VILNIUS TECH
Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Aja TUMAVIČĖ

GELEŽINKELIO TRANSPORTO SUKELIAMĄ TRIUKŠMĄ MAŽINANČIŲ SIENUČIŲ PARAMETRŲ TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (T 002)

Vilnius, 2025

2025-006-M

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Aja TUMAVIČĖ

GELEŽINKELIO TRANSPORTO SUKELIAMĄ TRIUKŠMĄ MAŽINANČIŲ SIENUČIŲ PARAMETRŲ TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (T 002)

Vilnius, 2025

Disertacija rengta 2013–2025 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Disertacija ginama eksternu.

Mokslinis konsultantas

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

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

Pirmininkas

prof. dr. Jurgita ANTUCHEVIČIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Statybos inžinerija T 002).

Nariai:

doc. dr. Raimondas GRUBLIAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Aplinkos inžinerija T 004),
doc. dr. Robertas KERŠYS (Kauno technologijos universitetas, Transporto inžinerija T 003),
doc. dr. Marek PSZCZOLA (Gdansko technikos universitetas, Lenkija, Statybos inžinerija – T 002),
doc. dr. Rasa UŠPALYTĖ-VITKŪNIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Statybos inžinerija T 002).

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

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.
Tel.: (+370 5) 274 4956; faksas (+370 5) 270 0112; el. paštas doktor@vilniustech.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2025 m. vasario 13 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 2025-006-M mokslo literatūros knyga

https://doi.org/10.20334/2025-006-M

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2025
© Aja Tumavičė, 2025
aja.tumavice@vilniustech.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Aja TUMAVIČĖ

RESEARCH OF PARAMETERS OF RAILWAY NOISE BARRIERS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (T 002)

Vilnius, 2025

The doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2013–2025.

The dissertation is defended as an external work.

Scientific Consultant

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

Chairperson

Prof. Dr Jurgita ANTUCHEVIČIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering T 002).

Members:

Assoc. Prof. Dr Raimondas GRUBLIAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Environmental Engineering T 004),

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

Assoc. Prof. Dr Marek PSZCZOLA (Gdansk University of Technology, Poland, Civil Engineering T 002),

Assoc. Prof. Dr Rasa UŠPALYTĖ-VITKŪNIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering T 002).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of the Scientific Field of Civil Engineering in the *Aula Doctoralis* hall of Vilnius Gediminas Technical University at **10 a.m. on 14 March 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 13 February 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).

Reziumė

Siekiant užtikrinti tvarią geležinkelių transporto plėtrą, būtina sumažinti riedmenų skleidžiamą triukšmą. Žemos triukšmo mažinimo sienutės, veiksmingai slopinančios rato ir bėgio sąveikoje kylantį riedėjimo triukšmą, gali būti tinkama priemonė triukšmui mažinti geležinkelių keliuose, kuriuose riedmenų važiavimo greitis neviršija 250 km/h. Tačiau, siekiant padidinti jų veiksmingumą, tokias sienutes reikėtų taikyti esant tam tikroms sąlygoms bei tinkamai parinkti jų techninius parametrus.

Disertacijos tikslas siekiant sumažinti riedėjimo skleidžiamo triukšmo poveikį aplinkai, pateikti rekomendacijas žemoms triukšmo mažinimo sienutėms taikyti tiesiuose geležinkelių bėgių kelio ruožuose bei žemos triukšmo mažinimo sienutės parinkimo algoritmą. Darbe sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai: triukšmo sienučių įneštinio silpninimo nustatymas atliekant eksperimentą ir riedmenų, judančių skirtingais važiavimo greičiais, skleidžiamo triukšmo mažinimo skirtingo aukščio triukšmo sienučių veiksmingumo palyginimas modeliuojant.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, išvados, literatūros sąrašas ir keturi priedai. Įvade pristatoma tyrimo problema, aprašomas darbo aktualumas ir tyrimų objektas, darbo tikslas ir uždaviniai, tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė ir ginamieji teiginiai, pateikiama disertacijos struktūra. Pirmame skyriuje atliekama literatūros analizė. Aprašyti rato ir bėgio sąveikos sukeliamo triukšmo mechanizmas bei modeliai, išnagrinėtas geležinkelių bėgių kelio skleidžiamo triukšmo teisinis reglamentavimas, aptarti moksliniai tyrimai geležinkelių bėgių kelio skleidžiamo triukšmo mažinimo tematika. Remiantis užsienio šalių patirtimi bei įvertinus Lietuvos sąlygas, sudarytas žemos triukšmo mažinimo sienutės taikymo modelis. Antrame skyriuje atlikta riedmenų važiavimo greičio ir geležinkelių skleidžiamo triukšmo lygio koreliacijos analizė, parengtas eksperimentinio tyrimo planas ir metodikos. Trečiame skyriuje atliktas triukšmo mažinimo priemonių veiksmingumo įvertinimas daugiakriteriu metodu. Siekiant nustatyti įvairaus aukščio bei ilgio triukšmo mažinimo sienučių veiksmingumą, atlikti eksperimentiniai triukšmo mažinimo sienutės įneštinio silpninimo lauko sąlygomis bei skaitinio modeliavimo CadnaA paketo programa tyrimai. Atlikta statistinė žemų triukšmo mažinimo sienučių parametrų, darančių įtaką įneštinio silpninimo vertėms, analizė.

Disertacijos tema paskelbti 7 straipsniai: 2 mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Web of Science* duomenų bazę, 1 recenzuojamame mokslo žurnale, 1 tarptautinės konferencijos medžiagoje, referuojamoje *Web of Science* duomenų bazėje, bei 3 kituose tarptautinių ir respublikinės konferencijų leidiniuose.

Abstract

Sustainable development of rail transport requires adequate mitigation of the noise emitted by rolling stock. Low noise barriers, which effectively mitigate rolling noise arising from the rail/wheel interaction, are a suitable means of noise reduction on railways where the speed of rolling stock does not exceed 250 km/h. However, to ensure their effectiveness, such barriers should be applied under certain conditions, and their technical parameters should be properly selected.

The dissertation aims to present recommendations for applying low-noise barriers in straight sections of railway tracks and an algorithm to select a low-noise barrier to reduce the impact of rolling noise on the environment. The work addresses several main tasks: determines the insertion loss of a noise barrier by experiment and uses numerical simulation to compare the effectiveness of different height noise barriers in mitigating the noise of rolling stocks moving at different speeds. The dissertation consists of an Introduction, three chapters, conclusions, and references. The introduction formulates the research problem, describes the relevance of the work and the object of research, formulates the aim and tasks of the work, describes the research methodology, the scientific novelty of the work, the practical significance of the work results and defended statements, and presents the structure of the dissertation. The first chapter revises the used literature. It describes the mechanism and models of the noise caused by the wheel/rail interaction, examines the legal regulation of the noise emitted by the railway track, and examines scientific research on mitigating the noise emitted by the railway track. Based on the experience of foreign countries and after evaluating the conditions of Lithuania, a model of applying a low noise barrier has been created. The second chapter analyses the correlation between rolling stock speed and the level of noise emitted by railways and suggests methods of experimental research. The third chapter evaluates the effectiveness of noise mitigation measures using a multi-criteria method. Experimental studies of noise barriers in field conditions and numerical modelling using the CadnaA package were carried out to determine the effectiveness of noise barriers of various sizes in mitigating the noise emitted by the railway track. A statistical analysis of the low noise barrier parameters that influence the insertion loss values was performed.

Seven scientific articles were published on the topic of the dissertation: two in scientific journals included in the *Web of Science*, one in a reviewed scientific journal, one in the *Web of Science* Proceedings database publications, and three in the scientific conference publications.

Žymėjimai

Simboliai

dB decibelas (angl. *decibel*);
dBA decibelas skalėje A (angl. *A-weighted decibel*);
D_{IL} įneštinis silpninimas (angl. *insertion loss*);
DL_{α} garso sugerties koeficientas (angl. *sound absorption coefficient*);
H aukštis, m (angl. *height*);
L ilgis, m (angl. *length*);
L_{Amax} maksimalus garso slėgio lygis, dBA (angl. *maximum sound pressure level*);
L_{dienos} dienos triukšmo rodiklis, t. y. dienos metu (nuo 7 val. iki 19 val.) triukšmo sukelto dirginimo rodiklis, t. y. vidutinis ilgalaikis A svertinis garso lygis, nustatytas vienų metų dienos laikotarpiui, dBA (angl. *day noise indicator*);
L_{dvn} – dienos, vakaro ir nakties triukšmo rodiklis, dBA (angl. *day-evening-night noise indicator*);
$L_{nakties}$ nakties triukšmo rodiklis, t. y. nakties metu (nuo 22 val. iki 7 val.) triukšmo sukelto dirginimo rodiklis, t. y. vidutinis ilgalaikis A svertinis garso lygis, nustatytas vienų metų nakties laikotarpiui, dBA (angl. *night noise indicator*);
$L_{peq,\ Tp}$ ekvivalentinis nuolatinis garso slėgio lygis, dB (angl. *equivalent continuous sound pressure level*);
L_{vakaro} vakaro triukšmo rodiklis, t. y. vakaro metu (nuo 19 val. iki 22 val.) triukšmo sukelto dirginimo rodiklis, t. y. vidutinis ilgalaikis A svertinis garso lygis, nustatytas vienų metų vakaro laikotarpiui, dBA (angl. *evening noise indicator*);

p reikšmė stebimas reikšmingumo lygmuo (angl. *p-value*);
ρ koreliacijos koeficientas (angl. *correlation coefficient*);
R^2 determinacijos koeficientas (angl. *coefficient of determination*).

Santrumpos

TMP – triukšmo mažinimo priemonė (angl. *noise mitigation measure*);

RMR – Reken- en Meetvoorschrift Railverkeerslawaai (Olandijos nacionalinė skaičiavimo metodika „Geležinkelio transporto triukšmo apskaičiavimo ir matavimo rekomendacijos“) (angl. *Calculation and Measurement Regulations for Rail Traffic Noise*).

Sąvokos

A dažninė svertis (angl. *A frequency weighting*) garso slėgio lygis, perskaičiuotas pagal Lietuvos standarto LST EN 61672-1:2014 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2014) reikalavimus.

Akustinio (garso) šešėlio zona (angl. *acoustic (sound) shadow zone*) tylos/tylesnė zona, susidaranti už triukšmo mažinimo sienutės.

Aukšta triukšmo mažinimo sienutė (angl. *high noise barrier*) triukšmo mažinimo sienutė, kurios aukštis $H \geq 1{,}5$ m.

Foninis triukšmas (angl. *background noise*) liekamasis kitų triukšmo šaltinių garsas.

Garso lygio kalibratorius (angl. *sound level calibrator*) įrenginys, skirtas garso lygio matuokliams kalibruoti.

Geležinkelių bėgių kelio skleidžiamas triukšmas (angl. *noise emitted by railway track*) triukšmas, kuri sudaro geležinkelio riedmenų variklių, pagalbinės įrangos skleidžiamas triukšmas, aerodinamis triukšmas ir riedėjimo triukšmas.

Įneštinis silpninimas Δ*IL* (toliau įneštinis silpninimas) (angl. *insertion loss* Δ*IL*) garso slėgio lygių skirtumas (decibelais), kai imtuvas tam tikroje vietoje prieš įrengiant triukšmo mažinimo sienutę ir po įrengimo, užtikrinant, kad nepasikeitė triukšmo šaltinis, reljefas, įtakos turinčios kliūtys ir atspindintys paviršiai (jei tokių yra), vietos ir meteorologinės sąlygos.

Maksimalus laikinis ir dažninis svertinis garso slėgio lygis (angl. *maximum time and frequency weighted sound pressure level*) pagal standartą LST ISO 1996-1:2017 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2017) tai yra didžiausias laikinis ir dažninis svertinis garso slėgio lygis per nustatytą laiko intervalą.

Riedėjimo triukšmas (angl. *rolling noise*) triukšmas kylantis dėl riedmenų rato ir bėgio sąveikos.

Tiesioginis įneštinio silpninimo nustatymo metodas (angl. *direct method for determining insertion loss*) metodas, kai įneštinis silpninimas nustatomas iš garso slėgio lygių prieš įrengiant sienutę ir po jos įrengimo skirtumo.

Tiesus geležinkelio ruožas (angl. *straight railway line*) geležinkelio kelio ruožas, kuriame nėra horizontaliųjų kreivių ir (arba) yra horizontaliosios kreivės, tačiau jų spinduliai yra ne mažesni nei 4000 m.

Transporto skleidžiamas triukšmas (angl. *noise emitted by transport*) tai transporto priemonių (kelių, geležinkelių, orlaivių) eismo skleidžiamas nuolatinis arba daugelio kartotinių pavienių garso įvykių triukšmas.

Triukšmas (angl. *noise*) nepageidaujami arba žmogui kenksmingi išoriniai garsai, kuriuos sukuria žmonių veikla.

Triukšmo mažinimo priemonė (angl. *noise mitigation measure*) priemonė, skirta triukšmui mažinti aplinkoje.

Triukšmo mažinimo sienutė (angl. *noise barrier*) triukšmo mažinimo priemonė, kuri užstoja tiesioginį kelių transporto sukeliamo ore sklindančio garso perdavimą.

Triukšmo mažinimo sienutės skaitinis modeliavimas (angl. *numerical simulation of a noise barrier*) skaičiavimais parinktų optimalių triukšmo mažinimo sienutės parametrų ir padėties įvertinimas.

Triukšmo mažinimo sienutės veiksmingumas (angl. *effectiveness of the noise barrier*) tinkamiausia konkrečiai vietai triukšmo mažinimo sienutė, įvertinus vietines sąlygas, ir parinkta pagal įneštinio silpninimo ΔIL vertę.

Triukšmo ribinis dydis (angl. *noise limit value*) triukšmo rodiklio vertė, kurią viršijus, triukšmo šaltinio valdytojas privalo imtis priemonių skleidžiamam triukšmui šalinti ar mažinti.

Triukšmo rodiklis (angl., *noise indicator*) tai garso, suvokiamo kaip triukšmas, duomuo, išreikštas fizikiniais garso mato vienetais.

Žema triukšmo mažinimo sienutė (angl., *low noise barrier*) arti bėgių kelio įrengiama triukšmo mažinimo sienutė, kurios aukštis $H \leq 1{,}5$ m.

Turinys

ĮVADAS 1
Problemos formulavimas 1
Darbo aktualumas 2
Tyrimų objektas 2
Darbo tikslas 2
Darbo uždaviniai 2
Tyrimų metodika 3
Darbo mokslinis naujumas 3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė 4
Ginamieji teiginiai 4
Darbo rezultatų aprobavimas 4
Disertacijos struktūra 5

1. MOKSLO DARBŲ, SKIRTŲ GELEŽINKELIŲ KELIO KELIAMAM TRIUKŠMUI IR JO MAŽINIMO PRIEMONĖMS, ANALIZĖ 7
1.1. Geležinkelių bėgių kelio skleidžiamo triukšmo ir jo mažinimo teisinis reglamentavimas 7
1.2. Rato ir bėgio sąveikos skleidžiamo triukšmo mechanizmas ir modeliai 14
1.3. Geležinkelių bėgių kelio skleidžiamo triukšmo ir riedmenų važiavimo greičio sąsajos 21

1.4. Geležinkelių bėgių kelio skleidžiamo triukšmo mažinimo priemonės ir jų įneštinis silpninimas 23
1.5. Žemos triukšmo mažinimo sienutės ties geležinkelių bėgių keliu 27
1.6. Aukštų ir žemų triukšmo mažinimo sienučių ties geležinkelių bėgių keliu veiksmingumo tyrimų analizė 31
1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas 36

2. TRIUKŠMO MAŽINIMO SIENUČIŲ VEIKSMINGUMO EKSPERIMENTINIS TYRIMAS IR ĮVERTINIMAS 39
2.1. Didžiausio leistino greičio ruožų geležinkelių bėgių kelio Kyviškės-Valčiūnai analizė 39
2.2. Įneštinio silpninimo nustatymo lauko sąlygomis eksperimentiniai tyrimai 40
2.2.1. Eksperimentinio tyrimo lauko sąlygomis metodika 40
2.2.1.1. Įneštinio silpninimo verčių nustatymas lauko sąlygomis, ties geležinkelių bėgių keliu 40
2.2.1.2. Įneštinio silpninimo verčių nustatymas lauko sąlygomis, ties geležinkelių bėgių keliu, netiesioginiu metodu 41
2.2.1.3. Įneštinio silpninimo nustatymui naudota įranga 42
2.2.1.4. Įneštinio silpninimo nustatymo schema ir tyrimo vieta 43
2.2.1.5. Įneštinio silpninimo verčių nustatymo lauko sąlygomis bandymas 45
2.3. Skaitinio modeliavimo vykdymo schema 51
2.4. Skaitinis triukšmo mažinimo sienučių modeliavimas 52
2.5. Skaitinio modeliavimo metodika 53
2.6. Antrojo skyriaus išvados 55

3. ŽEMŲ TRIUKŠMO MAŽINIMO SIENUČIŲ PARAMETRŲ ĮTAKOS JŲ VEIKSMINGUMUI VERTINIMAS 57
3.1. Triukšmo mažinimo priemonių veiksmingumo įvertinimas daugiakriteriu metodu 57
3.2. Įneštinio silpninimo verčių nustatymo lauko sąlygomis netiesioginiu metodu rezultatai 76
3.3. Skirtingo aukščio triukšmo sienučių palyginimas skaitiniu modeliavimu 84
3.4. Triukšmo mažinimo sienučių parametrų, darančių įtaką įneštinio silpninimo vertėms, statistinis įvertinimas 97
3.5. Trečiojo skyriaus išvados 107

BENDROSIOS IŠVADOS 111

REKOMENDACIJOS 113

LITERATŪRA IR ŠALTINIAI 115

AUTORĖS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJOS DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS 133

SUMMARY IN ENGLISH 135

Contents

INTRODUCTION....1
Problem formulation 1
Relevance of the dissertation.... 2
Object of the research.... 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 the research findings 4
The structure of the dissertation 5

1. ANALYSIS OF SCIENTIFIC WORKS ON RAILWAY ROAD NOISE AND ITS MITIGATION MEASURES.... 7
1.1. Legal regulation of railway track noise and its mitigation 7
1.2. Mechanism and models of noise emitted by wheel/rail interaction.... 14
1.3. Relationships between railway track noise and vehicle speed.... 21
1.4. Measures for mitigating the noise emitted by the railway tracks and their insertion loss.... 23
1.5. Low noise barriers on railway tracks.... 27

1.6. Analysis of studies on the effectiveness of high and low noise barriers on railway tracks 31
1.7. Conclusion of the first chapter and formulation of the dissertation tasks 36

2. EXPERIMENTAL STUDY AND EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF NOISE BARRIERS 39
2.1. Analysis of the maximum allowed speed zones of the Kyviškės-Valčiūnai railway track 39
2.2. Experimental studies of insertion loss determination under field conditions 40
2.2.1. Methodology of experimental research under field conditions 40
2.2.1.1. Determination of insertion loss values in field conditions at a railway track 40
2.2.1.2. Determination of the insertion loss values in field conditions, at the railway track, by indirect method 41
2.2.1.3. Equipment used to determine the insertion loss 42
2.2.1.4. Insertion loss determination scheme and research location 43
2.2.1.5. Field test of insertion loss values 45
2.3. Scheme of numerical modelling execution 51
2.4. Numerical noise barrier simulation 52
2.5. Methodology of numerical simulation 53
2.6. Conclusions of the second chapter 55

3. EVALUATION OF THE IMPACT OF LOW NOISE BARRIER PARAMETERS ON THEIR EFFECTIVENESS 57
3.1. Evaluation of the effectiveness of noise mitigation measures using a multi-criteria method 57
3.2. Results of in situ determination of insertion loss values using an indirect method 76
3.3. Numerical comparison of noise barriers of different heights in simulation 84
3.3. Statistical evaluation of the hybrid noise barrier parameters that affect the insertion loss values 97
3.6. Conclusions of the third chapter 107

GENERAL CONCLUSIONS 111

RECOMMENDATIONS 113

REFERENCES 115

THE LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION 133

SUMMARY IN ENGLISH 135

Įvadas

Problemos formulavimas

Pasaulyje dėl aplinkosauginių sumetimų (mažos energijos sąnaudos, išmeta mažai CO_2) yra skatinamas geležinkelių transportas, tačiau jis teršia aplinką ir skleidžia itin didelį triukšmą (Oertli & Hubner, 2010; Thompson et al., 2009; Wiebe et al., 2011). Pagrindiniai triukšmo poveikiai žmogui yra nervingumas, miego bei klausos sutrikimai (Elmenhorst et al., 2012; Le Prell & Clavier, 2017; Licitra et al. 2016; Louen et al., 2014), širdies sutrikimai (Walker et al. 2016), hipertenzija (Sørensen et al., 2011; Zeeb et al., 2017), vėžys (Erdmann et al., 2022; Sorensen et al., 2021). Poveikis stipresnis naktį, transportui intensyviau judant (Möhler et al., 2018, Schreckenberg et al., 2018). Itin erzina kintantys triukšmo dažniai (Yoon et al. 2018). Sąnaudos sveikatai dėl triukšmo sudaro 1 Eur/1000 km (Siciliano et al., 2016) ir kinta priklausomai nuo triukšmo lygio (Andersson et al., 2013). Taip pat mažina nuosavybės vertę (Beimer & Maennig, 2017; Chang & Kim,2012; Cushing-Daniels & Murray, 2005; Łowicki & Piotrowska, 2015). Ataskaitoje *Challenge 2050* ypač pabrėžiamas neigiamas triukšmo ir vibracijos poveikis (Moretti et al., 2013). ES dokumente „Baltoji knyga“ (2011) ir ES tarnybų dokumente (European Commission, 2011) numatoma, kad iki 2050 m. išlaidos dėl triukšmo turi būti sumažintos 46 %, todėl būtina mažinti triukšmą ties geležinkeliais.

Darbo aktualumas

Darbe pateikti žemų triukšmo mažinimo sienučių, ties geležinkeliais, tyrimai. Tokios sienutės pasaulyje diegiamos jau daugiau nei 20 m., tačiau nėra plačiai taikomos, ypač Lietuvoje. Nors jų įneštinio silpninimo vertės dažniausiai yra mažesnės nei įprastų sienučių, tačiau įrengimo sąnaudos mažesnės, didesnis eismo saugumas ir kt. Šiuo metu Lietuvoje didžiausia problema, susijusi su geležinkelių bėgių kelių skleidžiamu triukšmu, kyla geležinkelio tarpstočių ruožuose, einančiuose per gyvenamąsias teritorijas, ypač ties pervažomis. Kai riedmenų riedėjimo greitis yra nuo 50 km/h iki 240–250 km/h, vyrauja rato ir bėgio sąveikos skleidžiamas riedėjimo triukšmas (Guiral & Alonso, 2018; Hemsworth, 2008). Europinės vėžės „Rail Baltica“ didžiausias projektinis greitis iki 249 km/h, todėl Lietuvoje riedėjimo triukšmo slopinimas yra aktualus. Grubliauskas et al. (2014) nustatė, kad geležinkelių transporto skleidžiamo triukšmo lygis (ekvivalentinis ir maksimalus), išmatuotas 20 m atstumu nuo geležinkelio, gyvenamosiose teritorijose, ~ 20 dB viršijo ribines vertes. Žemos triukšmo mažinimo sienutės būtent ir skirtos tokiam triukšmui mažinti. Tačiau Lietuvoje yra taikomas gana didelis kelio gabaritas (3,1 m), kuriame, esant žemai sienutei, ji nebus veiksminga. Būtina parinkti tinkamus sienučių parametrus tam, kad būtų užtikrintas didžiausias sienučių veiksmingumas.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas tiesiuose geležinkelio ruožuose įrengtų aukštų ir žemų triukšmo mažinimo sienučių veiksmingumas.

Darbo tikslas

Disertacinio darbo tikslas mažinti riedmenų riedėjimo skleidžiamo triukšmo poveikį aplinkai (žmonėms), sudarant žemos triukšmo mažinimo sienutės taikymo ties balastuoto geležinkelių bėgių keliu algoritmą ir pasiūlant rekomendacijas veiksmingų parametrų (aukščio, ilgio, formos, atstumo nuo geležinkelių bėgių kelio) triukšmo sienučių, taikomų tiesiuose geležinkelių bėgių kelio ruožuose, parinkimo metodikai tobulinti.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti sprendžiami šie uždaviniai:

1. Sudaryti žemos triukšmo mažinimo sienutės taikymo ties balastuoto geležinkelių bėgių keliu algoritmą, atsižvelgiant į žemų triukšmo mažinimo sienučių taikymo patirtį užsienio šalyse, bei įvertinus Lietuvos sąlygas.
2. Parinkti racionaliausią, tolesniuose tyrimų etapuose analizuotiną triukšmo mažinimo priemonę, naudojant daugiakriterį TOPSIS metodą.
3. Atlikti garso slėgio lygio matavimų eksperimentą lauko sąlygomis, nustatant aukštos triukšmo mažinimo sienutės įneštinio silpninimo vertes.
4. Skaitiniu modeliavimu palyginti riedmenų, judančių skirtingais greičiais (50–250 km/h), skleidžiamo triukšmo mažinančių skirtingų parametrų triukšmo sienučių įneštinio silpninimo vertes.
5. Atliekant statistinę analizę, įvertinti žemų triukšmo mažinimo sienučių parametrus, turinčius įtakos įneštinio silpninimo vertėms.
6. Pateikti rekomendacijas triukšmo mažinimo sienutėms parinkti.

Tyrimų metodika

Darbo tikslui pasiekti buvo naudoti eksperimentiniai aukštos triukšmo sienutės įneštinio silpninimo tyrimai pagal techninių specifikacijų CEN/TS 16272-7:2015 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2015) reikalavimus. Triukšmo mažinimo sienučių įneštinio silpninimo verčių nustatymas atliktas naudojant skaitinį triukšmo sklaidos modeliavimą. Darbe pasitelktas daugiakriteris sprendimo priėmimo TOPSIS metodas.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie statybos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Nustatyta, kad žemos triukšmo mažinimo sienutės yra tinkama triukšmo mažinimo priemonė ties geležinkeliais.
2. Sudaryti kriterijai veiksmingiausiai triukšmo mažinimo priemonei parinkti.
3. Parinkti žemų triukšmo mažinimo sienučių, veiksmingiausiai mažinančių triukšmą, parametrai.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Darbe pateikti kriterijai, veiksmingiausiai triukšmo mažinimo priemonei parinkti, gali palengvinti priemonių diegimą ties Lietuvos geležinkelių ruožais. Didinant eismo saugą, skatinamas žmonių palankumas triukšmo mažinimo priemonėms, kurios vizualiai nedarko aplinkos. Darbo rezultatai taip pat gali būti panaudoti praktikoje reglamentuojant reikalavimus triukšmo mažinimo sienutėms parinkti naujuose statybos techniniuose norminiuose dokumentuose, taip paskatinant tokių sienučių diegimą mūsų šalyje.

Ginamieji teiginiai

1. Žemos triukšmo mažinimo sienutės yra veiksminga riedėjimo skleidžiamo triukšmo mažinimo priemonė, taikytina tiesiuose geležinkelių bėgių kelio ruožuose, kai vyraujantis traukinių važiavimo greitis yra nuo 50 iki 250 km/h. Saugesnė (matomumas, evakuacija), priimtinesnė visuomenei ir pigesnė alternatyva nei aukštos triukšmo mažinimo sienutės.
2. Tinkamomis sąlygomis bei tinkamų parametrų žemų triukšmo mažinimo sienučių įneštinių silpninimų vertės, nustatytos atokiau nuo geležinkelio kelio esančioje gyvenamojoje aplinkoje, yra lygiavertės aukštų triukšmo mažinimo sienučių įneštinio silpninimo vertėms.
3. Parenkant triukšmo mažinimo sienutes, nagrinėjami parametrai, kurie daro įtaką įneštinio silpninimo vertėms, yra sienutės aukštis ir jos ilgis.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema publikuoti 7 moksliniai straipsniai: du mokslo žurnale, įtrauktame į *Web of Science* duomenų bazę (Tumavičė et al., 2017; Tumavičė & Žalimienė, 2024); vienas periodiniame recenzuojamame mokslo žurnale (Tumavičė & Laurinavičius, 2015), vienas tarptautinės konferencijos medžiagoje, referuojamoje *Web of Science* duomenų bazėje (Tumavičė et al., 2016), du kituose konferencijų leidiniuose (Tumavičė & Laurinavičius, 2015, 2016).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti 5 mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas Lietuvos ateitis“: 2014 balandžio 11–12 d., 2015 gegužės 6 d., 2016 balandžio 7 d. Vilniuje, Lietuvoje.

- TRA 2016: 6 th Transport Research Arena, 2016 balandžio 18–21 d. Varšuvoje, Lenkijoje.
- 12th International Conference "Environmental Engineering", 2023 balandžio 27–28 d. Vilniuje, Lietuvoje.

Disertacijos struktūra

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

Darbo apimtis yra 149 puslapiai, tekste panaudotos 27 numeruotos formulės, 26 paveikslai ir 37 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudoti 186 literatūros šaltiniai.

1

Mokslo darbų, skirtų geležinkelių kelio keliamam triukšmui ir jo mažinimo priemonėms, analizė

Šiame skyriuje pateikiama literatūros šaltinių apžvalga. Analizuojami ir apibendrinami rato ir bėgio sąveikos skleidžiamo triukšmo mechanizmas ir modeliai, geležinkelių bėgių kelio skleidžiamo triukšmo teisinis reglamentavimas, geležinkelių bėgių kelio skleidžiamo triukšmo mažinimo būdai ir jų akustinis veiksmingumas, aukštų ir žemų triukšmo mažinimo sienučių ties geležinkelių bėgių keliu veiksmingumo tyrimai.

Šio skyriaus tematika paskelbtos keturios autorės publikacijos (Tumavičė & Laurinavičius, 2015a, 2015b; Tumavičė et al., 2016, 2020).

1.1. Geležinkelių bėgių kelio skleidžiamo triukšmo ir jo mažinimo teisinis reglamentavimas

Siekiant veiksmingai mažinti triukšmo poveikį, būtinas teisinis reguliavimas, kuris šiame amžiuje pradėtas diegti Europos mastu. Jau 2002 m. birželio 25 d. Europos Parlamento ir Europos Sąjungos Tarybos direktyvoje 2002/49/EB (2002) buvo

nustatyta, kad visos Europos Sąjungos (toliau ES) valstybės narės privalo pasirengti strateginius triukšmo žemėlapius. Taip pat, buvo priimtas Europos komisijos (toliau EK) sprendimas 2006/66/EB (2006) dėl techninės sąveikos specifikacijos, susijusios su transeuropinės paprastųjų geležinkelių sistemos posistemiu „Riedmenys:triukšmas“. Ši techninės sąveikos specifikacija taikoma krovininių vagonų, lokomotyvų, riedmenų sąstato ir keleivinių vagonų triukšmui matuoti arba reguliuoti. Europos Parlamento ir Tarybos direktyvoje 2008/57/EB (2008) buvo nustatyti pagrindiniai aplinkosaugos reikalavimai geležinkelių bėgių kelio poveikis aplinkai turi būti vertinamas projektavimo stadijoje. Be to, geležinkelių bėgių kelias turi atitikti visų galiojančių teisės aktų, susijusių su triukšmo mažinimu, reikalavimus. Europos bendrijų komisijos komunikate Europos Parlamentui ir Tarybai (KOM(2008) 432) „Geležinkelių transporto keliamo triukšmo mažinimo priemonės, skirtos esamam riedmenų parkui“ (Europos bendrijų komisija, 2008) nurodo, kad geriausia visų Europos krovininių vagonų modernizavimui yra naudoti šių priemonių derinį: mokestį, kurio dydis priklauso nuo triukšmo lygio, sugriežtintas triukšmo ribines vertes ir savanoriškus įpareigojimus. EK direktyva 2015/996 (2015) nurodo bendruosius įvertinimo metodus, skirtus strateginiam triukšmui kartografuoti, kuriuos ES valstybės narės taiko nuo 2018 m. gruodžio 31 d. Šie metodai parengti projekto „Bendrieji triukšmo įvertinimo metodai Europos Sąjungoje“ (CNOSSOS-EU) pagrindu.

Salomons & Eisses (2018) atlikę skaičiavimus pagal CNOSSOS modelį ir palyginę su skaičiavimais pagal dabartinį olandų skaičiavimo modelį, nustatė įvairių neatitikčių, susijusių su CNOSSOS modeliu (realios problemos, susijusios su pačiu modeliu, ir neaiškumai tekstiniame modelio aprašyme),bei pateikė siūlymus joms šalinti. Peeters & van Blokland (2018) atlikę CNOSSOS sklaidos ir Harmonoise modelių analizę, taip pat aptiko neatitikčių, susijusių su EK direktyvoje 2015/996 (2015) pateiktais garso galios koeficientais, bei pateikė siūlymą jų korekcijai. Kokkonen (2018) atkreipė dėmesį, kad CNOSSOS-EU siūlomi riedėjimo ir impulsinio triukšmo koeficientai netinkami taikyti šiaurės orų sąlygomis ir turėtų būti nusistatyti kiekvienos šalies atskirai. Vergoed & van Leeuwen (2018) palyginę skaičiavimus, atliktus CNOSSOS-EU ir SRM (olandų skaičiavimo metodas) metodais, nustatė, kad geležinkelių bėgių kelio skleidžiamas triukšmas, apskaičiuotas CNOSSOS-EU metodu, yra 1,5 dB didesnis nei SRM metodu (1,6 dB standartinis nuokrypis). Faulkner et al. (2023) palyginę skaičiavimus, atliktus CNOSSOS-EU ir SRM (olandų skaičiavimo metodas) metodais, nustatė, kad CNOSSOS-EU metodu buvo apskaičiuotas didesnis gyventojų, kuriuos veikia ribinis geležinkelio skleidžiamas triukšmas, skaičius (91692 respondentų), lyginant su olandų metodu. Venkataraman et al. (2025) pasiūlė metodą patobulinti CNOSSOS-EU taikomą geležinkelio triukšmo duomenų bazę, taikant skaičiavimus TWINS modeliu.

Ne visada galima palyginti skirtingose šalyse leidžiamus maksimalius garso slėgio lygius, kadangi jie skiriasi priklausomai nuo riedmenų tipo (krovininis, keleivinis, greitasis ir t. t.), atskaitos laiko (diena, vakaras, naktis, para ir kt.), imtuvo vietos (atviras laukas, ties pastato fasadu ir t. t.) (Zanin, 2016). Kiekviena ES šalis atskirai nusistato ribines aplinką veikiančio triukšmo vertes (1.1 lentelė).

1.1 lentelė. Kai kuriose Europos Sąjungos šalyse galiojančios triukšmo ribinės vertės (HN 33:2011; Ministr Środowiska, 2014; NSW EPA, 2013; Sainz, 2012; Verheijen et al., 2011)
Table 1.1. Noise limit values in force in some European Union countries (HN 33:2011; Ministr Środowiska, 2014; NSW EPA, 2013; Sainz, 2012; Verheijen et al., 2011)

Šalis	Taikymo sritis	L_{dvn} (dBA	L_{dienos} (dBA	L_{vakaro} (dBA	$L_{nak-ties}$	L_{AeqT} (dBA)	L_{Amax} (dBA)
Austrija[1]	Geležinkelių transporto	–	70	–	60	65–70 $L_{Aeq\ (diena)}$ 55–60 $L_{Aeq\ (naktis)}$	–
Belgija (Flandrijos regionas)	Geležinkelio eismo (lauke)	–	–	–	–	40–60 $L_{Aeq\ (7–19)}$ 35–55 $L_{Aeq\ (19–22)}$ 30–55 $L_{Aeq\ (22–7)}$	–
Belgija (Valonijos regionas)	Geležinkelio eismo (lauke)	–	–	–	–	50–60 $L_{Aeq\ (7–19)}$ 45–55 $L_{Aeq\ (6–7\ ir\ 19–22)}$	–
Belgija (Briuselio regionas)	Geležinkelio eismo (lauke)	–	–	–	–	65 (70)[2] $L_{Aeq(7-22)}$ 60 (65)[2] $L_{Aeq(22-7)}$	–
Danija[1]	Geležinkelio eismo	–	–	–	–	63 $L_{Aeq(24h)}$[3]	85[3]
Estija[4]	–	–	–	–	–	–	–
Suomija	Geležinkelio eismo	–	–	–	–	58 $L_{Aeq(diena)}$ 53 $L_{Aeq(naktis)}$	–
	Gyvenamieji rajonai ir kt.	63	–	–	52	–	–
	Nauji gyvenamieji rajonai ir kt.	63	–	–	47	–	–
	Kurortai ir kt.	53	–	–	42	–	–

1.1 lentelės tęsinys

Šalis	Taikymo sritis	L_{dvn} (dBA	L_{dienos} (dBA	L_{vakaro} (dBA	$L_{nakties}$ (dBA	L_{AeqT} (dBA)	L_{Amax} (dBA)
Prancūzija	Geležinkelio eismo triukšmas	73	–	–	65	63 (60)[5] $L_{Aeq(diena)}$ 58 (55)[5] $L_{Aeq(naktis)}$	–
Vokietija[1]	Geležinkelio eismo triukšmas	–	–	–	–	67 $L_{Aeq(diena)}$ 57 $L_{Aeq(naktis)}$	–
Graikija		–	–	–	–	–	–
Vengrija	Geležinkelio eismo triukšmas	63	–	–	55	–	–
Latvija	Geležinkelio eismo triukšmas: gyvenamieji rajonai (su individualiais namais), ir kt.	–	50	45	40	–	–
	Už gyvenamųjų rajonų	–	55	50	45	–	–
	Už teritorijų su daugiafunkciniais pastatais	–	60	55	45	–	–
	Už verslo zonų, viešų vietų, ir kt.	–	60	55	50	–	–
Lietuva	Gyvenamųjų pastatų (namų) ir viešųjų paslaugų funkcijų pastatai (išskyrus viešojo maitinimo ir kultūros pastatus) aplinka, paveikta transporto triukšmo	65	65	60	55	65 $L_{Aeq\ (6–18)}$ 60 $L_{Aeq\ (18–22)}$ 55 $L_{Aeq\ (22–6)}$	70 $L_{Aeq\ (6–18)}$ 65 $L_{Aeq\ (18–22)}$ 60 $L_{Aeq\ (22–6)}$

1.1 lentelės tęsinys

Šalis	Taikymo sritis	L_{dvn} (dBA)	L_{dienos} (dBA)	L_{vakaro} (dBA)	$L_{nakties}$ (dBA)	L_{AeqT} (dBA)	L_{Amax} (dBA)
Lenkija	Geležinkelių transporto triukšmas: sveikatos centrai, ligoninės, esančios už miestų ribų	50	–	–	45	50 $L_{Aeq\ D}$ 45 $L_{Aeq\ N}$	–
	Individualūs namai, ligoninės, esančios miestuose ir k.t.	64	–	–	59	61 $L_{Aeq\ D}$ 56 $L_{Aeq\ N}$	–
	Daugiabučiai namai, poilsio zonos už miestų ribų ir t. t.	68	–	–	59	65 $L_{Aeq\ D}$ 56 $L_{Aeq\ N}$	–
	Miesto centrai (miestas > 100 000 gyventojų)	70	–	–	65	68 $L_{Aeq\ D}$ 60 $L_{Aeq\ N}$	–
Portugalija	Geležinkelių transporto triukšmas: triukšmo atžvilgiu jautri zona (gyvenamosios vietos, ligoninės, mokyklos)	55	–	–	45	–	–
	Mišrūs rajonai	65	–	–	55	–	–
	Teritorijos, nepriskirtos savivaldybėms	63	–	–	53	–	–
	Suprojektuota riba, patvirtinanti triukšmui jautrią zoną	60	–	–	50	–	–
Slovakija	Geležinkelio eismo triukšmas	60	–	–	50	–	–
Slovėnija	Geležinkelių transporto triukšmas: triukšmingumo zonose (ligoninėse ir kt.)	–	54 (57)[2]	–	44 (47)[2]	–	–

1.1 lentelės pabaiga

Šalis	Taikymo sritis	L_{dvn} (dBA)	L_{dienos} (dBA)	L_{vakaro} (dBA)	$L_{nakties}$ (dBA)	L_{AeqT} (dBA)	L_{Amax} (dBA)
Slovėnija	Už mažiau triukšmui jautrių zonų (išskyrus gyvenamieji rajonai ir t. t.)	–	59 (63)[2]	–	49 (53)[2]	–	–
	Už mažiau triukšmui jautrių zonų (žemės ūkio paskirties vietovės ir t. t.)	–	64 (69)[2]	–	54 (59)[2]	–	–
	Už triukšmui nejautrių zonų (pramonės zona t. t.)	–	69 (80)[2]	–	59 (70)[2]	–	–
Švedija	Geležinkelio eismo triukšmas	–	–	–	–	58 $L_{Aeq(24h)}$	45 L_{Amax} (patalpose)
Olandija[1]	Geležinkelio eismo triukšmas	–	–	–	57	63 $L_{Aeq(dienos)}$ 58 $L_{Aeq(vakaro)}$ 53 $L_{Aeq(nakties)}$	–

[1] Geležinkeliui 5 dBA daugiau nei transporto triukšmo ribinė vertė keliuose.
[2] Nauji triukšmo šaltiniai (esami triukšmo šaltiniai).
[3] Nauja geležinkelio linija.
[4] Individualūs triukšmo lygiai, priklausantys nuo vietos sąlygų.
[5] Skliausteliuose pateiktos vertės yra taikomos TGV (pranc. *Train à Grande Vitesse*) greitųjų geležinkelių sistemos tinkle linijoms.
– nėra duomenų.

Pagal Lietuvos higienos normą HN 33:2011 (Lietuvos Respublikos sveikatos apsaugos ministerija, 2011) didžiausi leidžiami triukšmo ribiniai dydžiai gyvenamųjų pastatų (namų) ir visuomeninės paskirties pastatų (išskyrus maitinimo ir kultūros paskirties pastatus) aplinkoje, veikiamoje transporto skleidžiamo triukšmo, dienos metu 65 dBA, vakaro metu 60 dBA ir nakties metu 55 dBA. Modeliuojant veiksmingiausio įneštinio silpninimo sienutę buvo pasirinktas nakties periodas, t. y. ribinis 55 dBA triukšmo dydis.

Standarto LST ISO 1996-2:2017 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2017) L priede nurodytos taikytinos nacionalinės ir Europos skaičiavimo metodikos, pateiktos 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. Geležinkelių transporto keliamo triukšmo skaičiavimo metodai
Table 1.2. Methods of calculating noise caused by railway transport

Šalis/regionas	Triukšmo skaičiavimo metodas
Austrija	Geležinkelių eismo, traukinių eismo, manevravimo ir perkrovimo manevrų garso lygio apskaičiavimas (vok. *Berechnung der Schallimmission durch Schienenverkehr, Zugverkehr, Verschub- und Umschlagbetrieb*) (ONR 305011:2009)
Danija, Suomija, Islandija, Norvegija, Švedija	Geležinkelių transporto triukšmo Šiaurės skaičiavimo metodas TemaNord 1996 (angl. *Railway Traffic Noise Nordic Prediction Method*). Oficialiai naudojamas Suomijoje, Islandijoje, Norvegijoje ir Švedijoje (Nielsen, 1996) Naujas geležinkelių transporto triukšmo Šiaurės skaičiavimo metodas Nord 2000 (angl. *New Nordic Prediction Method for Rail Traffic Noise*). Oficialiai naudojamas Danijoje (Jonasson & Storeheier, 2001)
Europos sąjunga	CNOSSOS-EU modelis
Prancūzija	Prancūzijos kelių, geležinkelio ir pramonės triukšmo skaičiavimo metodas NFS 31-133:2011 (angl. *French noise prediction method for road, rail and industry*) (NFS 31-133:2013)
Vokietija	Geležinkelio vertinimo lygio apskaičiavimas Schall 03 (vok. *Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege*) (Mohler et al., 2009)
Japonija	*Shinkansen* kelio triukšmo lygio skaičiavimo metodas (angl. *Prediction model of a wayside noise level of Shinkansen*) (Nagakura & Zenda, 2003)
Olandija	Geležinkelių transporto eismo triukšmo RMR I (pagrindinis) metodas ir RMR II (detalus) metodas 2012 (oland. *Reken- en Meetvoorschrift Railverkeerslawaai 2012. Standaard Rekenmethode I. Standaard Rekenmethode II*)
Šveicarija	Šveicarijos emisijos ir imisijos modelis geležinkelio triukšmui skaičiuoti SEMIBEL (vok. *Schweizerisches Emissions- und Immissionsmodell für die Berechnung von Eisenbahnlärm*) (Cerletti et al., 2020)
Jungtinė Karalystė	Geležinkelio triukšmo skaičiavimas CRN (angl. *Calculation of Railway Noise*) (Department of Transport, 1995)

Pagal Lietuvos higienos normą HN 33:2011 (Lietuvos Respublikos sveikatos apsaugos ministerija, 2011), triukšmas įvertinamas matavimo ir (ar) modeliavimo būdu, gautus rezultatus palyginant su didžiausiais leidžiamais triukšmo ribiniais dydžiais. Šioje normoje yra neaiškumų planavimo (projektavimo) stadijoje nepastovus triukšmas pagal ekvivalentinį garso slėgio lygį arba pagal L_{dvn}, L_{dienos}, L_{vakaro} ir $L_{nakties}$ triukšmo rodiklius, o užbaigus statybos darbus triukšmas turi būti vertinamas pagal ekvivalentinį garso slėgio lygį ir maksimalų garso slėgio lygį. Todėl nėra aišku, kaip įvertinti triukšmo priemonės įneštinį silpninimą, jeigu projektuojant jų veiksmingumas buvo įvertintas pagal L_{dvn}, L_{dienos}, L_{vakaro} ir $L_{nakties}$ triukšmo rodiklius.

Taikant Šiaurės skaičiavimo metodą NPM (angl. *Nordic prediction method for train noise*), kuris vystomas daugiau nei 30 metų, galima apskaičiuoti paros ekvivalentinį garso slėgį ir didžiausią garso slėgio lygį (Ringheim, 1996). Pagal Lietuvos higienos normą HN 33:2011 (Lietuvos Respublikos sveikatos apsaugos ministerija, 2011) NPM gali būti taikomas keliems transporto triukšmo lygio vertės skaičiavimams. Lui et al. (2006), atlikęs triukšmo lygio matavimo rezultatų palyginimą su skirtingais triukšmo skaičiavimo metodais, nustatė, kad tiksliausi skaičiavimų rezultatai buvo gauti taikant Jungtinės Karalystės skaičiavimo metodą CRN (angl. *The method of calculation of railway noise*). NPM metodu atlikti skaičiavimai tai pat gana gerai atitiko matavimų rezultatus (1–3 dB didesni nei išmatuoti). Kitų dviejų skaičiavimų (CSTB 92 ir pagal ISO 9613-2:1996 (International Organization for Standardization, 1996)) rezultatai mažiau atitiko matavimų rezultatus. Džambas et al. (2018) atlikęs triukšmo lygio matavimo rezultatų palyginimą su Olandijos (RMR) ir Vokietijos (Schall 03) triukšmo skaičiavimo metodais nustatė, kad matavimų rezultatus labiau atitinka Vokietijos metodu atliktų skaičiavimų rezultatai. Tikėtina, taip yra dėl galimybės triukšmo skaičiavimuose vertinti daugiau kriterijų, pavyzdžiui, geležinkelių bėgių kelio vingiuotumą, traukinio ilgį.

1.2. Rato ir bėgio sąveikos skleidžiamo triukšmo mechanizmas ir modeliai

Pagal Lietuvos Respublikos triukšmo valdymo įstatymą Nr. IX-2499 (Lietuvos Respublikos Seimas, 2004), triukšmas nepageidaujami arba žmogui kenksmingi išoriniai garsai, kuriuos sukuria žmonių veikla. Pagal Lietuvos higienos normą HN 33:2011 (Lietuvos Respublikos sveikatos apsaugos ministerija, 2011), transporto skleidžiamas triukšmas tai transporto priemonių (kelių, geležinkelių, orlaivių) eismo skleidžiamas nuolatinis arba daugelio kartotinių pavienių garso įvykių triukšmas.

