies. Thank you to everyone who contributed to the preparation of this dissertation and my academic path in one way or another.

1. Analysis of scientific works on the research of roller-compacted concrete pavements

Roller-compacted concrete (RCC) is one of the types of concrete, the mixture of which is characterised by a higher amount of fine aggregate. Due to its unique mixture composition, RCC can be installed with an asphalt paver and compacted with rollers. This installation method simplifies the layer installation technology and reduces installation time and costs compared to the installation of traditional concrete. The service life of RCC pavement structures is directly related to the fatigue that develops over time from the loads acting on the pavement structure. The loads acting on the pavement structure create stresses and deformations in the pavement structure layers, which are the main causes of pavement structure fatigue. The RCC layer is a critical component of the pavement structure since it must be sufficiently resistant to stresses, deformations, and fatigue (Mohammed et al., 2018). The magnitude of stresses, strains, and fatigue at the bottom of the RCC depends on its mechanical properties. The most important mechanical properties of concrete are

compressive strength, flexural strength, and splitting strength (Vaitkus et al., 2020). The flexural strength of typical hardened concrete after 28 days is 4.5–5.2 MPa, and the compressive strength is 27.5–40 MPa (Vaitkus et al., 2019). The composition of the roller-compacted concrete mix affects the mechanical characteristics of RCC. The main components of the RCC mixture are crushed stone, sand, and cement, which may include fly ash, water, and additives (Harrington et al., 2010).

The functioning of RCC pavement structures, like other types of pavement structures, depends on the variation of the load-bearing capacity of the pavement structure and the dependence on hydrothermal effects. At different times, moisture changes in the base layers of the pavement structure and in the soil bed, which affects the load-bearing capacity of the pavement structure. The hydrothermal regime has a different effect on the base layers of the pavement structure with different materiality and mechanical properties. For the proper functioning of the pavement structure, the moisture content of the pavement structure should be as low and constant as possible.

Unlike in the case of slip-form concrete, RCC is installed without dowels and reinforcement. It is also not necessary to divide the concrete by the installation of deformation joints. To reduce the deformations of the roller-compacted concrete pavement and the stresses in the concrete layer, which may occur due to environmental effects on thin slabs, when tensile stresses appear in the upper or lower part of the concrete slab depending on the air temperature, and when such stresses occur, irregularly shaped cracks can form. Splitting the concrete by cutting deformation joints can handle the risk of natural cracks. Splitting the concrete pavement is usually done by cutting $1/3$ – $1/2.5$ of the pavement thickness (Harrington et al., 2010).

Concrete pavements must have a base layer of adequate strength and resistance, thus reducing the deflections of the surface of the pavement structure and, at the same time, the stresses generated at the bottom of the concrete layer. In addition, appropriate resistance base layers also affect the functioning of concrete deformation joints and load transfer (Harrington et al., 2010; Sadeghi & Hesami, 2018; Yaqoob, 2024).

In RCC pavements, the loads between the divided areas of the concrete pavement are transferred only through the formed aggregate-gate interlock (H. Mohammed et al., 2019). The load transfer efficiency of RCC pavements from deformation seams and/or natural cracks ranges from 22 per cent to 89 per cent (Pittman, 1996). According to the Portland Cement Association (PCA), the load transfer efficiency of RCC deformation joints is 60%, while that of natural cracks is 60–90% (Griffiths & Thom, 2007).

Fatigue models are PCA model (Portland Cement Association) (Packard & Tayabji, 1985), MEPDG (Mechanical Empirical Pavement Design Guide), Mechanistic Calibrated Model (US Army Corps of Engineers) (Yang, 2004), and zero maintenance model (Federal Highway Administration) (Yang, 2004; Ruiz-Valencia et al., 2017).

One of the methods used for determining the thickness of the concrete coating layer is provided in the calculation guidelines “Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen” (RDO Beton 24). When performing calculations according to the RDO Beton 24 methodology, the main mechanical properties of concrete that are evaluated during the calculation are:

- tensile modulus of elasticity;
- splitting strength.