Triukšmo matavimo skalė yra logaritminė, todėl net nedidelis triukšmo padidėjimas yra ženklai jaučiamas. Garso slėgio fizikinis vienetas yra paskalis (Pa). Silpniausias garsas, kurį gali pajusti žmogaus ausis yra apie 20 μPa, kai tuo tarpu didžiausias slėgis gali siekti net iki 100 Pa. Siekiant tokį platų garso slėgių diapazoną susiaurinti ir išreikšti slėgio vertes patogesnėje skalėje, yra naudojamas logaritminis vienetas decibelas (dB). Garso slėgio lygis skaičiuojamas lyginant esamą slėgį su mažiausiu žmogaus girdimu slėgiu pagal formulę:

$$L_p = 10 \times lg\frac{p^2}{p_0^2} = 20 \times lg\frac{p}{p_0}, \tag{1.1}$$

čia Lp garso slėgio lygis, dB; p garso slėgis, μPa; p_0 mažiausias žmogaus girdimas slėgis, μPa (20 μPa).

Pagal Europos Parlamento ir Komisijos direktyvą 2002/49/EB (Europos Parlamentas ir Europos Sąjungos Taryba, 2002) turi būti parinkti tokie bendrieji triukšmo rodikliai: L_{dvn} – dirginimui įvertinti ir L_{nakties} – miego trikdymui įvertinti. Pagal Lietuvos Respublikos triukšmo valdymo įstatymą Nr. IX-2499 (Lietuvos Respublikos Seimas, 2004) triukšmo rodiklis tai garso, suvokiamo kaip triukšmas, duomuo, išreikštas fizikiniais garso mato vienetais. O triukšmo ribinis dydis triukšmo rodiklio vertė, kurią viršijus triukšmo šaltinio valdytojas privalo imtis priemonių skleidžiamam triukšmui šalinti ar mažinti. Dienos, vakaro ir nakties triukšmo rodiklis L_{dvn} apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$L_{dvn} = 10lg\frac{1}{24}\left(12 \times 10^{\frac{L_{dienos}}{10}} + 4 \times 10^{\frac{L_{vakaro+5}}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_{nakties+10}}{10}}\right). \tag{1.2}$$

A svertinis garso lygis naudojamas įvertinti, kaip žmogaus ausis reaguoja į skirtingus garso slėgio lygius, t. y. suteikdama daugiau svorio dažniams, kur žmogaus klausa yra jautriausia.

Pagal technines specifikacijas CEN/TS 16272-7:2015 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2015) ekvivalentinis nuolatinis garso slėgio lygis $L_{\text{peq, Tp}}$ garso slėgio kvadrato kvadratinės šaknies vidurkio kvadrato nustatytame laiko intervale ir atskaitos garso slėgio kvadrato santykio dešimteriopas dešimtainis logaritmas, apskaičiuojamas pagal formulę:

$$L_{peq,T_p} = 10lg\left[\frac{1}{T_p}\int_{t_1}^{t_2}\frac{p^2(t)}{p_0^2}dt\right], \tag{1.3}$$

čia t_1 ir t_2 yra traukinio pravažiavimo intervalo pradžios ir pabaigos laikai, arba matavimo trukmė, jei tyrime naudojamas garsiakalbis.

$$T_p = t_2 - t_1,$$

P(t) akimirkinis garso slėgis laiko momentu *t*; p_0 atskaitos garso slėgis (lygus 20 μPa).

Turi būti nurodytas naudojamos dažnių juostos dažnis arba plotis, pavyzdžiui, ekvivalentinis nuolatinis A svertinis garso slėgio lygis L_{PAeqT}, ekvivalentinis nuolatinis vieno trečdalio oktavos juostos garso slėgio lygis ir t. t.

Pagal standartą LST ISO 1996-1:2017 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2017) ekvivalentinis nuolatinis A svertinis garso slėgio lygis L_{PAeqT} apskaičiuojamas pagal formulę:

$$L_{Aeq,T} = 10lg\left[\frac{\frac{1}{T}\int_{t1}^{t2} p_A^2(t)dt}{p_0^2}\right], \quad (1.4)$$

čia $p_A(t)$ akimirkinis A svertinis garso slėgis laiko momentu *t*; p_0 atskaitos garso slėgis (= 20 μPa). Pagal LST ISO 1996-1:2017 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2017) ekvivalentinis nuolatinis garso slėgio lygis dar yra vadinamas „laikiniu vidutiniu garso slėgio lygiu“.

Siekiant tinkami įvertinti ekvivalentinį triukšmo lygį, mažiausias matavimų intervalas turi būti toks, kad spėtų pravažiuoti 20 traukinių (po 5 kiekvienam traukinių tipui). Vertinant metinį ekvivalentinį triukšmo lygį, reikėtų pamatuoti ilgiau (Jagniatinskis et al., 2017).

Geležinkelių skleidžiamą triukšmą galima išskirti į 4 pagrindines grupes (Thompson et al., 2018):

1. Variklių skleidžiamą triukšmą.
2. Pagalbinės įrangos skleidžiamą triukšmą.
3. Aerodinaminį triukšmą.
4. Riedėjimo triukšmą.

Dažniausiai geležinkeliuose triukšmas kyla dėl rato ir bėgio sąveikos, kuri gali būti skirstoma į 3 pagrindines grupes (Thompson & Jones, 2000):

1. Riedėjimo triukšmas, atsirandantis tiesiuose ruožuose, kuris daugiausia yra nulemiamas rato ir bėgių nelygumų, sukeliančių vertikalią santykinę vibraciją. Riedėjimo triukšmas iš esmės yra linijinis procesas.
2. Smūginis triukšmas, laikytinas ekstremalia riedėjimo triukšmo forma. Jis atsiranda dėl trūkių (defektų) rate arba bėgyje. Sukeliama vibracija irgi yra vertikali, bet didžiąja dalimi tai nėra linijinis procesas.
3. „Žviegimo“ triukšmas, atsirandantis mažo spindulio kreivėse, paprastai kyla dėl šoninės sąveikos poveikio.

Nelson (1997) siūlo šiek tiek kitokį ratų/bėgio sąveikoje kylančio triukšmo skirstymą:

1. Triukšmas, skleidžiamas tiesiame geležinkelių bėgių kelio ruože.

2. Triukšmas, skleidžiamas geležinkelių bėgių kelio ruože su horizontalia kreive.
3. Smūginis triukšmas, kylantis dėl sandūrų, kelio priežiūros darbų ir kt.

Riedėjimo triukšmas yra pagrindinė geležinkelio skleidžiamo triukšmo dedamoji.

Šis triukšmas (tipinis dažnių diapazonas yra nuo 100 iki 5000 Hz) yra daug dažniau skleidžiamas nei „žviegimo“ ar smūginis triukšmas (Thompson, 2011). Įprastai riedėjimo triukšmas kyla dėl šių 4 priežasčių (Nelson, 1997):

1. Bėgių ir riedmenų ratų nelygumai.
2. Bėgių ir ratų parametrų kintamumas.
3. Bėgio ir rato valkšnumas.
4. Aerodinaminis triukšmas.

Rato ir bėgio sąveikoje kylantis riedėjimo triukšmas įprastai susidaro šių elementų sąlyčio vietoje. Abu elementai daro svarią įtaką triukšmo susidarymui (Thompson et al., 2009). Rato ir bėgo važiuojamųjų paviršių nelygumai sukelia vertikalius (santykinius) poslinkius tarp rato ir bėgio (Thompson et al., 1996a; Thompson et al., 2009). Sąlyčio vietoje atsirandančios aukšto dažnio vertikalios vibracijos yra perduodamus į abu elementus, kurie vibruoja ir skleidžia triukšmą į aplinkinį orą. Vizualus riedėjimo triukšmo kilmės mechanizmas pavaizduotas 1 pav. a) (Thompson et al., 2009).

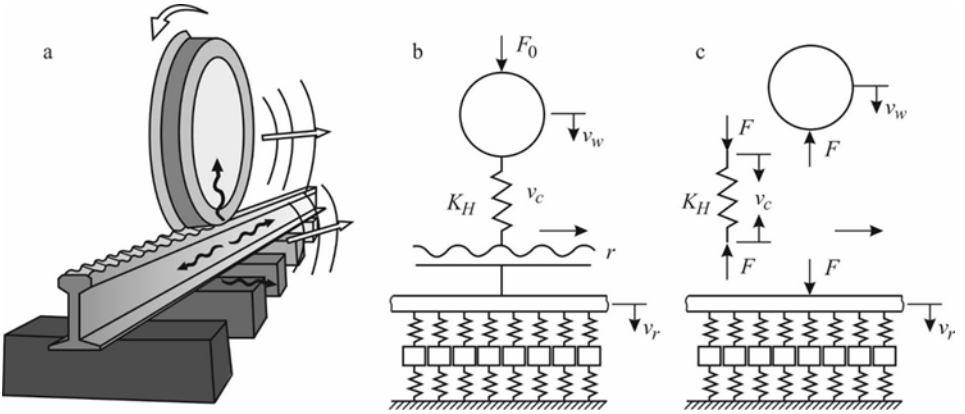
Zhang (2010) nagrinėtas PDP modelis (angl. *Model of perpendicular dipole pair*) parodė, kaip sklinda rato ir bėgio sąveikoje susidarantis triukšmas.

Bagheri et al. (2018) šiuo metu tiria naują metodą, nustatydami įprastines jėgas, susidarančias dėl rato-bėgio sąveikos, kuri pagrįsta rato įtempių matavimu.

Standartinis linijinis riedėjimo triukšmo modelis yra lygiagrečiosios varžos modelis (angl. *Parallel impedance model*). Šį modelį galima taikyti, kai yra įprastas riedėjimo triukšmas, kylantis dėl geros būklės bėgio ir rato sąveikos. Bet šis modelis neapima specifinių situacijų, pavyzdžiui, nelinijinių procesų, kuriuos sukelią dideli nelygumai, šoninės jėgos ir kitos priežastys (Nelson, 1997). Rato nelygumams įtaką daro stabdymo sistemos (Heutschi et al., 2016).

1.1 pav. b) ir c) pavaizduotos rato ir bėgio sistemos, kurią sudaro dvi dinaminės sistemos, sujungtos taške ir veikiamos santykinio poslinkio tarp jų, schema. Sąlyčio spyruoklė yra trečioji sistema lygiagrečiai sujungta su kitomis dviem sistemomis. Šiame modelyje gali būti ignoruojamas rato judėjimas išilgai bėgio ir pakeičiamas „judesio sužadinimu“ (Thompson et al., 2009).

Rato ir bėgio sąveikos skleidžiamo triukšmo modelius iš esmės galima suskirstyti į du pagrindinius modelius: „dažnių srities“ (angl. *Frequency domain*) ir „laiko srities“ (angl. *Time domain*).

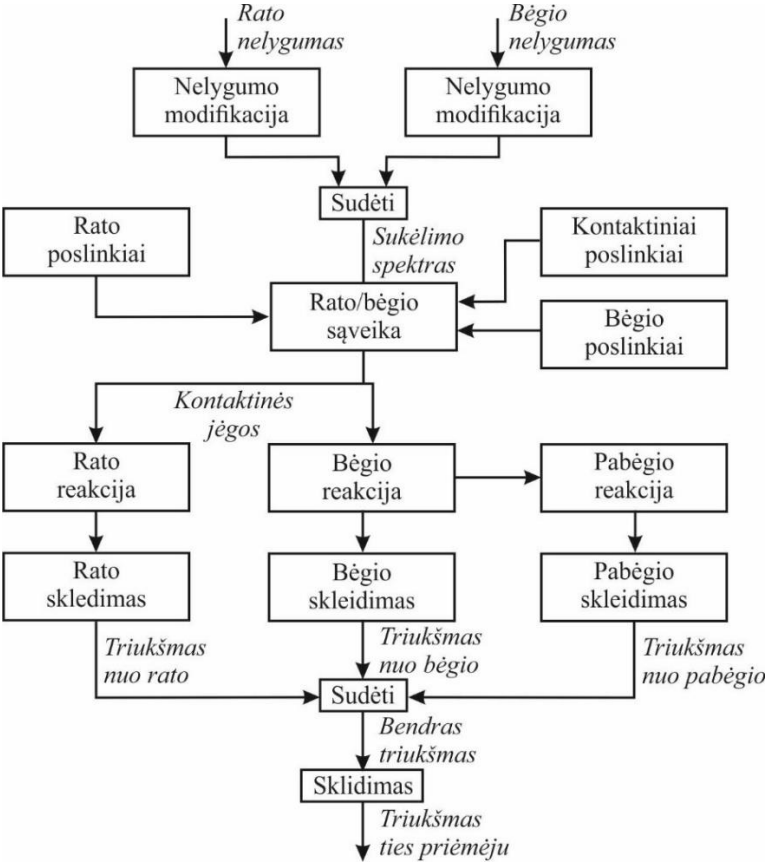


1.1 pav. a) Riedėjimo triukšmo kilmės mechanizmas; b) Rato ir bėgio sistemos schema: sužadinamas atsiranda dėl nelygumo *r* poveikio; c) Vertikaliai veikiančios dinaminės jėgos (Thompson et al., 2009)

Fig. 1.1. a) Mechanism of origin of rolling noise; b) schematic diagram of wheel/rail system. Excitation by roughness *r*; c) schematic diagram of wheel/rail system. Dynamic forces act in a vertical direction (Thompson et al., 2009)

Labiausiai išanalizuotas ir dažniausiai naudojamas „dažnių srities“ modelis, kurio pradininkas P. Remington, pradėtas plėtoti daugiau nei prieš 40 metų. Vėliau jo sukurtą modelį plėtojo ir tobulino D. J. Thompson. Pagrindinė šio modelio prielaida, kad tarp nelygumų ir garso yra linijinis sąryšis (Thompson et al., 1996a). „Dažnių srities“ modelis yra linijinis modelis (Nordborg, 1998). Šis modelis remiasi prielaida, kad riedėjimo triukšmas kyla dėl rato ir bėgio paviršiaus nelygumų, kurie veikdami vienas kitą sukelia vibraciją. Remiantis šiuo modeliu 1991 m. vykdant ERRI C163 projektą Europos geležinkeliams buvo sukurtas TWINS (angl. *Track-Wheel Interaction Noise Software*) modelis (1.2 pav.) (Thompson, 2011).

TWINS modelis skirtas apskaičiuoti skirtingų ratų ir geležinkelių bėgių kelių (bėgių ir pabėgių) triukšmo, skleidžiamo, kai pravažiuoja traukinys, emisiją. TWINS modelis apima daug teorinių modelių, skirtų įvertinti nelygumą, rato ir bėgio sąveiką, rato ir geležinkelių bėgių kelio dinamiką, garso sklaidą (Thompson et al. 1996a). Siekiant patikrinti TWINS skaičiavimų patikimumą buvo atlikta daug bandymų, kurių rezultatai parodė, kad iš esmės skirtumai tarp išmatuoto ir apskaičiuoto triukšmo lygių yra sąlyginai nedideli ~2 dB (Jones & Thompson, 2003; Kitagawa & Thompson, 2006; Thompson et al., 1996b). Vėliau modelis buvo modifikuotas, pavyzdžiui, įtraukta galimybė modeliuoti bebalastį geležinkelių bėgių kelią, skydus, montuojamus ant vagono, ir žemas triukšmo mažinimo sienutes (Talotte et al., 2003).



1.2 pav. TWINS skaičiavimo modelio schema (Thompson, 2011)
Fig. 1.2. Flow diagram of the TWINS calculation model (Thompson, 2011)

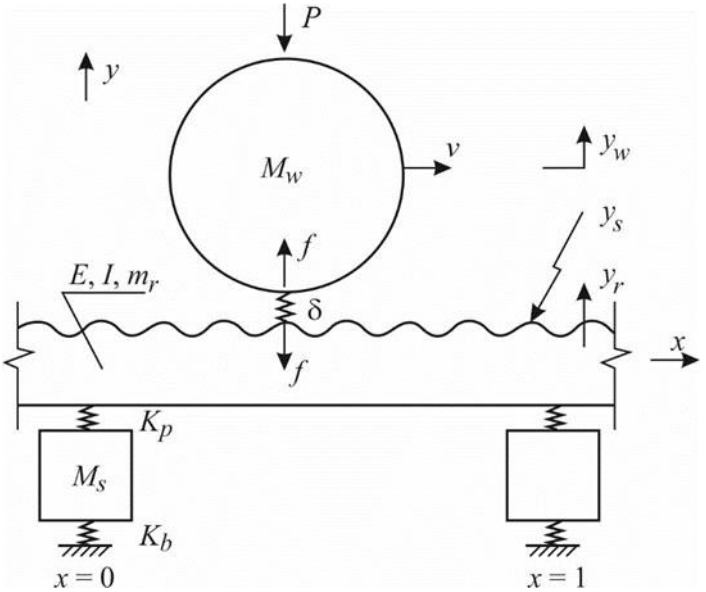
TWINS modelis plačiai ir dažnai taikomas įvairių elementų (ratų, bėgių ir kt.), skleidžiančių žemą garsą, kūryboje. Šį modelį galima panaudoti ir sukurtų elementų akustiniam veiksmingumui įvertinti. Remiantis TWINS modeliu buvo sukurti nauji teisės aktai, skirti reglamentuoti geležinkelių skleidžiamą triukšmą, pavyzdžiui, EK reglamentas (ES) Nr. 1304/2014 (Europos Komisija, 2014) (Thompson, 2011).

Patobulinus TWINS modelio skaičiavimo procedūrą, įdiegus grafinę vartotojo sąsają, buvo sukurtas RRNPS (angl. *Railway Rolling Noise Prediction Software*) modelis. Šis modelis suteikia galimybę įvertinti padėklų ir balasto dinaminių savybių poveikį garsui, atsirandančiam dėl rato ir bėgio sąveikos. RRNPS modelį palyginus su TWINS modeliu, nustatyta, kad ir RRNPS modeliu triukšmas gali būti patikimai prognozuojamas (Jiang et al., 2011). RRNPS modelis tinkamas

tirti naujas riedėjimo triukšmo, kylančio dėl bėgių nelygumų, kontrolės ir mažinimo strategijas (Jiang et al., 2014). Taip pat buvo sukurta keletas kitų šio modelio modifikacijų (Talotte et al., 2003).

„Dažnių srities“ modeliu skleidžiamas triukšmas apskaičiuojamas gana paprastai ir sparčiai. Jis yra tinkamas riedėjimo triukšmui skaičiuoti, bet norint skaičiuoti „žviegimo“ ar smūginį triukšmą, kurį sukelia didesnį nelygumai ar netolygi geležinkelių bėgių kelio epiūra, gali prireikti naudoti „laiko srities“ modelį (Knothe & Grassie, 1993). Šis modelis apimantis nelinijinius procesus daugiau nei prieš 20 metų buvo sukurtas M. Heckl. „Laiko srities“ modeliai suteikia galimybę modeliuoti tam tikras savybes, pavyzdžiui, nelinijines kontaktines spyruokles ir kt. (Nordborg, 1998).

„Laiko srities“ modelis remiasi modeliavimu baigtiniais elementais (Grassie, 1996). Šis modelis gali apimti visų tipų nelinijinius procesus, kurie dažniausiai atsiranda esant dideliems nelygumams ir/arba nedidelei statinei išankstinei apkrovai (Pieringer, 2013). Gali būti naudojama nelinijinė kontaktinė mechanika, tačiau realistiškesni rezultatai gaunami taikant diskredituotą kontaktinę sritį, įvertinant šiurkščius paviršius (Nordborg, 1998). Šio modelio principinė schema pavaizduota 1.3 pav.



1.3 pav. Laiko srities: rato ir bėgio sąveikos modelis (Nordborg, 1998)
Fig. 1.3. Time domain wheel/rail interaction model (Nordborg, 1998)

Šiuo metu modelis tobulinamas toliau. Fang et al. (2017) tyrinėjo kaip aširatis ir geležinkelių bėgių kelias reaguoja jiems sąveikaujant vienas su kitu. Han et al. (2017a) nagrinėjo šio modelio funkcionavimą prie didelių riedmenų važiavimo

greičių (300 km/h). Taip pat nustatyta, kad jų modelis padeda įvertinti bėgių nelygumų įtaką riedėjimo triukšmui. Han et al. (2017b) sukūrė supaprastintą laiko srities modelį, skirtą analizuoti „žviegimo“ triukšmo mažinimo priemonių veiksmingumą.

Szwarc & Czyżewski (2011) triukšmui skaičiuoti pritaikė genetinių algoritmų modelį, kurį būtų galima taikyti bendrai visoms Europos šalims, bei patikrino jo patikimumą, palygindami su matavimų rezultatais (± 2 dB tikslumas).

Dar yra ir alternatyvus triukšmo skaičiavimo modelis, kuriame transporto priemonė ir geležinkelių bėgių kelias išreikšti per *Green* funkcijas (Pieringer, 2013). Taip pat šiuo metu vystomas CRoNoS modelis, siekiant kuo tiksliau apskaičiuoti riedėjimo triukšmą, įvertinant struktūrines ratų (viso aširačio) ir geležinkelių bėgių kelio vibracijas, bei atsižvelgiant į traukinių važiavimo greitį (Guiral et al., 2018). Be to, yra atliekami tyrimai, siekiant ištirti, kokiai daliai skleidžiamo riedėjimo triukšmo įtaką daro geležinkelių bėgių kelio parametrai ir defektai, ir kokiai daliai – riedmenys, panaudojant naują WSE modelį (angl. *Wave signature extraction*) ir kitus 5 metodus (Thompson et al. 2018). Yang et al. (2018) tyrė dinaminių baigtinių elementų modelį, skirtą apskaičiuoti triukšmą, kylantį rato/izoliuotos bėgių sandūros sąveikoje, ir patikrino šio modelio patikimumą, palygindami su matavimų rezultatais.

Andres et al. (2022) triukšmui skaičiuoti sukūrė vibroakustinį rato ir bėgio modelį, kuriuo galima išskirti rato, bėgio ir pabėgio skleidžiamą garsą. Andres et al. (2025) triukšmui geležinkelio kelio horizontaliose kreivėse skaičiuoti sukūrė dinaminį modelį, kuriuo galima tiksliai įvertinti prie kreivėse veikiančių inercinių jėgų poveikio prisitaikančio aširačio vibracinį atsaką. Siekiant palengvinti skaičiavimus, vietoj trimačio skaitmeninio modelio panaudotas asimetrinis modelis. Knuth et al. (2024) atliko tyrimą, kuriuo tyrė besisukančio rato poveikį riedėjimo triukšmui. Skaičiavimuose naudoti skirtingi ratų modeliai (angl. *Lagrangian* ir *Eulerian*). Eulerio modelis (angl. *Eulerian*) naudotas aširačio mobilumui nustatyti ir riedėjimo triukšmui apskaičiuoti TWINS modeliu. Pascale et al. (2024) atliko skaičiavimus „Dažnių srities“ modeliu, kuriuo buvo tirtas vieno riedmens skleidžiamas triukšmas, įvertinant skirtingo tipo kuru varomus riedmenis. Be to, ypatingas dėmesys buvo skiriamas žemo dažnio triukšmui, kuris neigiamai veikia žmonių sveikatą ir ekosistemas. Gauti rezultatai buvo palyginti su triukšmu, sumodeliuotu CNOSSOS-EU, Harmonoise ir REMEL modeliais.

1.3. Geležinkelių bėgių kelio skleidžiamo triukšmo ir riedmenų važiavimo greičio sąsajos

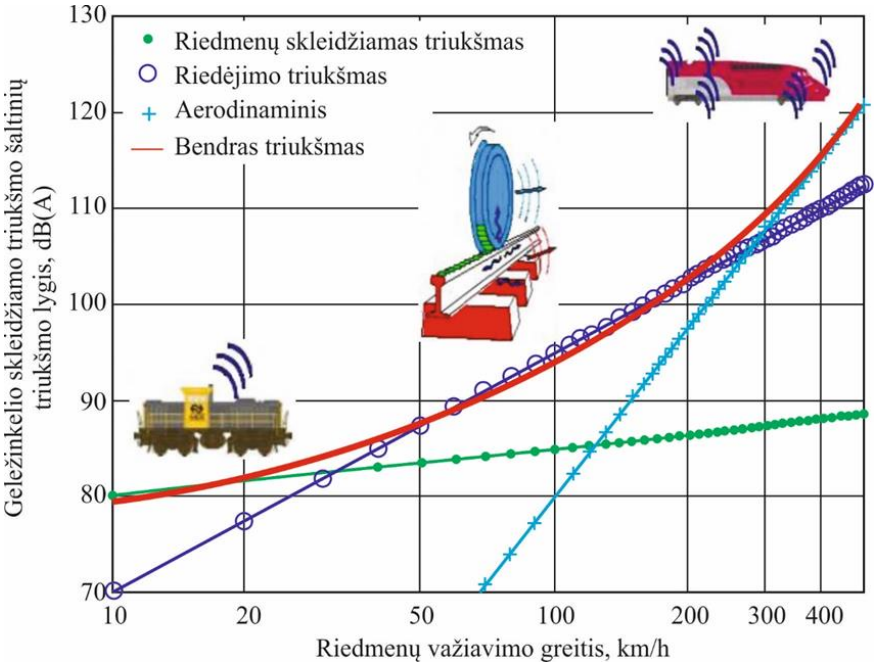
Geležinkelio skleidžiamo triukšmo lygis koreliuoja su greičio logaritmu (Profillidis, 2006; Thompson et al., 2009), tačiau didesnę įtaką daro atstumas nuo

triukšmo šaltinio negu greičio pokyčiai (Profillidis, 2006). Riedėjimo sukeliamas triukšmas, kurio pagrindinė priežastis yra rato ir bėgio sąveika, priklauso nuo riedmenų važiavimo greičio: kuo didesnis važiavimo greitis tuo didesnis skleidžiamas triukšmo lygis (ekvivalentinis garso slėgio lygis). Sukeliamas triukšmas apytiksliai lygus 30 log_{10} *V,* t. y. dvigubėjant greičiui, ekvivalentinis nuolatinis garso slėgio lygis, kai standartinė dažninė svertis yra A svertis (L_{AeqT}), didėja nuo 8 iki 10 dB (Thompson et al., 2009).

Geležinkelio triukšmas slopsta tolstant nuo žemės paviršiaus, meteorologinių sąlygų poveikio (Jabben & Potma, 2004). Olandų nacionaliniame standarte (1996) bendras triukšmo lygis apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$E_c = a_c + b_c \log(v_c) + 10 \log(Q_c) + K_{kelias,c} \qquad (1.5)$$

čia c riedmenų kategorijos indeksas; v_c greitis, km/h; Q_c c kategorijos traukinių, pravažiavusių per valandą, skaičius; $K_{kelias,\ c}$ konstanta, pasirenkama pagal geležinkelių bėgių kelio tipą; a_c, b_c koeficientai, pasirenkami pagal riedmenų tipą.



1.4 pav. Geležinkelio skleidžiamo triukšmo šaltinių triukšmo lygis, priklausantis nuo riedmenų važiavimo greičio (Hemsworth, 2008)

Fig. 1.4. Noise level of the railway noise sources according to the speed of trains (Hemsworth, 2008)

Riedmenų skleidžiamas triukšmas tarp kitų geležinkelių skleidžiamo triukšmo šaltinių vyrauja, kai riedmenų važiavimo greitis yra iki ~30 km/h, riedėjimo triukšmas kai daugiau nei 30 km/h, o aerodinaminis triukšmas kai daugiau nei 200 km/h (Clausen et al., 2012). Hemsworth (2008) nurodo, kad riedmenų skleidžiamas triukšmas vyrauja iki 35 km/h, riedėjimo triukšmas nuo ~35 km/h iki ~280 km/h, o aerodinaminis virš 280 km/h. Brons et al. (2003) nurodo, kad riedmenų skleidžiamas triukšmas vyrauja iki 50 km/h, riedėjimo triukšmas nuo ~50 km/h iki ~240 km/h, o aerodinaminis virš 240 km/h. Riedmenų vyraujantis greitis įprastai yra 50–300 km/h, todėl dėl riedėjimo triukšmo kyla daugiausia nepasitenkinimo.

Geležinkelio skleidžiamo triukšmo šaltinių triukšmo lygis, priklausantis nuo riedmenų važiavimo greičio, pavaizduotas 1.4 pav.

Riedmenų važiavimo greičiui įtakos turi ir geležinkelių bėgių kelio horizontaliosios kreivės dydis. Mažiausias reikiamas kreivės spindulys nustatomas pasirenkant didžiausias bėgio pakylos kreivėse nepakankamumo (stygiaus) $h_{\mathrm{d\ max}}$ ir kelio pakylos perviršio (pertekliaus) $h_{\mathrm{e\ max}}$ vertes (Profillidis, 2006):

$$\frac{11{,}8\times V_{max}^2}{R} - h_{d\ max} < \frac{11{,}8\times V_{min}^2}{R} - h_{e\ max}\ , \tag{1.6}$$

čia R horizontalios kreivės spindulys, m; $v_{\mathrm{max,\ min}}$ didžiausias ir mažiausias riedmenų važiavimo greitis, km/h.

Skirtingo greičio geležinkelio kelio ruožuose, atsižvelgiant į vyraujantį triukšmą, yra taikomos skirtingos triukšmo mažinimo priemonės. Be to, jos parenkamos ir pagal kitus kriterijus (aplinka, eismo saugumas ir kt.).

1.4. Geležinkelių bėgių kelio skleidžiamo triukšmo mažinimo priemonės ir jų įneštinis silpninimas

Geležinkelių bėgių kelio skleidžiamam triukšmui mažinti pasaulyje naudojama daug priemonių. Pavyzdžiui, viena iš ratų ir bėgių sąveikos skleidžiamo triukšmo mažinimo priemonių yra padidinti šių elementų sąlyčio plotą arba sumažinti kontaktinį standį (galima sumažinti iki 5–10 dB) (Remington & Webb, 1996). Fiorini (2022) nurodo, kad geležinkelio kelio atkarpos, esančios arčiausiai gyvenamųjų namų, įrengimas iškasoje veiksmingiau mažina geležinkelių skleidžiamą triukšmą nei įprastos triukšmo mažinimo sienutės (atitinkamai, 13–14 dBA ir 6–7 dBA).

Triukšmo mažinimo priemonės taip pat gali būti naudojamos kombinuotai, pavyzdžiui, kaip persidengiantys ekranai (prie vagonų montuojami skydai kartu su labai žemomis triukšmo mažinimo sienutėmis, montuojamomis prie pat geležinkelių bėgių kelio). Buvo atlikti tokių sienučių tyrimai. Didžiausias veiksmingumas buvo pasiektas naudojant kartu skydus su sienutėmis (Jones et al., 2001).

Luo et al. (2023) nustatė, kad bėgių slopintuvai gali būti taikomi kaip veiksminga papildoma priemonė triukšmui slopinti, jų teigiamas poveikis buvo nustatytas visuose matavimo taškuose. Įneštinis silpinimas, naudojant juos kartu su labai žemomis triukšmo mažinimo sienutėmis, yra iki 2–5 dBA. Thompson (2024) taip pat nustatė, kad bėgių slopintuvai veiksmingiausiai mažina triukšmą taikant juos su kitomis priemonėmis (begių kelio pertvarkymu). Su žemomis triukšmo mažinimo sienutėmis kartu gali būti naudojami ir kitokie elementai, pavyzdžiui, Olandijoje šiuo metu testuojami Whisswall difrakciniai elementai, įrengiami ant sienutės viršutinės dalies bei nukreipiantys garso bangas aukštyn (Schwanen et al., 2018). Kinijoje atlikti tyrimai sienučių, kurių viršutinėje dalyje yra šulinėliai, parodė, kad triukšmo lygį galima sumažinti iki 1,5 dBA (Wang et al., 2018). Lee et al. (2021) atlikus tyrimus Singapūre ir Taivane taip pat nustatyta, kad triukšmo mažinimo sienučių viršutiniai elementai (gembė arba dantytas kraštas) gali padidinti jų veiksmingumą.

Be to, sienutės gali atlikti keletą funkcijų, pavyzdžiui, be triukšmo mažinimo gali atlikti saulės kolektoriaus funkciją (Tzikas et al., 2017) ar sumažinti oro taršą (Ahangar et al., 2017; Dash & Elsinga, 2018). Venkatram et al. (2016) nustatė, kad oro teršalų kiekiai sumažėja net iki 40 % greta 4,5 m aukščio triukšmo mažinimo sienutės, ir 10 % 300 m atstumu nuo sienutės. Baldauf et al. (2016) nustatė iki 50 % sumažėjimą 50 m atstumu nuo sienutės ir ~30 % 300 m atstumu. Taip pat gali būti naudojamos ir neinžinierinės triukšmo mažinimo priemonės, pavyzdžiui, šiuo metu Europos geležinkelių transporto politika skatina geležinkelių prieigos mokesčių naudojimą siekiant sumažinti triukšmo taršos poveikį aplinkai (Pons-Rigat et al., 2017).

1.3 lentelėje pateiktos triukšmo mažinimo priemonės, suskirstytos į dvi triukšmo mažinimo grupes pagal poveikį: konstrukcinės ir technologinės priemonės bei miestų planavimo ir administracinės priemonės. Pateiktas jų numatomas įneštinis silpninimas.

Įprastos triukšmo mažinimo sienutės riedėjimo triukšmą gali sumažinti iki 20 dbA, žemos ir labai žemos iki 5 dBA (Pultznerová & Ižvolt, 2014).

Triukšmo mažinimo sienutės pagal savo akustines savybes gali būti skirstomos į 3 tipus (Kotzen & English, 2009):

1. Garsą atspindinti.
2. Garsą sugerianti (sienutė visada nepermatoma).
3. Reaktyvi (sienutė visada nepermatoma). Tai yra modifikuota garsą sugerianti sienutė, kurioje yra ertmių arba rezonatorių, skirtų tam tikriems triukšmo dažniams slopinti.

1.3 lentelė. Geležinkelių keliamo triukšmo mažinimo priemonės (Clausen et al., 2012; Estonian, Latvian & Lithuanian Environment, 2012; Esveld, 2001; Geležinkelių apsaugos centras, 2014; Jones et al., 2001; NSW EPA, 2013; Oertli & Hubner, 2010; Nelson, 1997; Wiebe, 2011)
Table 1.3. Noise mitigation measures for railways (Clausen et al., 2012; Estonian, Latvian & Lithuanian Environment, 2012; Esveld, 2001; Geležinkelių apsaugos centras, 2014; Jones et al., 2001; NSW EPA, 2013; Oertli & Hubner, 2010; Nelson, 1997; Wiebe, 2011)

Grupė	Veiksnys	Triukšmo mažinimo priemonė	Numatomas garso slėgio lygio sumažėjimas
Konstrukcinės ir technologinės priemonės			
Šaltinyje	Riedmenys	Stabdžių kaladėlių keitimas	8–10 dBA
		Rato konstrukcijos parinkimas (rato forma, rato skersmuo)	0–6 dBA
		Rato medžiagos parinkimas (elastinga, daugialypės medžiagos)	iki 5–10 dBA
		Ratų amortizatoriai	1–3 dBA
		Riedmenyse montuojami trinties modifikatoriai	nėra duomenų
		Veiksmingas dyzelinių lokomotyvų triukšmo slopinimas, tylios aušinimo sistemos, duslintuvai ir kt.	iki 13 dBA
		Gaubtuvai	0–10 dBA
		Mažą triukšmo lygį skleidžiantis pantografas (greitųjų geležinkelių, pantografo antgalio formos optimizavimas, specialios medžiagos)	iki 4 dBA
		Reguliari priežiūra (ratų šlifavimas, ratų priežiūra)	iki 20 dBA
	Geležinkelių bėgių kelio konstrukcija ir sankasa	Geležinkelių bėgių kelio konstrukcija (įvairios geležinkelių bėgių kelio formos)	nėra duomenų
		Bėgių slopintuvai	1–3 dBA
		Geležinkelių bėgių kelio tepimo priemonės, trinties modifikatoriai	nėra duomenų

1.3 lentelės tęsinys

Grupė	Veiksnys	Triukšmo mažinimo priemonė	Numatomas garso slėgio lygio sumažėjimas
		Elastingas bėgių kelias (elastingos pagrindo plokštės, specialūs bėgių amortizatoriai)	nėra duomenų
		Staigių pereigų tarp geležinkelių bėgių kelio konstrukcijų ar sankasos tipo vengimas	nėra duomenų
		Geležinkelio pylimas su garsą sugeriančia sistema	0–5 dBA
		Betoniniai pabėgiai vietoje medinių pabėgių	1–3 dBA
		Balastuotas kelias vietoje bebalasčio kelio	4–5 dBA
		Ilgabėgiai	0–5 dBA
		Garsinių signalų perkėlimas iš triukšmui jautrių zonų	nėra duomenų
		Nuolatinė techninė priežiūra (bėgių šlifavimas)	iki 20 dBA
Garso kelyje		Triukšmo užtvaros (sienutės, pylimai, natūralūs triukšmo barjerai iš gabionų, augalija, tranšėjos, iškasos)	0–15 dBA
		Tuneliai	10–30 dBA
Gretimuose pastatuose		Triukšmą izoliuojantys pastatų langai	10–30 dBA
		Fasado izoliacija („žalia siena“, dvigubas fasadas)	nėra duomenų
		Durys izoliuojančios garsą	0–10 dBA
Miestų planavimo ir administracinės priemonės			
–	Reguliavimas	Su triukšmu susijusios direktyvos, ribinės vertės, veiksmų kontrolė	nėra duomenų

1.3 lentelės pabaiga

Grupė	Veiksnys	Triukšmo mažinimo priemonė	Numatomas garso slėgio lygio sumažėjimas
–	Socialinės ir ekonominės priemonės	Socialinės priemonės (visuomenės švietimas, darbuotojų mokymas)	nėra duomenų
		Ekonominės priemonės (geležinkelių infrastruktūros mokesčiai už triukšmo taršą, finansinės paramos priemonės, kompensacijos)	nėra duomenų
–	Erdvinis planavimas ir valdymas	Pastatų įrengimas toliau nuo triukšmo šaltinio; pastatų forma; pastatų (kambarių) išdėstymas; pastatų sienos formos ir išdėstymas; pastatų orientacija; parkų ir želdinių planavimas; erdvinis planavimas; pastatai, kurie nejautrūs triukšmui (triukšmo barjerai)	iki 20 dBA
Prie šaltinio	Geležinkelių eismo kontrolė	Traukinio greičio ribojimas, eismo planavimas, eismo maršrutai	iki 20 dBA
Prie šaltinio	Geležinkelių bėgių kelio planavimas	Alternatyvaus bėgių kelio naudojimas (toliau nuo triukšmui jautrių zonų)	nėra duomenų

Garsą sugeriančios triukšmo mažinimo sienutės veiksmingiau sumažina triukšmo lygį nei garsą atspindinčios triukšmo mažinimo sienutės. Be to, garsą atspindinčios sienutės gali pabloginti akustinę situaciją, jei priešingoje kelio pusėje, nei yra numatoma triukšmo mažinimo sienutė, yra gyvenamųjų ar saugomų visuomeninės paskirties pastatų, tyliųjų zonų T TU 15 (Lietuvos automobilių kelių direkcija, 2015).

1.5. Žemos triukšmo mažinimo sienutės ties geležinkelių bėgių keliu

Žemos triukšmo mažinimo sienutės įrengiamos mažesniu atstumu nuo geležinkelio kelio bėgių nei aukštos sienutės tam, kad slopintų riedėjimo, t. y. rato ir bėgio

sąveikoje skleidžiamą triukšmą. Nors šių sienučių įneštinis silpninimas yra mažesnis nei aukštų triukšmo mažinimo sienučių, tačiau jos neriboja matomumo ties pervažomis, yra vizualiai patrauklios. Be to, jų įrengimo sąnaudos yra mažesnės.

Žemos triukšmo mažinimo sienutės ties geležinkelių bėgių keliu yra iš esmės dviejų tipų:

1. Sienutės, įrengiamos ties tramvajaus linijomis, yra skirtos apsaugoti nuo triukšmo poveikio pėsčiuosius ir dviratininkus, kai greta tramvajaus linijos apgyvendintose teritorijose yra nutiesti pėsčiųjų ir dviračių takai.
2. Sienutės, įrengiamos ties geležinkelių bėgiais, yra skirtos apsaugoti nuo riedėjimo triukšmo poveikio. Šios sienutės yra dviejų tipų itin žemos sienutės, kurios įrengiamos prie pat bėgių, ir iki 1,0 m aukščio sienutės, įrengiamos atitrauktos nuo bėgių 1,7–2,0 m atstumu.

Žemos triukšmo mažinimo sienutės gali būti įvairių formų, skirtingų konstrukcijų bei medžiagiškumo.

Žemų triukšmo mažinimo sienučių privalumai:

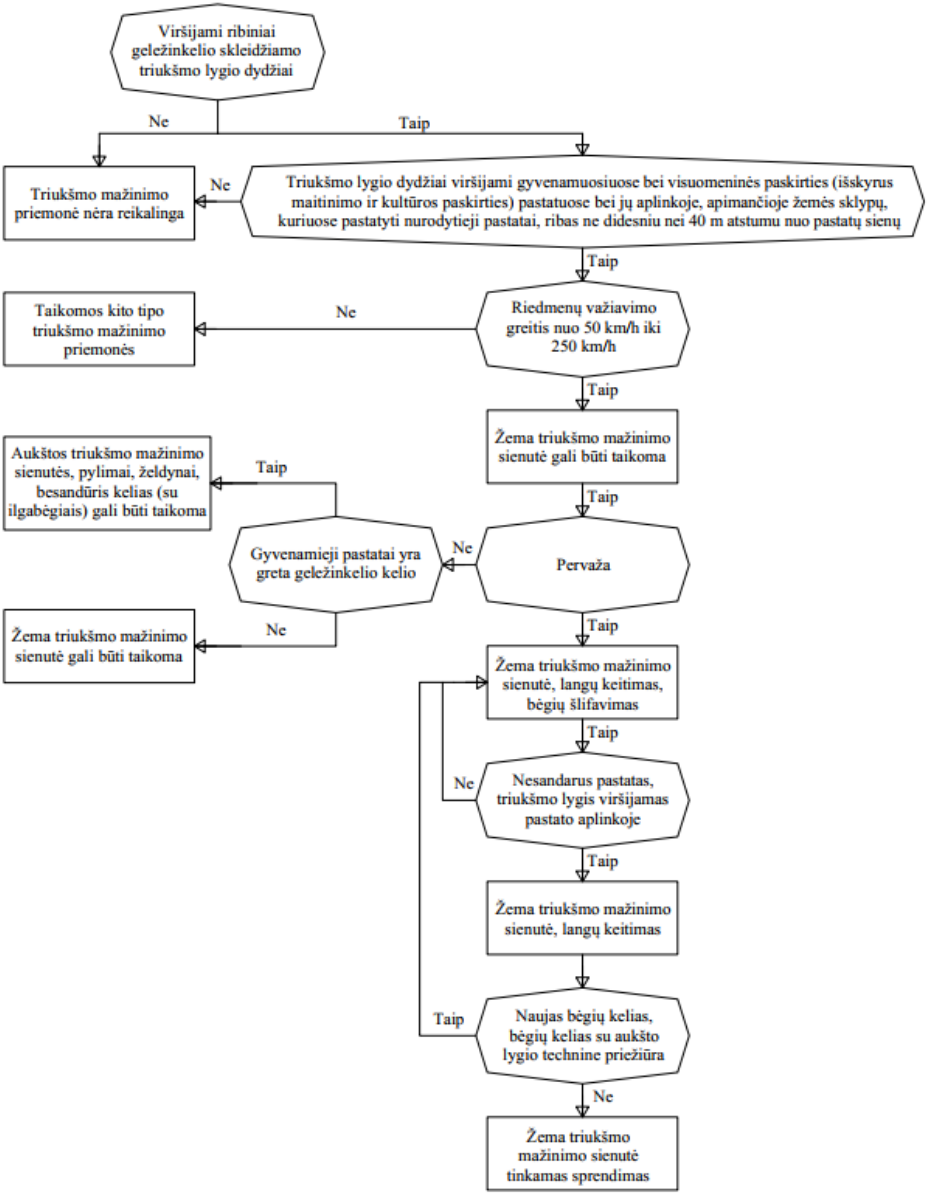
1. Garso sugertis artimiausiu įmanomu atstumu nuo triukšmo šaltinio vietos (rato ir bėgio sąlyčio).
2. Neužima daug ploto (išskyrus sienutes iš gabionų).
3. Dažnu atveju nereikalingas pamatas, t. y. gali būti įrengiama tiesiai ant išlyginto žemės paviršiaus ar balasto sluoksnio. Kai kuriais atvejais reikalinga nesudėtinga pamato konstrukcija.
4. Jei yra pamatas, jame galima įrengti kanalą kabeliams. Kai kuriais atvejais, pats kanalas kabeliams atlieka pamato funkciją.
5. Įprastu atveju nesudėtingai įrengiama. Kai kurių tipų sienutes galima įrengti gana sparčiai, per trumpas geležinkelio eismo pertraukas.
6. Įprastu atveju sienutės statinio techninė priežiūra (eksploatavimas) nėra sudėtinga.
7. Daugeliu atvejų remonto darbai nėra sudėtingi.
8. Neužstoja vaizdo keleiviams ir vietiniams gyventojams. Kai kurių tipų sienutės vizualiai gražiai atrodo ir (arba) dera prie aplinkinių teritorijų.
9. Neriboja matomumo ties pervažomis.
10. Kai kurių tipų sienutės yra siauros, todėl nesudėtinga įrengti tarpukelėje.
11. Dažnu atveju konstrukcijoje panaudotos medžiagos gali būti pakartotinai panaudojamos, arba sienutė įrengiama iš pakartotinio naudojimo medžiagų.

12. Dėl nedidelio sienutės aukščio gelbėtojams nėra sudėtinga pasiekti kelius ekstremaliu atveju.
13. Kai kurių tipų sienutės yra platesnės, todėl, jei reikia, galima eiti sienutės paviršiumi, pavyzdžiui, evakuacijos atveju, kai traukinys priverstinai sustabdomas, arba vykdant geležinkelių bėgių kelio apžiūras.
14. Dažnu atveju galima įrengti praėjimus ar pagalbines perlipimo priemones smulkiems gyvūnams.
15. Įprastai sienutės pritaikomos geležinkelių bėgių kelio priežiūros mechanizmų darbui sienutę galima laikinai perkelti arba atlenkti (priklausomai nuo sienutės tipo).
16. Mažesnės įrengimo sąnaudos nei aukštų triukšmo sienučių (žemos triukšmo mažinimo sienutės įrengimo sąnaudos 550,000 £/km, aukštos 820,000 £/km) (Tuler & Kaewunruen, 2017).

Žemų triukšmo mažinimo sienučių trūkumai:

1. Net žemi pamatai gali trukdyti įrengti drenažą ar tam tikrus konstrukcinius elementus netoli geležinkelių bėgių kelio (Oertli & Scossa-Romano, 2012).
2. Gali būti sudėtingesni ir ilgiau trunkantys geležinkelių bėgių kelio priežiūros darbai (Oertli & Scossa-Romano, 2012).
3. Gali kilti keblumų avarijos atveju ilgesnis evakuacijos laikas (Oertli & Scossa-Romano, 2012).
4. Padidinta rizika geležinkelio darbuotojams, tvarkantiems geležinkelių bėgių kelią žema sienutė sudaro kliūtį greitai pasitraukti pravažiuojant traukiniui (Oertli & Scossa-Romano, 2012).
5. Žemos sienutės tarpukelyje įrengimo kaštai gali prilygti aukštos sienutės įrengimo kaštams (Oertli & Scossa-Romano, 2012).
6. Nesumažina aerodinaminio triukšmo lygio (Morgan & Peeling, 2012).
7. Mažesnės panaudojimo galimybės nei įprastų aukštų triukšmo sienučių (Morgan & Peeling, 2012).
8. Nėra pakankamai išanalizuotas sienučių veiksmingumas laikui bėgant (Morgan & Peeling, 2012).

Remiantis žemų triukšmo mažinimo sienučių taikymo patirtimi užsienio šalyse ir įvertinus Lietuvos sąlygas, sudarytas žemos triukšmo mažinimo sienutės taikymo algoritmas (1.5 pav.).



1.5 pav. Žemos triukšmo mažinimo sienutės taikymo algoritmas (sudaryta autoriaus)

Fig. 1.5. Application algorithm of a low noise barrier (made by the author)

Vadovaujantis šiuo algoritmu galima nustatyti atvejus, kai triukšmo mažinimo priemonės išvis nėra reikalingos, kada ir kokios gali būti taikomos triukšmo mažinimo priemonės, bei nusistatyti, kokiais atvejais žemos triukšmo mažinimo sienutės yra tinkamas sprendimas geležinkelių kelio skleidžiamam triukšmui mažinti.

1.6. Aukštų ir žemų triukšmo mažinimo sienučių ties geležinkelių bėgių keliu veiksmingumo tyrimų analizė

Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad tiek aukštų, tiek žemų triukšmo mažinimo sienučių veiksmingumą galima ištirti atliekant jų matavimus lauko ir (arba) laboratorijos sąlygomis, skaitinį modeliavimą, naudojant programinę įrangą, atliekant matematinį (skaitinį) optimizavimą (skaičiavimus) ar respondentų apklausas, naudojant daugiakriterijinius bei kitus inovatyvius metodus.

Įvairių formų aukštų ir žemų triukšmo mažinimo sienučių ties geležinkeliu veiksmingumą atliekant skaitinį modeliavimą tyrė Watts (1996) ir Hothersall et al. (2000). Aukštų triukšmo mažinimo sienučių ties geležinkeliu veiksmingumą atliekant skaitinį modeliavimą, naudojant „RAYNOISE“ programinę įrangą, tyrė van Haaren & van Tol (2000); naudojant „CadnaA“ programinę įrangą tyrė Grubliauskas (2009). Žemų triukšmo mažinimo sienučių ties geležinkeliu veiksmingumą atliekant skaitinį modeliavimą, naudojant „LimA“ programinę įrangą, tyrė Čižkova & Štulikova (2014), Čižkova (2016); naudojant „IMMI“ ir „WRNOISE“ programinę įrangą, tyrė Vogiatzis & Vanhonacker (2016). Šiuo metu bandoma programinė įranga triukšmo mažinimo priemonių, įrengiamų triukšmo šaltinyje ar jo kelyje, poveikio triukšmo mažinimui (įskaitant žmonių suvokiamą) įvertinti, naudojant vizualizacijas (Pieren et al., 2018). Hong & Jeon (2014) atliko triukšmo mažinimo sienučių veiksmingumo bandymus naudojant „ENPro“ programinę įrangą. Be to, atliko audio bandymą, vizualinį bandymą ir audio-vizualinį bandymą laboratorijos sąlygomis. Nilsson et al. (2014) atliko įvairių tipų žemų triukšmo mažinimo sienučių skaitmeninį įvertinimą. Nustatytas triukšmo sienučių įneštinis silpninimas nuo 2 dBA iki ~17 dBA, priklausomai nuo triukšmo mažinimo sienutės tipo, vietos sąlygų bei priėmėjo tipo. Li et al. (2020) atliko vertikalių triukšmo mažinimo sienučių, įrengtų ant geležinkelio tilto, skaitmeninį įvertinimą naudojant statistinę energijos analizę. Nustatyta, kad įneštinis silpninimas mažėja tolinant sienutę nuo bėgių kelio ašies (atitraukus nuo 7,5 m iki 15,0 m sumažėja 1 dBA). Didžiausias įneštinis silpninimas paseiktas aukštinus sienutę 3–4 m. Veloso et al. (2023) atliko triukšmo mažinimo sienučių iš garsinių kristalų (angl. *sonic crystal*), padengtų poringuoju betonu, skaitmeninį įvertinimą, naudojant fundamentalių sprendimų metodą (angl. *Method of Fundamental Solutions*).

Bandymo rezultatai buvo palyginti su eksperimentinio sumažintos triukšmo mažinimo sienutės tyrimų rezultatas bei su rezultatais, apskaičiuotais ribinių elementų metodu.

Fitzgerald (1996) atliko žemų (h = 1,0 m, ant tilto) ir aukštų triukšmo mažinimo sienučių (h = 1,8 m ir 1,5 m), įrengtų ties miesto geležinkeliu, veiksmingumo bandymus matuojant lauko sąlygomis. Nustatytas triukšmo sienučių įneštinis silpninimas iki ~17 dBA.

Hothersall et al. (2000) atliko 20 kartų sumažintų įvairių formų aukštų triukšmo mažinimo sienučių (h = 2,75 m) maketo veiksmingumo bandymus laboratorijos sąlygomis, tam sukurtoje beaidėje kameroje. Nustatytas mažiausias įneštinis silpninimas ~11 dB (lygi, vertikali sienutė, be absorbuojančio sluoksnio), o didžiausias įneštinis silpninimas ~20 dB (išlenkta sienutė, su absorbuojančiu sluoksniu). Matavimo rezultatai vėliau buvo palyginti su matematinio (skaitinio) optimizavimo (skaičiavimo) rezultatais (pirmosios sienutės įneštinis silpninimas ~14 dB, o antrosios ~18 dB).

Jin et al. (2001) atliko sumažintos aukštos triukšmo mažinimo sienutės maketo veiksmingumo bandymus laboratorijos sąlygomis, beaidėje kameroje. Nustatyta, kad įneštinio silpninimo dydžiui didelę įtaką daro sienutės užlenkimo briaunos parametrai.

Watts et al. (2001) atliko 20 kartų sumažintų įvairių tipų (lygios, garsą atspindinčios „žaliuzių tipo“, garsą sugeriančios „žaliuzių tipo“) aukštų triukšmo mažinimo sienučių (įvairaus aukščio) maketo veiksmingumo bandymus laboratorinėmis sąlygomis, beaidėje kameroje. Nustatytas 3,0 m aukščio atspindinčios „žaliuzių tipo“ sienutės įneštinis silpninimas ~5 dBA, o garsą sugeriančios sienutės ~7 dBA. Įneštinio silpninimo vertės priklauso ir nuo tarpų tarp sienutės elementų dydžio bei šių elementų polinkio kampo, t. y. kuo didesnis tarpas ir polinkio kampas, tuo mažesnis įneštinis silpninimas. Matavimo rezultatai vėliau buvo palyginti su matematinio (skaitinio) optimizavimo (skaičiavimo) ribinių elementų metodu rezultatais, bei nustatyta, kad skaitinis modeliavimas yra patikimas metodas tokioms sienutėms modeliuoti skaitiniu būdu.

Busch & Nugent (2003) atliko du kartus sumažintos aukštos triukšmo mažinimo sienutės (h = 4,0 m) iš dviejų presuotos medienos plokščių, su skirtingais absorbuojančiais sluoksniais, maketo veiksmingumo bandymus lauko sąlygomis. Nustatytas įneštinis silpninimas 22 dBA.

Venckus et al. (2012) atliko aukštų triukšmo mažinimo sienučių su skirtingu viršutinės dalies polinkio kampu (90°, 120°, 150° ir 180°) veiksmingumo bandymus lauko sąlygomis pagal standartą ISO 11821:1997 (International Organization for Standardization, 1997). Esant žemų dažnių garsui, nustatytas didžiausias įneštinis silpninimas sienutės, kurios viršutinės dalies polinkio kampas 120° (1–4 dB didesnis lyginant su kitomis sienutėmis), o esant aukštų dažnių garsui lygios sienutės, kurios viršutinės dalies polinkio kampas 180°.

Jolibois (2013) atliko 10 kartų sumažintos T formos žemos triukšmo mažinimo sienutės (h = 1,0 m) iš dviejų presuotos medienos plokščių, su skirtingais absorbuojančiais sluoksniais, maketo veiksmingumo bandymus laboratorinėmis sąlygomis. Nustatytas sienutės be absorbuojančio sluoksnio įneštinis silpninimas apie 6 dBA. Sienutės, iš triukšmo šaltinio pusės, padengtos absorbuojančiu sluoksniu, nustatytas įneštinis silpninimas apie 10 dBA, o sienutės absorbuojančiu sluoksniu papildomai padengtos ir iš viršaus net iki 14 dBA. Matavimo rezultatai vėliau buvo palyginti su matematinio (skaitinio) optimizavimo (skaičiavimo) ribinių elementų metodu rezultatais. Nustatyta, kad pastarasis metodas yra gana tikslus, visgi nustatytas įneštinis silpninimas yra šiek tiek mažesnis nei nustatytas bandymu laboratorijoje, ypač esant žemiems arba aukštiems dažniams.

Jolibois (2014) rengdamas disertaciją atliko 10 kartų sumažintos T formos (h = 1,0 m) žemos triukšmo mažinimo sienutės iš dviejų presuotos medienos plokščių bei pusiau cilindro formos (R = 1,0 m) žemos triukšmo mažinimo sienutės iš PVC vamzdžio, maketų veiksmingumo bandymus laboratorinėmis sąlygomis. Abiem atvejais triukšmo mažinimo sienutės buvo įvairiu masteliu padengtos absorbuojančia medžiaga. Nustatytas abiejų tipų sienutės be absorbuojančio sluoksnio įneštinis silpninimas apie 6 dBA. Abiejų tipų sienučių, iš triukšmo šaltinio pusės padengtų absorbuojančiu sluoksniu, nustatytas įneštinis silpninimas apie 10 dBA.

Čižkova & Štulikova (2014) atliko žemų triukšmo mažinimo sienučių iš parabolės formos betono, su garsą sugeriančiu sluoksniu iš perdirbtos gumos be pamatų „Brens Barrier“ (h = 0,73 m virš bėgio paviršiaus, 1,73 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies), įrengtų Prahoje ties geležinkeliu, veiksmingumo bandymus matuojant lauko sąlygomis. Matavimai pagal standartą ČSN EN ISO 3095:2006 (TECHNOR print, 2006) buvo atlikti prieš įrengiant sienutes, ir po jų įrengimo. Nustatytas įneštinis silpninimas 6,5 dB. Atlikus analogiškų sienučių skaitinį modeliavimą, naudojant „LimA“ programinę įrangą, nustatytas įneštinis silpninimas 7,2 dB. Toks skirtumas gali būti laikomas matavimų (skaičiavimų) paklaida.

Tramvajai yra bėginės transporto priemonės, panašios į geležinkelio riedmenys. Ties tramvajų bėgiais taip pat yra taikomos žemos triukšmo mažinimo sienutės, todėl atliekant literatūros analizę, buvo nagrinėti ir tyrimai, susiję su triukšmo mažinimo sienutėmis ties tramvajų keliais.

Žemų triukšmo mažinimo sienučių, įrengtų ties tramvajaus linija, gyvenamajame rajone, veiksmingumo bandymus matuojant lauko sąlygomis atliko Jolibois et al. (2015, 2013). Buvo bandomos apverstos L formos triukšmo mažinimo sienutės (h = 0,95 m) iš presuotos medienos plokščių, iš triukšmo šaltinio pusės padengtos absorbuojančia medžiaga iš stiklo pluošto. Nustatytas įneštinis silpninimas daugiau nei 10 dBA (tramvajų, važiuojančių arčiausiai sienutės, triukšmui), ir 5 dBA tramvajų, važiuojančių atokiau nuo sienutės, triukšmui. Taip pat buvo

atliktas matematinis (skaitinis) optimizavimas (skaičiavimas) ribinių elementų metodu. Nustatyta, kad skaičiavimo rezultatai gana tiksliai (kelių dBA paklaida) atspindėjo triukšmo mažinimo sienutės veiksmingumą realiomis sąlygomis.

Čižkova (2016) atliko žemų triukšmo mažinimo sienučių iš parabolės formos betono, su garsą sugeriančiu paviršiumi iš perdirbto sintetinio sluoksnio ir plono gumos sluoksnio, be pamatų „Brens Barrier“ (h = 0,73 m virš bėgio paviršiaus paviršiaus, 2,0 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies), įrengtų Tetčice ties geležinkeliu, veiksmingumo bandymus matuojant lauko sąlygomis. Matavimai pagal standartą ČSN EN ISO 3095:2006 (TECHNOR print, 2006) buvo atlikti tiek prieš įrengiant sienutes, tiek po jų įrengimo. Nustatytas įneštinis silpninimas iki ~8 dB. Atlikus analogiškų sienučių skaitinį modeliavimą, naudojant „LimA“ programinę įrangą, nustatytas įneštinis silpninimas ~7 dB. Toks skirtumas gali būti laikomas matavimų (skaičiavimų) paklaida.

Vogiatzis & Vanhonacker (2016) atliko žemų triukšmo mažinimo sienučių (h = 1,10–1,20 m) su vertikaliomis absorbuojančiomis plokštėmis „SoundSorb“, įrengtų ties geležinkeliu, matavimus lauko sąlygomis pagal standartą ISO 3095:2013 (International Organization for Standardization, 2013). Šiame standarte nurodoma, kaip išmatuoti visų tipų bėginių transporto priemonių skleidžiamo išorinio triukšmo lygius ir spektrą. Bet nėra galimybės išmatuoti triukšmo, kurį skleidžia kiti su geležinkeliu infrastruktūra susiję elementai, parametrus. Nustatytas įneštinis silpninimas buvo nuo ~4 iki ~6 dBA.

Qin et al. (2024) atliko žemų triukšmo mažinimo sienučių (h = 1,10–1,20 m) su papildomais vertikaliais elementais (difuzoriais su mikroperforuota plokšte) matavimus lauko sąlygomis. Nustatyta, kad tokie elementai gali padidinti sienutės įneštinį silpninimą iki ~4 dBA.

Siekiant paspartinti triukšmo mažinimo sienučių veiksmingumo tyrimus lauko sąlygomis, Conter et al. (2023) vysto naują bandymų metodą SOPRANOISE, kurį planuojama diegti Europos sąjungos standartuose.

Zheng et al. (2017) atliko žemų V formos perforuotų triukšmo mažinimo sienučių (h = 1,0 m, plotis 1,0 m) veiksmingumo bandymus laboratorinėmis sąlygomis, reverberacijos kameroje. Reverberacija reiškinys, kai garsas daug kartų atspindimas. Matavimo rezultatai vėliau buvo palyginti su matematinio (skaitinio) optimizavimo (skaičiavimo) ribinių elementų metodų rezultatais. Nustatyta, kad matavimų rezultatai gerai koreliuoja su skaičiavimų rezultatais (virš 1000 Hz).

Jones et al. (2001) atliko triukšmo mažinimo priemonės, kurią sudaro labai žemos triukšmo mažinimo sienutės, montuojamas labai arti geležinkelių bėgių kelio (h = 0,18 m, 0,33 m atstumu nuo bėgio ašies) bei skydai, montuojami ant riedmenų vagonų, veiksmingumo bandymus, panaudojant matematinio (skaitinio) optimizavimo (skaičiavimo) ribinių elementų statistinės energijos analizės metodais. Šių bandymų rezultatai buvo palyginti su matavimų lauko sąlygomis rezultatais, nustatyta gera koreliacija. Nustatyta, kad, naudojant abu matematinio (skaitinio)

optimizavimo (skaičiavimo) metodus, gaunami tikslesni rezultatai nei naudojant tik antrąjį metodą. Nustatytas abiejų priemonių įneštinis silpninimas iki ~ 6 dBA, naudojant tik itin žemas triukšmo mažinimo sienutes iki ~2 dBA.

Nieuwenhuizen & Yntema (2018) atliko žemų triukšmo mažinimo sienučių iš betono su garsą sugeriančiu paviršiumi, įrengtų iš geležinkelio pusės (h = 0,76 m, 1,75 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies) matavimus pagal Olandijos standartą „Technische Regeling Emissiemeetmethoden Railverkeer 2006“. Rezultatai buvo palyginti su skaičiavimais, atliktais pagal olandišką skaičiavimo metodiką, skirtą įprasto aukščio sienutėms. Nustatyta, kad matavimų rezultatai (6–10 dBA) gerai koreliuoja su skaičiavimų rezultatais. Geiger et al. (2020) atliko žemų triukšmo mažinimo sienučių iš betono su garsą sugeriančiu paviršiumi, įrengtų iš geležinkelio pusės (h = 0,74 m, 1,78 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies) skaičiavimus, remiantis Schall 03 skaičiavimo metodika. Nustatytas įneštinis silpninimas 2–4 dBA.

Munteanu et al. (2018) atliko aukštų triukšmo sienučių (h = 6,5 m, 8,5 m ir 10,5 m, 5,5 m atstumu nuo pirmojo traukinio ašies) skaičiavimą pagal standartą ISO 9613-2:2006. Įvertinus įneštinį silpninimą (atitinkamai ~40 dB, ~41 dB ir ~44 dB) ir įrengimo sąnaudas (atitinkamai 101,59 Eur, 132,85 Eur ir 164,11 Eur), kaip optimalus variantas pasirinkta 6,5 m aukščio sienutė.

Baulac et al. (2009) atliko matematinį (skaitinį) inovatyvių triukšmo sienučių (žemos triukšmo mažinimo sienutės ir sienutės su daugiaelemenčiu viršumi), skirtų mažinti prekinių riedmenų gyvenamosiose teritorijose skleidžiamą triukšmą, optimizavimą (skaičiavimą) ribinių elementų metodu. Nustatytas žemų triukšmo sienučių įneštinis silpninimas nuo 5 iki 12 dBA. Ant sienutės tvirtinami viršaus elementai suteikia papildomą daugiau nei 5 dBA įneštinį silpninimą, lyginant su triukšmo mažinimo sienutėmis be šių elementų. Ribinių elementų metodu žemų triukšmo mažinimo sienučių (h = 1,2 m, atstumas nuo išorinio bėgio 1,225 m) formos optimizavimo ir dalį garso absorbuojančio poringo betono sluoksnio integravimo skaičiavimus atliko ir Lazaro et al. (2022). Nustatytas išlenktos sienutės su poringu sluoksniu įneštinis silpninimas iki 10 dBA visuose skaičiuotuose dažnių diapazonuose. Peplow et al. (2021) taip pat atliko skaičiavimus ribinių elementų metodu. Buvo tirta 1,0 m aukščio betoninė triukšmo mažinimo sienutė. Nustatytas įneštinis silpninimas ~8 dBA.

Nieves et al. (2024) atliko matematinį (skaitinį) triukšmo mažinimo sienučių skaičiavimą „dažnių srities“ ribinių elementų metodu (FDTD). Šiuo metodu įneštinis silpininimas įvertinimas tiksliau, gaunamos panašios vertės, kaip ir bandymais realiomis sąlygomis.

Serraris (2016) atliko 10 kartų sumažintų įvairių formų triukšmo mažinimo sienučių maketų veiksmingumo bandymus, naudodamas inovatyvų skanavimo ir

3D paišymo (angl. *Scan&Paint 3D*) tyrimo metodą. Šiuo metodu nustatyti įneštiniai silpninimai atitiko FHWA (angl. *Federal Highway Administration*) pateikiamas teorines ir kitų anksčiau atliktų eksperimentų rezultatų vertes.

Torija & Flindell (2014) atliko žemų triukšmo mažinimo sienučių (h = 1,0 m) bandymus laboratorijoje (simuliuojant garsus ir vykdant respondentų apklausą) ir lauko sąlygomis (įneštinis silpninimas 6 dBA). Nustatyta, kad bandymų rezultatai gerai koreliuoja.

Triukšmo mažinimo sienučių įneštinio silpninimo ir kitais kriterijais įvertinimo nauju daugiakriterijiniu metodu pasiūlė Doninck & Schillemans (2003).

Baulac et al. (2005), vertindami žemas triukšmo mažinimo sienutes (h = 1,0 m) gyvenamosiose teritorijose, panaudojo daugiakriterijinį optimizavimo metodą. Taip pat buvo atliktas matematinis (skaitinis) optimizavimas (skaičiavimas) ribinių elementų metodu. Nustatytas įneštinis silpninimas iki 11 dBA.

1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Išanalizavus kitų autorių mokslinius tyrimus, susijusius su rato ir bėgio sąveikos skleidžiamos triukšmo mechanizmu, geležinkelių bėgių kelio skleidžiamo triukšmo ir jo mažinimo reglamentavimu, geležinkelių bėgių kelio skleidžiamo triukšmo mažinimo priemonėmis, aukštų ir žemų triukšmo mažinimo sienučių veiksmingumo tyrimais, formuluojamos tokios išvados:

1. Rato ir bėgio sąveikoje tiesiuose ruožuose kylantis riedėjimo triukšmas įprastai susidaro šių elementų sąlyčio vietoje. Šis triukšmas dažniausiai kyla dėl rato ir bėgių nelygumų, sukeliančių vertikalią santykinę vibraciją. Riedėjimo triukšmas vyrauja, kai riedmenų važiavimo greitis yra nuo ~50 km/h iki ~240 km/h.
1. Bėgių kelio skleidžiamam triukšmui mažinti naudojama daug skirtingų priemonių, taikomų triukšmo šaltinyje, garso kelyje ar gretimuose pastatuose (konstrukcinės ir technologinės priemonės). Taip pat taikomos ir miestų planavimo ir administracinės priemonės: socialinės priemonės (visuomenės švietimas), ekonominės priemonės (mokesčiai už triukšmo taršą, finansinės paramos priemonės), geležinkelių kelio planavimas, atitraukiant jį toliau nuo triukšmui jautrių zonų ir kt.
2. Žemos triukšmo mažinimo sienutės įrengiamos mažesniu atstumu nuo geležinkelio kelio bėgių nei aukštos sienutės tam, kad slopintų riedėjimo, t. y. rato ir bėgio sąveikoje skleidžiamą triukšmą. Nors šių sienučių įneštinis silpninimas yra mažesnis nei aukštų triukšmo mažinimo sienučių, tačiau jos neriboja matomumo ties pervažomis,

nesukelia vizualinės taršos, mažesnės jų įrengimo sąnaudos, todėl tam tikromis sąlygomis tai itin veiksminga triukšmo mažinimo priemonė.

3. Atlikus žemų triukšmo mažinimo sienučių veiksmingumo užsienio šalių tyrimų analizę buvo nustatyta, kad skirtingų parametrų sienučių įneštinis silpninimas yra nuo 1,6 dBA iki 12 dBA. Didinant sienutės aukštį, įrengiant arčiau geležinkelio ar naudojant papildomus elementus, didėja ir įneštinis silpninimas, tačiau kartu blogėja eismo sauga, didėja vizualinė tarša ir įrengimo sąnaudos. Todėl būtina parinkti tinkamus žemos triukšmo mažinimo sienutės parametrus, užtikrinant pakankamą įneštinį silpninimą.

Darbo tikslui pasiekti formuluojami šie uždaviniai:

1. Parinkti racionaliausią tolesniais tyrimų etapais analizuotiną triukšmo mažinimo priemonę, naudojant daugiakriterį TOPSIS metodą.
2. Atlikti garso slėgio lygio matavimų eksperimentą lauko sąlygomis, nustatant aukštos triukšmo mažinimo sienutės įneštinio silpninimo vertes.
3. Skaitiniu modeliavimu palyginti riedmenų, judančių skirtingais greičiais (50–250 km/h), skleidžiamo triukšmo mažinančių skirtingų parametrų triukšmo sienučių įneštinio silpninimo vertes.
4. Atliekant statistinę analizę, įvertinti žemų triukšmo mažinimo sienučių parametrus, turinčius įtakos įneštinio silpninimo vertėms.
5. Pateikti rekomendacijas triukšmo mažinimo sienutėms parinkti.

2

Triukšmo mažinimo sienučių veiksmingumo eksperimentinis tyrimas ir įvertinimas

Šiame skyriuje pateikta eksperimentinio tyrimo metodika, tyrimo objektas, įneštinio silpninimo nustatymo schema bei pasirinkta vieta eksperimentui atlikti. Aprašyta tyrimui naudota įranga. Pateikta skaitinio modeliavimo vykdymo schema bei skaitinio modeliavimo metodika.

Šio skyriaus tematika paskelbtos dvi autorės publikacijos (Tumavičė & Laurinavičius, 2016; Tumavičė et al., 2023).

2.1. Didžiausio leistino greičio ruožų geležinkelių bėgių kelio Kyviškės–Valčiūnai analizė

Pagal Geležinkelio stočių projektavimo taisyklių (Lietuvos Respublikos susisiekimo ministerija, 2004) reikalavimus I ir II geležinkelių linijos kategorijos keliuose, kuriuose keleivinių traukinių didžiausias leistinas greitis yra 160 km/h, o prekinių traukinių 120 km/h, leidžiamas mažiausias horizontaliosios kreivės spin-

dulys, esant ypač sudėtingomis sąlygomis 800 m. Numatytoje geležinkelio linijoje Kyviškės-Valčiūnai net 29,0 % viso ruožo (nuo 0 km iki 23,586 km) sudaro horizontalios kreivės, kurių spindulys mažesnis nei 800 m. Ruože, kuriame atliekamas eksperimentinis tyrimas, yra nustatytas didžiausias leistinas važiavimo greitis 80 km/h.

2.2. Įneštinio silpninimo nustatymo lauko sąlygomis eksperimentiniai tyrimai

Numatyta atlikti geležinkelių skleidžiamo triukšmo ir aukštos triukšmo mažinimo sienutės eksperimentinį tyrimą lauko sąlygomis. Remiantis eksperimentinio tyrimo lauko sąlygomis rezultatais, numatyta patikrinti numatyto programine įranga sumodeliuoto geležinkelių bėgių kelio skleidžiamo triukšmo lygio tikslumą.

Turi būti užtikrinta, kad abiem matavimo atvejais triukšmo šaltinis, žemės reljefas, trikdžiai dėl kliūčių ar atspindintys paviršiai (jei tokių yra), būtų nepasikeitę (LST ISO 10847:2006 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2006)).

Bendru atveju įneštinis silpninimas apskaičiuojamas pagal tokią formulę (Vogiatzis & Vanhonacker, 2016):

$$D_{IL} = L_A - L_B, \tag{2.1}$$

čia D_{IL} įneštinis silpninimas, dB; L_{A} garso slėgio lygis prieš įdiegiant triukšmo mažinimo sienutę, dB; L_{B} garso slėgio lygis po triukšmo mažinimo sienutės įdiegimo, dB.

2.2.1. Eksperimentinio tyrimo lauko sąlygomis metodika

Siekiant atlikti įneštinio silpninimo netiesioginiu metodu eksperimentinį tyrimą lauko sąlygomis, parengta eksperimentinio tyrimo metodika, kuri išdėstyta žemiau esančiuose poskyriuose. Tyrimo metu buvo numatyta atlikti įneštinio silpninimo verčių nustatymą lauko sąlygomis, ties geležinkelių bėgių keliu netiesioginiu metodu. Parinkta standartus atitinkanti įneštinio silpninimo nustatymui įranga ir tyrimo vieta. Parengta įneštinio silpninimo nustatymo schema.

2.2.1.1. Įneštinio silpninimo verčių nustatymas lauko sąlygomis ties geležinkelių bėgių keliu

Visų tipų išorės triukšmo užtvarų įneštinio silpninimo nustatymas lauko sąlygomis atliekamas pagal standartą LST ISO 10847:2006 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2006). Triukšmo užtvarų ir susijusių įtaisų, sulaikančių ore sklindantį garsą, įneštinio silpninimo vertės lauko sąlygomis, ties geležinkelių bėgių

keliu, nustatomos pagal technines specifikacijas CEN/TS 16272-7:2015 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2015). Ši techninė specifikacija pateikia reikalavimus, skirtus tam tikros triukšmo mažinimo sienutės įneštinio silpninimo tam tikromis vietos ir meteorologinėms sąlygomis matuoti. Dokumento negalima pritaikyti palyginti ekvivalentininės triukšmo mažinimo sienutės, esančios skirtingomis vietos sąlygomis, įneštinio silpninimo vertes, t. y. galima palyginti tik tokiomis pačiomis sąlygomis esančių sienučių veiksmingumą. Tiesioginiu metodu galima palyginti skirtingų triukšmo mažinimo sienučių, įrengtų tokiomis pačiomis vietos sąlygomis, įneštinio silpninimo vertes.

Šioje techninėje specifikacijoje yra pateikti tokie įneštinio silpninimo nustatymo metodai: a) iš lygių prieš įrengiant sienutę ir po jos įrengimo skirtumo (tiesioginis metodas) ir b) garso slėgio lygis prieš įrengiant sienutę nustatomas matuojant kitoje lygiavertėje vietoje (netiesioginis metodas, taikomas tuo atveju, jeigu neįmanoma taikyti a) metodo, nes sienutė jau įrengta). Dokumente nurodyta, kad netiesioginiu metodu nustatomo įneštinio silpninimo vertės gali būti su didesne paklaida nei matuojant tiesioginiu metodu.

2.2.1.2. Įneštinio silpninimo verčių nustatymas lauko sąlygomis, ties geležinkelių bėgių keliu netiesioginiu metodu

Eksperimentas atliktas taikant netiesioginį metodą, kadangi triukšmo mažinimo sienutė yra jau yra įrengta, o jos pašalinti tam, kad atlikti eksperimentą tiesioginiu metodu, neįmanoma.

Tam, kad pagal technines specifikacijas CEN/TS 16272-7:2015 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2015) būtų galima taikyti netiesioginį metodą pasirenkant lygiavertę vietą, atitinkančią matavimo vietą ties triukšmo mažinimo sienute vertinant šiuos veiksnius: šaltinis, žemės reljefas, trikdžiai dėl kliūčių ar atsispindinčių paviršių, žemės paviršius ir meteorologinės sąlygos.

Pagal technines specifikacijas CEN/TS 16272-7:2015 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2015) garso slėgio (triukšmo) lygių skirtumas ΔL tarp atskaitos padėties ir imtuvo padėties atitinkamai nustatomas pagal „prieš“ (t. y. nesant triukšmo mažinimo sienutės) ir „po“ (t. y. esant triukšmo mažinimo sienutei) sąlygas:

$$\Delta L_B = L_{ref,B} - (L_{r,B} - C_r), \tag{2.2}$$

$$\Delta L_A = L_{ref,A} - (L_{r,A} - C_r'), \tag{2.3}$$

čia $L_{ref,B}$ yra „prieš“ garso slėgio lygis atskaitos padėtyje (lygiavertė vieta), dB; $L_{r,B}$ yra „prieš“ garso slėgio lygis imtuvo padėtyje (lygiavertė vieta), dB; $L_{ref,A}$ yra „po“ garso slėgio lygis atskaitos padėtyje, dB; $L_{r,A}$ yra „po“ garso slėgio lygis imtuvo padėtyje, dB; C_r ir C_r' imtuvo padėties tipo pataisos koeficientai: jei pusiau

laisvas laukas, tai C_r = 0 dB and C_r' = 0 dB; jei atsispindintys paviršiai, tai C_r = 6 dB and C_r' = 6 dB.

Pageidautina parinkti tokias imtuvo padėtis, kuriose koeficientai C_r ir C_r' iš esmės būtų vienodi. Netiesiogiai išmatuotas triukšmo mažinimo sienutės įneštinis silpninimas apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$D_{IL} = \Delta L_A - \Delta L_B, \tag{2.4}$$

čia $\Delta L_A \; ir \; \Delta L_B$ yra apskaičiuojami (2.2) ir (2.3) formulėmis.

Pagal technines specifikacijas CEN/TS 16272-7:2015 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2015), taikant netiesioginį metodą yra imituojama lygiavertė „prieš“ vieta. Tam, kad laikyti ją lygiaverte tikrajai „prieš“ vietai turi būti laikomasi šių sąlygų:

1. Imituojamos „prieš“ vietos reljefas, trukdančios kliūtys ir atspindintys paviršiai, jei tokių yra, ir žemės paviršius turi būti 60° zonoje abipus menamos linijos, jungiančios imtuvą su šaltiniu, akustiškai lygiaverčiai tai vietai, kur yra esama triukšmo mažinimo sienutė, tam, kad būtų pasiektas panašus garso sklidimas, įskaitant žemės paviršiaus atspindį.
2. Akustinė aplinka 30 m atstumu už pagrindinio imtuvo ir į šonus nuo jo turi būti lygiavertė.
3. Meteorologinės sąlygos turi būti lygiavertės.
4. Riedmenų eismas ir bėgių kelio būklė turi būti lygiaverčiai.

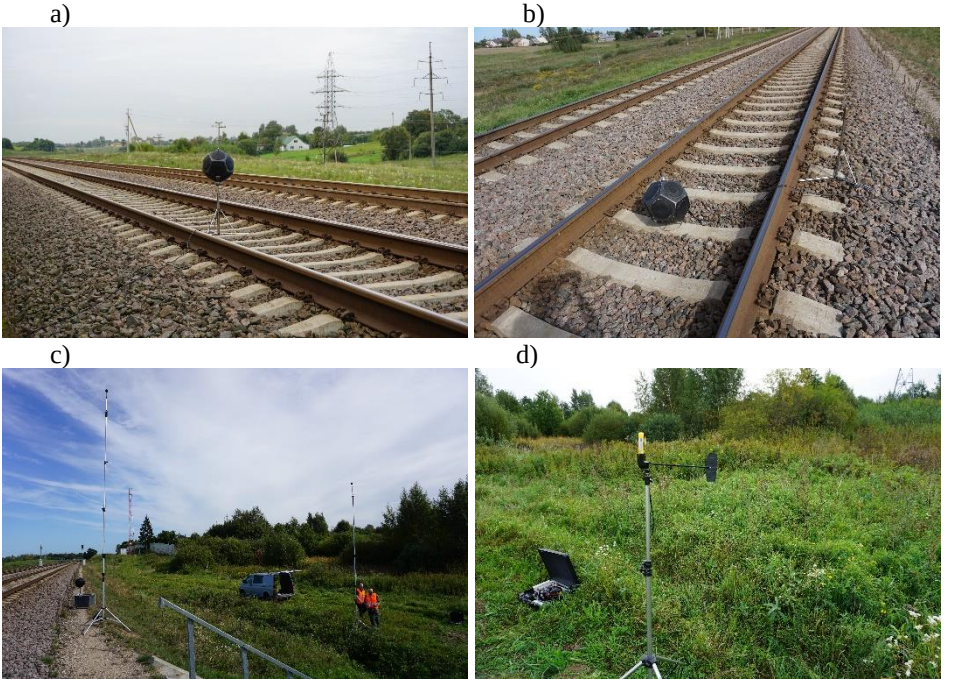
2.2.1.3. Įneštinio silpninimo nustatymui naudota įranga

Pagal technines specifikacijas CEN/TS 16272-7:2015 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2015) buvo panaudoti integruoti vidutinio garso lygio matuokliai, atitinkantys LST EN 61672-1:2014 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2014) 1 tipo reikalavimus. Panaudoti du matavimo kanalai tam, kad vienu metu pamatuoti atskaitos ir imtuvo padėtyse. Be to, buvo panaudotas LST EN 60942:2003 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2003) reikalavimus atitinkantis garso lygio kalibratorius. Nustatytam triukšmo lygiui užfiksuoti buvo panaudoti „G.R.A.S. Sound and viration“ mikrofonai. Šis mikrofono triukšmo lygio registravimo diapazonas yra nuo 3,15 Hz iki 20 kHz. Taip pat buvo naudotas dviejų kanalų garso matuoklis (analizatorius) „Symphonie“. Triukšmo lygiui matuoti buvo naudojama specializuota programinė įranga „dBTRIG32“. Gauti bandymo rezultatai buvo apdoroti programine įranga „dBTRAIT32“.

Bandymui panaudotas 332 mm skersmens garsiakalbis, atitinkantis reikalavimus keliamus triukšmo šaltiniui C pagal technines specifikacijas CEN/TS 16272-

7:2015 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2015), kurio charakteristikos artimos taškiniam šaltiniui ir kuris skleidžia triukšmą, atitinkantį LST EN 16272-3-2:2014 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2014) spektrą. Garsiakalbis buvo pastatytas tarp bėgių 0,5 m aukštyje virš bėgio galvutės viršaus arba bėgio galvutės viršaus lygyje. Bendras garso galios lygis buvo ne žemesnis kaip B.

2.1 pav. pavaizduota įneštinio silpninimo nustatymo eksperimento metu naudota įranga.



2.1 pav. Eksperimentui naudota įranga: a) garsiakalbis 0,5 m aukštyje virš bėgio galvutės viršaus; b) garsiakalbis bėgio galvutės viršaus lygyje; c) imtuvai; d) vėjo greičio matavimo prietaisas (fotografuota autoriaus)

Fig. 2.1. Equipment used for the experiment: a) loudspeaker at the height of 0.5 m above the top of the rail head; b) loudspeaker at the level of the top of the rail head; c) receivers; d) wind speed measuring device (made by author)

Pavaizduotas garsiakalbis, įrengtas bėgių galvutės lygmenyje tam, kad būtų galima įvertinti rato ir bėgio sąveikoje skleidžiamą triukšmą.

2.2.1.4. Įneštinio silpninimo nustatymo schema ir tyrimo vieta

Eksperimentui atlikti pasirinkta aukšta (sienutės aukštis nuo bėgių galvutės 3,50 m), 45 m ilgio triukšmo mažinimo sienutė iš aliuminio profilių, įrengta ties

geležinkelio linija Kyviškės–Valčiūnai, Nemėžyje, 4,0 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies (2.2 pav.). Triukšmo mažinimo sienutės projektinis įneštinis silpninimas 25 dBA.



2.2 pav. Eksperimentui atlikti pasirinkta aukšta triukšmo mažinimo sienutė, esanti prie geležinkelio linijos Kyviškės–Valčiūnai, Nemėžyje (fotografuota autoriaus)
Fig. 2.2. High noise reduction wall at the Kyviškės–Valčiūnai railway line in Nemėžys, which was investigated (made by the author)

Eksperimentui pasirinkta aukšta triukšmo mažinimo sienutė ties geležinkelio linija Kyviškės–Valčiūnai, Nemėžyje, kadangi:

1. Yra sąlygos privažiuoti prie pat triukšmo mažinimo sienutės.
2. Triukšmo mažinimo sienutė įrengta gana arti geležinkelio kelio (~4 m atstumu nuo begių).
3. Triukšmo mažinimo sienutė yra sąlyginai trumpa, todėl reljefas laikytinas akustiškai lygiaverčiu abejose vietose (imituojamoje „prieš“ vietoje ir vietoje, kur jau yra įrengta sienutė).

2.2.1.5. Įneštinio silpninimo verčių nustatymo lauko sąlygomis bandymas

Matavimai buvo atlikti vadovaujantis techninėmis specifikacijomis CEN/TS 16272-7:2015 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2015). Bandymui buvo naudotas triukšmo šaltinis C, t. y. geležinkelių bėgių kelio skleidžiamas triukšmas imituotas naudojant garsiakalbį, kadangi geležinkelio linijoje Kyviškės–Valčiūnai vyksta tik krovininių traukinių eismas, o traukinių greičiai neviršija 200 km/h. Techninėse specifikacijose rekomenduojamas garsiakalbio įrengimo aukštis 0,50 m virš bėgių galvutės, tačiau, siekiant įvertinti rato ir bėgio sąveikoje skleidžiamą triukšmą, buvo atliktas ir bandymas, kurio metu geležinkelių bėgių kelio skleidžiamą triukšmą imituojantis garsiakalbis buvo įrengtas kiek įmanoma žemiau, t. y. bėgių galvutės lygmenyje.

Garsiakalbis eksperimento metu buvo pastatytas geležinkelių bėgių kelio ašyje (tarp bėgių) bei nukreiptas statmenai triukšmo užvarai. Siekiant įvertinti triukšmo mažinimo sienutės įneštinį silpninimą netiesioginiu metodu, matuota buvo dviejose vietose: ties esama triukšmo mažinimo sienute, lygiavertėje vietoje, esančioje toje pačioje geležinkelio linijoje, ir kurios reljefas tapatus vietovės reljefui, kuriame jau yra įrengta sienutė (2.3 pav. a ir b).

Tam, kad būtų kiek įmanoma panašesnės vietos sąlygos, lygiavertė vieta buvo parinkta netoli nuo tiriamos triukšmo mažinimo sienutės. Ši sienutė matavimo rezultatams lygiavertėje vietoje poveikio neturi, kadangi triukšmo šaltinis yra garsiakalbis, t. y. skleidžiamas taškinis triukšmas. Eksperimentas atliktas ties nauja geležinkelių bėgių kelio linija, tad nelygumų, ypač ribinių, bei iešmų ar kitų įrenginių, kurie galėtų daryti įtaką skleidžiamo triukšmo lygiui, traktuojama, kad nėra.

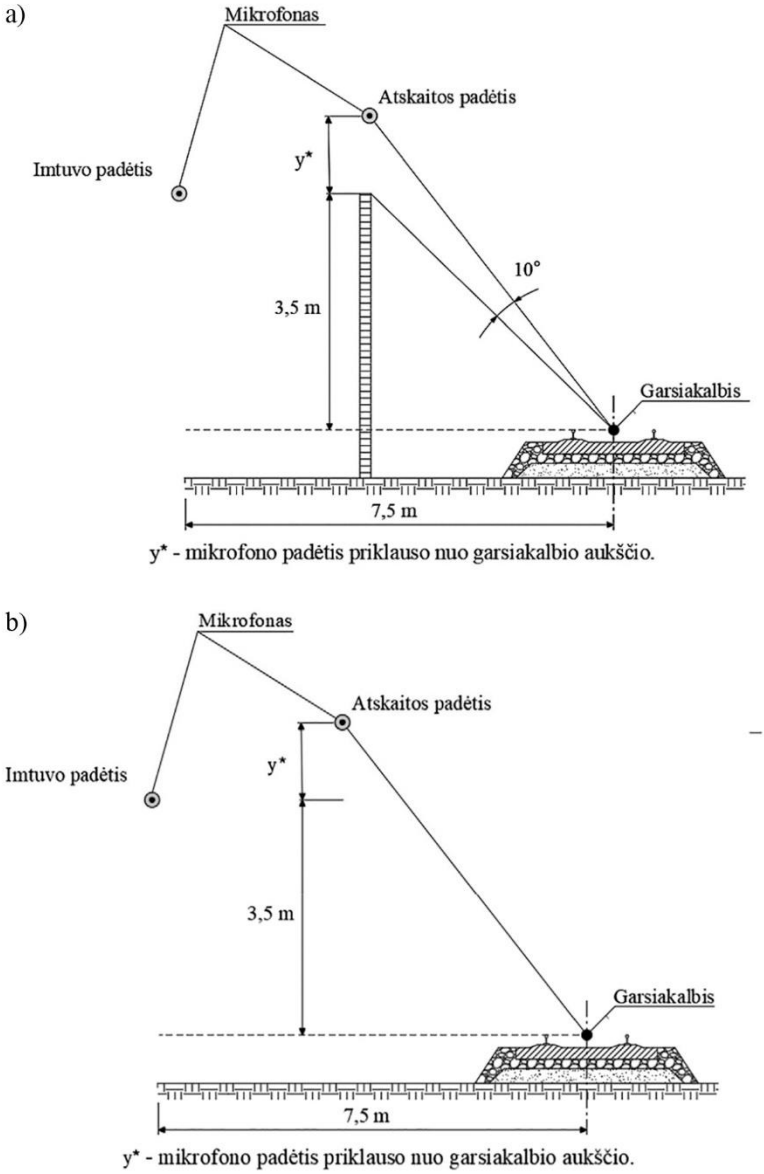
Ties įrengta triukšmo mažinimo sienute buvo atliktas matavimas, kai garsiakalbis buvo 0,50 m, o imtuvas – 3,5 m virš bėgių galvutės lygio, ir atitinkamai atliktas matavimas lygiavertėje vietoje (2.4 pav. a ir b).

Matavimai buvo atliekami, kai vėjo greitis < 5 m/s, geromis meteorologinėmis sąlygomis (nebuvo miglos, rūko, snygio, lietaus, oro temperatūra buvo ne žemesnė nei 0 °C ir ne aukštesnė nei 30 °C).

Triukšmas buvo matuojamas keturiose imtuvo (mikrofono) padėtyse, o triukšmo mažinimo sienutės įneštinis silpninimas apskaičiuotas pagal 2.6 formulę. Rezultatai pateikti 3.5, 3.6 ir 3.7 lentelėse.

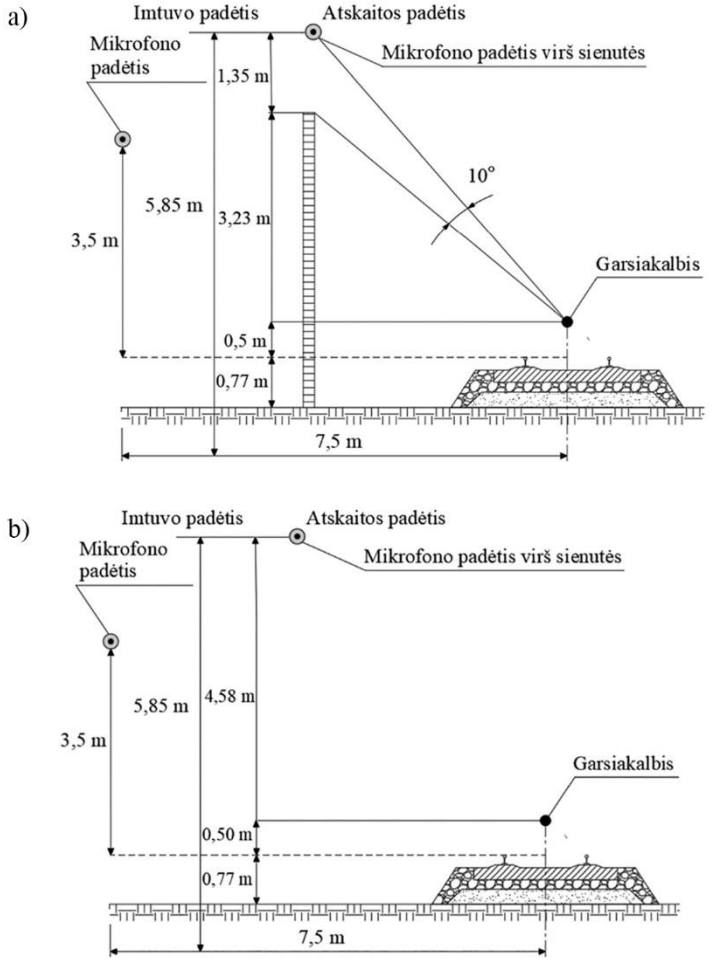
Ties įrengta triukšmo mažinimo sienute buvo atliktas matavimas, kai garsiakalbis buvo 0,50 m, o imtuvas buvo 5,5 m virš bėgių galvutės lygio, ir atitinkamai buvo atliktas matavimas lygiavertėje vietoje (2.5 pav. a ir b).

Ties įrengta triukšmo mažinimo sienute buvo atliktas matavimas, kai garsiakalbis buvo bėgių galvutės lygyje, o imtuvas buvo 3,5 m virš bėgių galvutės lygio, ir atitinkamai buvo atliktas matavimas lygiavertėje vietoje (2.6 pav. a ir b).



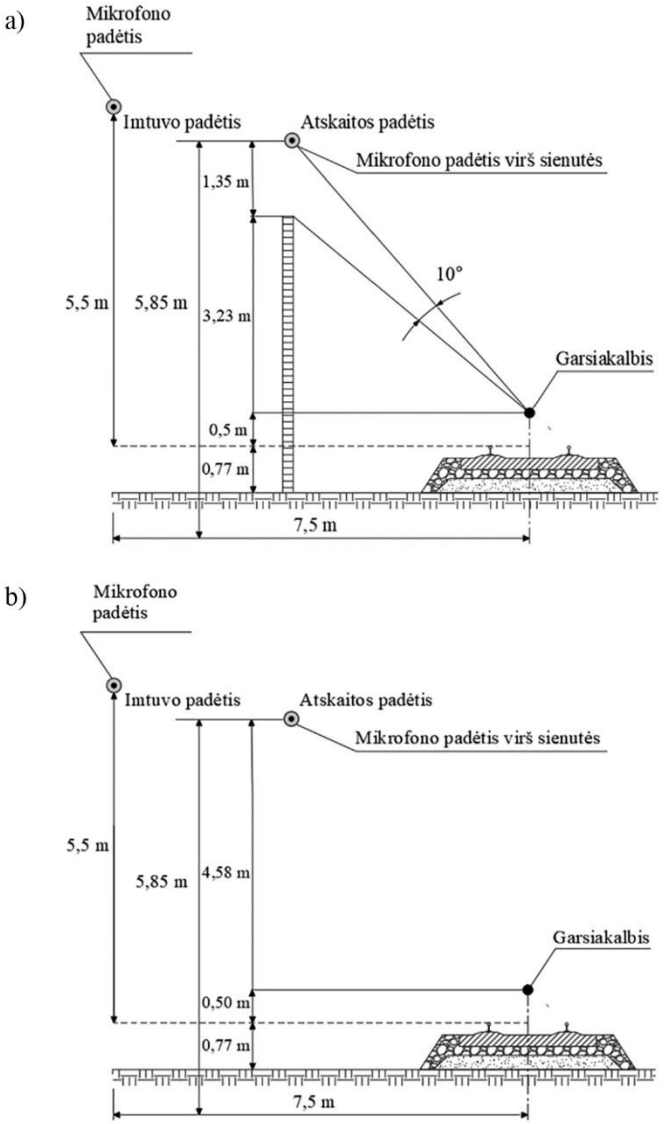
2.3 pav. a) Matavimo principinė schema ties triukšmo mažinimo sienute; b) Matavimo principinė schema lygiavertėje vietoje (sudaryta autoriaus)
Fig. 2.3. a) Schematic diagram of the measurement at the noise barrier; b) Schematic diagram of the measurement at an equivalent location (made by the author)

Ties įrengta triukšmo mažinimo sienute buvo atliktas matavimas, kai garsiakalbis buvo bėgių galvutės lygyje, o imtuvas buvo 5,5 m virš bėgių galvutės lygio, ir atitinkamai buvo atliktas matavimas lygiavertėje vietoje (2.7 pav. a ir b).