The modulus of elasticity in tension is related to the modulus of elasticity in compression, which is recalculated from the compressive strength. According to RDO Beton 24, calculations assume that the modulus of elasticity in tension is about 1.15 times higher than the modulus of elasticity in compression. The calculations also use the coefficient of thermal expansion, which estimates the temperature-induced bending moment. Considering other authors' studies on determining the thickness of the concrete layer, the coefficient of thermal expansion is not of great importance for the thickness of the concrete coating since the temperature-induced bending moment is not decisive for the performance of the coating construction (Vaitkus et al., 2021).

In the United States, automated calculation programs such as FAAR-FIELD or StreetPave are widely used to determine concrete pavement thickness. The flexural strength is the main mechanical property of concrete in the aforementioned automated calculation programs, which is applied in the calculations and on which the thickness of the concrete layer depends.

The automated calculation program FAARFIELD is adapted for calculations of concrete pavement structures against aircraft loads. The risk of fatigue cracks forming at the bottom of the concrete layer is evaluated when performing calculations of the toneless pavement construction using the automated calculation program FAARFIELD. Fatigue cracks are controlled by limiting the stresses that develop at the bottom of the concrete layer.

Calculations of the StreetPave concrete pavement construction are based on the mechanistic-empirical pavement design method. The calculations use mechanistic components, such as load, stresses and strains and empirical observations (Packard & Tayabji, 1985; Use of..., 2012). Fatigue and erosion conditions are checked in the pavement design calculations. Fatigue analysis evaluates the fatigue of the concrete layer in the middle and at the edge of the slab. According to the design methodology used by StreetPave, the fatigue analysis procedure checks the Miner's condition. The erosion analysis checks the erosion resistance of the base layers of the pavement structure and the disintegration of the concrete slabs at the seams, which is based on the bending of the concrete slab in the corners (Use of..., 2012).

Fatigue is the phenomenon of weakening in a material due to repeated loading cycles (American Concrete Institute, 2017). Pavement structures are constantly exposed to cyclic loads, which are caused by vehicular traffic (Papagiannakis & Masad, 2012). In concrete pavement structures, the concrete layer absorbs most of the stresses arising from loads. There are two types of stresses manifested in the concrete layer: compressive and bending (Papagiannakis & Masad, 2012). When designing concrete structures, the bending stresses occurring at the bottom of the concrete layer are the most critical since the bending strength of concrete is lower than the compressive strength. When designing and calculating concrete pavement structures, it is very important to properly assess the resulting stresses and deformations at the bottom of the concrete layer (KICI et al., 2018). Repeated bending stresses at the bottom of the concrete layer affect the progressive loss of the load-bearing properties of the concrete (Lee & Barr, 2004; Vassilopoulos, 2010). Calculations of concrete pavement structures are based on fatigue functions, which are used to check the boundary conditions of the pavement structure. Different fatigue functions are used depending on the calculation methods (Titus-Glover et al., 2005).

The original fatigue studies of traditional concrete began many years ago. Many scientists have carried out detailed studies of traditional concrete fatigue using different concrete mix compositions and materials. Meanwhile, the fatigue of roller-compacted concrete has not been studied as well by scientists. Research conducted on the fatigue of roller-compacted concrete shows different results. Some studies show that roller-compacted concrete has fatigue properties similar to traditional concrete, while other studies show that roller-compacted concrete has a higher resistance to fatigue formation. Systematised fatigue functions are presented in Table 1.6.

2. Experimental study of the behaviour of roller-compacted concrete pavement

The experimental study consists of three parts:

1. Analysing the influence of hydrothermal effects on the structure of the roller-compacted concrete installed on the base layer of soil with hydraulic binders and additives. The effect is evaluated by carrying out tests of the load-bearing capacity of the pavement structure with a falling weight deflectometer (FWD) for neutral and unfavourable hydrological conditions. Temperature-humidity sensors were installed on the road of local significance No. 130.

2. Comparing the stresses generated at the bottom of the roller-compacted concrete layer with the theoretical stresses characteristic of such a pavement construction. Stresses are determined by simulating vehicle loads with a falling weight deflectometer (FWD) on local road No. 130 with deformation sensors installed in the pavement structure.