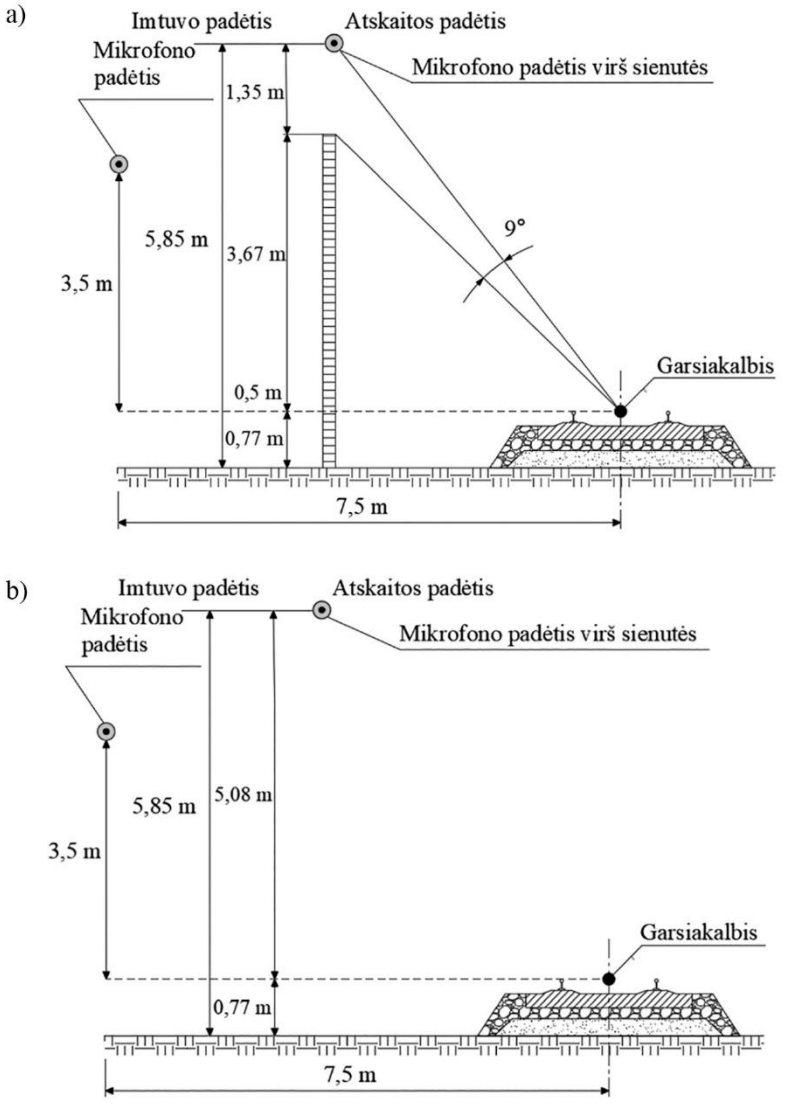


2.4 pav. a) Matavimo schema ties triukšmo mažinimo sienute, kai garsiakalbis pastatytas 0,50 m virš bėgių galvutės, o imtuvas buvo 3,5 m virš bėgių galvutės lygio; b) Matavimo schema lygiavertėje vietoje (sudaryta autoriaus)

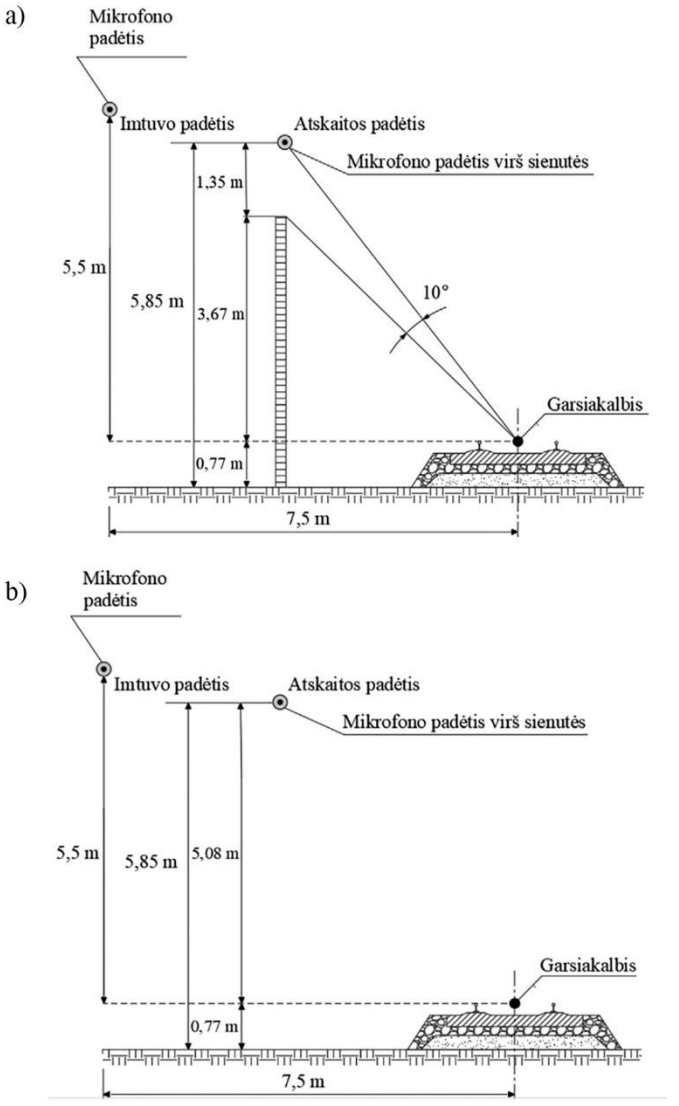
Fig. 2.4. a) Scheme of measurement at the noise barrier with the loudspeaker placed 0.50 m above the rail head and the receiver 3.5 m above the level of the rail head; b) Scheme of measurement at the equivalent location (made by the author)



2.5 pav. a) Matavimo schema ties įrengta triukšmo mažinimo sienute, kai garsiakalbis pastatytas 0,50 m virš bėgių galvutės, o imtuvas buvo 5,5 m virš bėgių galvutės lygio; b) Matavimo schema lygiavertėje vietoje (sudaryta autoriaus)
Fig. 2.5. a) Scheme of measurement at the noise barrier with the loudspeaker placed 0.50 m above the rail head and the receiver 5.5 m above the level of the rail head; b) Scheme of measurement at the equivalent location (made by the author)



2.6 pav. a) Matavimo schema ties įrengta triukšmo mažinimo sienute, kai garsiakalbis pastatytas bėgių galvutės lygyje, o imtuvas buvo 3,5 m virš bėgių galvutės lygio; b) Matavimo schema lygiavertėje vietoje (sudaryta autoriaus)
Fig. 2.6. a) Scheme of measurement at the noise barrier with the loudspeaker placed at the level of the rail head and the receiver 3.5 m above the level of the rail head; b) Scheme of measurement at the equivalent location (made by the author)



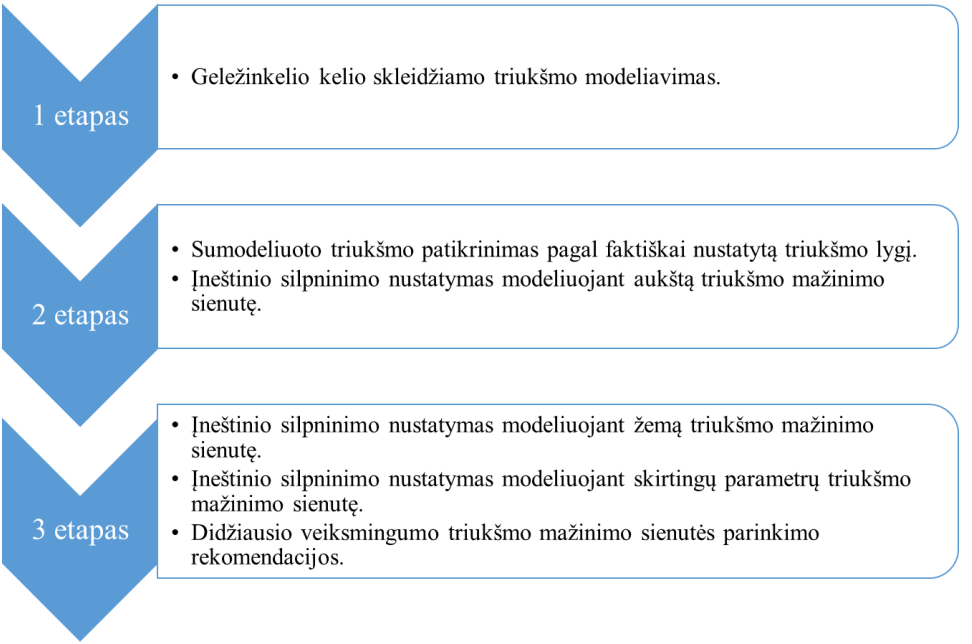
2.7 pav. a) Matavimo schema ties įrengta triukšmo mažinimo sienute, kai garsiakalbis pastatytas bėgių galvutės lygyje, o imtuvas buvo 5,5 m virš bėgių galvutės lygio; b) Matavimo schema lygiavertėje vietoje (sudaryta autoriaus)
Fig. 2.7. a) Scheme of measurement at the noise barrier with the loudspeaker placed at the level of the rail head and the receiver 5.5 m above the level of the rail head; b) Scheme of measurement at the equivalent location (made by the author)

Foninis triukšmo lygis turi neįtakoti matuojamų parametrų. Eksperimento metu nustatytas foninio triukšmo lygis turi būti ne mažiau kaip 10 dB žemesnis už triukšmo lygį, nustatytą eksperimento metu. Matavimo metu buvo tiriamas ir foninio triukšmo, į kurį įeina ir įrangos skleidžiamas triukšmas, lygis.

2.3. Skaitinio modeliavimo vykdymo schema

Siekiant tiriamame geležinkelių bėgių kelio ruože parinkti didžiausio veiksmingumo triukšmo mažinimo sienutes, buvo sukurtas triukšmo mažinimo sienutės parametrų parinkimo algoritmas.

Skaitinio modeliavimo vykdymo schema pateikta 2.8 pav.



2.8 pav. Skaitinio modeliavimo vykdymo schema (sudaryta autoriaus)
Fig. 2.8. Scheme of numerical modelling execution (made by the author)

Sukurtas triukšmo mažinimo sienutės parametrų parinkimo algoritmas toliau pritaikytas vykdant eksperimentą. Eksperimento metu numatyta atlikti matavimus lauko sąlygomis pasirinktoje vietoje. Sumodeliavus geležinkelių bėgių kelio skleidžiamą triukšmo lygį, jį numatyta patikrinti pagal lauko sąlygomis atliktų matavimų rezultatus. Toliau planuota sumodeliuoti skirtingų parametrų triukšmo mažinimo sienutes ir nustatyti jų įneštinį silpninimą.

2.4. Skaitinis triukšmo mažinimo sienučių modeliavimas

Pagal Lietuvos higienos normą HN 33:2011 (Lietuvos Respublikos sveikatos apsaugos ministerija, 2011) geležinkelių transporto triukšmo L_{dvn}, L_{dienos}, L_{vakaro} ir $L_{nakties}$ vertės skaičiavimais nustatomos taikant su EK rekomendacija 2003/613/EB (Europos Komisija, 2003) suderintą Olandijos nacionalinę skaičiavimo metodiką „Geležinkelio transporto triukšmo apskaičiavimo ir matavimo rekomendacijos“ „RMR“ (1996).

EK romisijos rekomendacijoje 2003/613/EB (Europos Komisija, 2003) nurodyta, kad „RMR“ metodikoje pateikiamos dvi skirtingos skaičiavimo schemos: SRM I (supaprastinta schema) ir SRM II (išsami schema). Naudojant „RMR“ metodiką galima apskaičiuoti ekvivalentinius garso slėgio lygius, bet nėra galimybės apskaičiuoti ekvivalentinių nuolatinių garso slėgio lygių pagal LST ISO 1996-2:2017 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2017). Norint apskaičiuoti nuolatinius rodiklius, į skaičiavimą turi būti įtraukti vidutiniai atitinkamų metų traukinių duomenys, vertinimo periodai (dienos, vakaro, nakties) pagal Europos Parlamento ir Komisijos direktyvos 2002/49/EB (Europos Parlamentas ir Europos Sąjungos Taryba, 2002) reikalavimus.

Atkreiptinas dėmesys, kad olandų skaičiavimo metodika netinkama skaičiuoti (modeliuoti) triukšmo mažinimo sienutes, įrengtas mažesniu kaip 4,5 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio (Nieuwenhuizen & Yntema, 2018), todėl skaitinio triukšmo mažinimo sienučių modeliavimo eksperimentiniame tyrime taikyta kita skaičiavimo metodika, t. y. CNOSSOS-EU metodika, kurią galima modeliuoti, ir žemas triukšmo mažinimo sienutes, įrengtas įvairiais atstumais nuo geležinkelių bėgių kelio.

Siekiant palyginti skirtingo aukščio triukšmo sienučių įneštinį silpninimą bei parinkti tinkamus sienutės techninius parametrus, buvo atliktas skaitinis modeliavimas, naudojant programinę įrangą CadnaA (angl. *Computer Aided Noise Abatement*). Su šia programine įranga galima skaičiuoti geležinkelių transporto triukšmo vertes pagal Olandijos nacionalinę skaičiavimo metodiką (RMR ir SMR II). Taip pat ir naudojantis kitomis pripažintomis metodikomis (Schall03 (1990), Schall Transrapid, VBUSch (Vokietija); Schall03 (2014) (Vokietija); DIN 18005 (Vokietija); ONR 305011 (Austrija); Semibel (Šveicarija); NMPB-Fer (Prancūzija); NMPB08-Fer (Prancūzija); CRN (Jungtinė Karalystė); TemaNord 1996:524 (Skandinavija); FTA/FRA, draft (JAV); CNOSSOS-EU (2014)).

2.5. Skaitinio modeliavimo metodika

Eksperimentui atlikti pasirinkta vieta, kurioje yra aukšta triukšmo mažinimo sienutė geležinkelių bėgių kelyje Kyviškės–Valčiūnai. Ties šia senute numatyta atlikti matavimus lauko sąlygomis, kurių metu bus išmatuotas geležinkelių bėgių kelio skleidžiamą triukšmo lygis tuo atveju, kai važiuoja riedmenys, ir išmatuotas triukšmo lygis, naudojant garsiakalbį imituojantį geležinkelių bėgių kelio skleidžiamą triukšmą pagal technines specifikacijas CEN/TS 16272-7:2015 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2015). Pagal matavimų rezultatus numatyta patikrinti sumodeliuotą geležinkelių bėgių kelio skleidžiamą triukšmo lygį. Parengus geležinkelių bėgių kelio skleidžiamo triukšmo modelį, numatyta sumodeliuoti skirtingų parametrų triukšmo mažinimo sienutes, esančias skirtingu atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, ir nustatyti jų įneštinį silpninimą.

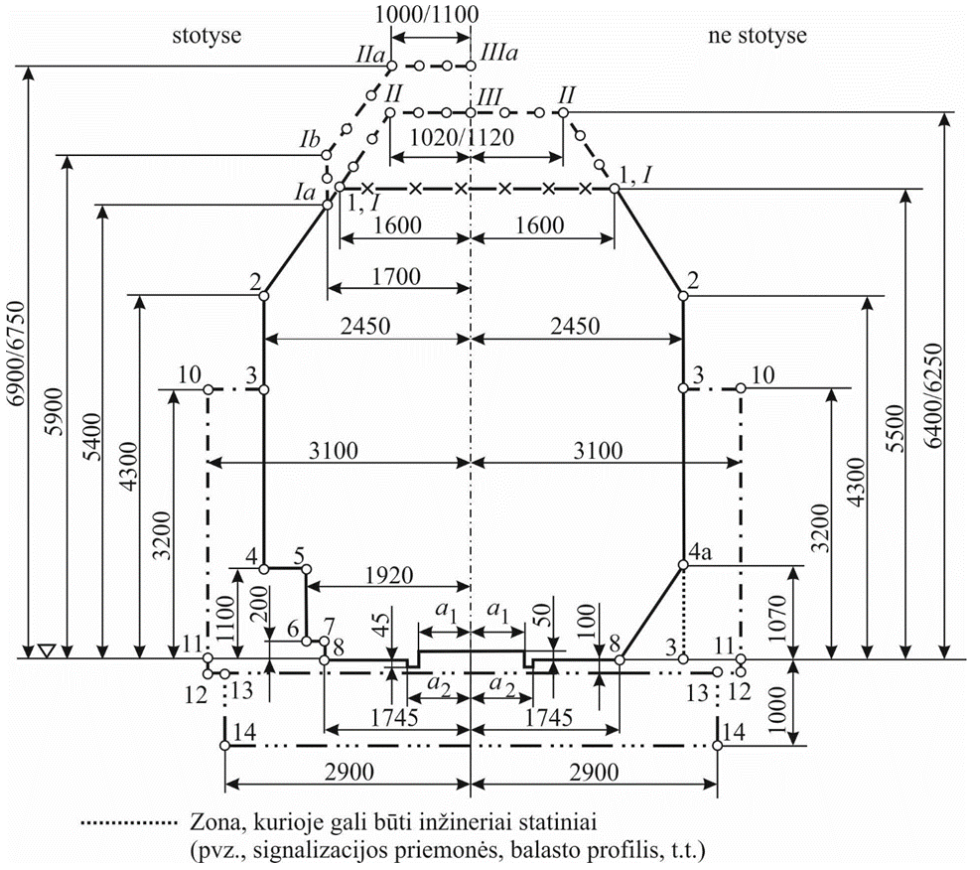
Lietuvoje pagal Statinių artumo gabaritų taikymo instrukciją 163/K (AB „Lietuvos geležinkeliai“, 2001) dokumentų reikalavimus yra ribojami atstumai iki geležinkelių bėgių. Pagrindiniai reikalavimai yra įtraukti į EK reglamento (E) Nr. 1299/2014 (Europos Komisija, 2014) H priedą, kuriame reglamentuojamas 1 520 mm vėžės sistemos inžinerinių statinių artumo gabaritas.

Pagal EK reglamento (E) Nr. 1299/2014 (Europos Komisija, 2014) reikalavimus tarpstočiuose esančiuose geležinkelių bėgių kelių ruožuose mažiausias atstumas, kuriuo gali būti rengiama signalai, atraminės sienos ir kitų geležinkelio posluoksnio inžinerinių statinių užtvaros, yra 2,45 m (2.9 pav. linija 9–4a, kuri apibrėžia inžinerinių statinių artumo gabarito kontūrą). Šiame gabarite yra ribojamas įrenginių ir statinių aukštis nuo bėgių galvutės viršaus lygio iki 1,07 m.

Statinių artumo gabaritų taikymo instrukcijoje 163/K (AB „Lietuvos geležinkeliai“, 2001) yra nurodyta, kad esant sudėtingoms topografinėms sąlygoms, suderinus su Lietuvos geležinkelių administracija, mažiausias atstumas, kuriuo tarpstočiuose gali būti rengiama kontaktinio tinklo atramos, semaforų ir šviesoforų stiebai bei atraminės sienelės, yra 2,75 m. Mažiausias atstumas, kuriuo gali būti rengiami mažieji šviesoforai, yra 2,45 m. Šiame gabarite yra ribojamas įrenginių ir statinių aukštis nuo bėgių galvutės viršaus lygio iki 1,10 m. Išimtiniais atvejais, Lietuvos geležinkelių administracijai leidus ir užtikrinus geležinkelio personalo, pramonės ir transporto įmonių darbuotojų bei keleivių saugumą (kai šalia kelio nenumatytas žmonių ėjimas arba įrengti apėjimai), mažiausias atstumas, kuriuo gali būti rengiami pastatai ir tvoros, yra 2,45 m. Be to, teisės aktuose nėra nurodyta, kad tokiu atstumu gali būti įrengiamos triukšmo mažinimo sienutės.

Pagal EK reglamento (E) Nr. 1299/2014 (Europos Komisija, 2014) reikalavimus tarpstočiuose esančiuose geležinkelių bėgių kelių ruožuose 3,1 m atstumu gali būti rengiama inžineriniai statiniai ir įrenginiai, esantys išorinėje „kraštinio“ kelio pusėje (žr. 2.9 pav. liniją 11–10–3, kuri apibrėžia inžinerinių statinių artumo

gabarito kontūrą). Šiame gabarite yra ribojamas įrenginių ir statinių aukštis iki 3,20 m.



2.9 pav. 1 520 mm vėžės sistemos inžinerinių statinių artumo gabaritas S [matmenys mm] (EK reglamentas (E) Nr. 1299/2014 (Europos Komisija, 2014))
Fig. 2.9. Structure gauge S for the 1 520 mm track gauge system [dimensions in mm] (Commission Regulation (ES) No 1299/2014 (European Commission, 2014))

Atlikus žemų triukšmo mažinimo sienučių taikymo geležinkelių bėgių keliuose užsienio šalyse patirties analizę, nustatyta, kad žemos triukšmo mažinimo sienutės rengiamos 1,73–2,0 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies. Pagal šiuo metu galiojančius Lietuvoje teisės aktų reikalavimus nėra įmanoma įrengti žemų triukšmo sienučių tokiu atstumu, todėl skaitiniam skirtingo aukščio triukšmo sienučių palyginimui modeliuojant pasirinkti atstumai, kuriuose Lietuvoje yra leidžiama rengti tam tikrus statinius bei įrenginius. Be to, tam, kad būtų galima įvertinti modeliuojamų sienučių veiksmingumą tomis pačiomis sąlygomis,

buvo sumodeliuotos esama aukšta triukšmo mažinimo sienutė bei žema triukšmo mažinimo sienutė, nutolusi nuo geležinkelių bėgių kelio ašies užsienio šalyse taikomu atstumu.

Taip pat buvo numatyta atlikti skaičiavimus, siekiant nustatyti tinkamų parametrų triukšmo mažinimo sienutę, kuri užtikrintų didžiausią įneštinį silpninimą. Modeliuojama įvairių aukščių sienutė, 2,45–3,1 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, jos forma kintanti (sienutės tiesios arba su gembe). Buvo siekiama parinkti veiksmingiausią Lietuvoje reglamentuojamais atstumais galimą įrengti žemą triukšmo mažinimo sienutę, kurią galima būtų taikyti kitose užsienio šalyse, griežtai reglamentuojančiose statinių ir įrenginių įrengimo atstumus nuo geležinkelių bėgių kelio ašies.

Siekiant įvertinti triukšmo mažinimo sienutės veiksmingumą įvairių greičių sąlygomis, numatyta modeliuoti triukšmo mažinimo sienutės prie 50 km/h (imituojant riedmenų greitį stočių ruože, mažiausia riba prie kurios vyrauja riedėjimo sukeliamas triukšmas), 80 km/h (imituojant riedmenų greitį ties eksperimentui pasirinkta triukšmo mažinimo sienute), 120 km/h (imituojant didžiausią leistiną greitį I ir II geležinkelių linijos kategorijos keliuose keleiviniams riedmenims), 160 km/h (imituojant didžiausią leistiną greitį I ir II geležinkelių linijos kategorijos keliuose prekiniams riedmenims), 250 km/h (didžiausia riba prie kurios vyrauja riedėjimo sukeliamas triukšmas).

2.6. Antrojo skyriaus išvados

Disertacijoje iškeltam tikslui pasiekti buvo išanalizuota riedmenų važiavimo greičio ir geležinkelių skleidžiamo triukšmo lygio sąsaja, parengtas eksperimentinio tyrimo planas ir eksperimentinio tyrimo lauko sąlygomis instrukcija bei skaitinio modeliavimo metodika. Apibendrinant antrajame skyriuje pateiktos analizės rezultatus galima teigti, kad:

1. Esamos sienutės įneštinį silpninimą atliekant tyrimą lauko sąlygomis galima atlikti pagal techninių specifikacijų CEN/TS 16272-7:2015 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2015) reikalavimus, taikant netiesioginį tyrimo metodą. Šis metodas apima garso slėgio lygio matavimą lygiavertėje vietoje be sienutės, kuri atitinka matavimo vietą ties triukšmo mažinimo sienute. Atitikimas vertinamas pagal šiuos kriterijus: šaltinis, žemės reljefas, trikdžiai dėl kliūčių ar atsispindinčių paviršių, žemės paviršius ir meteorologinės sąlygos.
2. Matavimams atlikti pagal technines specifikacijas CEN/TS 16272-7:2015 (Lietuvos standartizacijos de-partamentas, 2015) buvo pasirinktas triukšmo šaltinis C, t. y. geležinkelio skleidžiamam triukšmui

imituoti naudojamas garsiakalbis. Pagal technines specifikacijas rekomenduojamas garsiakalbio įrengimo aukštis 0,50 m virš bėgių galvutės, tačiau, siekiant įvertinti rato ir bėgio sąveikoje skleidžiamą triukšmą, numatyta atlikti matavimus ir įrengus garsiakalbį kiek įmanoma žemiau, t. y. bėgių galvutės lygmenyje. Taip pat skaitinio modeliavimo eksperimentinio tyrimo modelio sukalibravimui numatyta nustatyti ir faktinį pravažiuojančių riedmenų skleidžiamą triukšmą.

3. Siekiant skaitinio modeliavimo metu sukurti kuo realesnes sąlygas, atitinkantį geležinkelių skleidžiamo triukšmo modelį, skaitinio modeliavimo tyrimo plane buvo numatytas programine įranga sumodeliuoto geležinkelių bėgių kelio skleidžiamo triukšmo patikrinimas, remiantis eksperimentinio tyrimo lauko sąlygomis rezultatais. Buvo numatyta sumodeliuoti esamą aukštą triukšmo mažinimo sienutę, žemą triukšmo mažinimo sienutę bei skirtingų parametrų sienutes, nustatyti jų įneštinį silpninimą.
4. Triukšmo sienutėms palyginti skaitiniu modeliavimo metodu pasirinkti atstumai, kuriuose Lietuvoje yra leidžiama rengti tam tikrus statinius bei įrenginius. Modeliuojama įvairių aukščių bei formų sienutė, esanti 2,45–3,1 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies. Buvo siekiama parinkti tinkamiausią žemą triukšmo mažinimo sienutę, kurią būtų galima įrengti pagal Lietuvoje reglamentuojamus atstumus ir taikyti kitose užsienio šalyse, kuriose griežtai reglamentuojami atstumai, kuriais galima įrengti statinius ir įrenginius nuo geležinkelių bėgių kelio ašies. Be to, tam, kad būtų galima įvertinti modeliuojamų sienučių veiksmingumą tomis pačiomis sąlygomis, numatyta sumodeliuoti esamą aukštą triukšmo mažinimo sienutę bei žemą triukšmo mažinimo sienutę, nutolusią nuo geležinkelių bėgių kelio ašies užsienio šalyse taikomu atstumu.
5. Siekiant įvertinti triukšmo mažinimo sienutės veiksmingumą įvairių greičių sąlygomis, numatyta modeliuoti triukšmo mažinimo sienutes esant tokiems riedmenų važiavimo greičiams: 50 km/h (imituojant riedmenų greitį stočių ruože, mažiausia riba, kurioje vyrauja riedėjimo sukeliamas triukšmas), 80 km/h (imituojant riedmenų greitį ties eksperimentui pasirinkta triukšmo mažinimo sienute), 120 km/h (imituojant didžiausią leistiną greitį I ir II geležinkelių linijos kategorijos keliuose keleiviniams riedmenims), 160 km/h (imituojant didžiausią leistiną greitį I ir II geležinkelių linijos kategorijos keliuose krovininiams riedmenims), 240 km/h ir 250 km/h (didžiausia riba, kurioje vyrauja riedėjimo sukeliamas triukšmas).

3

Žemų triukšmo mažinimo sienučių parametrų įtakos jų veiksmingumui vertinimas

Šiame skyriuje atliktas triukšmo mažinimo priemonių veiksmingumo įvertinimas daugiakriteriu metodu. Pateikta esamos triukšmo mažinimo sienutės įneštinio silpninimo tyrimo lauko sąlygomis ir skaitinio modeliavimo tyrimo rezultatai, jų analizė. Atliktas žemų triukšmo mažinimo sienučių parametrų, darančių įtaką įneštinio silpninimo vertėms, rodiklių statistinis priklausomybės vertinimas.

Šio skyriaus tematika paskelbtos trys autorės publikacijos (Tumavičė et al., 2017, 2023; Tumavičė & Žalimienė, 2024), tyrimų rezultatai pristatyti mokslinėje konferencijoje (Tarptautinėje konferencijoje „Environmental Engineering“ 2023 m. Vilniuje, Lietuvoje).

3.1. Triukšmo mažinimo priemonių veiksmingumo įvertinimas daugiakriterijiniu metodu

Riedėjimo triukšmo mažinimo priemonių yra gana daug, todėl labai svarbu parinkti tinkamiausią konkrečiai vietai, įvertinant vietines sąlygas. Praktikoje labai

dažnai triukšmo mažinimo priemonės parenkamos remiantis tik įneštinio silpninimo kriterijumi, t. y. kiek tikėtina jos sumažins skleidžiamo triukšmo lygį. Bet šiuo kriterijumi neįmanoma įvertinti kitų triukšmo priemonės poveikio aplinkai aspektų (pavyzdžiui, eismo sauga, įrengimo ir priežiūros sąnaudos, priimtinumas visuomenei ir kt.), todėl labai svarbu vertinti ir kitus kriterijus. Išanalizavus mokslinius tyrimus, susijusius su žemomis triukšmo mažinimo sienutėmis bei jų privalumais, lyginant su aukštomis mažinimo sienutėmis (Morgan & Peeling, 2012; Oertli & Scossa-Romano, 2012; Tuler & Kaewunruen, 2017), buvo pasirinkti kriterijai, kuriais vertintas triukšmo mažinimo priemonių veiksmingumas daugiakriteriu TOPSIS metodu: įneštinis silpninimas, įrengimo/atlikimo sąnaudos, teritorijos poreikis (plotis), eismo saugumas, įgyvendinimo laikotarpis (sudėtingumas), priimtinumas visuomenei, poveikis aplinkai.

Daugiakriteriu metodu pasirinkta vertinti dažniausiai Lietuvoje taikomas triukšmo mažinimo priemones, t. y. garso sklidimo kelyje taikomas priemones (aukštą triukšmo mažinimo sienutę, pylimą, želdynų juostą), šaltinyje taikomas priemones (bėgių šlifavimą, bėgių kelią iš ilgabėgių), gretimuose pastatuose taikomą priemonę (pastato langų keitimą). Papildomai vertinta pasaulyje ir garso sklidimo kelyje plačiai taikoma žema triukšmo mažinimo sienutė.

Skirtingų, dažniausiai Lietuvoje taikomų triukšmą mažinančių priemonių ir siūlomos diegti žemos triukšmo mažinimo sienutės veiksmingumą galima palyginti naudojant daugiakriterius sprendimų priėmimo metodus. Šie metodai yra grindžiami nagrinėjamos srities ekspertų nuomone, kurie užpildo taikomo metodo anketą, sukurtą konkrečiai problemai spręsti pagal taikomą metodą.

Šioje disertacijoje, parenkant geriausią alternatyvą iš dažniausiai riedėjimo triukšmo mažinimui taikomų triukšmo mažinimo priemonių, naudojamas TOPSIS metodas (Balioti et al., 2018; Kacprzak, 2019; Krohling & Pacheco, 2015; Pavic & Novoselac, 2013; Pelegrina et al., 2019; Salih et al., 2019; Simanavičienė & Cibulskaitė, 2015). Šio metodo, skirto nustatyti geriausią alternatyvą, pagrįstą kompromisinio sprendimo koncepcijomis, pradininkai yra Hwang ir Yoon, o pats metodas pristatytas 1981 m. TOPSIS (angl. *The Technique for Order Preferences by Similarity to an Ideal Solution*) metodo esmė – kad geriausia alternatyva turi būti kuo mažesniu atstumu nuo teigiamo idealaus taško ir kuo didesniu atstumu nuo neigiamo idealaus taško (Tzeng & Huang, 2017).

Eismo saugumo, įgyvendinimo laikotarpio (sudėtingumo), priimtinumo visuomenei bei vizualio poveikio aplinkai (toliau poveikio aplinkai) kriterijų vertės gautos atlikus ekspertinį suvestinį vertinimą. Atliekant tyrimą buvo svarbu atrinkti tyrimo objekto esmę išmanančius ekspertus, todėl parinkta 11 ekspertų, kurie turi ilgalaikės praktinės ir mokslinės patirties civilinės inžinerijos mokslo kryptyse.

Triukšmo mažinimo priemonės (alternatyvos) buvo įvertintos balais tokia tvarka:

1. Eismo saugumo požiūriu vertinta balais nuo 1 (didelė eismo įvykių tikimybė) iki 10 (ypač maža eismo įvykių tikimybė).
2. Įgyvendinimo laikotarpio (sudėtingumo) požiūriu vertinta balais nuo 1 (sudėtingas įrengimas ir imlus laikui) iki 10 (lengvas ir spartus įrengimas).
3. Priimtinumo visuomenei požiūriu vertinta balais nuo 1 (priemonė visuomenei visiškai nepriimtina) iki 10 (priemonė visuomenei priimtina ir vertintina teigiamai).
4. Poveikio aplinkai požiūriu vertinta balais nuo 1 (priemonė daro itin neigiamai įtaką aplinkai ir vizualiai nepriimtina) iki 10 (priemonė aplinką veikia teigiamai ir vizualiai priimtina).

Apklausos rezultatai pateikiami 3.1–3.4 lentelėse.

3.1 lentelė. Triukšmo mažinimo priemonių įvertinimas eismo saugos požiūriu
Table 3.1. Evaluation of noise mitigation measures from the point of view of traffic safety

Ekspertas / TMP	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	Vid.
1. Aukšta triukšmo mažinimo sienutė	7	4	6	2	6	4	4	5	3	3	2	4
2. Žema triukšmo mažinimo sienutė	8	8	7	9	10	9	8	8	6	10	9	8
3. Pastato langų keitimas	10	10	9	10	10	10	10	7	10	10	5	9
4. Pylimas	9	5	7	8	8	2	8	6	8	10	3	7
5. Želdynų juosta	8	10	8	10	7	3	6	6	9	9	4	7
6. Bėgių šlifavimas	10	10	7	10	10	10	10	7	10	10	10	9
7. Bėgių kelias iš ilgabėgių	8	10	7	10	10	10	10	6	10	10	10	9

3.2 lentelė. Triukšmo mažinimo priemonių įvertinimas pagal įgyvendinimo laikotarpį ir sudėtingumą
Table 3.2. Evaluation of noise mitigation measures from the point of view of the implementation period and complexity

Ekspertas / TMP	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	Vid.
1. Aukšta triukšmo mažinimo sienutė	3	4	5	6	3	5	1	4	2	6	3	4
2. Žema triukšmo mažinimo sienutė	8	9	9	8	8	8	8	10	8	8	8	8
3. Pastato langų keitimas	10	8	9	9	9	10	8	9	10	10	2	9
4. Pylimas	8	4	7	7	3	3	3	7	6	7	2	5
5. Želdynų juosta	3	3	5	2	7	10	6	7	8	5	1	5
6. Bėgių šlifavimas	2	6	6	5	10	4	8	8	7	8	10	7
7. Bėgių kelias iš ilgabėgių	5	5	6	3	5	3	4	5	6	7	9	5

3.3 lentelė. Triukšmo mažinimo priemonių įvertinimas poveikio aplinkai požiūriu
Table 3.3. Evaluation of noise mitigation measures from the point of view of environmental impact

Ekspertas / TMP	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	Vid.
1. Aukšta triukšmo mažinimo sienutė	2	6	6	7	5	8	2	5	3	5	4	5
2. Žema triukšmo mažinimo sienutė	7	8	10	8	9	9	8	10	9	9	8	9
3. Pastato langų keitimas	10	6	7	6	10	10	9	8	8	10	6	8
4. Pylimas	10	10	7	9	7	10	8	8	10	9	7	9
5. Želdynų juosta	10	10	10	9	8	10	10	7	8	8	10	9
6. Bėgių šlifavimas	9	5	6	7	10	5	9	7	8	10	3	7
7. Bėgių kelias iš ilgabėgių	9	10	10	7	10	9	9	9	8	10	10	9

3.4 lentelė. Triukšmo mažinimo priemonių įvertinimas priimtinumo visuomenei požiūriu
Table 3.4. Evaluation of noise mitigation measures from the point of view of public acceptability

Ekspertas / TMP	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	Vid.
1. Aukšta triukšmo mažinimo sienutė	3	4	2	3	5	2	4	3	3	2	6	3
2. Žema triukšmo mažinimo sienutė	4	8	7	9	9	8	8	7	9	9	8	8
3. Pastato langų keitimas	10	6	9	7	9	10	9	8	6	10	9	8
4. Pylimas	9	6	7	8	7	10	8	8	10	10	4	8
5. Želdynų juosta	10	6	9	9	8	9	10	8	10	10	9	9
6. Bėgių šlifavimas	10	7	9	8	10	9	9	7	10	10	9	9
7. Bėgių kelias iš ilgabėgių	10	7	9	9	10	10	9	7	10	10	5	9

Siekiant nustatyti, ar atlikto suvestinio vertinimo rezultatai yra patikimi, buvo nustatytas Kendalo konkordancijos koeficientas, kurį apskaičiavus galima nustatyti, ar sutampa ekspertų nuomonės.

Konkordancijos koeficientas, kai vertinimuose yra sutampančių balų, turi būti apskaičiuojamas pagal tokią formulę (Legrende, 2005):

$$W = \frac{12 \times SS}{m^2(k^3 - k) - m \times T}, \tag{3.1}$$

čia m – ekspertų skaičius, k efektyvumo rodiklių skaičius, T sutampančių balų pataisos koeficientas.

Sutampančių balų pataisos koeficientas apskaičiuojamas pagal tokią formulę (Legrende, 2005):

$$T = \sum_{q=1}^{u} \left(t_k^3 - t_k\right), \tag{3.2}$$

čia t_k sutampančių balų skaičius kiekvienoje q iš u susijusių balų grupių.

Konkordancijos koeficientas gali kisti nuo 0 iki 1. Tuo atveju, jeigu konkordancijos koeficiento reikšmė yra lygi 1, ji parodo, kad ekspertų nuomonės yra visiškai suderintos, ir priešingai, jeigu konkordancijos koeficiento reikšmė yra lygi 0, ji parodo, kad ekspertų nuomonės yra visiškai nesuderintos.

Apskaičiuoti konkordancijos koeficientai W (0,883 – eismo saugumo požiūriu, 0,702 – įgyvendinimo laikotarpio (sudėtingumo) požiūriu, 0,952 – priimtinumo visuomenei požiūriu, 0,555 – poveikio aplinkai požiūriu) rodo, kad ekspertinių vertinimų suderinamumas yra pakankamas.

Apskaičiavus atsitiktinio dydžio X^2 reikšmę, buvo gauta 58,25 (eismo saugumo požiūriu), 46,34 (įgyvendinimo laikotarpio (sudėtingumo) požiūriu), 62,82 (priimtinumo visuomenei požiūriu) ir 36,65 (poveikio aplinkai požiūriu). Pasirenkamas patikimumo lygmuo α 0,05, iš X^2 lentelės su laisvės laipsniu ν = k – 1, rasta kritinė reikšmė X^2_{kr}, kurios vertė 12,592. Apskaičiuotos visais vertintais aspektais X^2 vertės yra didesnės už X^2_{kr}, todėl nustatyta, kad ekspertų vertinimai yra suderinti.

3.5 lentelėje pateiktos dažniausiai riedėjimo triukšmui mažinti taikomos triukšmo mažinimo priemonės (alternatyvos) ir pagrindiniai kriterijai, kuriais remiantis buvo parinkta geriausia alternatyva. Eismo saugumo, įgyvendinimo laikotarpio (sudėtingumo), priimtinumo visuomenei bei poveikio aplinkai kriterijų vertės gautos išvedus vidurkį iš balų, kuriais įvertino ekspertai.

Buvo atliktas triukšmo mažinimo priemonių ir kriterijų/techninių parametrų koreliacijos vertinimas, kurio metu buvo papildomai užpildytos 5-ios ekspertų, turinčių ilgalaikės praktinės ir mokslinės patirties civilinės inžinerijos mokslo kryptyse, vertinimų anketos ir nustatyta, kuris rodiklis yra svarbiausias. Buvo nustatyti efektyvių rodiklių reikšmingumai taikant porinio lyginimo metodą. Optimalus sprendimas gautas išsprendus tiesinių lygčių sistemą. Ekspertų apklausos ir reikšmingumo skaičiavimo rezultatai pateikti 3.6–3.10 lentelėse.

3.5 lentelė. Triukšmo mažinimo priemonės racionaliausio sprendimo priėmimo matrica
Table 3.5. Matrix for making the most rational decision for noise reduction measures

Kriterijus/techninis parametras[1)]	Vienetas	Triukšmo mažinimo priemonė (alternatyva)						
		Aukšta triukšmo sienutė	Žema triukšmo sienutė	Pakeisti pastatų langai	Pylimas	Želdynų juosta	Nušlifuoti bėgiai	Sandūrinis kelias
Garso slėgio lygio sumažėjimas	dBA	15	10	30[2)]	15	5[3)]	3	10
Įrengimo sąnaudos	Eur/m	1700[4)]	1500[5)]	8000[6)]	111[7)]	1333	10,32[8)]	463

3.5 lentelės pabaiga

Kriterijus/techninis parametras[1)]	Vienetas	Triukšmo mažinimo priemonė (alternatyva)						
		Aukšta triukšmo sienutė	Žema 90 triukšmo sienutė	Pakeisti pastatų langai	Pylimas	Želdynų juosta	Nušlifuoti bėgiai	Sandūrinis kelias
Garso slėgio lygio sumažėjimas	dBA	15	10	30[2)]	15	5[3)]	3	10
Įrengimo/atlikimo sąnaudos	Eur/m	1700[4)]	1500[5)]	8000[6)]	111[7)]	1333	10,32[8)]	463
Teritorijos poreikis (plotis)	m	0,20[9)]	0,20[9)]	0[10)]	22[11)]	30[12)]	0[10)]	0[10)]
Eismo saugumas	Įvertinimas balu	4	8	9	7	7	9	9
Įgyvendinimo laikotarpis (sudėtingumas)	Įvertinimas balu	4	8	9	5	5	7	5
Priimtinumas visuomenei	Įvertinimas balu	3	8	8	8	9	9	9
Poveikis aplinkai	Įvertinimas balu	5	9	8	9	9	7	9

Pastabos: [1)] tuo atveju, jeigu yra verčių intervalas, priimama didžiausia vertė;

[2)] veiksminga tik uždarius langus arba naudojant specialias ventiliacines orlaides;

[3)] tam, kad pasiektų veiksmingumą augmenija turi būti plati, labai aukšta ir tanki;

[4)] triukšmo mažinimo sienutės įrengimo sąnaudos priklauso nuo sienutės aukščio ir kitų veiksnių Hemsworth (2003) nurodo nuo 933 Eur/m (2,0 m aukščio sienutė) iki 1475 Eur/m (4,0 m aukščio sienutė); Hemsworth (2008) ir Clausen et al. (2012) nuo 1000 Eur/m (2,0 m aukščio sienutė) iki 1700 Eur/m (4,0 m aukščio sienutė); Royal Haskoning DHV (2013) nuo 810 Eur/m (2,0 m aukščio

sienutė) iki 1350 Eur/m (4,0 m aukščio sienutė); Milford et al. (2012) 1600 Eur/m; Tuler & Kaewunruen (2017) 937 Eur/m;

[5)] triukšmo mažinimo sienutės įrengimo sąnaudos priklauso nuo sienutės aukščio ir kitų veiksnių Nilsson (2009) nurodo 500–1500 Eur/m (4,0 m aukščio sienutė); Tuler & Kaewunruen (2017) 630 Eur/m;

[6)] Clausen et al. (2012) nurodo 3000–8000 Eur/namui (4 langai); Hemsworth (2003) 2200–8000 Eur/namui (4 langai); Hemsworth (2008) 5600 Eur/namui (4 langai);

[7)] Morgan et al. (2001) nurodo 111 Eur/m^2;

[8)] Tuler & Kaewunruen (2017) 7,32 Eur/m, jei nepalankios oro sąlygos 9,38 Eur/m; Hemsworth (2003) 10,32 Eur/m; Nilsson (2009) 4,00 Eur/m;

[9)] triukšmo mažinimo sienutės plotis priklauso nuo jos konstrukcijos. Į imtį nepaimta 0,75 m pločio žema triukšmo mažinimo sienutė sudaryta iš gabionų, kadangi jos įrengimo sąnaudos nėra didžiausios;

[10)] nėra papildomos teritorijos poreikio, triukšmo mažinimo priemonė įrengiama esamų statinių ribose;

[11)] pylimo plotis priklauso nuo jo aukščio, keteros pločio ir šlaitų nuolydžio, pavyzdžiui, 3 m aukščio pylimo, kurio šlaitų nuolydis 1:2 bei keteros plotis 2 m, plotis bus 14,0 m;

[12)] reikiamo įneštinio silpninimo vertei užtikrinti reikalingas želdynų juostos plotis priklauso nuo augalo rūšies. Pagal Aplinkosauginių priemonių projektavimo, įdiegimo ir priežiūros rekomendacijas. Kelių eismo triukšmo mažinimas APR-T 10 (Lietuvos automobilių kelių direkcija, 2010) juostos plotis gali svyruoti nuo 0,5 m iki 10 m. Dobson & Ryan (2000) nurodo, kad veiksmingam triukšmo mažinimui reikalinga iki 20–30 m želdynų juosta.

3.6 lentelė. 1 eksperto (Eks1) apklausos ir reikšmingumo skaičiavimo rezultatai
Table 3.6. Expert 1 (Ex1) survey and significance calculation results

	Matavimo vnt.	Reikšmingumas	Garso slėgio lygio sumažėjimas	Įrengimo sąnaudos	Teritorijos poreikis (plotis)	Eismo saugumas	Įgyvendinimo laikotarpis (sudėting.)	Priimtinumas visuomenei	Poveikis aplinkai
Įneštinis silpninimas	dBA	0,362	1	2	3	2	4	8	5
Įrengimo sąnaudos	Eur/m	0,268	0,5	1	5	3	3	7	4

3.6 lentelės pabaiga

	Matavimo vnt.	Reikšmingumas	Garso slėgio lygio sumažėjimas	Įrengimo sąnaudos	Teritorijos poreikis (plotis)	Eismo saugumas	Įgyvendinimo laikotarpis (sudėtingumas)	Priimtinumas visuomenei	Poveikis aplinkai
Teritorijos poreikis (plotis)	m	0,043	0,333	0,2	1	0,125	0,5	2	0,5
Eismo saugumas	Įvertinimas balu	0,186	0,5	0,333	8	1	8	8	6
Įgyvendinimo laikotarpis (sudėtingumas)	Įvertinimas balu	0,048	0,25	0,333	2	0,125	1	4	0,5
Priimtinumas visuomenei	Įvertinimas balu	0,033	0,125	0,143	0,5	0,125	0,25	1	0,25
Poveikis aplinkai	Įvertinimas balu	0,059	0,2	0,25	2	0,167	2	4	1

3.7 lentelė. 2 eksperto (Eks2) apklausos ir reikšmingumo skaičiavimo rezultatai rezultatai
Table 3.7. Expert 2 (Ex2) survey and significance calculation results

	Matavimo vnt.	Reikšmingumas	Garso slėgio lygio sumažėjimas	Įrengimo sąnaudos	Teritorijos poreikis (plotis)	Eismo saugumas	Įgyvendinimo laikotarpis (sudėtingumas)	Priimtinumas visuomenei	Poveikis aplinkai
Įneštinis silpninimas	dBA	0,377	1	2	2	3	5	7	4
Įrengimo sąnaudos	Eur/m	0,265	0,5	1	4	3	2	6	5

3.7 lentelės pabaiga

	Matavimo vnt.	Reikšmingumas	Garso slėgio lygio sumažėjimas	Įrengimo sąnaudos	Teritorijos poreikis (plotis)	Eismo saugumas	Įgyvendinimo laikotarpis (sudėtingumas)	Priimtinumas visuomenei	Poveikis aplinkai
Teritorijos poreikis (plotis)	m	0,049	0,5	0,25	1	0,167	0,333	0,5	0,5
Eismo saugumas	Įvertinimas balu	0,162	0,333	0,333	6	1	7	8	6
Įgyvendinimo laikotarpis (sudėtingumas)	Įvertinimas balu	0,053	0,2	0,5	3	0,143	1	3	0,5
Priimtinumas visuomenei	Įvertinimas balu	0,037	0,143	0,167	2	0,125	0,333	1	0,25
Poveikis aplinkai	Įvertinimas balu	0,058	0,25	0,2	2	0,167	2	4	1

3.8 lentelė. 3 eksperto (Eks3) apklausos ir reikšmingumo skaičiavimo rezultatai rezultatai
Table 3.8. Expert 3 (Ex3) survey and significance calculation results

	Matavimo vnt.	Reikšmingumas	Garso slėgio lygio sumažėjimas	Įrengimo sąnaudos	Teritorijos poreikis (plotis)	Eismo saugumas	Įgyvendinimo laikotarpis (sudėtingumas)	Priimtinumas visuomenei	Poveikis aplinkai
Įneštinis silpninimas	dBA	0,382	1	3	2	2	4	7	5
Įrengimo sąnaudos	Eur/m	0,206	0,333	1	5	2	3	7	4

3.8 lentelės pabaiga

	Matavimo vnt.	Reikšmingumas	Garso slėgio lygio sumažėjimas	Įrengimo sąnaudos	Teritorijos poreikis (plotis)	Eismo saugumas	Įgyvendinimo laikotarpis (sudėtingumas)	Priimtinumas visuomenei	Poveikis aplinkai
Teritorijos poreikis (plotis)	m	0,044	0,5	0,2	1	0,125	2	0,5	0,5
Eismo saugumas	Įvertinimas balu	0,236	0,5	0,5	8	1	8	8	7
Įgyvendinimo laikotarpis (sudėtin-gumas)	Įvertinimas balu	0,042	0,25	0,333	0,5	0,125	1	4	0,2
Priimtinumas visuomenei	Įvertinimas balu	0,033	0,143	0,143	2	0,125	0,25	1	0,167
Poveikis aplinkai	Įvertinimas balu	0,058	0,2	0,25	2	0,143	5	6	1

3.9 lentelė. 4 eksperto (Eks4) apklausos ir reikšmingumo skaičiavimo rezultatai rezultatai
Table 3.9. Expert 4 (Ex4) survey and significance calculation results

	Matavimo vnt.	Reikšmingumas	Garso slėgio lygio sumažėjimas	Įrengimo sąnaudos	Teritorijos poreikis (plotis)	Eismo saugumas	Įgyvendinimo laikotarpis (sudėtingumas)	Priimtinumas visuomenei	Poveikis aplinkai
Įneštinis silpninimas	dBA	0,375	1	2	3	3	4	7	4
Įrengimo sąnaudos	Eur/m	0,252	0,5	1	4	2	3	6	5

3.9 lentelės pabaiga

	Matavimo vnt.	Reikšmingumas	Garso slėgio lygio sumažėjimas	Įrengimo sąnaudos	Teritorijos poreikis (plotis)	Eismo saugumas	Įgyvendinimo laikotarpis (sudėtingumas)	Priimtinumas visuomenei	Poveikis aplinkai
Teritorijos poreikis (plotis)	m	0,053	0,333	0,25	1	0,167	0,5	0,5	0,5
Eismo saugumas	Įvertinimas balu	0,187	0,333	0,5	6	1	7	7	8
Įgyvendinimo laikotarpis (sudėtingumas)	Įvertinimas balu	0,044	0,25	0,333	2	0,143	1	3	0,2
Priimtinumas visuomenei	Įvertinimas balu	0,04	0,143	0,167	2	0,143	0,333	1	0,333
Poveikis aplinkai	Įvertinimas balu	0,048	0,25	0,2	2	0,125	5	3	1

3.10 lentelė. 5 eksperto (Eks5) apklausos ir reikšmingumo skaičiavimo rezultatai rezultatai

Table 3.10. Expert 5 (Ex5) survey and significance calculation results

	Matavimo vnt.	Reikšmingumas	Garso slėgio lygio sumažėjimas	Įrengimo sąnaudos	Teritorijos poreikis (plotis)	Eismo saugumas	Įgyvendinimo laikotarpis (sudėtingumas)	Priimtinumas visuomenei	Poveikis aplinkai
Įneštinis silpninimas	dBA	0,368	1	2	2	3	3	8	4
Įrengimo sąnaudos	Eur/m	0,253	0,5	1	5	2	3	6	4

3.10 lentelės pabaiga

	Matavimo vnt.	Reikšmingumas	Garso slėgio lygio sumažėjimas	Įrengimo sąnaudos	Teritorijos poreikis (plotis)	Eismo saugumas	Įgyvendinimo laikotarpis (sudėtingumas)	Priimtinumas visuomenei	Poveikis aplinkai
Teritorijos poreikis (plotis)	m	0,038	0,5	0,2	1	0,125	0,333	0,5	0,333
Eismo saugumas	Įvertinimas balu	0,186	0,333	0,5	8	1	7	7	5
Įgyvendinimo laikotarpis (sudėtingumas)	Įvertinimas balu	0,058	0,333	0,333	3	0,143	1	3	3
Priimtinumas visuomenei	Įvertinimas balu	0,041	0,125	0,167	2	0,143	0,333	1	3
Poveikis aplinkai	Įvertinimas balu	0,055	0,25	0,25	3	0,2	0,333	0,333	1

Pagal kiekvieną anketą buvo nustatyti kriterijų rangai. Ekspertų apklausos rezultatai pateikti 3.11 lentelėje.

3.11 lentelė. Ekspertų apklausos rezultatai
Table 3.11. Results of the expert survey

Ekspertas	Efektyvumo rodiklis						
Eks1	1	2	6	3	5	7	4
Eks2	1	2	6	3	5	7	4
Eks3	1	3	5	2	6	7	4
Eks4	1	2	4	3	6	7	5
Eks5	1	2	7	3	4	6	5
Rangų suma	5	11	28	14	26	34	22
Vidutinis rangas	1	2,2	5,6	2,8	5,2	6,8	4,4

Siekiant įvertinti, ar atliko suvestinio vertinimo rezultatai yra patikimi, buvo nustatytas Kendalo konkordancijos koeficientas *W*, kurį apskaičiavus gali nustatyti, ar sutampa ekspertų nuomonės. Tik tuo atveju, kai visų ekspertų vertinimai yra panašūs, kriterijaus svoris yra patikimas (Sivilevičius & Martišius, 2023, Sivilevičius et al., 2024). Kuo mažiau skiriasi ekspertų nuomonės, tuo konkordancijos koeficiento reikšmė yra artimesnė vienetui, ir atvirkščiai, jei ekspertų nuomonės labai skiriasi konkordancijos koeficiento reikšmė yra artimesnė nuliui (Podvezko, 2008).

Pirma paskaičiuojama efektyvumo rodiklio nuokrypio kvadratų suma pagal tokią formulę (Field, 2005):

$$S^2 = \sum_{i=1}^{k}\left(\sum_{j=1}^{m} x_i - \bar{x}\right)^2, \tag{3.3}$$

čia $\bar{x}$ −rangų sumų x_i vidurkis.

Paskaičiavus efektyvumo rodiklio nuokrypio kvadratų sumą buvo gauta 642.

Sutampančių rangų reikšmių nėra, todėl konkordancijos koeficiento reikšmė skaičiuojama pagal tokią formulę (Field, 2005):

$$W = \frac{12 \times SS}{m^2 \times (k^3 - k)}, \tag{3.4}$$

čia m − ekspertų skaičius, *k* efektyvumo rodiklių skaičius.

Paskaičiavus konkordancijos koeficiento *W* reikšmę buvo gauta 0,92. Gauta reikšmė yra artima vienetui, todėl galima teigti, kad ekspertų nuomonės iš esmės sutampa.

Lyginamų rodiklių (objektų) skaičius *k* yra 7, todėl konkordancijos koeficiento reikšmingumas gali būti nustatytas naudojant X^2 kriterijų. Atsitiktinio dydžio vertė paskaičiuojama pagal tokią formulę (Podvezko, 2005):

$$X^2 = W \times m \times (k - 1), \tag{3.5}$$

čia m − ekspertų skaičius, *k* efektyvumo rodiklių skaičius.

Paskaičiavus atsitiktinio dydžio X^2 reikšmę buvo gauta 27,51. Pasirenkamas patikimumo lygmuo α 0,05, iš X^2 lentelės su laisvės laipsniu ν = k – 1, rasta kritinė reikšmė X^2_{kr}, kurios vertė 12,895. Apskaičiuota X^2 vertė yra didesnė už X^2_{kr}, todėl nustatyta, kad ekspertų vertinimai yra suderinti.

Naudojant TOPSIS metodą, yra atsižvelgiama į alternatyvų rinkinį $A = \{A_k \mid k = 1, \ldots, n\}$ ir į kriterijų rinkinį $C = \{C_j \mid j = 1, \ldots, m\}$. Čia $X = \{x_{kj} \mid k = 1, \ldots, n; j = 1, \ldots, m\}$ žymi veiklos įvertinimo rinkinį, o $w = \{w_j \mid j = 1, \ldots, m\}$ yra reikšmingumų rinkinys. Informacinė matrica $I = (A, C, X, W)$ gali būti pateikiama 3.12 lentelėje pavaizduotoje formoje (Tzeng & Huang, 2017).

3.12 lentelė. Informacinė TOPSIS matrica
Table 3.12. The information table of TOPSIS

Kriterijaus žymuo / Alternatyvos	C_1	C_2	...	C_m
A_1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1m}
A_2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2m}
...	...	...	...	...
A_n	x_{n1}	x_{n2}	...	x_{nm}
W	w_1	w_2	...	w_m

Visų pirma turi būti apskaičiuojami normalizuoti įvertinimai (Tzeng & Huang, 2017):

$$r_{kj} = \frac{x_{kj}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{n} x_{kj}^2}}, \tag{3.6}$$

kai $k = 1, \ldots, n$; $j = 1, \ldots, m$.

Buvo sudaryta informacinė TOPSIS matrica (3.13 lentelė), apskaičiuoti normalizuoti įvertinimai (3.14 lentelė) ir sudaryta apskaičiuota normalizuota sprendimų matrica (3.15 lentelė).

3.13 lentelė. Sudaryta informacinė TOPSIS matrica
Table 3.13. Information matrix TOPSIS

Kriterijaus žymuo / Alternatyvos, Nr.	Įneštinis silpninimas	Įrengimo sąnaudos	Teritorijos poreikis (plotis)	Eismo saugumas	Įgyvendinimo laikotarpis	Priimtinumas visuomenei	Poveikis aplinkai
Aukšta triukšmo mažinimo sienutė, Nr. 1	15	1700	0,2	4	4	3	5
Žema triukšmo mažinimo sienutė, Nr. 2	10	1500	0,2	8	8	8	9
Pakeisti pastatų langai, Nr. 3	30	8000	$1*10^{-9}$	9	9	8	8
Pylimas, Nr. 4	15	111	22	7	5	8	9
Želdynų juosta, Nr. 5	5	1333	30	7	5	9	9
Bėgių šlifavimas, Nr. 6	3	10,32	$1*10^{-9}$	9	7	9	7

3.13 lentelės pabaiga

Kriterijaus žymuo / Alternatyvos, Nr.	Įneštinis silpninimas	Įrengimo sąnaudos	Teritorijos poreikis (plotis)	Eismo saugumas	Įgyvendinimo laikotarpis	Priimtinumas visuomenei	Poveikis aplinkai
Sandūrinis kelias, Nr. 7	10	463	$1*10^{-9}$	9	5	9	9
$\sum$	88,0	13117,32	52,40	53,0	43,0	54,0	56,0
w	0,032	0,017	0,010	0,586	0,473	0,464	1,141

3.14 lentelė. Apskaičiuotų normalizuotų įvertinimų vertės
Table 3.14 Values of the calculated normalised estimates

Apskaičiuotų normalizuotų įvertinimų vertės													
r_{11}	0,377	r_{12}	0,109	r_{13}	0,003	r_{14}	0,071	r_{15}	0,087	r_{16}	0,052	r_{17}	0,084
r_{21}	0,251	r_{22}	0,096	r_{23}	0,003	r_{24}	0,143	r_{25}	0,174	r_{26}	0,140	r_{27}	0,152
r_{31}	0,754	r_{32}	0,513	r_{33}	0,000	r_{34}	0,160	r_{35}	0,196	r_{36}	0,140	r_{37}	0,135
r_{41}	0,377	r_{42}	0,007	r_{43}	0,342	r_{44}	0,125	r_{45}	0,109	r_{46}	0,140	r_{47}	0,152
r_{51}	0,126	r_{52}	0,086	r_{53}	0,467	r_{54}	0,125	r_{55}	0,109	r_{56}	0,157	r_{57}	0,152
r_{61}	0,075	r_{62}	0,001	r_{63}	0,000	r_{64}	0,160	r_{65}	0,152	r_{66}	0,157	r_{67}	0,000
r_{71}	0,251	r_{72}	0,030	r_{73}	0,000	r_{74}	0,160	r_{75}	0,109	r_{76}	0,157	r_{77}	0,152
r_{kj} normalizuoti įvertinimai													

3.15 lentelė. Apskaičiuota normalizuota sprendimų matrica
Table 3.15. Calculated normalised decision matrix

$\bar{r}$ =	0,377	0,109	0,003	0,071	0,087	0,052	0,084
	0,251	0,096	0,003	0,143	0,174	0,140	0,152
	0,754	0,513	0,000	0,160	0,196	0,140	0,135
	0,377	0,007	0,342	0,125	0,109	0,140	0,152
	0,126	0,086	0,467	0,125	0,109	0,157	0,152
	0,075	0,001	0,000	0,160	0,152	0,157	0,000
	0,251	0,030	0,000	0,160	0,109	0,157	0,152

Tada turi būti apskaičiuojami svertiniai normalizuoti įvertinimai (Tzeng & Huang, 2017):

$$v_{kj}(x) = w_j r_{kj}(x), \tag{3.7}$$

kai $k = 1, \ldots, n$; $j = 1, \ldots, m$.

Apskaičiuotų svertinių normalizuotų įvertinimų vertės pateiktos 3.16 lentelėje, o svertinė normalizuota matrica – 3.17 lentelėje.

Apskaičiavus svertinius normalizuotus įvertinimus yra nustatomas teigiamas idealus taškas (variantas) *TIT* ir neigiamas idealus taškas (variantas) *NIT* (Tzeng & Huang, 2017):

$$TIT = A^+ = \left\{v_1^+(x), v_2^+(x), \ldots, v_j^+(x), \ldots, v_m^+(x)\right\} = \left\{\left(max_k v_{kj}(x) | \text{ j} \in J_1\right), \left(min_k v_{kj} | \text{ j} \in J_2\right) | \text{ k} = 1, \ldots, \text{n}\right\}, \tag{3.8}$$

$$NIT = A^- = \left\{v_1^-(x), v_2^-(x), \ldots, v_j^-(x), \ldots, v_m^-(x)\right\} = \left\{\left(min_k v_{kj}(x) | \text{ j} \in J_1\right), \left(max_k v_{kj} | \text{ j} \in J_2\right) | \text{ k} = 1, \ldots, \text{n}\right\}, \tag{3.9}$$

čia J_1 ir J_2 atitinkamai naudos ir sąnaudų atributai.

Nustatytų teigiamo idealaus taško (varianto) TIT ir neigiamo idealaus taško (varianto) NIT vertės pateiktos 3.18 lentelėje.

3.16 lentelė. Apskaičiuotų svertinių normalizuotų įvertinimų vertės
Table 3.16. Values of calculated weighted normalised estimates

Apskaičiuotų svertinių normalizuotų įvertinimų vertės													
v_{12}	0,012	v_{12}	0,002	v_{13}	0,000	v_{14}	0,042	v_{15}	0,041	v_{16}	0,024	v_{17}	0,096
v_{21}	0,008	v_{22}	0,002	v_{23}	0,000	v_{24}	0,084	v_{25}	0,082	v_{26}	0,065	v_{27}	0,173
v_{31}	0,024	v_{32}	0,009	v_{33}	0,000	v_{34}	0,094	v_{35}	0,093	v_{36}	0,065	v_{37}	0,154
v_{41}	0,012	v_{42}	0,000	v_{43}	0,003	v_{44}	0,073	v_{45}	0,051	v_{46}	0,065	v_{47}	0,173
v_{51}	0,004	v_{52}	0,001	v_{53}	0,005	v_{54}	0,073	v_{55}	0,051	v_{56}	0,073	v_{57}	0,173
v_{61}	0,002	v_{62}	0,000	v_{63}	0,000	v_{64}	0,094	v_{65}	0,072	v_{66}	0,073	v_{67}	0,000
v_{71}	0,008	v_{72}	0,000	v_{73}	0,000	v_{74}	0,094	v_{75}	0,051	v_{76}	0,073	v_{77}	0,173
$v_{kj}(x)$ svertinis normalizuotas įvertinimas													

3.17 lentelė. Apskaičiuota svertinė normalizuota matrica
Table 3.17. Weighted calculated normalised matrix

$\overline{v}^*=$	0,012	0,002	0,000	0,042	0,041	0,024	0,096
	0,008	0,002	0,000	0,084	0,082	0,065	0,173
	0,024	0,009	0,000	0,094	0,093	0,065	0,154

3.17 lentelės pabaiga

$\overline{v}^*$=	0,012	0,000	0,003	0,073	0,051	0,065	0,173
	0,004	0,001	0,005	0,073	0,051	0,073	0,173
	0,002	0,000	0,000	0,094	0,072	0,073	0,000
	0,008	0,000	0,000	0,094	0,051	0,073	0,173
	max	min	min	max	max	max	max

3.18 lentelė. Nustatytų teigiamo idealaus taško (varianto) TIT ir neigiamo idealaus taško (varianto) NIT vertės
Table 3.18. Determined values of positive ideal point (variant) TIT and negative ideal point (variant) NIT

Nustatytų teigiamo idealaus taško (varianto) TIT ir neigiamo idealaus taško (varianto) NIT vertės							
$TIT = A^+$	0,024	0,000	0,000	0,094	0,093	0,073	0,173
$NIT = A^-$	0,002	0,009	0,005	0,042	0,041	0,024	0,000

Toliau yra aspkaičiuojami atstumai nuo kiekvienos alternatyvos iki TIT (idealios alternatyvos) ir NIT (negatyviai idealios alternatyvos). Atstumo vertės gali būti apskaičiuojamos naudojant Euklido (angl. *Euclidean*) atstumą (Tzeng & Huang, 2017):

$$D_k^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{m}\left[v_{kj}(x) - v_j^+(x)\right]^2}, \tag{3.10}$$

kai $k = 1, \ldots, n$, ir

$$D_k^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{m}\left[v_{kj}(x) - v_j^-(x)\right]^2}, \tag{3.11}$$

kai $k = 1, \ldots, n$.

Apskaičiuoti atstumai nuo kiekvienos alternatyvos iki TIT (idealios alternatyvos) ir NIT (negatyviai idealios alternatyvos) yra pateikti 3.19 lentelėje.

3.19 lentelė. Atstumai nuo kiekvienos alternatyvos iki TIT (idealios alternatyvos) ir NIT (negatyviai idealios alternatyvos)
Table 3.19. Distances from each alternative to TIT (ideal alternative) and NIT (negatively ideal alternative)

Triukšmo mažinimo priemonė	D^+	D^-
Aukšta triukšmo mažinimo sienutė	0,118	0,097

3.19 lentelės pabaiga

Žema triukšmo mažinimo sienutė	0,023	0,189
Pakeisti pastatų langai	0,023	0,178
Pylimas	0,048	0,182
Želdynų juosta	0,051	0,184
Nušlifuoti bėgiai	0,177	0,079
Sandūrinis kelias	0,044	0,189

Panašumai su TIT (variantų racionalumo reikšmės) gali būti apskaičiuojami (Tzeng & Huang, 2017):

$$C_k^* = \frac{D_k^-}{(D_k^* + D_k^-)} \ , \tag{3.12}$$

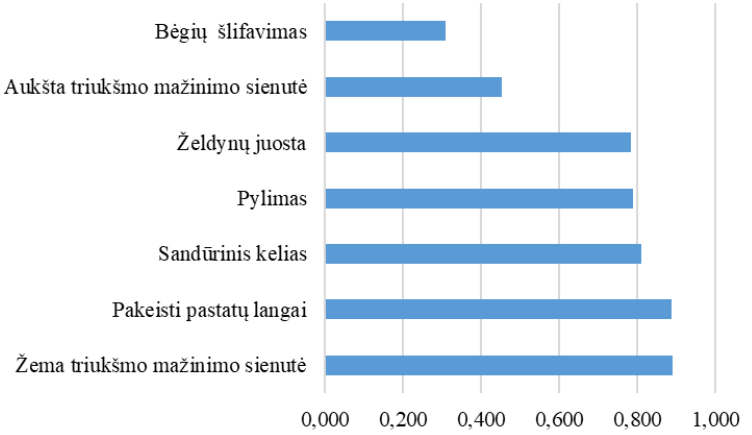
čia $C_k^* \in [0,1]\ \forall k = 1, \ldots, n$, kai $k = 1, \ldots, n$.

Geriausia alternatyva gaunama pasirenkant pagal panašumą į TIT (C_k^*), išdėstantant mažėjančia tvarka.

Atlikus skaičiavimus TOPSIS metodu, buvo nustatytas triukšmo mažinimo priemonių racionalumo koeficientas, nusakantis taikytinos triukšmo mažinimo priemonės veiksmingumą konkrečiomis vietos sąlygomis, kuris pateiktas 3.20 lentelėje mažėjančia tvarka ir 3.1. pav.

3.20 lentelė. Triukšmo mažinimo priemonių (alternatyvų) racionalumo koeficientai mažėjančia tvarka
Table 3.20. Coefficients of the rationality of noise reduction measures (alternatives)

	Triukšmo mažinimo priemonė	Racionalumo koeficientai
C2	Žema triukšmo mažinimo sienutė	0,890
C3	Pakeisti pastatų langai	0,887
C7	Sandūrinis kelias	0,809
C4	Pylimas	0,789
C5	Želdynų juosta	0,783
C1	Aukšta triukšmo mažinimo sienutė	0,452
C6	Bėgių šlifavimas	0,308



3.1 pav. Triukšmo mažinimo priemonių (alternatyvų) racionalumo koeficientai
Fig. 3.1. Coefficients of the rationality of noise reduction measures (alternatives)

Atlikus 7 skirtingų triukšmo mažinimo priemonių (alternatyvų) analizę TOPSIS metodu, nustatyta, kad racionaliausia (geriausia) alternatyva yra žema triukšmo mažinimo sienutė, o mažiausiai racionali bėgių šlifavimas. Iš rezultatų taip pat matyti, kad langų keitimas bei sandūrinis kelias yra svarstytinos alternatyvos, įvertinus vietos sąlygas, pavyzdžiui, langai gali būti keistini, jei patys pastatai yra geros būklės, o jų fasadai ir kiti elementai yra gerų garso izoliacinių savybių.

3.2. Įneštinio silpninimo verčių nustatymo lauko sąlygomis netiesioginiu metodu rezultatai

Šio etapo tikslas nustatyti aukštos triukšmo mažinimo sienutės įneštinį silpninimą, esant dvejoms triukšmo šaltinio (garsiakalbio) padėtims, t. y. nurodytoje techninėse specifikacijose CEN/TS 16272-7:2015 (Lietuvos standartizacijos de-partamentas, 2015) 0,5 m aukštyje virš bėgio galvutės lygio, kai garsiakalbio skleidžiamas triukšmas imituoja traukinio skleidžiamą triukšmą, ir bėgio galvutės lygyje, kai garsiakalbio skleidžiamas triukšmas imituoja rato ir bėgio sąveikoje kylantį triukšmą. Eksperimentinio tyrimo, kurio metu buvo nustatytas garso slėgio lygis esant triukšmo mažinimo sienutei atskaitos ir imtuvo padėtyse, rezultatai yra pateikti 3.21–3.23 lentelėse bei 3.2–3.5 pav.

Eksperimento metu visų matavimų metu vėjo greitis buvo 0,4 m/s, oro temperatūra 17 °C, t. y. tenkino techninių specifikacijų CEN/TS 16272-7:2015 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2015) reikalavimus.

Nustatyta, kad tirta triukšmo mažinimo sienutė traukinių skleidžiamą triukšmą mažina, ypač esant aukštesniems dažniams kai garsiakalbis pastatytas 0,50 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio bei mikrofonas 3,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio, didžiausias įneštinis silpninimas nustatytas prie 2500 Hz dažnio 25,1 dB, o kai mikrofonas pastatytas 5,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio, didžiausias įneštinis silpninimas nustatytas prie 3150 Hz dažnio 26,0 dB. Pastebėta, kad tirta triukšmo mažinimo sienutė mažiau veiksmingai mažina žemų dažnių triukšmą, ypač prie 80 Hz (esant mikrofono aukščiui 3,5 m 0,9 dB ir esant mikrofono aukščiui 5,5 m 1,7 dB). Tikėtina, kad tad didžiausią įtaką padarė sienutės konstruktyvas ir medžiagiškumas. T. y. sienutė yra sandari, todėl veiksmingai slopina aukštų dažnių triukšmą, kuris sklinda per plyšius, bet netinkamai parinkta sienutės medžiaga daro įtaką žemų dažnių triukšmo praleidimui. Nustatyta, kad tirta sienutė veiksmingai mažina riedėjimo triukšmo, kurio tipinis dažnių diapazonas nuo 100 iki 5000 Hz, lygį, t. y. nustatytas įneštinis silpninimas yra 7,2–25,1 dB, kai mikrofonas pastatytas 3,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio, ir 6,3–26,0 dBA, kai mikrofonas pastatytas 5,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio. Kai dažnis buvo ≥ 250 Hz, abiejų mikrofono padėčių atvejais nustatytas įneštinis silpninimas ne mažesnis kaip 10,0 dB. Nustatyta, kad mikrofonui esant žemesnėje padėtyje, t. y. 3,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio, daugeliu atvejų įneštinis silpninimas yra didesnis nei 5,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio.

3.21 lentelė. Nustatyti garso slėgio lygiai L_i (dB) atskaitos mikrofono vietoje
Table 3.21. Sound pressure level L_i (dB) at the reference position

Matavimai su triukšmo mažinimo sienute					Matavimai be triukšmo mažinimo sienutės					Foninio triukšmo lygis, dB
Dažnis, Hz	Mikrofono padėtis				Dažnis, Hz	Mikrofono padėtis				
	3,5 m	5,85 m	3,5 m	5,85 m		3,5 m	5,85 m	3,5 m	5,85 m	
	Garsiakalbio padėtis					Garsiakalbio padėtis				
	0,5 m aukštyje virš bėgio galvutės lygio		Bėgio galvutės lygyje			0,5 m aukštyje virš bėgio galvutės lygio		Bėgio galvutės lygyje		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
50	60,2	62,6	62,3	62,3	50	60,3	60,4	58,2	58,8	38,4
63	66,1	67,6	69,1	69,2	63	67,9	68	64,8	65,3	41
80	67,8	69,2	74,4	74,4	80	73,6	73,7	67,2	67,5	42,2
100	76,2	76,4	74	74	100	75,8	75,8	73,6	74	41,9
125	81,4	82,2	81,4	81,5	125	80,1	80,1	81,6	81,8	32,1
160	77,8	78	85	85	160	85,4	85,4	77,6	77,9	29,7

3.21 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
200	84,5	84,9	84,5	84,5	200	84,5	84,5	85	85,1	36,5
250	85,8	86,7	78,5	78,4	250	75,9	75,7	85,7	85,4	26,6
315	80,1	82,1	77,8	77,7	315	71,3	71,4	76,6	76,3	34,7
400	78,1	80,2	76,7	76,7	400	75,6	75,6	80,2	79,3	37,5
500	80,6	83,2	78,5	78,5	500	76,9	76,9	76,9	77,4	26,8
630	78	79,5	78,3	78,2	630	80,1	80,1	76,3	78,4	35,5
800	79,4	82,2	80,3	80,2	800	76,6	76,6	76,1	76,5	32,4
1000	79,5	82,1	77,3	77,2	1000	73,5	73,5	74,6	74	33
1250	77,6	80,3	76,6	76,4	1250	77,4	77,3	76,3	75,6	31,6
1600	80,5	81,3	80,2	80,1	1600	78,2	78,2	76,8	76,5	30,6
2000	84,2	81,9	82,4	82,3	2000	80,9	80,8	77,5	76,7	30,7
2500	83,3	81,1	80,6	80,4	2500	78,7	78,7	77,7	76,4	30,1
3150	83,1	81,2	79,2	78,8	3150	77,7	77,4	77,7	75,9	30,2
4000	84,4	86	80,2	80	4000	84,6	84,7	81,9	79,2	30,4
5000	74	80,8	75,8	75,8	5000	81,3	81,3	78,1	77,9	30,9
A (svertinis dažnis)	92,8	93,4	90,6	90,6	A (svertinis dažnis)	90,9	90,8	89,3	88,4	43,8

3.22 lentelė. Nustatyti garso slėgio lygiai L_i (dB) imtuvo mikrofono vietoje
Table 3.22. Sound pressure level L_i (dB) at the receiver position

Matavimai su triukšmo mažinimo sienute					Matavimai be triukšmo mažinimo sienutės					Foninio triukšmo lygis, dB
Dažnis, Hz	Mikrofono padėtis				Dažnis, Hz	Mikrofono padėtis				
	3,5 m	5,5 m	3,5 m	5,5 m		3,5 m	5,5 m	3,5 m	5,5 m	
	Garsiakalbio padėtis					Garsiakalbio padėtis				
	0,5 m aukštyje virš bėgio galvutės lygio		Bėgio galvutės lygyje			0,5 m aukštyje virš bėgio galvutės lygio		Bėgio galvutės lygyje		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
50	49	53,7	49,7	50,8	50	52,9	53,4	51,1	51,3	37
63	55,3	57,3	55,9	57,4	63	64,2	64,2	63,5	63,5	36,8
80	58,7	60	60,9	62,1	80	65,4	66,2	62,6	63,1	34,3
100	60,3	64	61	63,1	100	70	71,5	69,1	70,5	47
125	66,3	67,4	65,5	65,1	125	75,6	75	74,5	70,3	33,7

3.22 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
160	61,8	62,9	66,4	70,2	160	78,3	77	69,9	70,6	29
200	62,1	66,6	64	68,1	200	69,3	72,5	71,8	74,1	39,5
250	65,1	67,6	51,6	62,3	250	68,7	69,1	70,7	74,7	27,9
315	60,5	64,7	55,1	59,3	315	66,8	67,6	68,6	71,4	36,2
400	55,3	59,8	51,7	54,5	400	68,2	70	72,4	72,1	38,7
500	52	59,1	52,5	54,5	500	62,7	65,9	68	66,9	27,2
630	50,1	56,3	50	52,7	630	66,8	70,6	64	67,1	36,3
800	50,6	55,1	50,4	52,8	800	63,7	68,6	63,8	66,1	33,1
1000	48,7	54,7	48,6	50,8	1000	62,4	64,6	62,2	63,5	33,9
1250	46,8	53,3	45,3	46,7	1250	65,3	66,8	63,9	64	33,4
1600	50,9	50,6	46,3	49,7	1600	70,8	68,2	63,4	66,2	33
2000	54,5	45,5	49,2	50,2	2000	73,7	68,9	68,1	67,1	33,7
2500	51,5	48,2	47,4	50,8	2500	72	70,3	68,7	68,9	34
3150	49,8	47	47,9	49,5	3150	67,8	69,2	69,9	69,1	34,6
4000	48,5	52,1	45,2	47,9	4000	69,3	71	72,4	69,4	35,3
5000	42,7	45,9	40	42,3	5000	66,4	64,9	64,3	64,5	32
A (svertinis dažnis)	63,9	66,5	61,4	64,8	A (svertinis dažnis)	80,5	79,9	79,1	78,9	45,2

3.23 lentelė. Lauko sąlygomis nustatytas aukštos triukšmo mažinimo sienutės įneštinis silpninimas
Table 3.23. Insertion loss of the investigated high noise barrier was determined by measuring in-field conditions

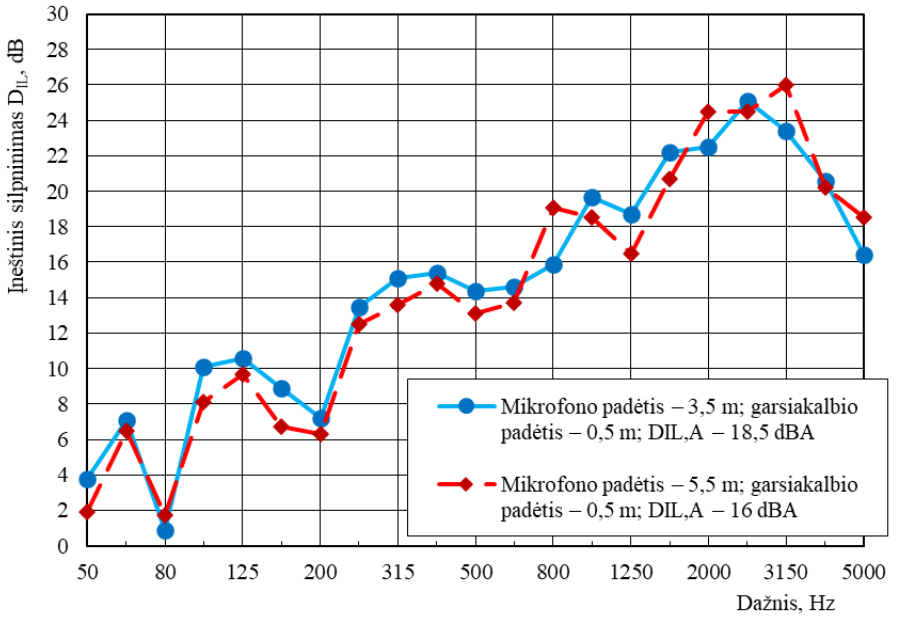
Mikrofono padėtis, m	3,5	3,5	5,5	5,5	Dažnis, Hz
Garsiakalbio padėtis, m	0,5	0	0,5	0	
Įneštinis silpninimas, D_{IL}, dB	3,8	5,5	1,9	4	50
	7,1	11,9	6,5	10	63
	0,9	8,9	1,7	7,9	80
	10,1	8,5	8,1	7,4	100
	10,6	8,8	9,7	4,9	125
	8,9	10,9	6,7	7,5	160
	7,2	7,3	6,3	5,4	200
	13,5	11,9	12,5	5,4	250
	15,1	14,7	13,6	13,5	315
	15,4	17,2	14,8	15	400

3.23 lentelės pabaiga

Įneštinis silpninimas, D_{IL}, dB	14,4	17,1	13,1	13,5	500
	14,6	16	13,7	14,2	630
	15,9	17,6	19,1	17	800
	19,7	16,3	18,5	15,9	1000
	18,7	18,9	16,5	18,1	1250
	22,2	20,5	20,7	20,1	1600
	22,5	23,8	24,5	22,5	2000
	25,1	24,2	24,5	22,1	2500
	23,4	23,5	26	22,5	3150
	20,6	25,5	20,2	22,3	4000
	16,4	22	18,5	20,1	5000
$D_{IL,A}$ dBA	18,5	19,0	16,0	16,3	

Tai susiję su garso sklidimo keliu, t. y. garsas nuo triukšmo mažinimo sienutės difraguoja, kai jo banga, einanti pro sienutės viršutinį kraštą, užlinksta ir patenka į triukšmo šešėlį. Kuo toliau nuo triukšmo šaltinio sienutės viršus, tuo labiau sumažėja sklindantis triukšmas. Tik esant aukštiems dažniams (≥ 2000 Hz) įneštinis silpninimas yra didesnis mikrofonui esant aukštesnėje padėtyje, t. y. 5,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio. Tai pastebėjo ir kiti tyrėjai, pavyzdžiui, Piechowicz (2011) – kad garso difrakcijos poveikis labai priklauso nuo garso bangos ilgio santykio su kliūties (sienutės) aukščiu; Piechowicz (2015) – kad difrakcijos reiškiniui labiau imlus žemų dažnių garsas, t. y. aukšto dažnio garsas labiau linkęs sklisti virš sienutės, nepatekdamas į triukšmo šešėlį.

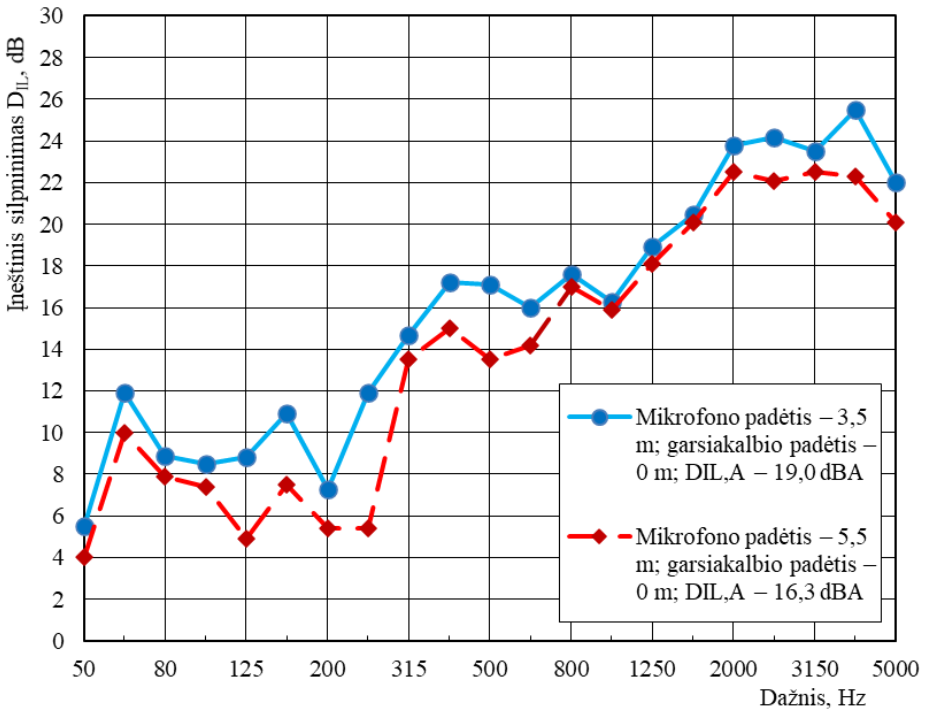
Nustatyta, kad tuo atveju, kai garsiakalbis pastatytas bėgių galvutės lygyje analogiškai, kaip ir garsiakalbiui esant 0,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio, tirta triukšmo mažinimo sienutė traukinių skleidžiamą triukšmą sumažino, ypač esant aukštesniems dažniams kai mikrofonas pastatytas 3,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio, didžiausias įneštinis silpninimas nustatytas prie 4000 Hz dažnio 25,5 dB. Kai mikrofonas pastatytas 5,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio, didžiausias įneštinis silpninimas nustatytas prie 200 Hz ir 3150 Hz dažnių 22,5 dB. Pastebėta, kad tirta triukšmo mažinimo sienutė mažiau veiksmingai mažina triukšmą esant žemų dažnių triukšmui, ypač prie 125 Hz (esant mikrofono aukščiui 3,5 m 8,8 dB ir esant mikrofono aukščiui 5,5 m 4,9 dB) ir 200 Hz (esant mikrofono aukščiui 3,5 m 7,3 dB ir esant mikrofono aukščiui 5,5 m 5,4 dB).



3.2 pav. Matavimų, kai garsiakalbis pastatytas 0,50 m virš bėgių galvutės lygio, rezultatai

Fig. 3.2. Results of measurements when the speaker is placed 0.50 m above the level of the rail head

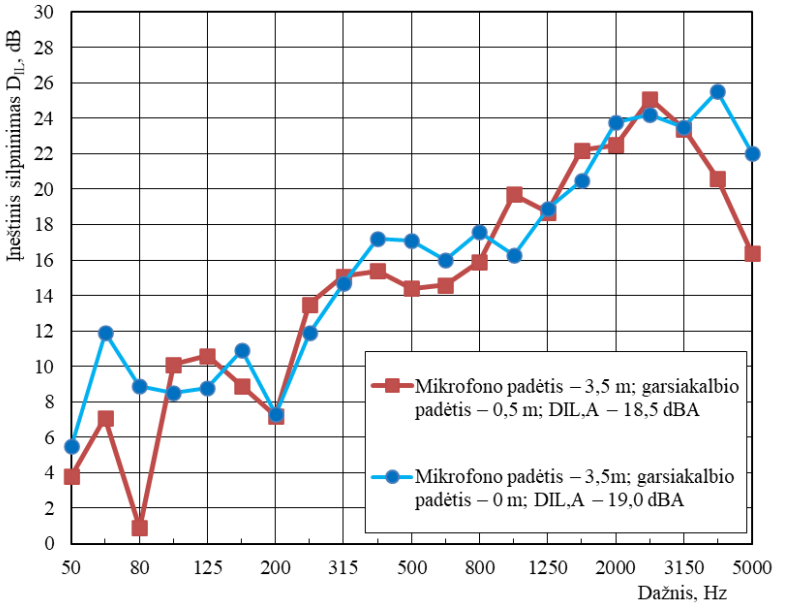
Pastebėta, kad tirta sienutė veiksmingai mažina riedėjimo triukšmo (tipinis dažnių diapazonas nuo 100 iki 5000 Hz), lygį, t. y. nustatyto įneštinio silpninimo lygis yra 7,3–25,5 dB, kai mikrofonas pastatytas 3,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio, ir 4,9–22,5 dBA, kai mikrofonas pastatytas 5,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio. Kai dažnis buvo ≥ 315 Hz, abiejų mikrofono padėčių atvejais buvo nustatytas įneštinis silpninimas ne mažesnis kaip 10,0 dB. Nustatyta, kad mikrofonui esant žemesnėje padėtyje, t. y. 3,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio, įneštinis silpninimas yra didesnis nei esant 5,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio. Kuo toliau nuo triukšmo šaltinio sienutės viršus, tuo labiau sumažėja sklindantis triukšmas. Taigi, garsiakalbiui esant bėgių galvutės viršaus lygyje, nustatyta, kad imtuvui esant žemiau, pasiekiamas didesnis triukšmo slopinimas, t. y. įneštinis silpninimas net ir esant aukštiems dažniams.



3.3 pav. Matavimų, kai garsiakalbis pastatytas bėgių galvutės lygyje, rezultatai
Fig. 3.3. Results of measurements when the loudspeaker is placed at the level of the rail head

Pastebėta, kad kai mikrofonas pastatytas 3,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio, įneštinio silpninimo dydis esant skirtingoms garsiakalbio padėtims (0,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio ir bėgių galvutės lygyje) varijuoja priklausomai nuo dažnio. Iš visos matavimų imties 14 kartų buvo nustatytas didesnis įneštinis silpninimas esant garsiakalbių bėgių galvutės lygyje, ir 7 kartus 0,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio. Esant žemiausiems dažniams, t. y. nuo 50 Hz iki 80 Hz didesnis įneštinis silpninimas nustatytas esant garsiakalbiui bėgių galvutės lygyje (prie 50 Hz 44,74 % didesnis įneštinis silpninimas, prie 63 Hz 67,61 % didesnis įneštinis silpninimas, prie 80 Hz beveik 10 kartų didesnis įneštinis silpninimas). Analogiškai, buvo nustatyta ir esant aukščiausiems dažniams, t. y. nuo 3150 Hz iki 5000 Hz (prie 3150 Hz 0,42 % didesnis įneštinis silpninimas, prie 4000 Hz 23,79 % didesnis įneštinis silpninimas, prie 5000 Hz 34,15 % didesnis įneštinis silpninimas). Didesnis įneštinis silpninimas esant garsiakalbiui 0,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio nustatytas prie dažnio, kurio vertės 100 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 315 Hz, 1000 Hz, 1600 Hz ir 2500 Hz (atitinkamai 18,82 %, 20,45 %,

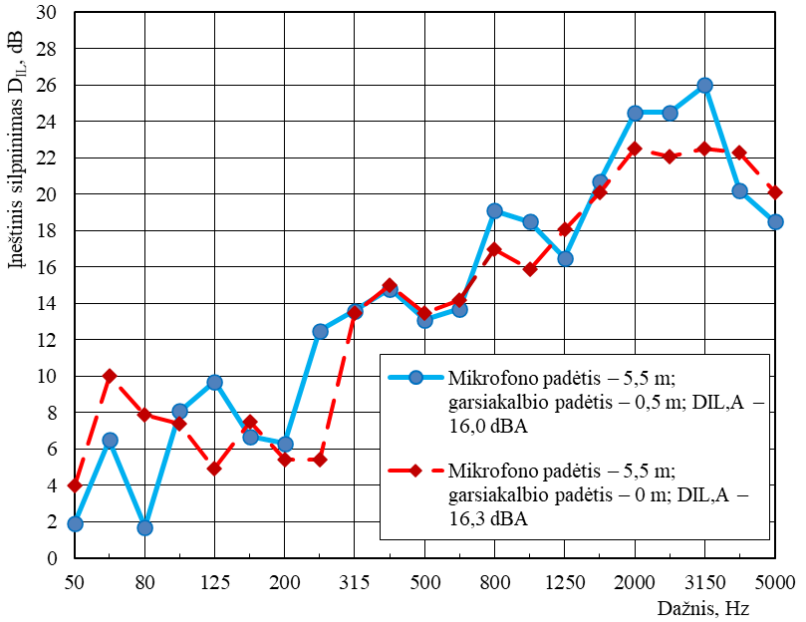
13,45 %, 2,72 %, 20,86 %, 8,29 % ir 3,72 % didesnis įneštinis silpninimas). Pastebėta, kad priklausomai nuo garsiakalbio padėties nedaug kito įneštinio silpninimo nustatytos vertės prie 200 Hz, 1250 Hz ir 3150 Hz skirtumas ne didesnis nei 2,0 %.



3.4 pav. Matavimų, kai mikrofonas yra 3,5 m virš bėgių galvutės lygio, rezultatai
Fig. 3.4. Results of measurements when the microphone is 3.5 m above the level of the rail head

Pastebėta, kad kai mikrofonas pastatytas 5,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio, įneštinio silpninimo dydis esant skirtingoms garsiakalbio padėtims (0,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio ir bėgių galvutės lygyje) varijuoja priklausomai nuo dažnio. Iš visos matavimų imties 10 kartų buvo nustatytas didesnis įneštinis silpninimas esant garsiakalbių bėgių galvutės lygyje, ir 11 kartų 0,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio. Esant žemiausiems dažniams, t. y. nuo 50 Hz iki 80 Hz didesnis įneštinis silpninimas nustatytas esant garsiakalbiui bėgių galvutės lygyje (prie 50 Hz daugiau nei 2 kartus didesnis įneštinis silpninimas, prie 63 Hz 53,85 % didesnis įneštinis silpninimas, prie 80 Hz daugiau nei 4 kartus didesnis įneštinis silpninimas). Analogiškai, buvo nustatyta ir esant aukščiausiems dažniams, t. y. nuo 4000 Hz iki 5000 Hz (prie 4000 Hz 10,40 % didesnis įneštinis silpninimas, prie 5000 Hz 8,65 % didesnis įneštinis silpninimas). Didesnis įneštinis silpninimas esant garsiakalbiui 0,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio nustatytas prie dažnio, kurio vertės 100 Hz, 125 Hz, 200 Hz, 250 Hz, 315 Hz, 800 Hz,

1000 Hz, 1600 Hz, 2000 Hz, 2500 Hz ir 3150 Hz (atitinkamai 9,46 %, 97,96 %, 16,67 %, 131,48 %, 0,74 %, 12,35 %, 16,35 %, 2,99 %, 8,89 %, 10,86 % ir 15,56 % didesnis įneštinis silpninimas). Pastebėta, kad priklausomai nuo garsiakalbio padėties nedaug kito įneštinio silpninimo nustatytos vertės prie 315 Hz ir 400 Hz skirtumas ne didesnis nei 2,0 %.



3.5 pav. Matavimų, kai mikrofonas yra 5,5 m virš bėgių galvutės lygio, rezultatai
Fig. 3.5. Results of measurements when the microphone is 5.5 m above the level of the rail head

Eksperimentinio tyrimo lauko sąlygomis (natūrinių tyrimų) rezultatai panaudoti patikrinant skaitiniu modeliavimu sukurtą triukšmo modelį.

3.3. Skirtingo aukščio triukšmo sienučių palyginimas skaitiniu modeliavimu

Skaitinis riedmenų skleidžiamo triukšmo ir skirtingo aukščio triukšmo sienučių triukšmo modeliavimas buvo atliktas CadnaA paketo programa, skirta pramoniniam, kelių ir geležinkelių triukšmui, įvertinanti vietovės reljefą ir vietovės triukšmo absorbcines savybes, pastatų aukštį, meteorologines sąlygas. Geležinkelių transporto triukšmui skaičiuoti naudota CNOSSOS-EU metodika.