3. Evaluating deformations of deformation joints and base erosion for roller-compacted concrete pavement structures with base layers of different mechanical properties. The research is carried out by determining the load transfer coefficient of roller-compacted concrete deformation joints and the deflections in the corners of the slabs by comparing them with the theoretical fatigue calculation algorithms.

Temperature-humidity sensors were installed in the pavement structure of the local road No. 130. The analysis of data for 2022–2023 found that the average weekly temperature at the bottom of the CTB layer varied from $-2.99\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+27.67\text{ }^{\circ}\text{C}$ and at the bottom of the RCC – from $7.34\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $31.74\text{ }^{\circ}\text{C}$. Meanwhile, the average weekly humidity at the bottom of the CTB layer varied from 6.39% to 12.64%. Temperature and humidity data were monitored for two years (2022 and 2023) in two different locations on the local road. Data were recorded at locations PK 14+00 and PK 15+00 every hour and every day with minor gaps due to technical reasons.

The deformation study at the bottom of the roller-compacted concrete was carried out by simulating a load of 200 kN with a falling weight deflectometer (FWD) at the locations where deformation sensors were installed in the pavement structure. The study was conducted in November–July 2022 and in November 2023. During the test, the pavement structure was loaded ten times with a load of 200 kN and the deformations were fixed during each loading. The data of the deformation sensor is recorded with a cycle of 0.001 seconds. During the study of deformations in November 2022 at the bottom of the CTB layer, the temperature was $7.90\text{ }^{\circ}\text{C}$; the humidity was 11.14%. In November 2023, the temperature at the bottom of CTB was $6.31\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the humidity amounted to 10.95%.

In November 2022, deformations at the bottom of the roller-compacted concrete from a load of 200kN simulated by a falling weight deflectometer (FWD) varied from 122 $\mu\epsilon$ to 141 $\mu\epsilon$, with an average of 129 $\mu\epsilon$ and a standard deviation of 6 $\mu\epsilon$. In November 2023, the strains at the bottom of roller-compacted concrete from a load of 200kN ranged from 120 $\mu\epsilon$ to 145 $\mu\epsilon$, the mean was 136 $\mu\epsilon$, and the standard deviation was 8 $\mu\epsilon$.

Considering the equivalent size of the standard axle load, the deformations were measured at the bottom of the roller-compacted concrete layer after simulating a load of 50 kN (one wheel load) with a falling weight deflectometer. The recorded deformation at the bottom of the roller-compacted concrete layer from a load of 50 kN, simulated by a falling weight deflectometer (FWD), was 37 $\mu\epsilon$. The actual stresses at the bottom of the roller-compacted concrete layer were equal to 1.40 MPa.

The research conducted on the local road No. 130 section No. 1 regarding the load transfer coefficient of deformation joints showed a variation from 32% to 86% of the load transfer coefficient of deformation joints from a load of 50 kN with an average of 61% and the average standard deviation of 19%. At road section No. 2, from a load of 50 kN, the load transfer coefficient of deformation joints varied from 53% to 100%, with an average of 75% and an average standard deviation of 18%. At Šumsko pl. 96, from a load of 50 kN, the load transfer coefficient of the deformation joints varied from 29% to 82%, with an average of 64% and an average standard deviation of 20%. At Graičiūno St. 36D, from a load of 50 kN, the load transfer coefficient of deformation joints varied from 70% to 95%, with an average of 87% and an average standard deviation of 7%. On regional road No. 4415, from a load of 50 kN, the load transfer coefficient of deformation joints varied from 85% to 89%, with an average of 88% and an average standard deviation of 1%.

The research conducted regarding the load transfer coefficient of deformation joints on local road No. 130, section No. 1, showed the variation of load transfer coefficient of deformation joints from a load of 100 kN from 39% to 87%, with an average of 65% and an average standard deviation of 16%. At road section No. 2, from a load of 100 kN, the load transfer coefficient of deformation joints varied from 52% to 98%, with an average of 72% and an average standard deviation of 15%. At Šumsko pl. 96, from a load of 100 kN, the load transfer coefficient of the deformation joints varied from 40% to 84%, with an average of 66% and an average standard deviation of 15%. At Graičiūno St. 36D, from a load of 100 kN, the load transfer coefficient of the deformation joints varied from 88% to 92%, with an average of 90% and an average standard deviation of 2%. On regional road No. 4415, from a load of 100 kN, the load transfer coefficient of deformation joints varied from 47% to 88%, with an average of 84% and an average standard deviation of 13%.