Siekiant sumodeliuoti triukšmo mažinimo sienutes, buvo sukurtas triukšmo modelis (esama situacija be triukšmo mažinimo sienutės ir su 3,5 m aukščio triukšmo mažinimo sienute), kuris patikrintas pagal natūrinius geležinkelio triukšmo matavimų prie dvikelio geležinkelių bėgių kelio Kyviškės–Valčiūnai rezultatus. Natūrinių matavimų metu vietoje, kurioje nėra triukšmo mažinimo sienutės, buvo matuotas triukšmo lygis 4 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio. Nustatytas garso slėgio – 85,1–86,7 dBA. Riedmenų, kurių garso slėgio lygiai buvo matuoti, duomenys bei matavimų rezultatai pateikti 3.24–3.25 lentelėse.

Remiantis riedmenų eismo grafiku, buvo sukurtas modelis, atsižvelgiant į vidutinį faktinį riedmenų su vagonais skaičių geležinkelių bėgių kelyje Kyviškės–Valčiūnai. Nakties laikotarpiu ruožu pravažiuoja 37 riedmenys, vidutinis vagonų skaičius sąstate – 61 vnt. Ruože riedmenys važiuoja 80 km/h greičiu.

Sukurto triukšmo modelio vidutinis triukšmo lygis yra 85,1 dBA, todėl teigtina, kad modelis sukurtas tinkamai ir atitinka natūrinių triukšmo matavimų rezultatus.

Atlikti triukšmo lygio skaičiavimai 7,5 m ir 45 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies. 7,5 m atstumas pasirinktas tam, kad nustatyti, koks triukšmo lygis iš karto už sienutės, kur yra akustinio šešėlio zona ir kur didžiausias aukštos triukšmo mažinimo sienutės įneštinis silpninimas. 45 m atstumas pasirinktas tam, kad nustatyti, koks triukšmo lygis yra didesniu atstumu, kur jau nėra sienutės akustinio šešėlio, bei kur yra pastatų, kurių aplinkoje neturi būti viršijamas ribinis triukšmo dydis, sklypo riba.

Skaičiavimai buvo atlikti skirtinguose aukščiuose nuo geležinkelių bėgio viršaus (1,5 m, 3,5 m ir 5,5 m) tam, kad nustatyti, kaip triukšmo lygiai keičiasi aukščiui kintant. Programoje CadnaA nėra galimybės pasirinkti sienutės medžiagiškumo, tačiau galima nurodyti, koks turi būti modeliuojamas triukšmo mažinimo sienutės garso sugerties koeficientas DL_α, kuriuo yra išreiškiamas medžiagos gebėjimas sugerti garsą. Įvertinus tai, kad kitoje geležinkelių bėgių kelio Kyviškės–Valčiūnai pusėje nei modeliuojama triukšmo mažinimo sienutė nėra gyvenamųjų ar visuomeninės paskirties pastatų, ir nėra poreikio jas apsaugoti nuo atsispindėjusio triukšmo neigiamo poveikio, visų modeliuojamų sienučių atveju buvo pasirinktas vienodas garso sugerties koeficientas DL_α 4 dBA, t. y. pagal T TU 15 (Lietuvos automobilių kelių direkcija, 2015) A0 garso sugerties kategorijos, t. y. modeliuotos garso nesugeriančios triukšmo mažinimo sienutės.

Principinė skaičiavimo schema pavaizduota 3.7 pav. Schemoje pavaizduotas imtuvas (mikrofonas) žymi triukšmo lygio skaičiavimo aukštį nuo bėgio viršaus.

3.24 lentelė. Riedmenų, kurių garso slėgio lygis buvo matuotas, duomenys
Table 3.24. Data of rolling stock noise levels of which were measured

Matavimo Nr.	Vėjo greitis, m/s	Oro temperatūra, °C	Traukinio Nr.	Sutartinis traukinio ilgis, m	Traukinio masė (bruto), t	Vagonų skaičius	Šilumvežio serija	Iš viso ašių
1	0,4	17	**2306**	64	1611	61	2M62M	4 ašių-61
2	0,4	17	**2311**	71	1636	39	2M62M	4 ašių-39
3	0,4	17	**2615**	63	5906	63	2M62M	4 ašių-63
4	0,4	17	**2308**	60	3752	60	2M62M	4 ašių-60

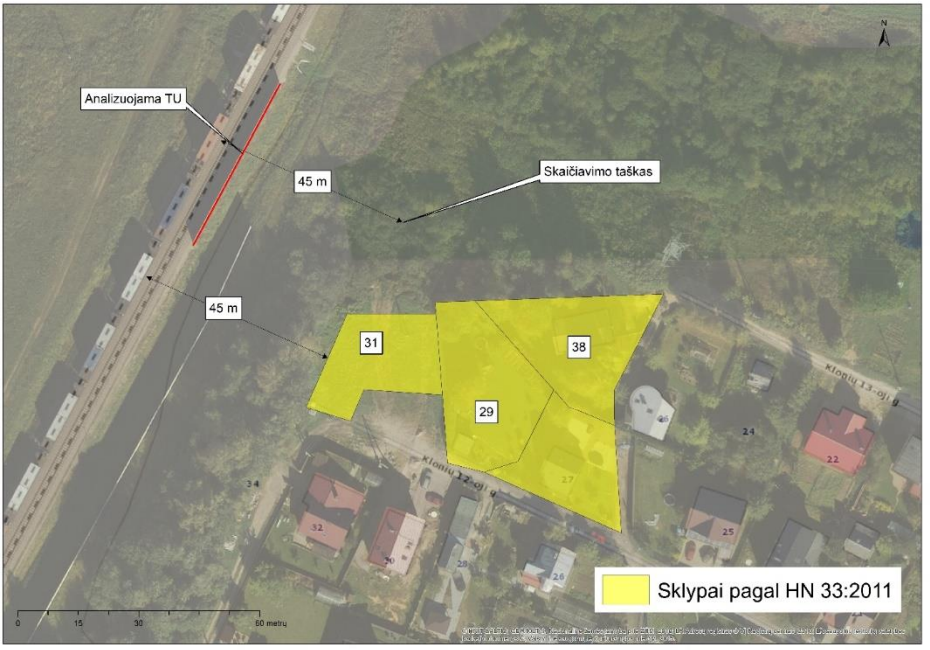
3.25 lentelė. Riedmenų skleidžiamo garso slėgio lygis, nustatytas 4 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio
Table 3.25. Sound pressure level emitted by the rolling stock, which was determined at a distance of 4 m from the railway track

Dažnis, Hz	Garso slėgio lygis, dB			
	1 traukinys	2 traukinys	3 traukinys	4 traukinys
50	90,3	74,3	85,4	82,0
63	92,5	78,4	87,9	84,6
80	88	81,9	89,1	81,8
100	85,4	80,4	84	76,2
125	86,2	79,5	83,4	74,7
160	85	79	83,1	75,1
200	83,8	80,1	83,1	75,3
250	80,5	80,4	80,6	73,8
315	80,2	80,1	77,8	72,4
400	77,8	80,9	77,5	72,1
500	78	78,7	77,6	73,2
630	79,9	78,2	76,9	76,3
800	76,9	78,3	75,4	75,7
1000	76,1	77,6	74,2	75,6
1250	72,2	73,8	72,9	71,0
1600	74,4	76,2	73,4	73,3
2000	72,9	74,2	72,1	71,7
2500	71,7	73,3	71,4	70,6
3150	70,2	72,1	70,4	69,6
4000	68,6	70	68,5	66,5
5000	65,1	67,4	66,1	63,9

3.25 lentelės pabaiga

Dažnis, Hz	Garso slėgio lygis, dB			
	1 traukinys	2 traukinys	3 traukinys	4 traukinys
5300	62,7	64,5	63,6	61,3
8000	59	62,4	62,2	61,9
10000	55,9	58,6	58,5	55,0
A (svertinis) daž-	86,2	86,7	85,1	83,5

Geležinkelių bėgių kelio ruožui artimiausi gyvenamųjų namų sklypai ir skaičiavimui pasirinkta mikrofono vieta pavaizduota 3.6 pav.



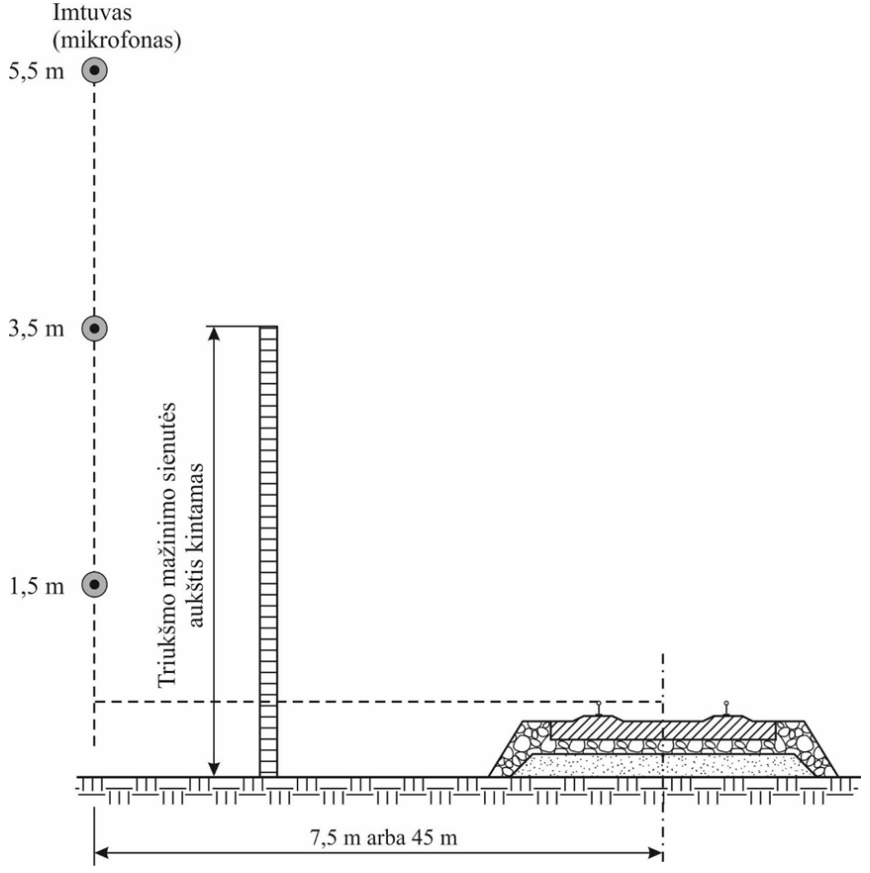
3.6 pav. Artimiausių nagrinėjamam geležinkelių bėgių kelio ruožui gyvenamųjų namų sklypų ribos ir pasirinkta skaičiavimui mikrofono vieta

Fig. 3.6. Boundaries of the residential parcels closest to the examined railway track section and the location of the microphone chosen for the calculation

Atliktas triukšmo lygio prie skirtingo riedmenų važiavimo greičio modeliavimas, siekiant įvertinti skirtingų sumodeliuotų triukšmo mažinimo sienučių įneštinį silpninimą. Buvo modeliuotos 7 alternatyvos, kurios pateiktos 3.26 lentelėje. Modeliavimo rezultatai yra pateikti 3.27–3.28 lentelėse.

Esamos situacijos skaičiavimai parodė, kad šiuo metu 45 m atstumu ribinė vertė 1,5 m aukštyje viršijama 2 dBA. V ir IV variantuose buvo modeliuojamos

skirtingo aukščio ir skirtingų formų sienutės siekiant rasti tinkamiausių parametrų žemos triukšmo mažinimo sienutės variantą. V alternatyvoje numatyta, kad sienutės ilgis bus toks pats, kaip ir kitų modeliuojamų sienučių alternatyvų (esama situacija, I–IV). Modeliuojama triukšmo mažinimo sienutė numatoma 3,1 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, t. y. tokiu atstumu, kuriuo Lietuvoje pagal teisės aktų reikalavimus galima rengti statinius bei įrenginius.



3.7 pav. Principinė skaičiavimo schema (sudaryta autoriaus)
Fig. 3.7. Principle scheme for modelling the noise level and the insertion loss (made by the author)

Modeliuojant sienutės formą, buvo išsikelta sąlyga, kad sienutės elementai būtų ne arčiau nei 2,45 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies. Šis atstumas atitinka teisės aktų reikalavimus, kurie išimtiniais atvejais leidžia rengti tam tikrus

įrenginius bei statinius ties geležinkelių bėgių keliu. Atlikus skaičiavimus nustatyta, kad tokiu atstumu veiksmingiausia yra 1,3 m aukščio, apverstos L formos sienutė, kurios gembės ilgis 0,65 m.

3.26 lentelė. Sumodeliuotos triukšmo mažinimo sienučių alternatyvos
Table 3.26. Modelled noise barrier alternatives

Alternatyva	Triukšmo mažinimo sienutės parametrai				
	aukštis nuo bėgių viršaus *H*, m	ilgis *L*, m	atstumas nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, m	forma	gembės, atlenktos link geležinkelių bėgių kelio, ilgis, m
Esama situacija	3,5	45	4,0	tiesi (I forma)	-
I var.	0,76	45	1,75	tiesi (I forma)	-
II var.	1,2	45	2,6	tiesi (I forma)	-
III var.	1,0	45	3,75	apversta L forma	0,9
IV var.	1,2	45	2,45	tiesi (I forma)	-
V var.	kintamas	45	3,1	tiesi (I forma) arba apversta L forma	kintamas*
VI var.	kintamas	kintamas	2,45–3,1 m	tiesi (I forma) arba apversta L forma	kintamas*
* modeliuota skirtingu kampu atlenkta gembė					

VI alternatyvoje numatyta, kad triukšmo mažinimo sienutės ilgis gali kisti. Ieškant tinkamiausio varianto nustatyta sąlyga, kad modeliuojama triukšmo mažinimo sienutė ir jos elementai gali būti 2,45–3,1 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, t. y. tokiu atstumu išimties atvejais dar galima rengti tam tikrus įrenginius bei statinius ties geležinkelių bėgių keliu. Atlikus skaičiavimus nustatyta, kad veiksmin-

giausia žema triukšmo mažinimo sienutė būtų ją prailginus į abi puses taip, kad bendras ilgis siektų ~100 m (~15 m pratęsta pietų kryptimi ir ~40 m šiaurės kryptimi). Sienutė turėtų būti 2,75 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, 1,3 m aukščio sienutė, apverstos L formos, gembės ilgis 0,30 m. Nustatyta, kad T formos žemos triukšmo mažinimo sienutės nėra veiksmingos. Modeliuojant bandyta gembę atlenkti kitokiu kampu. Mažinant polinkio kampą, pavyzdžiui, atlenkiant ją 45 º kampu, nustatytas an`alogiškas įneštinis triukšmo silpninimas. Todėl, esant poreikiui išlaikyti šiek tiek didesnį atstumą nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, sienutes gali būti numatytos su atlenktu viršutiniu elementu.

3.27 lentelė. Apskaičiuotos visų sumodeliuotų triukšmo mažinimo sienučių variantų garso slėgio lygių vertės
Table 3.27. Calculated sound pressure levels of all modelled noise barrier variants

Atstumas nuo bėgių kelio ašies, m	Mikrofono aukštis, m	Esama situacija		I var.	II var.	III var.	IV var.	V var.	VI var.
		dBA							
		be sienutės	H– 3,5 m, L 45 m, 4 m atstumu	H– 0,76 m, L 45 m, 1,75 m atstumu	H 1,2 m, L 45 m, 2,6 m atstumu	H 1,0 m, L 45 m, 3,75 m atstumu, L formos gembės ilgis 0,9 m	H– 1,10 m, L 45 m, 2,45 m atstumu	,H 1,3 m, L 45 m, 3,1 m atstumu, L formos gembės ilgis 0,65	H –1,3 m, L– 100 m, 2,75 m atstumu, L formos gembės ilgis 0,3 m
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
50 km/val.									
7,5	1,5	71,3	49,4	68,6	63,4	66,8	64,9	63,5	63,5
	3,5	71,2	58,2	71,2	71,2	71,2	71,2	71,2	71,2
	5,5	69,9	69,9	69,9	69,9	69,9	69,9	69,9	69,9
45	1,5	61,0	55,5	57,6	56,3	56,8	56,6	56,4	52,2
	3,5	61,2	55,9	58,7	57,1	57,8	57,5	57,2	54,2
	5,5	61,7	57,2	60,2	58,7	59,4	59,0	58,7	56,8
80 km/val.									
7,5	1,5	72,4	50,7	69,7	64,9	67,8	66,3	65,0	65,0
	3,5	72,3	59,9	72,3	72,3	72,3	72,3	72,3	72,3
	5,5	71,1	71,1	71,1	71,1	71,1	71,1	71,1	71,1
45	1,5	62,4	57,0	59,1	57,9	58,3	58,2	57,9	54,0
	3,5	62,7	57,5	60,0	58,7	59,3	59,1	58,7	55,9
	5,5	63,1	58,6	61,6	60,0	60,6	60,3	60,0	58,2

3.27 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
120 km/val.									
7,5	1,5	74,0	52,0	71,3	66,5	69,3	67,9	66,6	66,6
	3,5	73,9	61,4	73,9	73,9	73,9	73,9	73,9	73,9
	5,5	72,6	72,6	72,6	72,6	72,6	72,6	72,6	72,6
45	1,5	64,2	58,7	60,8	59,6	60,0	59,9	59,6	55,6
	3,5	64,4	59,2	61,7	60,4	61,0	60,8	60,5	57,5
	5,5	64,8	60,3	63,4	61,7	62,3	62,0	61,7	59,8
160 km/val.									
7,5	1,5	75,2	52,9	72,6	67,6	70,5	69,0	67,7	67,7
	3,5	75,1	62,3	75,1	75,1	75,1	75,1	75,1	75,1
	5,5	73,9	73,9	73,9	73,9	73,9	73,9	73,9	73,9
45	1,5	65,4	59,9	62,0	60,8	61,2	61,0	60,8	56,6
	3,5	65,6	60,4	62,9	61,6	62,2	62,0	61,6	58,6
	5,5	66,1	61,6	64,7	63,0	63,6	63,2	63,0	61,1
200 km/val.									
7,5	1,5	76,1	53,6	73,6	68,4	71,4	69,9	68,5	68,5
	3,5	76,1	62,9	76,1	76,1	76,1	76,1	76,1	76,1
	5,5	74,8	74,8	74,8	74,8	74,6	74,8	74,8	74,8
45	1,5	66,3	60,8	62,8	61,6	62,0	61,8	61,6	57,2
	3,5	66,5	61,2	63,8	62,4	63,0	62,8	62,5	59,4
	5,5	67,0	62,5	65,6	63,9	64,5	64,1	63,9	62,0
240 km/val.									
7,5	1,5	79,0	56,6	76,4	71,7	74,5	73,0	71,8	71,8
	3,5	78,9	66,9	78,9	78,9	78,9	78,9	78,9	78,9
	5,5	77,7	77,7	77,7	77,7	77,7	77,7	77,7	77,7
45	1,5	69,1	63,9	65,9	64,8	65,1	65,0	64,8	61,2
	3,5	69,3	64,4	66,8	65,5	66,1	65,9	65,5	62,9
	5,5	69,8	65,6	68,4	66,9	67,5	67,1	66,9	65,1
250 km/val.									
7,5	1,5	79,3	57,0	76,8	72,1	74,9	73,4	72,2	72,2
	3,5	79,3	67,4	79,3	79,3	79,3	79,3	79,3	79,3
	5,5	78,1	78,1	78,1	78,1	78,1	78,1	78,1	78,1
45	1,5	69,5	64,3	66,3	65,2	65,5	65,4	65,2	61,6
	3,5	69,7	64,8	67,2	65,9	66,5	66,3	65,9	63,3
	5,5	70,2	66,0	68,8	67,3	67,9	67,5	67,3	65,5

3.28 lentelė. Apskaičiuotos visų sumodeliuotų triukšmo mažinimo sienučių variantų įneštinių silpninimų vertės
Table 3.28. Calculated insertion loss values of all modelled noise barrier variants

Atstumas nuo bėgių kelio ašies, m	Mikrofono aukštis, m	Esama situacija	I var.	II var.	III var.	IV var.	V var.	VI var.
		dBA						
		H– 3,5 m, L 45 m, 4 m atstumu	H– 0,76 m, L 45 m, 1,75 m atstumu	H 1,2 m, L 45 m, 2,6 m atstumu	H 1,0 m, L 45 m, 3,75 m atstumu. L formos gembės ilgis 0,9 m	H– 1,10 m, L 45 m, 2,45 m atstumu	.H 1,3 m, L 45 m, 3,1 m atstumu. L formos gembės ilgis 0,65	H –1,3 m, L– 100 m, 2,75 m atstumu. L formos gembės ilgis 0,3 m
1	2	3	4	5	6	7	8	9
50 km/val.								
7,5	1,5	21,9	2,7	7,9	4,5	6,4	7,8	7,8
	3,5	13	0	0	0	0	0	0
	5,5	0	0	0	0	0	0	0
45	1,5	5,5	3,4	4,7	4,2	4,4	4,6	8,8
	3,5	5,3	2,5	4,1	3,4	3,7	4	7
	5,5	4,5	1,5	3	2,3	2,7	3	4,9
80 km/val.								
7,5	1,5	21,7	2,7	7,5	4,6	6,1	7,4	7,4
	3,5	12,4	0	0	0	0	0	0
	5,5	0	0	0	0	0	0	0
45	1,5	5,4	3,3	4,5	4,1	4,2	4,5	8,4
	3,5	5,2	2,7	4	3,4	3,6	4	6,8
	5,5	4,5	1,5	3,1	2,5	2,8	3,1	4,9
120 km/val.								
7,5	1,5	22	2,7	7,5	4,7	6,1	7,4	7,4
	3,5	12,5	0	0	0	0	0	0
	5,5	0	0	0	0	0	0	0
45	1,5	5,5	3,4	4,6	4,2	4,3	4,6	8,6
	3,5	5,2	2,7	4	3,4	3,6	3,9	6,9
	5,5	4,5	1,4	3,1	2,5	2,8	3,1	5
160 km/val.								
7,5	1,5	22,3	2,6	7,6	4,7	6,2	7,5	7,5
	3,5	12,8	0	0	0	0	0	0
	5,5	0	0	0	0	0	0	0
45	1,5	5,5	3,4	4,6	4,2	4,4	4,6	8,8
	3,5	5,2	2,7	4	3,4	3,6	4	7
	5,5	4,5	1,4	3,1	2,5	2,9	3,1	5

3.28 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6	7	8	9
200 km/val.								
7,5	1,5	22,5	2,5	7,7	4,7	6,2	7,6	7,6
	3,5	13,2	0	0	0	0	0	0
	5,5	0	0	0	0,2	0	0	0
45	1,5	5,5	3,5	4,7	4,3	4,5	4,7	9,1
	3,5	5,3	2,7	4,1	3,5	3,7	4	7,1
	5,5	4,5	1,4	3,1	2,5	2,9	3,1	5
240 km/val.								
7,5	1,5	22,4	2,6	7,3	4,5	6	7,2	7,2
	3,5	12	0	0	0	0	0	0
	5,5	0	0	0	0	0	0	0
45	1,5	5,2	3,2	4,3	4	4,1	4,3	7,9
	3,5	4,9	2,5	3,8	3,2	3,4	3,8	6,4
	5,5	4,2	1,4	2,9	2,3	2,7	2,9	4,7
250 km/val.								
7,5	1,5	22,3	2,5	7,2	4,4	5,9	7,1	7,1
	3,5	11,9	0	0	0	0	0	0
	5,5	0	0	0	0	0	0	0
45	1,5	5,2	3,2	4,3	4	4,1	4,3	7,9
	3,5	4,9	2,5	3,8	3,2	3,4	3,8	6,4
	5,5	4,2	1,4	2,9	2,3	2,7	2,9	4,7

Atlikus skaitinį triukšmo mažinimo sienučių modeliavimą nustatyta, kad aukštos triukšmo mažinimo sienutės yra veiksmingiausios, kai reikia apsaugoti greta sienutės esančias teritorijas. 3,5 m aukščio triukšmo mažinimo sienutės, esančios 4,0 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, įneštinis silpninimas, nustatytas 1,5 m aukštyje nuo bėgių viršaus, 7 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, yra net 8–9 kartus didesnis (priklausomai nuo riedmenų važiavimo greičio) nei itin žemos, 0,76 m aukščio triukšmo mažinimo sienutės, esančios 1,75 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies. Tomis pačiomis sąlygomis nustatytas aukštos triukšmo mažinimo sienutės įneštinis silpninimas yra 2,7–3,1 kartus didesnis (priklausomai nuo riedmenų važiavimo greičio) nei žemos, 1,2 m aukščio triukšmo mažinimo sienutės, esančios 2,6 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies.

3,5 m aukščio triukšmo mažinimo sienutės, esančios 4,0 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, įneštinis silpninimas, nustatytas 3,5 m aukštyje nuo bėgių viršaus, 7 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, yra ~ 2 kartus mažesnis nei nustatytas 1,5 m aukštyje nuo bėgių viršaus, o 5,5 m aukštyje sienutė yra neveiksminga, t. y. yra nustatytas tas pats triukšmo lygis, kaip ir tuo atveju, kai nėra sienutės, o įneštinis silpninimas lygus 0.

Skaičiuojant įneštinį silpninimą greta sienutės, jis būna didžiausias, kai imtuvas (mikrofonas) yra kuo žemiau, lygis, nes teritorija patenka į akustinio šešėlio zoną.

Iš žemų triukšmo mažinimo sienučių didžiausias įneštinis silpninimas, nustatytas 1,5 m aukštyje nuo bėgių viršaus, 7 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, yra 1,2 m aukščio ir 45 m ilgio triukšmo mažinimo sienutės, esančios 2,6 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies (7,2–7,9 dBA). Tokiomis pačiomis sąlygomis nežymiai mažesnis įneštinis silpninimas buvo nustatytas 1,3 m aukščio triukšmo mažinimo sienučių, esančių 3,1 m atstumu (sienutės ilgis 45 m, L formos gembės ilgis 0,65 m) ir 2,75 m atstumu (sienutės ilgis 100 m, L formos gembės ilgis 0,3 m) nuo geležinkelių bėgių kelio ašies (7,1–7,8 dBA). Mažiausias įneštinis silpninimas nustatytas itin žemos, 0,76 m aukščio triukšmo mažinimo sienutės, esančios 1,75 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies 2,5–2,7 dBA. Visais atvejais didesnis įneštinis silpninimas nustatytas prie mažesnio riedmenų važiavimo greičio, nors itin žemos triukšmo mažinimo sienutės atveju šis skirtumas itin nedidelis.

Visų kitų skaitiniu būdu modeliuotų žemų triukšmo sienučių įneštinis silpninimas nustatytas 3,5 m ir 5,5 m aukštyje nuo bėgių viršaus, 7 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, yra lygus 0. Šio tipo sienutės nėra skirtos apsaugoti greta geležinkelių bėgių kelio esančias triukšmui jautrias teritorijas, jos reikalingos, kai triukšmą reikia sumažinti atokiau nuo geležinkelių bėgių kelio esančiose teritorijose.

Atlikus triukšmo mažinimo sienučių skaitinį modeliavimą, pastebėta, kad skirtingų aukščių ir formų sienučių įneštinis silpninimas, nustatytas 1,5–5,5 m aukštyje nuo bėgių viršaus, 45 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, mažiau skiriasi tarpusavyje nei arčiau geležinkelių bėgių kelio ašies. Pavyzdžiui, esant riedmenų važiavimo greičiui 50 km/h, mažiausias įneštinis silpninimas (3,4 dBA) nustatytas 0,76 m aukščio triukšmo mažinimo sienutei, esančiai 1,75 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies. Didžiausias įneštinis silpninimas (8,8 dBA) nustatytas 1,3 m aukščio triukšmo mažinimo sienutei, esančiai 2,75 m atstumu nuo kelio ašies (sienutės ilgis 100 m, L formos gembės ilgis 0,3 m). Skirtumas tarp šių silpnumo reikšmių siekia ~ 2,6 karto. Lyginant pastarosios triukšmo mažinimo sienutės veiksmingumą su kitų tirtų sienučių veiksmingumu, nustatyta, kad įneštinis silpninimas yra didesnis nuo ~1,6 karto (aukšta, aukštis 3,5 m, ilgis 45 m, 4 m atstumu) iki ~ 2,1 karto (aukštis 1,0 m, ilgis 45 m, 3,75 m atstumu, L formos gembės ilgis 0,9 m) nei kitų sienučių įneštinis silpninimas. Panašūs skirtumai pastebimi ir matuojant prie skirtingų riedmenų važiavimo greičių – didėjant greičiui, bendru atveju mažėja visų sienučių įneštinis silpninimas. Taip pat skirtumai pastebimi matuojant skirtinguose aukščiuose – kuo aukščiau atliekami matavimai, tuo mažesnis nustatomas įneštinis silpninimas.

Atlikus skaitinį modeliavimą nustatyta, kad aukštos triukšmo mažinimo sienutės yra ypač veiksmingos apsaugant greta jų esančias triukšmui jautrias teritorijas. Tačiau tolstant nuo senutės, jos įneštinis silpninimas mažėja, o apskaičiuoti silpninimo lygiai yra gan panašūs į kai kurių analizuotų žemų triukšmo mažinimo sienučių įneštinio silpninimo lygius. Didesniu atstumu įneštinio silpninimo mažinimui daug didesnę įtaką daro ne sienutės aukštis, o ilgis, bei tam tikru mastu – forma ir atstumas iki geležinkelių bėgių kelio ašies.

Atlikus skaitinį modeliavimą prie skirtingų riedmenų važiavimo greičių nustatyta, kad triukšmo mažinimo sienučių, nepriklausomai nuo jų parametrų ir įrengimo vietos, įneštiniam silpninimui nestiprią įtaką daro važiavimo greitis. Daugeliu atvejų įneštinis silpninimas šiek tiek mažėja, kai didėja riedmenų važiavimo greitis.

Nustatytas 0,76 m aukščio triukšmo mažinimo sienutės, esančios 1,75 m atstumu, įneštinis silpninimas, išmatuotas 45 m atstumu, yra nuo 1,5 dBA iki 3,5 dBA, priklausomai nuo imtuvo (mikrofono) vietos ir riedmenų važiavimo greičio. Nieuwenhuizen & Yntema (2018), atlikę tokių pat parametrų žemų triukšmo mažinimo sienučių tyrimą, nustatė didesnį įneštinį silpninimą (6–10 dBA).

Nustatytas 1,2 m aukščio triukšmo mažinimo sienutės, esančios 2,6 m atstumu, įneštinis silpninimas, išmatuotas 45 m atstumu, yra nuo 2,9 dBA iki 4,7 dBA, priklausomai nuo imtuvo (mikrofono) vietos ir riedmenų važiavimo greičio. Vogiatzis & Vanhonacker (2016), atlikę tokių pat parametrų žemų triukšmo mažinimo sienučių tyrimą, nustatė neženkliai didesnį įneštinį silpninimą (4,1–5,8 dBA).

Nustatytas 1,0 m aukščio L formos (gembės ilgis 0,9 m) triukšmo mažinimo sienutės, esančios 3,75 m atstumu, įneštinis silpninimas, išmatuotas 45 m atstumu, yra nuo 2,3 dBA iki 4,3 dBA, priklausomai nuo imtuvo (mikrofono) vietos ir riedmenų važiavimo greičio. Baulac et al. (2009) atlikę tokių pat parametrų žemų triukšmo mažinimo sienučių matematinį (skaitinį) skaičiavimą ribinių elementų metodu nustatė ženkliai didesnį įneštinį silpninimą (5–12 dBA). Ženkliai didesnį įneštinį silpninimą jie gavo modeliuodami sienutes su sugeriančiais paviršiais bei daugiaelemenčiu viršumi.

Siekiant didžiausio triukšmo lygio sumažėjimo didesniu atstumu įrengiant žemas triukšmo mažinimo sienutes, skaičiavimai parodė, kad didžiausias veiksmingumas būtų pasiekiamas, jei triukšmo mažinimo sienutė būtų bent 100 m ilgio (jautri triukšmui teritorija sienutės epicentre – 45 m atstumu), jos aukštis 1,3 m virš bėgių galvutės, o pati sienutė L formos, su 0,3 m ilgio gembe (vertikalioji dalis atlenkta link geležinkelio). Skaičiavimais nustatyta, kad tokių techninių parametrų triukšmo mažinimo sienutės veiksmingumas būtų didesnis už šiuo metu įrengtą ~45 m ilgio ir 3,5 m aukščio triukšmo mažinimo sienutę.

Siekiant nustatyti, kokios sienutės leidžia gauti didesnį įneštinį silpninimą, buvo atliktas papildomas tyrimas, apskaičiuojant įneštinį silpninimą žemų triukšmo mažinimo sienučių tiesių sienučių ir analogiškų parametrų sienučių su atlenktu link geležinkelių bėgių kelio bėgių viršutiniu elementu (apverstos L formos gembe). Įvertinus tai, kad riedmenų važiavimo greitis beveik neturi įtakos triukšmo mažinimo sienutės įneštiniam silpninimui, visos papildomos sienutės buvo modeliuotos prie tokio paties 250 km/h riedmenų važiavimo greičio. Papildomai modeliuotos 4 alternatyvos:

1. III A variantas: triukšmo mažinimo sienutės aukštis nuo bėgių viršaus 1,0 m, sienutės ilgis 45 m, sienutė yra 3,75 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies.
2. V A variantas: triukšmo mažinimo sienutės aukštis nuo bėgių viršaus 1,3 m, sienutės ilgis 45 m, sienutė yra 3,1 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies.
3. VI A variantas: triukšmo mažinimo sienutės aukštis nuo bėgių viršaus 1,3 m, sienutės ilgis 45 m, sienutė yra 2,75 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies.
4. VI B variantas: triukšmo mažinimo sienutės aukštis nuo bėgių viršaus 1,3 m, sienutės ilgis 100 m, sienutė yra 2,75 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies.

3.29 lentelė. Apskaičiuotos papildomai sumodeliuotų triukšmo mažinimo sienučių variantų įneštinių silpninimų vertės
Table 3.29. Calculated insertion loss values of the additionally modelled noise barrier variants

Atstumas nuo bėgių kelio ašies, m	Mikrofono aukštis, m	Esama situacija	III A var.	V A var.	VI A var.	VI B var.	VI 15º var.	VI 30º var.	VI 60º var.
		dBA							
		H– 3,5 m, L 45 m, 4 m atstumu	H 1,0 m, L 45 m, 3,75 m atstumu.	.H 1,3 m, L 45 m, 3,1 m atstumu	H –1,3 m, L– 45 m, 2,75 m atstumu.	H –1,3 m, L– 100 m, 2,75 m atstumu.	H –1,3 m, L– 100 m, 2,75 m atstumu. Gembė atlenkta 15º kampu	H –1,3 m, L– 100 m, 2,75 m atstumu. Gembė atlenkta 30º kampu	H –1,3 m, L– 100 m, 2,75 m atstumu. Gembė atlenkta 60º kampu
250 km/val.									
7,5	1,5	22,3	0,2	5,6	6,2	6,2	6,2	6,2	6,3
	3,5	11,9	0	0	0	0	0	0	0
	5,5	0	0	0	0	0	0	0	0
45	1,5	5,2	3,3	4,1	4,2	7,3	7,3	7,3	7,4
	3,5	4,9	2,5	3,4	3,5	5,7	5,7	5,7	5,8
	5,5	4,2	1,2	2,6	2,8	4,4	4,4	4,4	4,5

Siekiant nustatyti, kiek triukšmo mažinimo sienutės su atlenktu viršutiniu elementu įneštinį silpninimą daro įtką viršutinio elemento atlenkimo kampui, buvo papildomai atlikti 100 m ilgio sienutės skaičiavimai su skirtingais kampais (15º, 30º, 60 º) atlenktu viršutiniu elementu. Papildomo modeliavimo rezultatai pateikti 3.29 lentelėje.

Atlikus papildomą skaitinį triukšmo mažinimo sienučių modeliavimą nustatyta, kad žemos triukšmo mažinimo sienutės su atlenktu link geležinkelių bėgių viršutiniu elementus yra didesnio veiksmingumo nei sienutės su neatlenktu viršutiniu elementu, pavyzdžiui, L formos (gembės ilgis 0,9 m) sienutės, kurios aukštis 1,0 m, ilgis 45 m, įrengtos 3,75 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, įneštinis silpninimas, nustatytas 1,5 m aukštyje nuo bėgių viršaus, yra 1,2 karto didesnis nei tų pačių parametrų tiesios sienutės įneštinis silpninimas. Analogiškai įneštinis silpninimas, nustatytas 3,5 m aukštyje nuo bėgių viršaus, yra 1,28 karto didesnis, o įneštinis silpninimas, nustatytas 5,5 m aukštyje nuo bėgių viršaus, yra 1,92 karto didesnis nei tų pačių parametrų tiesios sienutės įneštinis silpninimas.

3.4. Triukšmo mažinimo sienučių parametrų, darančių įtaką įneštinio silpninimo vertėms, statistinis įvertinimas

Statistinio tyrimo metu buvo siekiama įvertinti, kurie triukšmo mažinimo sienučių parametrai, nustatyti iš modeliavimo duomenų, statistiškai reikšmingai turi įtakos įneštinio silpninimo vertėms. Analizei buvo naudoti šie triukšmo mažinimo sienučių parametrai: sienutės aukštis, sienutės ilgis, forma (tiesi arba su gembe) bei atstumas nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, kuriame yra sienutė.

Atliktą statistinę analizę sudaro dvi dalys: pirma aprašomoji, kurioje pateikiamos išmatuoto įneštinio silpninimo skaitinės charakteristikos (mažiausia reikšmė (min), mediana, vidurkis ($\bar{x}$), maksimali reikšmė (max), standartinis nuokrypis (δ) ir matavimų skaičius (N)).

Mediana verčių aibės vidurinis (centrinis) skaičius, kuris aibę dalija į dvi dalis mažesnių už medianą ir didesnių už medianą. Standartinis nuokrypis δ nuokrypis, žymintis reikšmių išsibarstymą apie vidurkį.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^2}{N-1}}, \tag{3.13}$$

čia $\bar{x}$ matavimų aibės aritmetinis vidurkis (toliau vidurkis); N matavimų skaičius; x_i – i-ojo matavimo reikšmė.

Patikrinamos kai kurios statistinės hipotezės dėl įneštinio silpninimo statistiškai reikšmingų skirtumų ir išryškinamos priklausomybių tendencijos, kurios

naudojamos antroje statistinės analizės dalyje daugialypės tiesinės regresijos modelio, aprašančio ryšį tarp įneštinio silpninimo ir sienučių parametrų, įvertinimui (Čekanavičius & Murauskas, 2001). Hipotezėms tikrinti naudota vienfaktorinė dispersinė analizė ANOVA (angl. *Analysis of variance*), poriniams vidurkiams palyginti – *t* testas (kai lyginamas dviejų grupių vidurkis) (Čekanavičius & Murauskas, 2001). Normaliojo skirstinio sąlyga tikrinta naudojant Shapiro-Wilk testą. Tuo atveju, kai normaliojo skirstinio hipotezė buvo atmesta, papildomai naudoti neparametriniai ANOVOS ir *t* testo analogai, atitinkamai Kruskal-Wallis testas ir Mann-Whitney U testas.

Statistinių testų rezultatai interpretuojami naudojant *p* reikšmę stebimą reikšmingumo lygmenį, kuris parodo, kokia tikimybė yra atmesti teisingą H_0 hipotezę, atsižvelgiant į turimus duomenis. Analizė atlikta naudojant R programinį paketą (angl. *The R Project for Statistical Computing*).

Nustatyta, kad prie visų greičių pasitaiko labai panašus silpninimo reikšmių standartinis nuokrypis bei vidurkis (3.30 lentelė), t. y. statistiškai reikšmingų skirtumų tarp įneštinio silpninimo, gauto prie skirtingų greičių, nebuvo stebėta (p = 0,996), t. y. faktiškai prie visų tirtų riedmenų važiavimo greičių, nustatytos įneštinio silpninimo vertės buvo panašios.

Taikant vienfaktore dispersinę analizę buvo siekiama įvertinti, ar triukšmo mažinimo sienutės aukštis, gembės atlenkimo kampas, atstumas nuo geležinkelio bėgių kelio ašies, kuriame yra sienutė, turi įtakos įneštinio silpninimo vertėms.

3.30 lentelė. Įneštinio silpninimo vertės pagal riedmenų važiavimo greitį
Table 3.30. Values of insertion loss according to rail stock speed

Riedmenų važiavimo greitis	Min	Mediana	Vidurkis $\bar{x}$	Max	Standartinis nuokrypis δ	N-matavimų sk.	Vienfaktorė ANOVA ir neparametrinis jos analogas Kruskal-Wallis testas*
50.00	0.00	3.40	3.80	21.90	4.17	48	p = 0.996 ir p = 0.999
80.00	0.00	3.35	3.72	21.70	4.06	48	
120.00	0.00	3.40	3.75	22.00	4.11	48	
160.00	0.00	3.40	3.79	22.30	4.18	48	
200.00	0.00	3.50	3.84	22.50	4.24	48	
240.00	0.00	3.20	3.60	22.40	4.08	48	
250.00	0.00	3.35	3.39	22.30	3.45	90	
*įneštiniam silpninimui normaliojo skirstinio hipotezė atmesta visų greičių atveju (p < 0.001), žr. histogramą (3.8 pav.)							

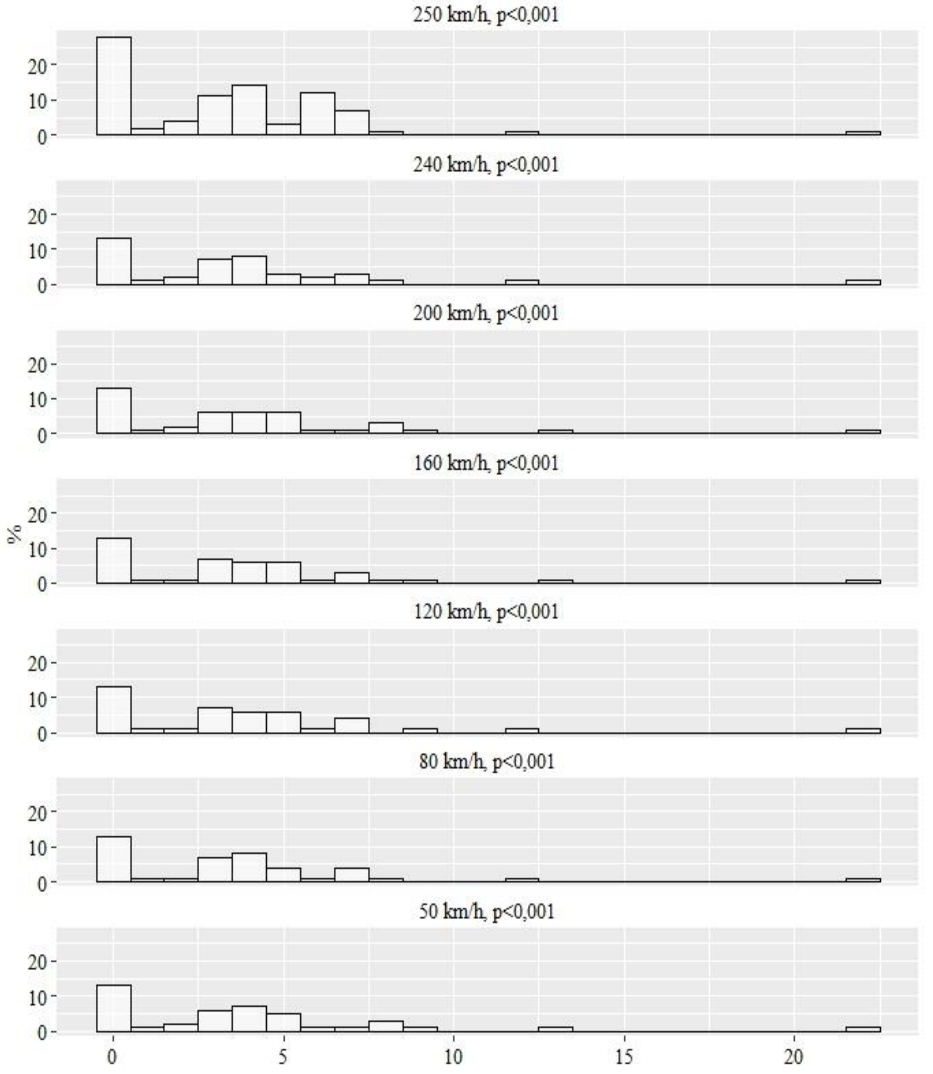
Atlikus pirminę analizę nustatyta, kad žemos triukšmo mažinimo sienutės yra veiksmingiausios, kai matavimai atliekami didesniu atstumu nuo geležinkelio bėgių kelio ašies (3.26–3.28 lentelės). Todėl statistinėje analizėje naudotos triukšmo lygio vertės, nustatytos 45 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies. Statistinės analizės rezultatai parodė, kad įneštinio silpninimo vidurkiai statistiškai reikšmingai skiriasi, priklausomai nuo triukšmo mažinimo sienutės aukščio (p < 0,0001). Nustatyta tendencija, kad sienutės aukštis lemia didesnį įneštinio silpninimo vidurkį (aukščių intervale nuo 0,76 iki 1,3 m). Tačiau, 3,5 m aukščio sienutė iš šios tendencijos išsiskyrė, nes jos įneštinio silpninimo vidurkis buvo šiek tiek mažesnis nei 1,3 m aukščio sienutės (3.31 lentelė).

Nustatyta, kad sienučių įneštinio silpninimo vidurkiai statistiškai reikšmingai skiriasi priklausomai nuo atstumo, kuriuo yra triukšmo mažinimo sienutė (p < 0,0001) (3.32 lentelę), t. y. atstumo, kuriuo yra triukšmo mažinimo sienutė, turi įtakos įneštinio silpninimo vertėms.

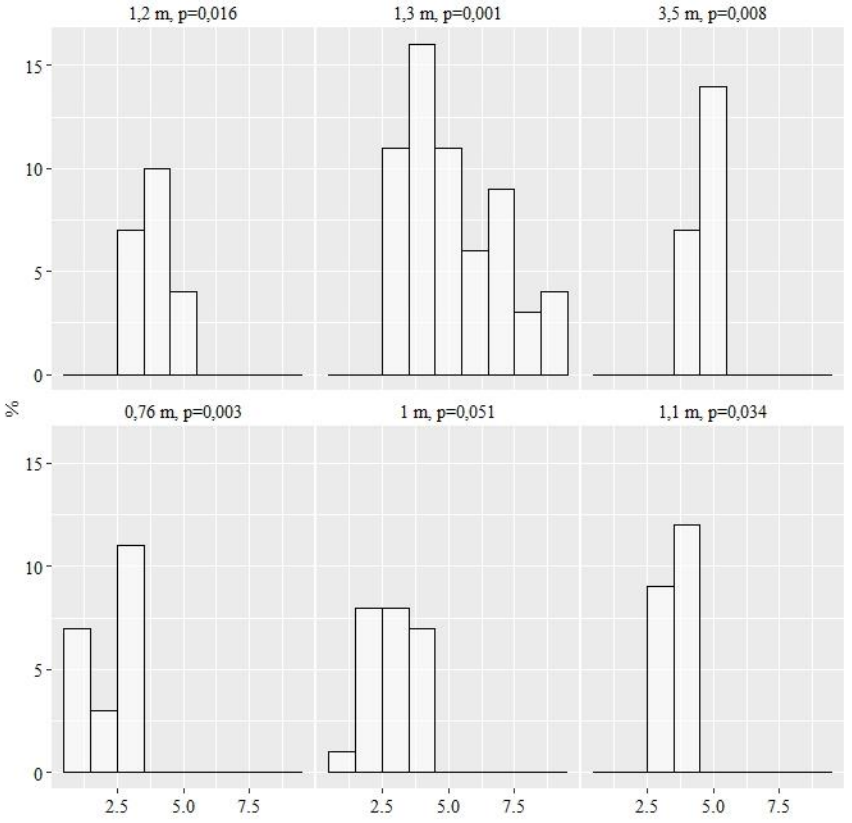
3.31 lentelė. Įneštinio silpninimo vertės pagal triukšmo mažinimo sienutės aukštį
Table 3.31. Values of the insertion loss according to the height of the noise barrier

Triukšmo mažinimo sienutės aukštis	Min	Mediana	Vidurkis $\bar{x}$	Max	Standartinis nuokrypis δ	N-matavimų sk.	Vienfaktorė ANOVA ir neparametrinis jos analogas Kruskal-Wallis testas*
0,76	1,4	2,7	2,46	3,5	0,81	21	Abiejų testų atvejais p < 0,0001
1	1,2	3,35	3,18	4,3	0,82	24	
1,1	2,7	3,6	3,55	4,5	0,64	21	
1,2	2,9	4	3,84	4,7	0,65	21	
1,3	2,6	4,65	5,20	9,1	1,78	60	
3,5	4,2	5,2	4,99	5,5	0,45	21	

* įneštiniam silpninimui normaliojo skirstinio hipotezė atmesta visų sienutės aukščių atveju, p reikšmes žr. histogramoje (3.9 pav.)



3.8 pav. Įneštinio silpninimo verčių pagal riedmenų važiavimo greitį histograma
Fig. 3.8. Histogram of the insertion loss values according to the train speed



3.9 pav. Įneštinio silpninimo verčių pagal triukšmo mažinimo sienutės aukštį histograma
Fig. 3.9. Histogram of the insertion loss values according to the height of the noise barrier

Siekiant įvertinti, ar gembės atlenkimo kampas turi įtakos įneštinio silpninimo vertėms, buvo lyginamos tik triukšmo mažinimo sienutės su atlenkta gembe, bei eliminuojant aukštas triukšmo mažinimo sienutes. Analizė atlikta riedmenų važiavimo greičio 250 km/h sąlygomis, nes būtent prie šio greičio atlikti papildomi skaičiavimai, įvertinant skirtingais kampais atlenktų viršutinių elementų (gembių) įneštinį silpninimą. Žemos triukšmo mažinimo sienutės pasižymi didesniu veiksmingumu, kai triukšmo lygis matuojamas didesniu atstumu nuo geležinkelio bėgių kelio ašies. Todėl statistiniam palyginimui buvo naudojamos triukšmo lygio vertės, nustatytos 45 m atstumu nuo geležinkelio bėgių kelio ašies.

3.32 lentelė. Įneštinio silpninimo vertės pagal triukšmo mažinimo sienutės atstumą
Table 3.32. Values of the insertion loss according to the distance at which the noise barrier is located

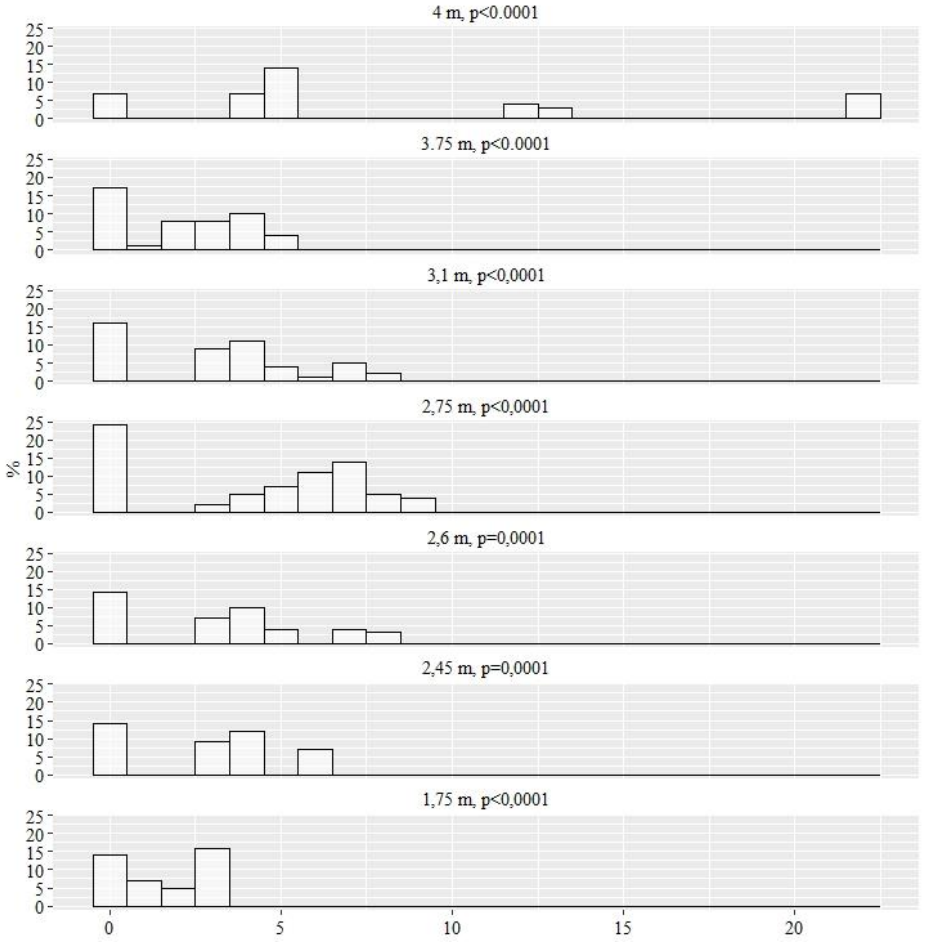
Atstumas, kuriuo yra triukšmo mažinimo sienutė	Min	Mediana	Vidurkis $\bar{x}$	Max	Standartinis nuokrypis δ	N-matavimų sk.	Vienfaktorė ANOVA ir neparametrinis jos analogas Kruskal-Wallis testas*
1,75	0	2	1,67	3,5	1,32	42	Abiejų testų atvejais $p < 0{,}0001$
2,45	0	3,15	2,80	6,40	2,25	42	
2,6	0	3,45	3,18	7,90	2,67	42	
2,75	0	5,00	4,23	9,10	3,25	72	
3,1	0	3,25	3,08	7,80	2,58	48	
3,75	0	2,50	2,27	4,70	1,84	48	
4	0	5,25	8,28	22,50	7,31	42	
*įneštiniam silpninimui normaliojo skirstinio hipotezė atmesta visų sienutės atstumų atveju, p reikšmes žr. histogramoje (3.10 pav.)							

Nustatyta, kad įneštinis silpninimas statistiškai reikšmingai skiriasi priklausomai nuo triukšmo mažinimo sienutės viršutinio elemento atlenkimo kampo ($p < 0{,}001$) (3.33 lentelė). Tyrimai parodė, kad įneštinis silpninimas yra statistiškai reikšmingai didesnis, kai kai gembės atlenkimo kampas yra 90º (vidurkis 4,62 dBa), palyginti su atveju, kai kampas yra 0º (vidurkis 3,36 dBa) ($p < 0{,}001$) (3.14 lentelė).

3.33 lentelė. Įneštinio silpninimo vertės pagal triukšmo mažinimo sienutės viršutinio elemento (gembės) atlenkimo kampą
Table 3.33. Values of insertion loss according to the deflection angle of the upper element (bracket) of the noise barrier

Gembės atlenkimo kampas, º	Min	Mediana	Vidurkis $\bar{x}$	Max	Standartinis nuokrypis δ	N-matavimų sk.	*T* testas ir jo neparametrinis analogas Mann-Whitney U testas palyginti įneštinio silpninimo vidurkį tarp gembės atsilenkimo kampo 0° ir 90°*
0	1,2	3,4	3,36	7,3	1,05	75	Abiejų testų atvejais $p < 0{,}001$
15	4,4	5,7	5,80	7,3	1,45	3	
30	4,4	5,7	5,80	7,3	1,45	3	
60	4,5	5,8	5,90	7,4	1,45	3	
90	2,3	4,2	4,62	9,1	1,84	63	
* dėl per mažo matavimų skaičiaus įneštinio silpninimo statistinis palyginimas prie gembės kampo 15°, 30° ir 60° nebuvo taikytas. Žr. histogramą (3.11 pav.)							

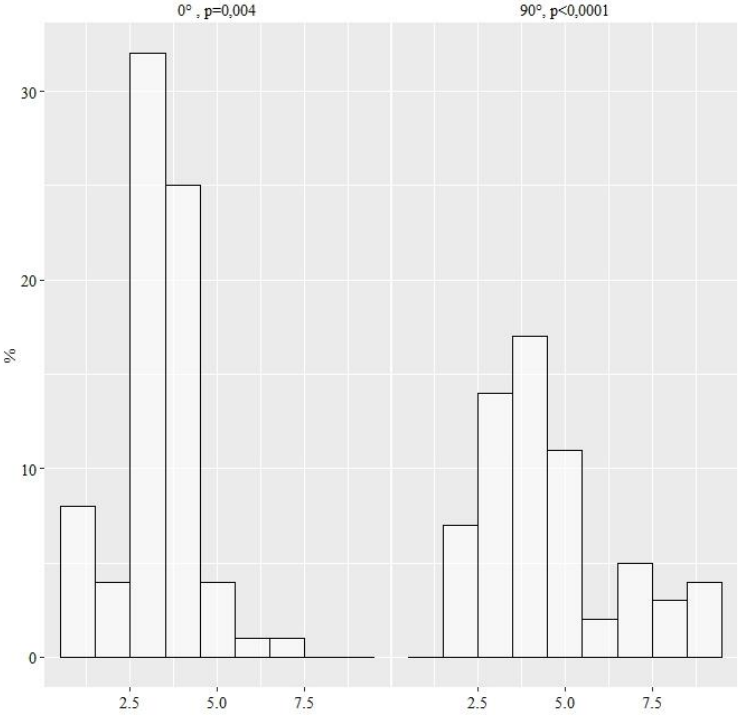
Į statistinį palyginimą nebuvo įtraukti atvejai, kai gembės kampas buvo 15°, 30° ir 60°, nes šiems atvejams buvo atlikta tik po tris nustatymus, o tai yra per mažas duomenų skaičius patikimiems statistiniams duomenims atlikti.



3.10 pav. Įneštinio silpninimo verčių pagal atstumą, kuriuo yra triukšmo mažinimo sienutė, histograma
Fig. 3.10. Histogram of the insertion loss values according to the distance from the noise barrier

Siekiant įvertinti, ar triukšmo mažinimo sienutės ilgis daro įtaką įneštinio silpninimo vertėms, buvo atliktas palyginimas, taikant dviejų charakteristikų *t* testą (angl. *two-sample t-test*), ir jo neparametrinį analogą Mann-Whitney U testą.

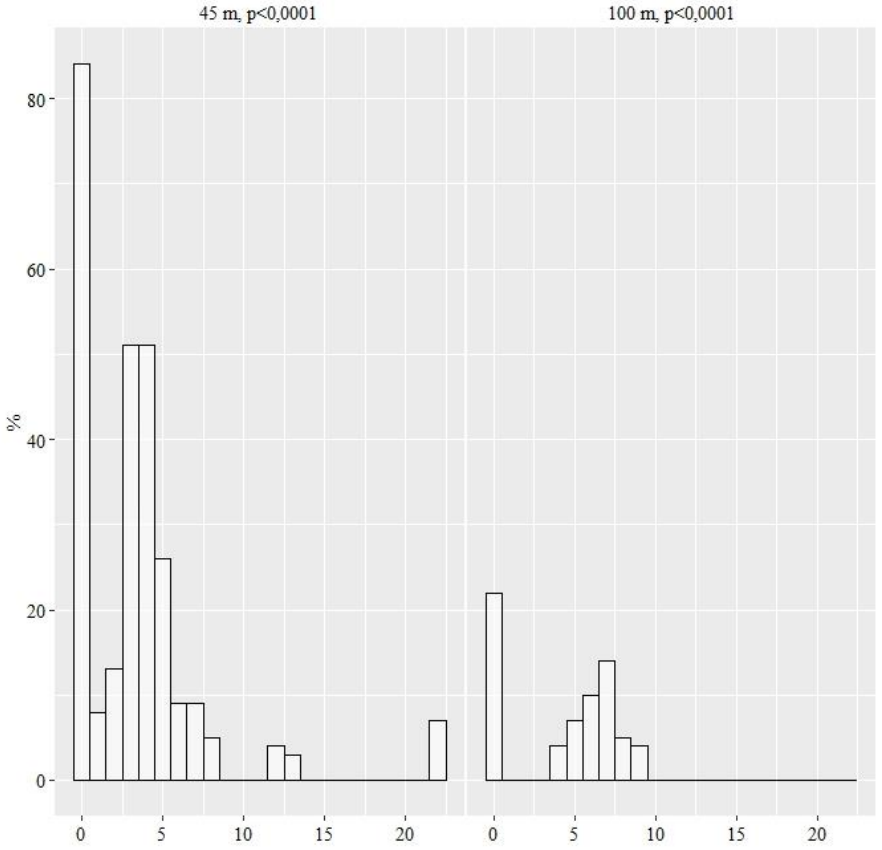
Nustatyta, kad 100 m ilgio triukšmo mažinimo sienutės vidutinis įneštinis silpninimas buvo statistiškai reikšmingai didesnis nei 45 m ilgio triukšmo mažinimo sienutės, atitinkamai 4,37 ± 3,29 ir 3,49 ± 4,07, (p = 0,068 ir p = 0,0005) (3.34 lentelė).



3.11 pav. Įneštinio silpninimo verčių, pagal triukšmo mažinimo sienutės viršutinio elemento (gembės) atlenkimo kampą, histograma
Fig. 3.11. Histogram of the insertion loss values according to the angle of deflection of the upper element (bracket) of the noise barrier

3.34 lentelė. Įneštinio silpninimo vertės pagal triukšmo mažinimo sienutės ilgį
Table 3.34. Values of the insertion loss according to the length of the noise barrier

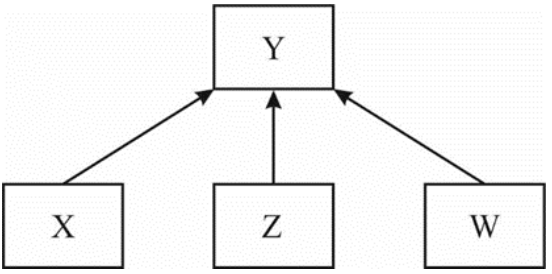
Triukšmo mažinimo sienutės ilgis, m	Min	Mediana	Vidurkis $\bar{x}$	Max	Standartinis nuokrypis δ	N-matavimų sk.	*t* testas ir neparametrinis jo analogas Mann-Whitney U testas
45	0	3,10	3,49	22,50	4,07	270	p = 0,068 ir p = 0.0005
100	0	5,35	4,37	9,10	3,29	66	
*įneštiniam silpninimui normaliojo skirstinio hipotezė atmesta abiejų sienutės ilgių atveju, p < 0.0001, žr. histogramą (3.12 pav.)							



3.12 pav. Įneštinio silpninimo verčių, pagal triukšmo mažinimo sienutės ilgį, histograma
Fig. 3.12. Histogram of the insertion loss values according to the length of the noise barrier

Iš aprašomosios statistinės analizės matyti, kad įneštinis silpninimas priklauso nuo kai kurių kintamųjų tiesiškai, todėl buvo atlikta statistinė tiesinė regresinė analizė.

Tiesinės regresijos modelyje visais atvejais priimama, kad intervalinis kintamasis priklauso nuo vieno ar kelių kitų kintamųjų X, Z, W. Kintamasis Y vadinamas priklausomu kintamuoju, kintamieji X, Z, W vadinami aiškinamaisiais kintamaisiais arba regresoriais (Čekanavičius & Murauskas, 2014). Principinė modelio schema pavaizduota 3.13 pav.



3.13 pav. Principinė tiesinės regresijos modelio schema (Čekanavičius & Murauskas, 2014)
Fig. 3.13. Schematic diagram of a linear regression model (Čekanavičius & Murauskas, 2014)

Matematinė daugialypės tiesinės regresijos modelio išraiška yra tokia (Čekanavičius & Murauskas, 2014):

$$Y = c + b_1X + b_2Z + b_3W + e, \quad (3.14)$$

čia *e* žymi liekamąją paklaidą, t. y. viską, nuo ko dar gali priklausyti *Y*, ir kas nebuvo įtraukta į modelio vertinimą. Konstanta *c* ir koeficientai b_1, b_2, b_3 įvertinami iš imties duomenų: $\hat{c}, \widehat{b_1}, \widehat{b_2}, \widehat{b_3}$. Įvertintas daugialypės tiesinės regresijos modelis vidutinei *Y* reikšmei prognozuoti (Čekanavičius, Murauskas 2014):

$$\hat{Y} = \hat{c} + \widehat{b_1}X + \widehat{b_2}Z + \widehat{b_3}W. \quad (3.15)$$

Šioje lygtyje įvertintų koeficientų ženklai nurodo priklausomybės tarp priklausomo ir aiškinamųjų kintamųjų kryptį: jei ženklas teigiamas (neigiamas), tai didėjant nepriklausomam kintamajam, didėja (mažėja) ir $\hat{Y}$ reikšmės. Koeficientas $\widehat{b_1}$ parodo, kiek pasikeis $\hat{Y}$ reikšmė, jei vienu matavimo vienetu padidinsime X, kai kitų regresorių reikšmės yra fiksuotos (Čekanavičius & Murauskas, 2014).

Atliekant statistinę tiesinę regresinę analizę, į bendrą regresijos modelį buvo įtraukti šie aiškinamieji kintamieji (regresoriai): žemos triukšmo mažinimo sienutės aukštis, ilgis, viršutinis elementas (gembė), atstumas nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, kuriame yra sienutė, riedmenų važiavimo greitis ir atstumas nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, kuriuo skaičiuotas triukšmo lygis (X, Z, W ir kt.). Priklausomasis kintamasis Y yra įneštinis silpninimas.

Nustatyta, kad įneštinis silpninimas statistiškai reikšmingai priklauso nuo dviejų kintamųjų triukšmo mažinimo sienutės aukščio ($p < 0{,}0001$) ir ilgio ($p < 0{,}0001$). Abu parametrai teigiami, t. y. kuo ilgesnė ir aukštesnė sienutė, tuo didesnis įneštinis silpninimas. Triukšmo mažinimo sienutės aukščiui padidėjus 1 metru, įneštinis silpninimas vidutiniškai padidėja 2,53 dBA, kai kiti parametrai lieka ne-

pakitę, o sienutės ilgiui padidėjus 1 metru, įneštinis silpninimas vidutiniškai padidėja 0,045 dBA, kai kiti parametrai lieka nepakitę. Be to, lyginant triukšmo mažinimo sienutę be gembės su triukšmo mažinimo sienute, kurios gembė atlenkta 90 º kampu, nustatyta, kad pastarosios sienutės įneštinis silpninimas yra vidutiniškai 0.6867 dBa didesnis nei sienučių be gembės (p = 0,02).

$$IS = -1{,}39 + 2{,}52 * H_{(p<0{,}0001)} + 0{,}04 * L_{(p<0{,}0001)}, \quad (3.17)$$

čia *IS* įneštinis silpninimas; *H* triukšmo mažinimo sienutės aukštis; *L* triukšmo mažinimo sienutės ilgis.

Determinacijos koeficientas (R kvadratas, R^2) yra vienas iš rodiklių, parodančių regresijos modelio tinkamumą. Determinacijos koeficientas modeliuojamų ir stebimų priklausomo kintamojo reikšmių skirtumų matas, t. y. kiek procentų *Y* elgesio paaiškina kintamųjų *X*, *Z*, *W* elgesys. Determinacijos koeficientas įgyja reikšmes iš intervalo [0, 1]. Kuo koeficiento reikšmė didesnė, tuo modelis geriau tinka duomenims. Blogai, kai $R^2 < 0{,}20$, kai $R^2 = 0{,}25$ modelis tinka tik iš bėdos. O štai, jei $R^2 = 0{,}89$, tai modelis gana tiksliai aprašo duomenis (Čekanavičius & Murauskas, 2014)

Atlikus statistinę analizę gauta, kad determinacijos koeficientas $R^2 = 0.67$, t. y. sienutės aukštis ir ilgis paaiškina 67 % silpninimo reikšmių išsibarstymo.

3.5. Trečiojo skyriaus išvados

Disertacijoje iškeltam tikslui pasiekti atlikti esamos aukštos triukšmo mažinimo sienutės įneštinio silpninimo nustatymo bei skaitinio skirtingo aukščio triukšmo sienučių palyginimo modeliuojant eksperimentiniai tyrimai. Atliktas statistinis žemų triukšmo mažinimo sienučių parametrų, darančių įtaką įneštinio silpninimo vertėms, rodiklių priklausomybės vertinimas. Apibendrinant trečiajame skyriuje pateiktus eksperimentinio tyrimo ir analizės rezultatus, galima teigti, kad:

1. Atlikus 7 skirtingų triukšmo mažinimo priemonių (alternatyvų) analizę TOPSIS metodu, nustatyta, kad racionaliausia (geriausia) alternatyva yra žema triukšmo mažinimo sienutė (racionalumo koeficientas 0,89), o mažiausiai racionali bėgių šlifavimas (racionalumo koeficientas 0,308).
2. Eksperimentiniu tyrimu lauko sąlygomis tirta aukšta triukšmo mažinimo sienutė veiksmingai mažina riedėjimo triukšmo (tipinis dažnių diapazonas nuo 100 iki 5000 Hz), lygį, t. y. nustatytas įneštinis silpninimas yra 7,2–25,1 dB, kai mikrofonas pastatytas 3,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio, ir 6,3–26,0 dBA, kai mikrofonas pastatytas 5,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio. Kai dažnis ≥ 250 Hz, abiejų mikro-

fono padėčių atvejais buvo nustatytas įneštinis silpninimas, ne mažesnis kaip 10,0 dB. Nustatyta, kad mikrofonui esant žemesnėje padėtyje, t. y. 3,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio, daugeliu atvejų įneštinis silpninimas yra didesnis nei esant 5,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio.

3. Aukštos triukšmo mažinimo sienutės yra itin veiksmingos apsaugant greta jų esančias triukšmui jautrias teritorijas. Tačiau tolstant nuo geležinkelio bėgių kelio, įneštinis silpninimas mažėja, o apskaičiuoti įneštinio silpninimo lygiai tampa gana panašūs į kai kurių analizuotų žemų triukšmo mažinimo sienučių įneštinio silpninimo lygius. Lyginant to paties 45 m ilgio sienutes, nustatytas 1,5 m aukštyje nuo bėgių viršaus, 45 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, 3,5 m aukščio tiesios I formos triukšmo mažinimo sienutės (4,0 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies) įneštinis silpninimas (5,2 dBA) yra 20,93 % didesnis nei 1,2 m aukščio tiesios I formos triukšmo mažinimo sienutės (2,6 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies) ir 1,3 m aukščio apverstos L formos triukšmo mažinimo sienutės (3,1 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, gembės ilgis 0,65 m) įneštinis silpninimas (4,3 dBa); 30,0 % nei 1,0 m aukščio apverstos L formos triukšmo mažinimo sienutės (3,75 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, gembės ilgis 0,9 m) įneštinis silpninimas (4,0 dBA); 26,83 % didesnis nei 1,0 m aukščio tiesios triukšmo mažinimo sienutės (2,45 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies) įneštinis silpninimas (4,1 dBA). 45 m ilgio 3,5 m aukščio tiesios I formos triukšmo mažinimo sienutės (4,0 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies) įneštinis silpninimas (5,2 dBA), nustatytas 1,5 m aukštyje nuo bėgių viršaus, 45 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, yra 34,17 % mažesnis nei 100 m ilgio 1,3 m aukščio apverstos L formos triukšmo mažinimo sienutės (2,75 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, gembės ilgis 0,3 m) įneštinis silpninimas (7,9 dBA).

4. Žemos triukšmo mažinimo sienutės su atlenktu link geležinkelių bėgių viršutiniu elementu (gembe) yra didesnio akustinio veiksmingumo nei sienutės su neatlenktu viršutiniu elementu, pavyzdžiui, L formos (gembės ilgis 0,9 m) sienutės, kurios aukštis 1,0 m, ilgis 45 m, įrengtos 3,75 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, įneštinis silpninimas (4,0 dBA), nustatytas 1,5 m aukštyje nuo bėgių viršaus, yra 1,2 karto didesnis nei tų pačių parametrų tiesios I formos sienutės įneštinis silpninimas (3,3 dBA). Analogiškai įneštinis silpninimas (2,5 dBA), nustatytas 3,5 m aukštyje nuo bėgių viršaus, yra 1,28 karto didesnis, o įneštinis silpninimas (1,2 dBa), nustatytas 5,5 m aukštyje nuo bėgių

viršaus, yra net 1,92 karto didesnis nei tų pačių parametrų tiesios I formos sienutės įneštinis silpninimas (4,0 dBA).

5. Atlikus statistinę analizę nustatyta, kad įneštinis silpninimas nuo greičio nepriklauso (p reikšmė, $p = 0.996$), tačiau statistiškai reikšmingai skiriasi priklausomai nuo triukšmo mažinimo sienutės aukščio ($p < 0,0001$), nuo atstumo, kuriuo yra triukšmo mažinimo sienutė ($p < 0,0001$), nuo triukšmo mažinimo sienutės viršutinio elemento atlenkimo kampo ($p < 0,001$). Atlikus porinį palyginimo testą nustatyta, kad apskaičiuotas įneštinis silpninimas skiriasi tik tarp sienučių, kai visai gembės nėra, t. y. gembės atlenkimo kampas yra 0º (įneštinio silpninimo vidurkis 3,36 dBa), ir kai gembės atlenkimo kampas yra 90º (įneštinio silpninimo vidurkis 4,62 dBa). 100 m ilgio triukšmo mažinimo sienutės vidutinis įneštinis silpninimas buvo didesnis nei 45 m ilgio triukšmo mažinimo sienutės vidutinis įneštinis silpninimas, atitinkamai 4,37 ± 3,29 ir 3,49 ± 4,07, tad skirtumą dar galima laikyti statistiškai reikšmingu, t. y. p šiek tiek viršija 0,05 ($p = 0,068$).
6. Atlikus statistinę tiesinę regresinę analizę nustatyta, kad įneštinis silpninimas statistiškai reikšmingai priklauso nuo dviejų kintamųjų triukšmo mažinimo sienutės aukščio ($p < 0,0001$) ir ilgio ($p < 0,0001$). Abu parametrai teigiami, t. y. kuo ilgesnė ir aukštesnė sienutė, tuo didesnis įneštinis silpninimas. Triukšmo mažinimo sienutės aukščiui padidėjus 1 metru, įneštinis silpninimas vidutiniškai padidėja 2,53 dBA, kai kiti parametrai lieka nepakitę. Sienutės ilgiui padidėjus 1 metru, įneštinis silpninimas vidutiniškai padidėja 0,045 dBA, kai kiti parametrai lieka nepakitę. Be to, lyginant triukšmo mažinimo sienutę be gembės su triukšmo mažinimo sienute, kurios gembė atlenkta 90º kampu, nustatyta, kad pastarosios sienutės įneštinis silpninimas yra vidutiniškai 0,6867 dBa didesnis nei sienutės be gembės ($p = 0,02$).

Bendrosios išvados

1. Atlikus triukšmo mažinimo priemonių, taikomų ties geležinkelių bėgių keliais, veiksmingumo tyrimų analizę nustatyta, kad žemos triukšmo mažinimo sienutės tam tikromis sąlygomis gali būti akustiškai veiksmingos, t. y. jų įneštinis silpninimas pakankamas, siekiant apsaugoti nuo triukšmo neigiamo poveikio toliau nuo bėgių kelio esančias triukšmui jautrias teritorijas. Be to, jos gali užtikrinti saugias eismo sąlygas, vizualiai neteršti aplinkos ir leisti sutaupyti įrengimo sąnaudas, lyginant su aukštomis triukšmo mažinimo sienutėmis. Remiantis žemų triukšmo mažinimo sienučių taikymo patirtimi užsienio šalyse ir įvertinus Lietuvos sąlygas, sukurtas žemos triukšmo mažinimo sienutės taikymo algoritmas leidžia greitai ir veiksmingai, atsižvelgiant į vietos sąlygas (ribiniai triukšmo lygiai, riedmenų važiavimo greitis ir kt.), nustatyti, kada žema triukšmo mažinimo sienutė yra tinkamiausia priemonė aplinkai apsaugoti nuo geležinkelių bėgių kelio skleidžiamo triukšmo.

2. Įvertinus eismo saugumą, įgyvendinimo laikotarpį (sudėtingumą), priimtinumą visuomenei bei vizualinį poveikį aplinkai, naudojant daugiakriterį TOPSIS metodą, nustatyta, kad racionaliausia triukšmo mažinimo priemonė yra žema triukšmo mažinimo sienutė (racionalumo koeficientas 0,89). Mažiausiai racionali triukšmo mažinimo priemonė bėgių šlifavimas (racionalumo koeficientas 0,31).

3. Eksperimentiniu tyrimu lauko sąlygomis nustatyta, kad aukšta triukšmo mažinimo sienutė veiksmingai mažina riedėjimo triukšmo (tipinis dažnių diapazonas nuo 100 iki 5000 Hz) lygį. Nustatytas įneštinis silpninimas yra 7,2–

25,1 dBA, kai mikrofonas pastatytas 3,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio, ir 6,3–26,0 dBA, kai mikrofonas pastatytas 5,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio. Kai dažnis ≥ 250 Hz abiejų mikrofono padėčių atvejais buvo nustatytas įneštinis silpninimas ne mažesnis kaip 10,0 dB. Nustatyta, kad mikrofonui esant žemesnėje padėtyje, t. y. 3,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio, daugeliu atvejų įneštinis silpninimas yra didesnis nei esant 5,5 m aukštyje virš bėgių galvutės lygio.

4. Skaitinio modeliavimo eksperimentiniu tyrimu nustatyta, kad aukštos triukšmo mažinimo sienutės yra itin veiksmingos apsaugant greta jų esančias jautrias triukšmui teritorijas. Tačiau tolstant nuo geležinkelių bėgių kelio, jų įneštinis silpninimas mažėja, o apskaičiuoti įneštinio silpninimo lygiai tampa panašūs į tam tikrų parametrų žemų triukšmo mažinimo sienučių įneštinio silpninimo lygius. 3,5 m aukščio 45 m ilgio triukšmo mažinimo sienutės įneštinis silpninimas (5,2 dBA), nustatytas 45 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, yra tik 20,93–30,0 % didesnis nei skirtingų parametrų, bet to paties ilgio 1,0–1,3 m aukščio sienučių įneštinis silpninimas (4,0–4,3 dBA), ir 34,17 % mažesnis nei 100 m ilgio 1,3 m aukščio triukšmo mažinimo sienutės įneštinis silpninimas (7,9 dBA).

5. Atlikus statistinę analizę nustatyta, kad įneštinis silpninimas nuo greičio nepriklauso ($p = 0,996$), tačiau statistiškai reikšmingai skiriasi priklausomai nuo triukšmo mažinimo sienutės aukščio ($p < 0,0001$), nuo atstumo, kuriuo yra triukšmo mažinimo sienutė ($p < 0,0001$), nuo triukšmo mažinimo sienutės viršutinio elemento (gembės) atlenkimo kampo ($p < 0,001$). Apskaičiuotas įneštinis silpninimas statistiškai skiriasi tik tarp sienučių, kurios yra be gembės, t. y. gembės atlenkimo kampas yra 0º (įneštinio silpninimo vidurkis 3,36 dBa), ir kai gembės atlenkimo kampas yra 90º (įneštinio silpninimo vidurkis 4,62 dBa). 100 m ilgio triukšmo mažinimo sienutės vidutinis įneštinis silpninimas buvo didesnis nei 45 m ilgio triukšmo mažinimo sienutės vidutinis įneštinis silpninimas, atitinkamai 4,37 ± 3,29 ir 3,49 ± 4,07, tad skirtumą dar galima laikyti statistiškai reikšmingu ($p = 0,068$).

6. Atlikus statistinę tiesinę regresinę analizę nustatyta, kad įneštinis silpninimas statistiškai reikšmingai priklauso nuo dviejų kintamųjų triukšmo mažinimo sienutės aukščio ($p < 0,0001$) ir ilgio ($p < 0,0001$). Abu parametrai teigiami, t. y. kuo ilgesnė ir aukštesnė sienutė, tuo didesnis įneštinis silpninimas (determinacijos koeficientas $R^2 = 0,67$). Triukšmo mažinimo sienutės aukščiui padidėjus 1 metru, įneštinis silpninimas vidutiniškai padidėja 2,53 dBA, o sienutės ilgiui padidėjus 1 metru, įneštinis silpninimas vidutiniškai padidėja 0,045 dBA, kai kiti parametrai lieka nepakitę. Triukšmo mažinimo sienutės, kurios gembė atlenkta 90º kampu, įneštinis silpninimas yra vidutiniškai 0,6867 dBa didesnis nei sienutės be gembės ($p = 0,02$).

Rekomendacijos

1. Modeliuojant triukšmo mažinimo sienutes didesniu atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, rekomenduojama:

1.1. Numatyti 1,0–1,3 m aukščio triukšmo mažinimo sienutę, siekiant užtikrinti geras saugaus eismo sąlygas ir išlaikyti vizualinę estetiką.

1.2. Parinkti 25–30 m ilgesnę triukšmo mažinimo sienutę nei apsaugomos triukšmui jautrios teritorijos, kad jos nebūtų paveiktos geležinkelių bėgių kelio triukšmo, skleidžiamo riedmenims pravažiavus sienutę.

1.3. Tuo atveju, jeigu numatyta triukšmo mažinimo sienutė nepasiekia reikiamo įneštinio silpninimo lygio, numatyti sienutę su apverstos L formos viršutiniu elementu (gembe), atlenktu 90º kampu link geležinkelių bėgių kelio. Šio elemento ilgis turi būti toks, kad jis nepatektų į geležinkelių bėgių kelio gabaritą.

2. Rekomenduojama toliau tęsti mokslinius tyrimus su sienutėmis, kurių garso sugerties koeficientai skirtingi, panaudojant kitokios formos viršutinius elementus.

3. Rekomenduojama įrengti eksperimentinę 1,0–1,3 m aukščio triukšmo mažinimo sienutę 2,45–3,1 m atstumu nuo geležinkelių bėgių kelio ašies, siekiant nustatyti įneštinio silpninimo vertes realiomis sąlygomis.

Literatūra ir šaltiniai

AB „Lietuvos geležinkeliai“. (2001). *Statinių artumo gabaritų taikymo instrukcija 163/K* (2001, lapkričio 26, Nr. 456).

Andersson, H., Jonsson, L., & Ögren, M. (2013). Benefit measures for noise abatement: Calculations for road and rail traffic noise. *European Transport Research Review, 5*, 135–148. https://doi.org/10.1007/s12544-013-0091-3

Andrés, V.T., Martínez-Casas, J., Denia, F.D., & Thompson, D.J. (2022). Influence study of rail geometry and track properties on railway rolling noise. *Journal of Sound and Vibration, 525*(116701). https://doi.org/10.1016/j.jsv.2024.118738

Andrés, V.T., Martínez-Casas, J., Denia, F.D., Thompson, D.J., & Bruni, S. (2025). Railway rolling noise in curved tracks: Dynamic modelling of the wheelset and influence of the curve. *Journal of Sound and Vibration*, *595*(118738). https://doi.org/10.1016/j.jsv.2024.118738

Association Francaise de Normalisation. (2013). *Acoustics - outdoor noise - calculation of sound levels* (NFS 31 133: 2011).

Austrian Standards International. (2009). Berechnung der Schallimmission durch Schienenverkehr - Zugver-kehr, Verschub- und Umschlagbetrieb (ONR 305011:2009). https://www.austrian-standards.at/de/shop/onr-305011-2009-11-15~p1727346

Bagheri, V. R., Younesian, D., & Tehrani, P. H. (2018). A new methodology for the estimation of wheel rail contact forces at a high-frequency range. *Proceedings of the*

Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 232(10), 2353–2370. https://doi.org/10.1177/0954409718771746

Baldauf, R. W., Isakov, V., Deshmukh, P., Venkatram, A., Yang, B., & Zhang, K. M. (2016). Influence of solid noise barriers on near-road and on-road air quality. *Atmospheric Environment, 129*, 265–276. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.01.025

Balioti, V., Tzimopoulos, C., & Evangelides, C. (2018). Multi-Criteria Decision Making Using TOPSIS Method Under Fuzzy Environment. Application in Spillway Selection. Iš *The 3rd EWaS International Conference on "Insights on the Water-Energy-Food Nexus". Proceedings 2018, 2*(11), 637. https://doi.org/10.3390/proceedings2110637

Baulac, M., Defrance, J. & Jean, P. (2005). Optimization of low height noise protections in urban areas. Iš *Acta Acustica united with Acustica, 86*(5), 811–820. http://www.conforg.fr/acoustics2008/cdrom/data/fa2005-budapest/paper/355-0.pdf

Baulac, M., Defrance, J., Jean, P., Margiocchi, F., & Poisson, F. (2009). Noise Impact of innovative barriers dedicated to freight trains in urban areas. Iš *16th International Congress on Sound and Vibration (ICSV16)*, 8. https://www.proceedings.com/content/006/006894webtoc.pdf

Beimer, W., & Maennig, W. (2017). Noise effects and real estate prices: A simultaneous analysis of different noise sources. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 54*, 282–286. https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.05.010

Brons, M. , Nijkamp, P., Pels, E., & Rietveld, P. (2003). Railroad noise: Economic valuation and policy. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 8*(3), 169–184. https://doi.org/10.1016/S1361-9209(02)00048-2

Busch, T. A., & Nugent R. E. (2003). A reduced-scale railway noise barrier's insertion loss and absorption coefficients: comparison of field measurements and predictions. *Journal of Sound and Vibration 267*(3), 749–759. https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00738-7

Cerletti, P., Eze, I. C., Schaffner, E., Foraster, M., Viennau, D., Cajochen, C., Wunderli, J.-M., Röösli, M., Stolz, D., Pons, M., Imboden, M., & Probst-Hensch, N. (2020). The independent association of source-specific transportation noise exposure, noise annoyance and noise sensitivity with health-related quality of life. *Environment International, 143*, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105960

Chang, J. S., & Kim, D. (2012). Hedonic estimates of rail noise in Seoul. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 19*, 1–4. https://doi.org/10.1016/j.trd.2012.11.002

Clausen, U., Doll, C., Franklin, F. J., Franklin, G. V., Heinrichmeyer, H., Kochsiek, J., Rothengatter, W., & Sieber, N. (2012). *Reducing railway noise pollution. Directorate general for internal policies. Policy department B: structural and cohesion policies. Transport and tourism.* Directorate-General for Internal Policies of the Union (European Parliament). https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/eb80e515-ab88-4983-91df-bce339307f7d

Conter, M., Garai, M., Clairbois, J.-P., Fuchs, A., Guidorzi, P., Strigari, F., Chudalla, M., Brero, G., & Nicodème, C. (2023). SOPRANOISE a New Quick Method for Measuring the Acoustic Quality of Noise Barriers In-Situ. *Transportation Research Procedia, 72*, 642–649. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.450

CROW-stuurgroep Reken en Meetvoorschriften. (2006). Technische Regeling Emissie Meetmethoden Railverkeer. CROW. https://wetten.overheid.nl/BWBR0020773/2012-04-01

Cushing-Daniels, B., & Murray, P. (2005). Welfare effects of increased train noise: A comparison of the costs and benefits of train whistle use at highway railway crossings. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 10*(5), 357–364. https://doi.org/10.1016/j.trd.2005.04.006

Čekanavičius, V., & Murauskas G. (2001). *Statistika ir jos taikymai 1 knyga*. TEV.

Čekanavičius, V., & Murauskas G. (2014). *Taikomoji regresinė analizė socialiniuose tyrimuose*. Vilniaus universiteto leidykla.

Čižkova, P. & Štulikova, L. (2014). The effectiveness of a low height noise barrier. In *14th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM).* ISSN, (pp. 711–718). https://doi.org/10.5593/SGEM2014/B52/S20.094

Čižkova, P. (2016). The acoustic effectiveness of low height noise barrier. In *Inter-Noise16. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, (pp. 3985–3992). https://www.ingentaconnect.com/contentone/ince/incecp/2016/00000253/00000004/art00015?crawler=true

Dash, A., & Elsinga, G. E. (2018). Air pollutant sinks on noise barriers: Where do they perform the best? *Atmospheric Environment, 187*, 144–154. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.05.041

Department of Transport. (1995). *Calculation of railway noise 1995*. The Stationery Office Ltd. ISBN 9780115517549

Dobson M., & Ryan. J. (2000). *Trees & shrubs for noise control*. Trees in Focus. Practical care and management. Arboricultural Advisory and Information Service. https://www.trees.org.uk/Trees.org.uk/files/8c/8c69f212-a82e-424b-96d1-c8ff6dc02403.pdf

Džambas, T., Lakušić, S., & Dragčević, V. (2018). Traffic noise analysis in railway station zones. *Applied Acoustics, 137*, 27–32. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.03.006

Elmenhorst, E.-M., Pennig, S., Rolny, V., Quehl, J., Mueller, U., Maass, H., & Basner, M. (2012). Examining nocturnal railway noise and aircraft noise in the field: sleep, psychomotor performance, and annoyance. *The Science of the Total Environment, 424*, 48–56. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.02.024

Enayati Ahangar, F., Heist, D., Perry, S., & Venkatram, A. (2017). Reduction of air pollution levels downwind of a road with an upwind noise barrier. *Atmos Environ (1994). 2017, 155*(137), 1–10. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.02.001

Erdmann, F., Raaschou-Nielsen, O., Hvidtfeldt, U. A., Ketzel, M., Brandt, J., Khan, J., Schüz, J., & Sørensen, M. (2022). Residential road traffic and railway noise and risk of childhood cancer: A nationwide register-based case-control study in Denmark. *Environmental Research, 212*(A). 11. https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113180

Estonian, Latvian & Lithuanian Environment. (2012). *Aplinkos triukšmo prevencijos veiksmų organizavimo ir įgyvendinimo pavyzdinis modelis*. Nacionalinis visuomenės sveikatos centras prie Sveikatos apsaugos ministerijos. https://nvsc.lrv.lt/uploads/nvsc/documents/files/Aplinkos%20triuk%C5%A1mo%20prevencijos%20veiksm%C5%B3%20organizavimo%20ir%20%C4%AFgyvendinimo%20pavyzdinis%20modelis.pdf

Esveld, C. (2001). *Modern railway track* (2nd edition). MRT-productions.

Europos Komisija. (2003). *Komisijos rekomendacija 2003/613/EB dėl gairių pramonės, orlaivių, kelių ir geležinkelių transporto keliamo triukšmo patikslintiems tarpiniams skaičiavimo metodams ir su emisija susijusių duomenų* (OL 2003 L 212, 49). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32003H0613

Europos Komisija. (2006). *Europos Komisijos sprendimas 2006/66/EB dėl transeuropinių paprastųjų geležinkelių posistemio „Riedmenys: triukšmas“ techninių sąveikos specifikacijų* (Document 32006D0066). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX%3A32006D0066

European Commission. (2011). *Roadmap to a Single European Transport Area Towards a competitive and resource efficient transport system.* [White paper]. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52011DC0144

Europos Parlamentas ir Europos Sąjungos Taryba. (2002). *Europos Parlamento ir Komisijos direktyva 2002/49/EB dėl aplinkos triukšmo įvertinimo ir valdymo* (Document 32002L0049). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX:32002L0049

Europos bendrijų komisija. (2008) *Europos bendrijų komisijos komunikate Europos Parlamentui ir Tarybai* (KOM(2008) 432). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX:52008DC0432

Europos Parlamentas ir Europos Sąjungos Taryba. (2008). *Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2008/57/EB dėl geležinkelių sistemos sąveikos Bendrijoje* (Document 32008L0057). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0057

Europos Komisija. (2014). *Komisijos reglamentas (ES) Nr. 1299/2014 dėl Europos Sąjungos geležinkelių sistemos infrastruktūros posistemio techninės sąveikos specifikacijos* (Document 32014R1299). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX:32014R1299

Europos Komisija. (2014). *Komisijos reglamentas (ES) Nr. 1304/2014 dėl posistemio „Geležinkelių riedmenys. Triukšmas“ techninės sąveikos specifikacijos, kuriuo iš dalies keičiamas Sprendimas 2008/232/EB ir panaikinamas Sprendimas 2011/229/ES*

(Document 32014R1304). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2014.356.01.0421.01.LIT

Europos Komisija. (2015). *Komisijos direktyva (ES) 2015/996, kuria pagal Europos Parlamento ir Tarybos direktyvą 2002/49/EB nustatomi bendrieji triukšmo įvertinimo metodai* (Document 32015L0996). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX:32015L0996

Fang, W., Martinez-Casas, J. & Bruni, S. (2017). A Time-Domain Model for the Study of High-Frequency Wheelset–Track Interaction. *Urban Rail Transit, 3*, 203–213. https://doi.org/10.1007/s40864-017-0049-1

Faulkner, J.-P., Murphy. E., Rice, H. J., Kennedy, J., & Bourke, E. (2023). Assessing rail-based environmental noise exposure using CNOSSOS-EU. *Applied Acoustics*, *207*(109322). https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109322

Field, A., P. (2005). Kendall's Coefficient of Concordance. In B. Everitt, & D. Howell (Ed.), *Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science*. John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/0470013192.bsa327

Fitzgerald, B. M. (1996). The Development and Implementation of Noise Control Measures on an urban railway. *Journal of sound and vibration*, *193*(1), 377–385. https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0278

Fiorini, C. V. (2022). Railway noise in urban areas: assessment and prediction on infrastructure improvement combined with settlement development and regeneration in central Italy. *Applied Acoustics*, *185*(108413). https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108413

Geiger, P., Moheit, L., & Garburg, R. (2020). *Future Improvement for Energy and Noise Grant Agreement*. Shift2Rail project FINE 1. Future Improvement for Energy and Noise.

Geležinkelių apsaugos centras. (2014). *Lietuvos geležinkelių transporto sektoriaus ilgalaikės strategijos iki 2030 m Strateginių pasekmių aplinkai vertinimo ataskaita*.

Grassie, S. L. (1996). Models of railway track and vehicle/track Interaction at high frequencies: Results of Benchmark Test. *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, *25*(1), 243–262. https://doi.org/10.1080/00423119608969199

Grubliauskas R. (2009). *Aplinkos triukšmo ir jo mažinimo taikant lengvas konstrukcijas, tyrimai bei skaitinis modeliavimas.* [Daktaro disertacija, Vilniaus Gedimino technikos universitetas]. Lietuvos akademinė elektroninė biblioteka. https://vb.vgtu.lt/object/elaba:1873628/1873628.pdf

Grubliauskas, R., Strukcinskiene, B., Raistenskis, J., Strukcinskaite, V., Buckus, R., Janusevicius, T., & Pereira, P. A. D. (2014). Effects of urban rail noise level in a residential area. *Journal of vibroengineering, 16*, 987–996. https://www.extrica.com/article/14612

Guiral, A., & Alonso, A. (2018). CRoNoS railway rolling noise prediction tool: wheelset model assessment. In *Euronoise 2018*, *8*, (pp. 1471–1478). https://www.euronoise2018.eu/docs/papers/246_Euronoise2018.pdf

Han, J., He, Y., Xiao, X., Sheng, X., Zhao, G. & Jin, X. (2017). Effect of control measures on wheel/rail noise when the vehicle curves. *Applied sciences, 7*(11), 1144–1164. https://doi.org/10.3390/app7111144

Han, J., Zhong, S. Q., Zhou, X., Xiao, X. B., Zhao, G. T., & Jin, X. S. (2017). Time-domain model for wheel-rail noise analysis at high operation speed. *Journal of Zhejiang university-science A, 18*, 593–602. https://doi.org/10.1631/jzus.A1600692

Hemsworth, B. (2003). *Strategies and Tools to Assess and Implement Noise Reducing Measures for Railway Systems*. STAIRRS. Final technical report. European Rail Research Institute. https://uic.org/IMG/pdf/rapport_final_stairrs.pdf

Hemsworth, B. (2008). *Environmental Noise Directive Development of Action Plans for Railways*. International Union of Railways (UIC). https://uic.org/IMG/pdf/action_planning_paper_final-2.pdf

Heutschi, K., Bühlmann, E., & Oertli, J. (2016). Options for reducing noise from roads and railway lines. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, 94*, 308–322. https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.09.019

Hong, J. Y., & Jeon, J. Y. (2014). The effects of audio-visual factors on perceptions of environmental noise barrier performance. *Landscape and Urban Planning, 125*, 28–37. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.02.001

Hothersall, D. C., Horoshenkov, K. V., Morgan, P. A., & Swift, M. J. (2000). Scale modelling of railway noise barriers. *Journal of sound and vibration, 234*(2), 207 223. https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2886

International Organization for Standardization. (1996). *Acoustics attenuation of sound during propagation outdoors Part 2: general method of calculation* (ISO 9613-2:1996). https://www.iso.org/standard/20649.html

International Organization for Standardization. (1997*). Acoustics — Measurement of the in situ sound attenuation of a removable screen* (ISO 11821:1997). https://www.iso.org/standard/20230.html

International Organization for Standardization. (2013*). Acoustics — Railway applications — Measurement of noise emitted by railbound vehicles* (ISO 3095:2013). https://www.iso.org/standard/55726.html

Jabben, J., & Potma, C. J. M. (2004). *Monitoring Noise Emissions from Railway lines.* Special issue 2.