The study of the base erosion in natural objects was carried out in April 2024. The research determined the deflections of the pavement surface in the corners of the concrete slabs. It was carried out at two objects where the RCC is installed on the crushed aggregate base layer (road No. 4415 and Graičiūno st. 36D), at two different road No. 130 sections where the RCC is placed on the base layer of soils reinforced with a hydraulic binder and an ion exchange improving additive (road No. 130, sections No. 1 and No. 2) and at one facility where a traditional concrete is installed on the base layer of soils reinforced with a hydraulic binder and an ion exchange improving additive (Šumsko pl. 96). The surface

deflections in the corners of the concrete slabs were measured with a falling weight deflectometer simulating a load of 50 kN and 100 kN. Considering the research results, at local road No. 130, section No. 1, from a load of 50 kN, the surface deflections of the concrete slabs at the corners varied from 142 μm to 625 μm , with an average of 266 μm and an average standard deviation of 166 μm . At section No. 2, from a load of 50 kN, the surface deflections of the concrete slabs at the corners varied from 183 μm to 668 μm , with an average of 383 μm and an average standard deviation of 163 μm . At Šumsko pl. 96, from a load of 50 kN, the deflections of the surface of the pavement at the corners of the concrete slabs varied from 138 μm to 432 μm , with an average of 221 μm and an average standard deviation of 94 μm . At Graičiūno St. 36D, from a load of 50 kN, the surface deflections of the concrete slabs at the corners varied from 109 μm to 210 μm , with an average of 135 μm and an average standard deviation of 34 μm . On regional road No. 4415, from a load of 50 kN, the surface deflections of the concrete slabs at the corners varied from 112 μm to 192 μm , with an average of 141 μm and an average standard deviation of 27 μm .

3. Stress and deformation limits of roller-compacted concrete pavement on soils bonded with hydraulic binders

Theoretical stresses at the bottom of the roller-compacted concrete layer were calculated using the MN LAYER (Khazanovich and Wang 2008) program. The following data were used to create a computational scheme of the pavement structure:

- design thicknesses of the layers of the coating structure;
- the modulus of elasticity of roller-compacted concrete, calculated from the actual flexural strength, determined during the reconstruction of the object;
- the modulus of elasticity of the lower and upper base layer made of soils bound with hydraulic binders and additives (CTS and CTB), calculated during back-calculation of the modulus of elasticity of the layers of the pavement structure;
- the typical modulus of elasticity of the natural subgrade.

The theoretical, computational model of the pavement structure, made considering the actual mechanical properties of the pavement structure, is presented in Figure S.3.1.

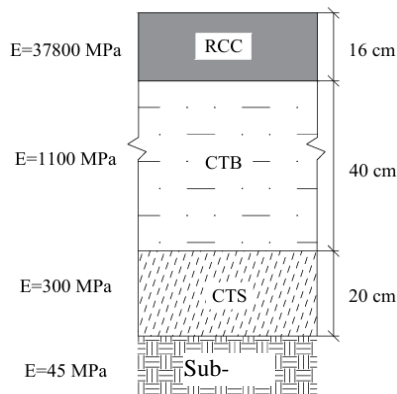


Fig. S.3.1. Computational scheme of pavement structure

The theoretical stresses at the bottom of the RCC and CTB are calculated considering the created theoretical, computational scheme of the pavement structure. Theoretical stresses at the bottom of the RCC and CTB were calculated using the MN LAYER (Khanzovich and Wang 2008) program; the results are presented in Table S.3.1.

Table S.3.1. Theoretical stresses at the bottom of the RCC and CTB layer

Load, kN	Stresses at the bottom of RCC, MPa	Stresses at the bottom of CTB, MPa
50	2.03	0.088
100	4.06	0.176
200	8.11	0.351

A critical variable for joint deformation and base erosion fatigue is the deflection of the pavement surface at the corner of the slab. Considering the equivalent size of the standard axle load, the deflections of the pavement surface at the corners of the slabs were measured with a falling weight deflectometer from a load of 50 kN. Systematised statistical indicators of deformation joint deformations and base erosion research from 50 kN load are given in Figure S.3.2.

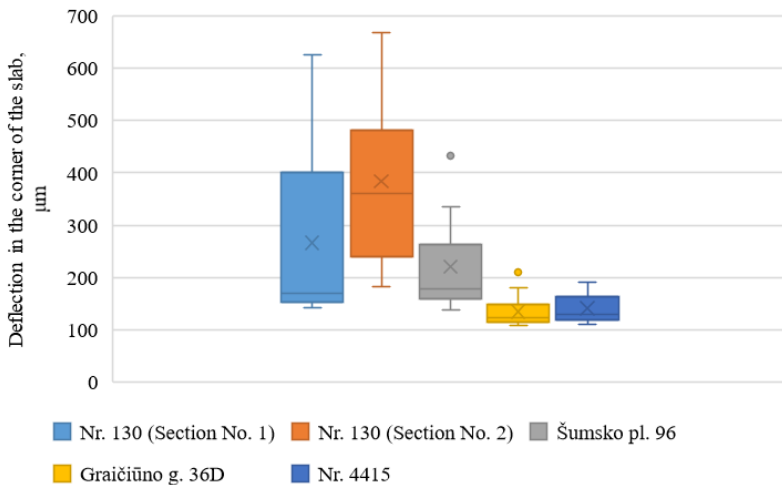


Fig. S.3.2. Box plot diagram of corner concrete slab deflection (50 kN)

Considering the different composition, materiality, mechanical properties of the layers of the objects and the values of the lower quartiles (Q3) presented, the limits of the pavement surface are accepted deflections in the corner of the slab, which are used in the fatigue function of joint deformations and base erosion. Table S.3.2 provides the limit deflections of the surface of the pavement in the corner of the slab, considering the different composition and properties of the pavement structure.

Table S.3.2. Marginal pavement surface deflection at the corner of the slab

RCC flexural strength, MPa	Base type	Limit deflections, μm (50 kN)	Limit deflections, μm (100 kN)
5.6	CTB	358	432
6.5	SPS	156	279
7	CTB	235	247

Calculations of deformation joint deformations and base erosion fatigue were performed by evaluating the limit deflections of the pavement surface at the corner of the slab presented in Table S.3.3 and by evaluating the intermediate limit deflections calculated according to Yang (2004) derived dependencies between the size of the deflection at the corner of the slab and the increase in the thickness and/or flexural strength of the concrete layer. Table S.3.3 presents the results of the calculation of deformation joint deformations and the base erosion fatigue function.

Table S.3.3. Results of calculation of faulting/erosion fatigue function

Base	k value, MPa/m	RCC flexural strength, MPa	RCC thickness, cm	Limit deflections ¹⁾ , μm		P	
				50 kN	100 kN	50 kN	100 kN
CTB	235 ²⁾	5.5	16	358	432	45.64	66.46
			18	315	380	31.41	45.71
			19	293	358	25.75	38.44
		6.5	16	293	355	30.57	44.88
			18	258	312	21.07	30.81
			19	240	294	17.27	25.92
		7.0	16	265	277	25.01	27.32
			18	235	247	17.48	19.31
			19	217	233	14.12	16.28
Crushed aggregate	115 ³⁾	5.5	16	207	370	6.15	19.65
			18	184	330	4.32	13.90
			19	174	311	3.66	11.69
		6.5	16	175	313	4.40	14.07
			18	156	279	3.11	9.93
			19	147	263	2.61	8.36
		7.0	16	153	285	3.36	11.66
			18	136	254	2.36	8.23
			19	129	240	2.01	6.96

Notes: ¹⁾ Deflection in the corner of the slab. ²⁾ k value was calculated considering 6% subgrade CBR and 45 cm thickness CTB ($E=1100$ MPa). ³⁾ k value was calculated considering 6% subgrade CBR and 20 cm thickness SPS ($E=350$ MPa).

General conclusions

1. The temperature-humidity sensors installed in the pavement structure of local road No. 130 were used for data analysis for 2022–2023, and the bearing capacity tests were performed at different times of the year (under neutral and unfavourable hydrothermal regime effects) with a falling weight deflectometer. It was determined that the bearing

capacity of the pavement structure increased over time since measurements were taken nine months after the installation of the pavement structure, the deflections w_0 decreased, and the equivalent stiffness modulus E_0 increased.

2. The comparison of the actual stresses determined from the deformation sensors installed at the bottom of the RCC and the theoretical stresses calculated according to the pavement structure scheme was used to determine that the actual stresses at the bottom of the RCC were 31% lower than the theoretical stresses. In addition, 31% lower actual than theoretical stresses at the bottom of the RCC reduced the stress ratio (SR) used in the crack fatigue function, thereby ensuring greater margin and greater resistance to fatigue cracking.

3. Studies of the load transfer efficiency of deformation joints have shown that the load transfer efficiency of RCC expansion joints formed by cutting $1/3$ – $1/2.5$ of the pavement thickness was greater than 80% in most of the studied locations. Some locations had a load transfer efficiency of less than 80%. The main reason for this may be the improper formation of aggregate interlock in the deformation joints. Load transfer between different slabs is particularly important for axial loads exceeding 10 t. The studies have established that under heavy transport loads when the axle load is ≥ 10 t, a 16 cm RCC thickness ensures the upper quartile of load transfer, which determines good or acceptable load transfer.

4. A calculation scheme for the pavement structure has been developed and recommended solutions for RCC pavement structures have been presented, which can be applied in high-load areas (for example, intermodal terminals and military mobility facilities) and structures with a lower driving comfort level, ensuring pavement smoothness $IRI \leq 2.0$ m/km, i.e., local roads and regional roads of state significance, with an average annual daily traffic intensity (VMPEI) < 1000 vehicles/day, permissible driving speed ≤ 90 km/h. (Tables 3.6 and 3.7).

5. To ensure the uniformity of the mechanical properties of RCC pavement structures installed on CTS and CTB and their compliance with the design values, technical specifications for RCC, CTS and CTB and requirements for the installation control of RCC pavement structures on CTB and CTS, have been prepared and presented. The technical specifications and control parameters of the layers have been selected considering the input data of the mechanistic-empirical pavement construction method (RCC bending strength and strength characteristics of the base layers), the suitability of the mixtures for the intended purpose, the technological feasibility of the installation of the layers, and the prevailing climatic conditions.

Recommendations

1. When performing pavement structure calculations using mechanistic-empirical pavement design methods, it is recommended to use the mechanical properties of RCC, CTB and CTS layers presented in the dissertation.

2. To reduce the risks of deformation of expansion joints and erosion of the base, in traffic areas where the axial load of heavy transport vehicles is ≥ 10 t, it is recommended to apply an RCC layer thickness of at least 16 cm, regardless of the calculated RCC layer thickness.

Rafal MICKEVIČ

KELIO DANGOS VOLUOJAMOJO BETONO ANT HIDRAULINIAIS
RIŠIKLIAIS SURIŠTO GRUNTO PAGRINDO STIPRUMO
IR DEFORMACIJŲ TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Statybos inžinerija (T 002)

INVESTIGATIONS ON THE STRENGTH AND DEFORMATIONS
OF ROLLER-COMPACTED CONCRETE PAVEMENT ON
SOIL BASE BOUNDED WITH HYDRAULIC BINDERS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Civil Engineering (T 002)

Lietuvių kalbos redaktorė Laimutė Kertenienė
Anglų kalbos redaktorė Jūratė Griškėnaitė

2025 04 11. 10,8 sp. l. Tiražas 20 egz.
Leidinio el. versija <https://doi.org/10.20334/2025-016-M>
Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius
Spausdino UAB „Ciklonas“,
Žirmūnų g. 68, 09124 Vilnius