Jagniatinskis, A., Fiks, B., & Zaporozhets, O. (2017). Annual assessment of transport noise using representative time measurements. *Procedia Engineering, 134*, 301–308. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.011

Jiang, S., Meehan, P. A., Thompson, D. J., & Jones C. J. C. (2011). Railway rolling noise prediction under European conditions. *Proceedings of ACOUSTICS 2011, 51*, (pp. 1–8). https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2011/papers/p51.pdf

Jiang, S., Meehan, P. A., Bellette, P. A., Thompson, D. J., & Jones, C. J. C. (2014). Validation of a prediction model for tangent rail roughness and noise growth. *Wear, 314*(1–2), 261–272. https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.038

Jin, B. J., Kim, H. S., Kang, H. J., & Kim, J. S. (2001). Sound diffraction by a partially inclined noise barrier. *Applied acoustics, 62*(9), 1107–1121. https://doi.org/10.1016/S0003-682X(00)00094-3

Jolibois, A. (2013). *A study on the acoustic performance of tramway low-height noise barriers: gradient-based numerical optimization and experimental approaches*. [Daktaro disertacija, Université Paris-Est]. https://pastel.hal.science/pastel-00965168/file/TH2013PEST1116_complete.pdf

Jolibois, A. (2014). *A sensitivity-based approach to optimize the surface treatment of a low-height tramway noise barrier*. [Daktaro disertacija, Pennsylvania State University]. https://www.proquest.com/docview/1467750813

Jolibois, A., Defrance, J., Koreneff, H., Jean, P., Duhamel, D., & Sparrow, V. W. (2015). In situ measurement of the acoustic performance of a full scale tramway low height noise barrier prototype. *Applied acoustics, 94*, 57–68. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.02.006

Jonasson, H. G., & Storeheier, S. (2001). *New Nordic prediction method for road traffic noise*. SP Rapport.
https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1190134&dswid=7430

Jones, C. J. C., Thompson, D. J., & Waters, T. P. (2001). Application of numerical models to a system of train- and track-mounted acoustic shields. *International Journal of Acoustics and Vibration, 6*(4), 185-192. https://eprints.soton.ac.uk/9981/

Jones, C. J. C. & Thompson, D. J. (2003). Extended validation of a theoretical model for railway rolling noise using novel wheel and track designs. *Journal of Sound and Vibration; 267*(3), 509–522. https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00711-9

Kacprzak, D. (2019). A doubly extended TOPSIS method for group decision making based on ordered fuzzy numbers. *Expert Systems with Applications, 116*, 243–254. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.09.023

Kitagawa, T. & Thompson, D. J. (2005). Comparison of wheel/rail noise radiation on Japanese railways using the TWINS model and microphone array measurements. *Journal of Sound and Vibration 2006, 293*(3–5), 496–509. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.08.037

Knothe, K. L., & Grassie, S. L. (1993). Modelling of Railway Track and Vehicle/Track Interaction at High Frequencies. *Vehicle System Dynamics, 22*(3–4), 209–262. https://doi.org/10.1080/00423119308969027

Knuth, C., Squicciarini, G., Thompson, D., & Baeza, L. (2024). Effects of rotation on the rolling noise radiated by wheelsets in high-speed railways. *Journal of Sound and Vibration, 572*(118180). https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.118180

Kokkonen, J. (2018). CNOSSOS-EU noise model implementation in Finland and experience of it in 3rd END round. In *Euronoise 2018*, 6, (pp. 1219–1224). https://www.euronoise2018.eu/docs/papers/207_Euronoise2018.pdf

Kotzen, B., English, C., & Custard, G. (2009). *Environmental noise barriers: A guide to their acoustic and visual design* (2nd edition). CRC Press. https://doi.org/10.3397/1.3484864

Krohling, R. A. & Pacheco, A. G. C. (2015). A-TOPSIS An approach based on TOPSIS for ranking evolutionary algorithms. *Procedia Computer Science, 55*, 308–317. https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.054

Lázaro, J., Pereira, M., Costa, P. A., & Godinho, L. (2022). Performance of Low-Height Railway Noise Barriers with Porous Materials. *Applied Sciences, 12*(6), 2960, 1–18. https://doi.org/10.3390/app12062960

Lee. H. P., Lim, K. M., & Kumar, S. (2021). Noise assessment of elevated rapid transit railway lines and acoustic performance comparison of different noise barriers for mitigation of elevated railway tracks noise. *Applied Acoustics*, *183*(108340). https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108340

Legrende, P. (2005). The Kendall Coefficient of Concordance Revisited. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics, 10*(2), 226–245. https://doi.org/10.1198/108571105X46642

Le Prell, C. G., & Clavier, O. H. (2017). Effects of noise on speech recognition: Challenges for communication by service members. *Hearing Research, 349*, 76–89. https://doi.org/10.1016/j.heares.2016.10.004

Li, X., Hu, X., & Zheng, J. (2020). Statistical energy method for noise reduction performance of the vertical noise barrier alongside railway bridges. *Applied Acoustics*, *170*(107503). https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107503

Licitra, G., Fredianelli, L., Petri, D., & Vigotti, M. A. (2016). Annoyance evaluation due to overall railway noise and vibration in Pisa urban areas. *Science of The Total Environment, 568*, 1315–1325. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.071

Lietuvos automobilių kelių direkcija. (2010). *Aplinkosauginių priemonių projektavimo, įdiegimo ir priežiūros rekomendacijos. Kelių eismo triukšmo mažinimas APR-T 10* (2010, balandžio 1, Nr. V-88). https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.369314

Lietuvos automobilių kelių direkcija. (2015). *Dėl Triukšmo užtvarų parinkimo, modeliavimo, projektavimo ir įrengimo taisyklių T TU 15 patvirtinimo* (Nr. V(E)-18). https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/a5464420451a11e59cf1cfda14b526c5?jfwid=q86m1vqqw

Lietuvos Respublikos susisiekimo ministerija. (2004). *Dėl Geležinkelio stočių projektavimo taisyklių patvirtinimo* (Nr. 3-25/D1-249). https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.236475?jfwid=

Lietuvos Respublikos sveikatos apsaugos ministerija. (2011). *Dėl Lietuvos higienos normos HN 33:2011 "Triukšmo ribiniai dydžiai gyvenamuosiuose ir visuomeninės paskirties pastatuose bei jų aplinkoje" patvirtinimo* (Nr. V-604). https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.402074

Lietuvos Respublikos Seimas. (2004). *Lietuvos Respublikos triukšmo valdymo įstatymas* (Nr. IX-2499). https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.244674/asr

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2003). *Elektroakustika. Etaloninio garso šaltiniai* (IEC 60942:2003). (LST EN 60942:2003).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2006). *Akustika. Visų tipų išorės triukšmo užtvarų įneštinio silpninimo nustatymas realioje aplinkoje (tapatus ISO 10847:1997)*. (LST ISO 10847:2006).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2013). *Akustika. Geležinkelio taikmenys. Bėginių transporto priemonių skleidžiamo triukšmo matavimas*. (LST EN ISO 3095:2013).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2014). *Elektroakustika. Garso lygio matuokliai. 1 dalis. Techniniai reikalavimai (IEC 61672-1:2013)*. (LST EN 61672-1:2014).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2014). *Geležinkelio taikmenys. Bėgių kelias. Triukšmo užtvaros ir susiję įtaisai, sulaikantys ore sklindantį garsą. Bandymo metodas akustinėms charakteristikoms nustatyti. 3-2 dalis. Standartizuotas geležinkelio triukšmo spektras ir vienparametriai įverčiai, taikomi tiesioginio garso lauke*. (LST EN 16272-3-2:2014).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2015). *Geležinkelio taikmenys. Bėgių kelias. Triukšmo užtvaros ir susiję įtaisai, sulaikantys ore sklindantį garsą. Bandymo metodas akustinėms charakteristikoms nustatyti. 7 dalis. Papildomos charakteristikos. Vietoje nustatomos įneštinio silpninimo vertės*. (CEN/TS 16272-7:2015).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2017). *Akustika. Aplinkos triukšmo aprašymas, matavimas ir vertinimas. 1 dalis. Pagrindiniai dydžiai ir vertinimo procedūros (tapatus ISO 1996-1:2016)*. (LST ISO 1996-1:2017).

Lietuvos standartizacijos departamentas. (2017). *Akustika. Aplinkos triukšmo aprašymas, matavimas ir vertinimas. 2 dalis. Garso slėgio lygių nustatymas*. (LST ISO 1996-2:2017).

Louen, C., Wehrens, A., & Vallée, D. (2014). Analysis of the effectiveness of different noise reducing measures based on individual perception in Germany. *Transportation Research Procedia, 4,* 472–481. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.11.036

Łowicki, D., & Piotrowska, S. (2015). Monetary valuation of road noise. Residential proper-ty prices as an indicator of the acoustic climate quality. *Ecological Indicators, 52*, 472–479. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.01.002

Lui, W. K., Li, K. M. Ng, P. L., & Frommer, G. H. (2006). A comparative study of different numerical models for predicting train noise in high-rise cities. *Applied Acoustics, 67(5)*, 432–449. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2005.08.005

Luo, Y.-K., Song, L.-Z., Zhang, C., & Ni, Y.-Q. (2023). Experimental evaluation and numerical interpretation of various noise mitigation strategies for in-service elevated suburban rail. *Measurement, 219 (113276)*. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113276

Milford, I., Aasebo, Sigve J., & Strommer, K. (2012). Value for money in road traffic noise abatement. *Procedia Social and Behavioral Sciences 48(2012)*, 1366–1374. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.1112

Ministr Środowiska. (2014). Dopuszczalne poziomy hałasu w środowisku [Permissible Noise Levels in the Environment]. https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20140000112/O/D20140112.pdf

Mohler, U., Liepert, M., & Onnish, H. (2009). *Schall 03 1990 versus Schall 03 2006: A Comparison of the Calculation Methods for Railway noise with Noise level Measurements.* https://pub.dega-akustik.de/NAG_DAGA_2009/data/articles/000115.pdf

Mohler, U., Liepert, M., Skowronek, V., Muller, U. & Schreckenberg, D. (2018). Maximum sound pressure level as an additional criterion for the assessment of railway noise at night: Acoustic criteria for the maximum-level in regulations. In *Euronoise 2018, 4*. http://mopa.de/files/2018/07/1806_Euronoise-Maximum-sound-pressure-level-as-an-additional-criterion-for-the-assessment-of-railway-noise-at-night.pdf

Moretti, M., Arendt, F., Malm, G., Garrod, T., Gilbert, T., Coart, F., Doppelbauer, J., Choumert, D., Lehmann, E., Depledge, A., Pepy, G., & Citroën, P. (2013). *Challenge 2050. The rail sector vision.* Community of European Railway and Infrastructure Companies (CER), European Infrastructure Managers (EIM) and International Union of Railways (UIC). https://uic.org/europe/IMG/pdf/europe_challenge2050.pdf

Morgan S. M. & Kay D. H.; Narayan Bodapati, S. (2001). Study of noise barrier life-cycle costing. *Journal of Transportation Engineering, 127(3)*, 230–236. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2001)127:3(230)

Morgan, A. P. & Peeling, J. (2012). *Railway noise mitigation: Low-height noise barriers* [Factsheet 03]. http://www.51m.co.uk/wp-content/uploads/2013/08/Factsheet-03-nov-2012-Low-Height-Noise-Barriers.pdf

Müller, U., Schreckenberg, D., Möhler, U., & Liepert, M. (2018). Maximum-level as an additional criterion for the assessment of railway noise at night: Derivation of a wake-up protection criterion for standards and regulations. In *Euronoise 2018, 6,* (pp. 503–507). https://www.euronoise2018.eu/docs/papers/87_Euronoise2018.pdf

Munteanu, C., Mihaela, M. L., Tămaş-Gavrea, D. R., Cobîrzan, N., Chiuzbaian, R., & Fernea, R. (2018). Protection to railway traffic noise in the case of a multilevel residential building from the city of Cluj-Napoca. *Procedia Manufacturing, 22*, 339–346. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.051

Nagakura, K., & Zenda, Y. (2003). Prediction model of wayside noise level of Shinkansen. In N. Chouw & G. Schmid (Eds.), *Wave 2002: Wave Propagation - Moving Load - Vibration Reduction*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003211372

Nelson, J. T. (1997). *Wheel/rail noise control manual (TCRP Report 23)*. Transportation Research Board. https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp_rpt_23.pdf

Nielsen, H. L. (1997). *Road traffic noise: Nordic prediction method (TemaNord: 1996:525)*. The Stationery Office Books (Agencies). ISBN 13: 9789291208364.

Nieuwenhuizen, E., & Yntema, N. (2018). *The effect of close proximity, low height barriers on railway noise.* In *Euronoise 2018*, *6*, (pp. 1375–1379). https://www.euronoise2018.eu/docs/papers/230_Euronoise2018.pdf

Nieves, J. G., Picó, R., Rey, R. D., Alba, J., & Redondo, J. (2024). Assessment of the sound reduction index provided by noise barriers with low sound insulation. *Applied Acoustics, 220*(109967). https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2024.109967

Nilsson, N. A. (2009). General measures for noise mitigation. *Quiet City Transport. QCITY*. 137. https://www.qcity.org/downloads/260110/qcity-brochure_final.pdf

Nilsson, M., Bengtsson, J., & Klaeboe, R. (2014). *Environmental methods for transport noise reduction*. CRS Press. https://doi.org/10.1201/b17606

Nordborg, A. (2002). Wheel/rail noise generation due to nonlinear effects and parametric excitation. *The Journal of the Acoustical Society of America 2002, 212*(4), 1772–1781. https://doi.org/10.1121/1.1459463

Oertli, J., & Hubner, P. (2010). *Railway noise in Europe. A 2010 report in the state of art. First edition.* International Union of Railways (UIC). https://uic.org/IMG/pdf/uic_railway_noise_the_state_of_the_art_2010.pdf

Oertli, J., & Scossa-Romano, E. (2012). *Rail Dampers, Acoustic Rail Grinding , Low Height Noise Barriers. A report on the state of the art.* International Union of Railways (UIC). https://www.uic.org/IMG/pdf/2012_dampers_grinding_lowbarriers.pdf

Olandijos nacionalinė skaičiavimo metodika „Geležinkelio transporto triukšmo apskaičiavimo ir matavimo rekomendacijos“. (1996). Nyderlandų karalystės būsto, teritorijų planavimo ir aplinkos ministerija. („Reken- en Meetvoorschrift Railverkeerslawaai ’96, Ministerie Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 20 November 1996“).

Pascale. A., Guarnaccia, C., & Coelho, M. C. (2024). Analysis of single vehicle noise emissions in the frequency domain for two different motorizations. *Journal of Environmental Management, 370*(122905). https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122905

Pavić, Z. & Novoselac, V. (2013). Notes on TOPSIS Method. *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES), 1*(2), 05–12. https://www.ijres.org/papers/v1-i2/B120512.pdf

Peeters, B. & van Blokland G. (2018*). Correcting the CNOSSOS-EU road noise emission values*. In *Euronoise 2018, 8,* (pp. 1245–1251). https://www.euronoise2018.eu/docs/papers/211_Euronoise2018.pdf

Pelegrina, G. D., Duarte, L. T., & Romano, J. M. T. (2019). Application of independent component analysis and TOPSIS to deal with dependent criteria in multicriteria decision problems. *Expert Systems with Applications, 122*, 262–280. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.01.008

Peplow, A., Persson, P., & Andersen, L. V. (2021). Evaluating annoyance mitigation in the screening of train-induced noise and ground vibrations using a single-leaf traffic barrier. *Science of The Total Environment, 790*(147877). https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147877

Piechowicz, J. (2011). Sound wave diffraction at the edge of a sound barrier. *Acta Physica Polonica A 2011, 119*(6A), 1040–1045. https://doi.org/10.12693/APhysPolA.128.A-36

Piechowicz, J. (2015). Sound diffraction over noise barriers with added devices installed on the top edge with added devices installed on the top edge. *Acta Physica Polonica A 2015, 128*(1A), 36–40. https://doi.org/10.12693/APhysPolA.128.A-36

Pieren, R., Lauper, D., & Heutschi, K. (2018). Demonstrator for rail vehicle pass-by events. In *Euronoise 2018,* (pp. 1409–1414). https://www.euronoise2018.eu/docs/papers/236_Euronoise2018.pdf

Pieringer, A. On the modelling of wheel/rail noise. *AIA-DAGA (2013), Merano*, 56–59. https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/176336/local_176336.pdf

Podvezko, V. (2005). Agreement of expert estimates. *Technological and Economic Development of Economy, 11*(2), 101–107. https://doi.org/10.3846/13928619.2005.9637688

Podvezko, V. (2008). Comprehensive evaluation of complex quantities. *Business: Theory and Practice, 9*(3), 160–168. https://doi.org/10.3846/1648-0627.2008.9.160-168

Pons-Rigat, A., Turró, M., Saurí, S. & Ubalde, L. (2017). Environmental rail charges in Europe: a review. *Transport reviews*. 667–684. https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1289991

Profillidis, V. A. (2006). *Railway Management and Engineering* (3rd edition). Ashgate Publishing Limited. Ashgate Publishing Company.

Pultznerová, A., & Ižvolt, L. (2014). Structural modifications, elements and equipment for railway noise reduction. *Procedia Engineering, 91*, 274–279. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.059

Qin, M., Wang, J., Deng, Q., & Cai, J. Insert loss experiment and acoustic impedance theoretical study on the noise barrier with MPP-QRD top structure. *Applied Acoustics, 221*(109996). https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2024.109996

Remington, P., & Webb, J. (1996). Wheel/rail noise reduction through profile modification. *Journal of Sound and Vibration 193*(1), 335–348. https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0274

Ringheim, M. (1996). The new Nordic prediction method for railway noise. *Journal of Sound and Vibration, 193*(1), 277–282. https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0268

International Union of Railways (UIC). (2013). *The real cost of railway noise mitigation: A risk assessment.* https://uic.org/IMG/pdf/ba7041-101-100-md-af20130168-lok__final_report_uic_real_costs_30jan13.pdf

Sainz, M. (2012). Limit values summary. *Eionet Forum. ETC Spatial Information and Analysis*. https://forum.eionet.europa.eu/

Salih, M. M., Zaidan, B.B., Zaidan, A.A., & Ahmed, M. A. (2019). Survey on Fuzzy TOPSIS State-of-the-Art between 2007–2017. *Computers and Operations Research 104*(2019), 207–227. https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.12.019

Salomons, E., & Eisses, A. (2018). Investigations of the CNOSSOS sound propagation model. In *Euronoise 2018, 8*, (pp. 1253–1260). https://www.euronoise2018.eu/docs/papers/212_Euronoise2018.pdf

Schreckenberg, D., Belke, Ch., Benz, S., Möhler, U., Müller, U., & Liepert, M. (2018). Maximum-level as an additional criterion for the assessment of railway noise at night: Definition of sleep quality and derivation of a protection criterion based on reported sleep disturbances for standards and regulations. In *Euronoise 2018, 16*, (509–513). https://www.euronoise2018.eu/docs/papers/88_Euronoise2018.pdf

Schwanen, W., Yntema, N., & Wijnant, Y. (2018). Whisswall, a sound diffractor on a low height noise barrier: experimental testing. In *Euronoise 2018, 6*, (pp. 1443–1447). https://www.euronoise2018.eu/docs/papers/241_Euronoise2018.pdf

Serraris, J. (2016). Propagation of sound around different noise barrier models using a three-dimensional scan based sound visualization technique. *Noise control engineering journal, 64*(2), 134–141. https://doi.org/10.3397/1/376366

Siciliano, G., Barontini, F., Islam, D. M. Z., Zunder, T. H., Mahler, S. & Grossoni, I. (2016). Adapted cost-benefit analysis methodology for innovative railway services. *European Transport Research Review, 8*(23), 14. https://doi.org/10.1007/s12544-016-0209-5

Simanavičienė, R., & Cibulskaitė, J. (2015). Sprendimo, gauto TOPSIS metodu, patikimumo statistinė analizė. *Lithuanian Journal of Statistics 2015, 54*(1), 110–118. https://doi.org/10.15388/LJS.2015.13886

Sivilevičius, H., & Martišius, M. (2023). The Significance of the Factors Increasing the Asphalt Pavement Recycling Rate in the Country, Determined Using Multiple-Criteria Decision-Making Methods. *Applied Sciences 13*(22), 1–24. https://doi.org/10.3846/tede.2024.21881

Sivilevičius, H., Vaitkus, A., & Čygas, D. (2024). Modeling and significance assessment of road construction participant and user benefits using expert evaluation methods.

T*echnological and economic development of economy 2024, 30*(5), 1486–1509. https://doi.org/10.3846/tede.2024.21881

Sorensen, M., Hvidberg, M., Hoffmann, B., Andersen, Z. J., Nords-borg, R. B., Lillelund, K. G., Jakobsen, J., Tjønneland, A., Overvad, K., & Raaschou-Nielsen, O. (2011). Exposure to road traffic and railway noise and associations with blood pressure and self-reported hypertension: a cohort study. *Environmental Health: A Global Access Science Source, 10*, 92. https://doi.org/10.1186/1476-069X-10-92

New South Wales Environment Protection Authority (NSW EPA). (2013). *Rail Infrastructure Noise Guideline. Environment Protection Authority.* https://www.epa.nsw.gov.au/~/media/EPA/Corporate%20Site/resources/noise/20130018eparing.ashx

Szwarc, M., & Czyewski, A. (2011). New approach to railway noise modeling employing Genetic Algorithms. *Applied Acoustics, 72*(8), 611–622. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.01.003

Talotte, C., Gautier, P. E., Thompson, D. J., & Hanson, C. (2003). Identification, modelling and reduction potential of railway noise sources: a critical survey. *Journal of Sound and Vibration, 267*(3), 447–468. https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00707-7

The R Project for Statistical Computing. (n. d.). R-project. https://www.R-project.org/

Thomson, D. J., Hemsworth, B. & Vincent, N. (1996). Experimental Validation of the Twins Prediction Program for Rolling Noise: Part 1: Description of the model and method. *Journal of Sound and Vibration, 193*(1), 123–135. https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0252

Thompson, D. J., Fodiman, P., & Mahe, H. (1996). Experimental validation of the Twins Prediction Program for rolling noise, Part 2: Results. *Journal of Sound and Vibration; 193*(1), 137–147. https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0253

Thompson, D. J., & Jones, C. J. C. (2000). *A* review of the modelling of wheel / rail noise generation. *Journal of Sound and vibration; 231*(3), 519–536. https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2542

Thompson, D.J., Jones, C., & Gautier, P. E. (2009). *Railway noise and vibration. Mechanisms, modelling and means of control* (1st edition). Elsevier.

Thompson, D. (2011). The role of theoretical models in shaping railway noise policy and mitigation strategies. In *Proceedings of Acoustics, 9*, (pp. 1–8). https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2011/papers/p9.pdf

Thompson, D. J., Squicciarini, G., Zhang, J., Lopez Arteaga, I., Zea, E., Dittrich, M., Jansen, E., Arcas, K., Cierco, E., Magrans, F. X., Malkoun, A., Iturritxa, E., Guiral, A., Stangl, M., Schleinzer, G., Martin Lopez, B., Chaufour, C., & Wändell, J. (2018). Assessment of measurement-based methods for separating wheel and track contributions to railway rolling noise. *Applied Acoustics, 140*, 48–62. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.05.012

Thompson, D. (2024). *Railway Noise and Vibration* (2nd edition). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804439-1.00018-4

Torija, A. J., & Flindell, I. H. (2014). Listening laboratory study of low height roadside noise barrier performance compared against in-situ field data. *Building and environment, 81*, 216–225. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.07.006

TECHNOR print. (2006). *Železniční aplikace - Akustika - Měření hluku vyzařovaného kolejovými vozidly* (ČSN EN ISO 3095:2005). https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-3095-280350-174698.html

Tuler, M.V. & Kaewunruen, S. (2017). Life cycle analysis of mitigation methodologies for railway rolling noise and groundbourne vibration. *Journal of environmental management, 191*, 75–82. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.075

Tzeng, H-H., & Huang J.-J. (2017). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. CRC Press. Taylor & Francis Group.

Tzikas, C., Jong, M. M. D., & Slooff, L. H. (2017). Graffiti on Solar Noise Barriers, a case study. In *33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition,* (pp. 2529–2531). https://publicaties.ecn.nl/PdfFetch.aspx?nr=ECN-M--17-038

Van Doninck, N., & Schillemans, L. (2003). Environmental integration of measures to reduce railway noise in the Brussels Capital Region. *Journal of sound and vibration, 267*(3), 419–429. https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00704-1

Van Haaren, E., & Van Tol, P. H. (2000). Validation of ray acoustics applied for the modelling of noise barriers. *Journal of sound and vibration, 231*(3), 681–688. https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2555

Venckus, Z., Grubliauskas, R., & Venslovas, A. (2012). The research on the effectiveness of the inclined top type of a noise barrier. *Journal of environmental engineering and landscape management, 20*(2), 155–162. https://doi.org/10.3846/16486897.2011.634068

Venkataraman, S., Rumpler, R., Leth, S., Toward, M., & Bustad, T. (2022). Improving strategic noise mapping of railway noise in Europe: Refining CNOSSOS-EU calculations using TWINS. *Science of The Total Environment, 839*(156216). https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156216

Venkatram, A., Isakov, V., Deshmukh, P., & Baldauf, R. (2016). Modeling the impact of solid noise barriers on near road air quality. *Atmospheric Environment, 141*, 462–469. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.07.005

Veloso, M., Pereira, M., Godinho, L., Amado-Mendes, P., & Redondo, J. (2023). Insertion loss prediction of sonic crystal noise barriers covered by porous concrete using the Method of Fundamental Solutions. *Applied Acoustics, 211*(109543). https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109543

Vergoed, T., & Van Leeuwen, H. J. A. (2018). *Evaluation and Validation of the CNOSSOS calculation method in the Netherlands.* In *Euronoise 2018*, *6*, (pp. 1231–1235). https://www.euronoise2018.eu/docs/papers/209_Euronoise2018.pdf

Verheijen, E., Elbers, F. & Golde, W. (2011). *Exploring bearable noise limits and emission ceilings for the railways. Part I: National and European legislation and analysis of different noise limit systems.* International Union of Railways (UIC). https://uic.org/IMG/pdf/p250_bearable_noise_limits_part_i_final.pdf

Vogiatzis, K. & Vanhonacker, P. (2016). Noise reduction in urban LRT networks by combining track based solutions. *Science of the total environment*, 1344–1354. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.060

Walker, E. D., Brammer, A., Cherniack, M. G., Laden, F., & Cavallari, J. M. (2016). Cardiovascular and stress responses to short-term noise exposures—A panel study in healthy males. *Environmental Research, 150*, 391–397. https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.06.016

Wang, Y., Jiao, Y., & Chen, Z. (2018). Research on the well at the top edge of noise barrier. *Applied Acoustics, 133*, 118–122. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.12.018

Watts, G. R. (1996). Scale modelling of railway noise barriers. *Applied Acoustics, 234*(2), 207–223. https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2886

Watts, G. R., Hothersall, D. C., & Horoshenkov, K. V. (2001). Measured and predicted acoustic performance of vertically louvred noise barriers. *Applied acoustics, 62*(11), 1287–1311. https://doi.org/10.1016/S0003-682X(00)00101-8

Wiebe, E., Sandor, J., Cheron, C., & Haas, S. (2011). *ERRAC Roadmap WP 01 The Greening of Surface Transport. "Towards 2030 Noise and Vibrations Roadmap"*. The European Rail Re-search Advisory Council (ERRAC), International Union of Railways (UIC) and the Association of the European Rail Industry (UNIFE). https://errac.org/wp-content/uploads/2013/07/ERRAC_WP01_Roadmap_Noise-and-Vibration_V06.pdf

Yang, Z., Boogaard, A., Chen, R., Dollevoet, R., & Li, Z. (2018). Numerical and experimental study of wheel-rail impact vibration and noise generated at an insulated rail joint. *International Journal of Impact Engineering, 113*, 29–39. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.11.008

Yoon, K., Gwak, Doo Y., Chun, C., Seong, Y., Hong, J., & Lee, S. (2018). Analysis of frequency dependence on short-term annoyance of conventional railway noise using sound quality metrics in a laboratory context. *Applied Acoustics, 138*, 121–132. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.03.024

Zanin, P. H. T. (2016). *Noise pollution in urban and industrial environments: Measurements and noise mapping*. Nova Science Publishers.

Zeeb, H., Hegewald, J., Schubert, M., Wagner, M., Dröge, P., Swart, E., & Seidler, A. (2017). Traffic noise and hypertension results from a large case-control study. *Environmental research, 157*, 110–117. https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.05.019

Zhang, X. (2010). The directivity of railway noise at different speeds. *Journal of Sound and Vibration, 329*(25), 5273–5288. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2010.07.003

Zheng, S., Zhou, Q., & Han, J. (2017). Performance of V-shaped perforated noise barriers. *Noise control engineering journal*, *65*(5), 396–405. https://doi.org/10.3397/1/376556

Autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Tumavičė, A., & Laurinavičius, A. (2015). Geležinkelių plėtros galimybės Lietuvoje: geležinkelių keliams projektuoti skirtų norminių techninių dokumentų analizė akustinio triukšmo mažinimo aspektu. *Mokslas 0150 Lietuvos ateitis: Statyba, transportas, aviacinės technologijos*, 5, 557–563. https://doi.org/10.3846/mla.2015.835

Tumavičė, A., Laurinavičius, A., Vaitkus, A., Mikaliūnas, Š., Perveneckas, Z., & Čiuprinskas, K. (2017). Effectiveness analysis of railway noise mitigation measures. *Gradevinar*, 69(1), 41–51. https://doi.org/10.14256/JCE.1877.2016

Tumavičė, A., & Žalimienė, L. (2024). Insertion loss value dependency of the low height noise barriers distance from railway track. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 19(4). https://doi.org/10.7250/bjrbe.2024-19.648

Straipsniai kituose leidiniuose

Tumavičė, A., & Laurinavičius, A. (2015). Mažesnę fizinę aplinkos taršą keliančių geležinkelių įrengimo galimybės Lietuvoje: geležinkelių kelių įrengimą reglamentuojančių dokumentų analizė. Iš *17-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos „Aplinkos apsaugos inžinerija”*.

https://www.semanticscholar.org/paper/Ma%C5%BEesn%C4%99-fizin%C4%99-aplinkos-tar%C5%A1%C4%85-kelian%C4%8Di%C5%B3-%C4%AFrengimo-Tumavi%C4%8D%C4%97-Laurinavi%C4%8Dius/e9f1c7e2a-ecb1b48cabd220504d1ecd805b79371

Tumavičė, A., & Laurinavičius, A. (2016). Geležinkelių skleidžiamo akustinio triukšmo mažinimo priemonių efektyvumas. Iš *19-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos „Aplinkos apsaugos inžinerija”* (pp. 200–204). https://doi.org/10.3846/aainz.2016.29

Tumavičė, A., Laurinavičius, A., Jagniatinskis, A., & Vaitkus, A. (2016). Environmental noise mitigation measures for Lithuanian railway network. In L. Rafalski & A. Zofka (Eds.), *Transportation Research Procedia. Transport Research Arena TRA2016* (pp. 2704–2713). https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.448

Tumavičė, A., & Jasiūnienė, V. (2023). Influence of low noise barrier height on sound insertion loss. In *12th International conference “Environmental Engineering ” (ICEE-2023).* Scopus. https://doi.org/10.3846/enviro.2023.927

Summary in English

Introduction

Problem formulation

Rail transport is promoted around the world for environmental reasons (low energy consumption and low CO_2 emissions); however, it also pollutes the environment, especially by noise (Oertli & Hubner, 2010; Wiebe et al., 2011; Thomspon et al., 2009). The main identified health disorders caused by noise are nervousness, sleep and hearing disorders (Louen et al., 2014; Le Prell & Clavier, 2017; Elmenhorst et al., 2012; Licitra et al., 2016), heart problems (Walker et al. 2016), hypertension (Sørensen et al., 2011; Zeeb et al., 2017), cancer (Sorensen et al., 2021; Erdmann et al., 2022).

Challenge 2050 particularly emphasises the negative impact of noise and vibration (Moretti et al., 2013). The EU White Paper (2011) and the EU Commission document (European Commission, 2011) predict that by 2050, noise costs must be reduced by 46%; therefore, it is necessary to reduce noise at railways.

Relevance of the dissertation

The dissertation describes the research of low noise barriers at railways to determine their internal attenuation. Such noise barriers have been installed and studied for more than 20 years, but they are not widely used in the world, and they are not installed at all in Lithuania. Low noise barriers are less often designed because their insertion loss values are typically lower than those of high noise barriers. However, unlike conventional high noise

barriers, such barriers are simpler in design, have lower installation costs, are safer because they do not limit visibility, etc. Currently, in Lithuania, the biggest problem related to noise emitted by railway tracks arises in the sections of railway stations (where the speed of the trains is up to 160 km/h), passing through residential areas, especially at the crossings. Here, the rolling noise emitted by the wheel/rail interaction prevails, which is predominant among other types of noise emitted by the railway track when the rolling speed of the rolling stock is from 50 km/h to 240–250 km/h (Hemsworth, 2008, Guiral & Alonso, 2018). On the newly constructed European gauge "Rail Baltica" line, the design driving speed is up to 249 km/h. Grubliauskas et al. (2014) found that the level of noise (equivalent and maximum) emitted by railway transport, measured at a distance of 20 m from the railway, in residential areas, exceeded the limit values by ~ 20 dB. Low noise barriers are designed to reduce such noise.

Object of the research

The research object is the effectiveness of high and low noise barriers installed along straight sections of railway tracks as a noise reduction criterion.

Aim of the dissertation

The dissertation aims to reduce the impact of rolling stock noise on the environment (people) by developing an algorithm to apply low-noise barriers along ballasted railway tracks and by scientifically determining and proposing recommendations for selecting effective parameters for noise walls applied on straight sections of railway tracks.

Tasks of the dissertation

The following objectives had to be achieved to meet the aim of the dissertation:

1. To create an algorithm that applies low noise barriers along the ballasted rail track, based on the experience of applying low noise barriers in foreign countries and after assessing the conditions of Lithuania.
2. To select the most rational noise mitigation measure to be analysed in the following research stages using the multi-criteria TOPSIS method.
3. To perform a sound pressure level measurement experiment under field conditions, determining the input insertion loss of the high noise barrier.
4. To compare the insertion loss values of noise barriers with different parameters that mitigate the noise emitted by rolling stock moving at different speeds (50 km/h–250 km/h) using numerical simulation.
5. To evaluate the parameters of the low noise barriers influencing the insertion loss values based on statistical analysis.
6. To provide recommendations for the selection of noise barriers.

Research methodology

Experimental studies of noise barrier insertion loss were used according to CEN/TS 16272-7:2015 requirements to achieve the aim and objectives of the dissertation. The insertion loss values of noise reduction barriers were calculated using a numerical simulation of noise propagation. The work used the TOPSIS method of decision-making.

Scientific novelty of the dissertation

When preparing the dissertation, the following results were obtained, which are new to the science of civil engineering:

1. Low noise barriers have been found to be a suitable noise mitigation measure along the railways.
2. The criteria for the selection of the most effective noise mitigation measure have been established.
3. Selected parameters of low noise barriers that most effectively mitigate the rolling noise arising from wheel-track interaction.

Practical value of the research findings

The criteria presented in the dissertation for selecting the most effective noise reduction measure can facilitate the installation of measures along Lithuanian railway sections, thereby increasing traffic safety and increasing people's favorability for noise reduction measures that do not visually pollute the environment. The results achieved can also be used in practice when setting out noise barrier selection criteria and requirements for low noise barriers in new technical regulatory documents, thus encouraging the installation of such walls in our country.

Defended statements

1. Low noise barriers are effective measures to mitigate rolling noise, applicable on straight sections of railway tracks where the prevailing speed of trains is between 50 km/h and 250 km/h. A safer (visibility, evacuation, and less reverberation effect), more acceptable to the public, and a cheaper alternative than usual size barriers.
2. Under the right conditions and with the right parameters, the insertion loss values of low noise barriers, determined in a residential environment away from the railway track, are equivalent to the insertion loss values of high barriers.
3. When choosing low noise barriers, the most important parameters that influence the insertion loss values are the height of the barrier and its length.

Approval of the research findings

Seven scientific papers were published on the topic of the dissertation: three in scientific journals, including in the *Web of Science* database (Tumavičė et al., 2017; Tumavičė & Žalimienė, 2024), one in a peer-reviewed scientific journal (Tumavičė & Laurinavičius,

2015), one in international conference proceedings, listed in the *Web of Science* database (Tumavičė et al., 2016), two in other publications on international and national conferences (Tumavičė & Laurinavičius, 2016; Tumavičė & Laurinavičius, 2014).

The results of the research conducted in this dissertation were published in five scientific conferences in Lithuania and abroad:

- Seminar for Junior Researchers Science is the Future for Lithuania in 2014, 2015 and 2016, Vilnius, Lithuania;
- International conference Transport Research Arena TRA2016 in 2016, Warsaw, Poland;
- International Conference Environmental Engineering in 2023, Vilnius, Lithuania.

The structure of the dissertation

The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions, and recommendations.

The dissertation is 149 pages, It contains 27 numbered formulae, 26 figures and 37 tables. The dissertation used 186 sources.

1. Analysis of scientific works on railway road noise and its mitigation measures

Rolling noise caused by wheel/rail interaction is a major component of railway noise. This noise usually occurs at the point of contact between these elements. Both elements significantly influence noise generation (Thompson et al., 2009). The unevenness of the running surfaces of the wheel and rail causes vertical (relative) displacements between the wheel and the rail (Thompson et al., 2009; Thompson et al., 1996a). High-frequency vertical vibrations generated at the point of contact are transmitted to both elements, which vibrate and emit noise into the surrounding air (Thompson et al., 2009).

Many measures are used in the world to mitigate the noise emitted by railway tracks (applied at the noise source, for example, rolling stock elements, regular maintenance, and railway track construction; in the sound path, for example, noise barriers and tunnels; in adjacent buildings, for example, replacement of windows and facade isolation). Noise mitigation measures can be used in combination, for example, as overlapping screens (rolling stock-mounted shields combined with very low noise barriers installed right next to the railway track).

Low noise barriers are installed at a smaller distance from the railway tracks than high noise barriers to mitigate rolling noise emitted in the wheel/rail interaction, so they have a small height. Although the insertion loss of these barriers is lower than that of high noise barriers, they do not restrict visibility at crossings and are visually attractive. In addition, their installation costs are lower.

Based on the experience of applying low noise barriers in foreign countries and after evaluating the conditions of Lithuania, a low noise barrier application algorithm was created (Fig. S.1.1).

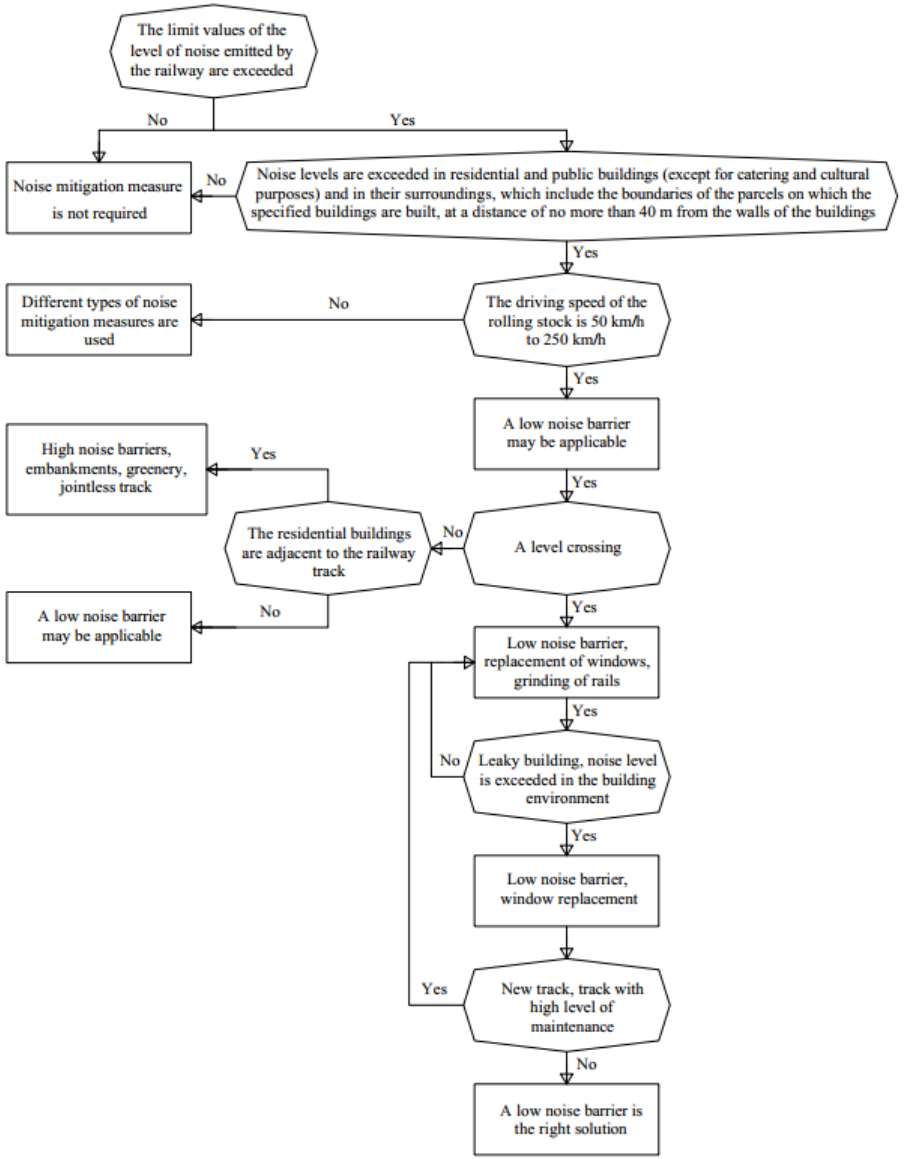


Fig. S.1.1. Application algorithm of a low noise barrier (made by the author)

To summarise the analysed scientific research, it can be stated that to mitigate rolling noise, e.g., noise generated in wheel/rail interaction, low noise barriers are installed at a smaller distance from the railway tracks than high barriers. Although the insertion loss of

these barriers is usually lower than that of high noise barriers, they do not restrict visibility at crossings, are visually attractive, and their installation costs are lower.

2. Experimental study and evaluation of the effectiveness of noise barriers

The railway line selected for the experiment, the Kyviškės–Valčiūnai section, has a maximum permissible speed of 80 km/h, i.e., the speed at which wheel/rail interaction noise prevails. The noise barrier investigated during the experiment is already installed, so the insertion loss in field conditions on the railway track was determined using the indirect method according to the standard (technical specifications) CEN/TS 16272-7 (2015). Measurements were performed according to CEN/TS 16272-7 (2015), adapting the test process to local conditions and available equipment.

An algorithm was developed to select noise barriers with optimal parameters in the investigated section of the railway track. The scheme of the experimental study is presented in Fig. S.2.1.

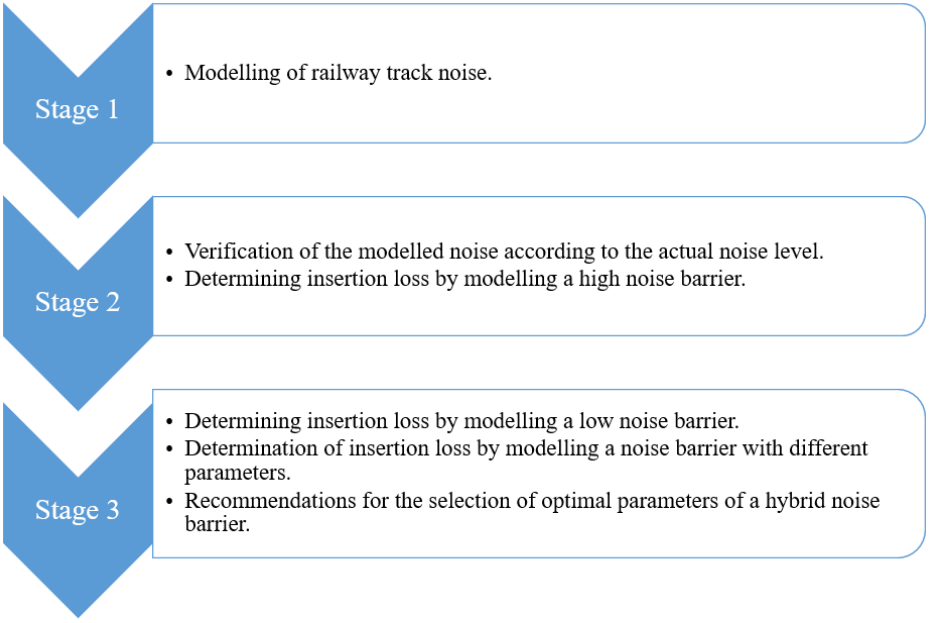


Fig. S.2.1. Scheme of numerical modelling execution (made by the author)

Numerical modelling was performed using the software CadnaA (Computer Aided Noise Abatement) to compare the insertion loss of noise barriers of different heights and to select the optimal technical parameters of the barrier.

After analysing the experience of applying low-noise barriers on railway tracks in foreign countries, it was found that low-noise barriers are installed at a distance of 1.73–

2.0 m from the axis of the railway track. In Lithuania, according to the requirements of the Instruction for the Application of Construction Proximity Gauges 163/K (2001), distances to railway tracks are limited. The main requirements are included in the Commission Regulation No. 1299/2014 (2014) Appendix H, which regulates the proximity gauge of engineering structures of the 1,520 mm gauge system. According to the requirements of the legal acts currently in force in Lithuania, it is not possible to install low barriers at such a distance; therefore, for the numerical comparison of noise barriers of different heights, the distances at which it is allowed to build certain structures and facilities in Lithuania were selected for modelling.

3. Evaluation of the impact of low noise barrier parameters on their effectiveness

In the dissertation, the effectiveness of different noise mitigation measures commonly used in Lithuania and the low noise barrier proposed to be implemented in Lithuania was evaluated using a multi-criteria decision-making method. An analysis of seven different noise mitigation measures using the TOPSIS method determined that the most rational (best) alternative is a low noise barrier, and the least rational is rail grinding.

During the experimental study under field conditions, the insertion loss of the existing noise barrier was determined at two positions of the noise source (loudspeaker). The results of the experimental study are presented in Figs S.3.1 to S.3.4.

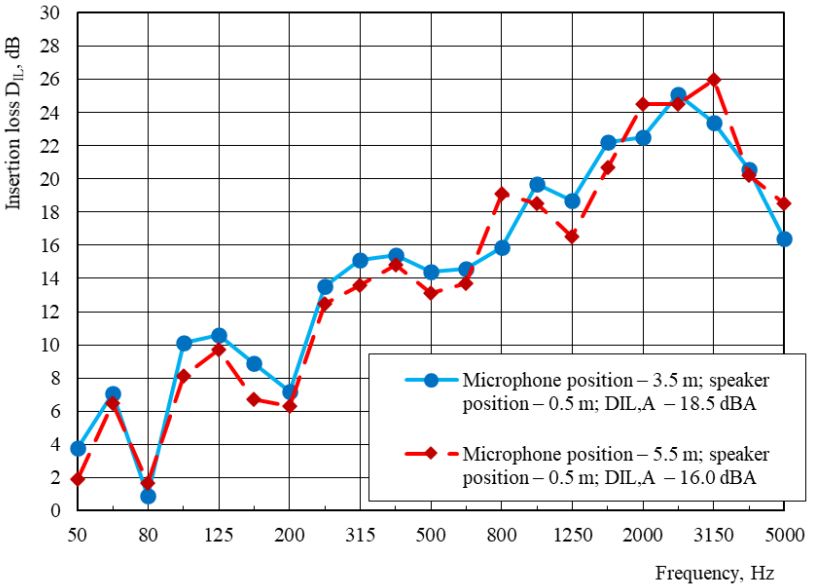


Fig. S.3.1. Results of measurements when the speaker is placed 0.50 m above the level of the rail head

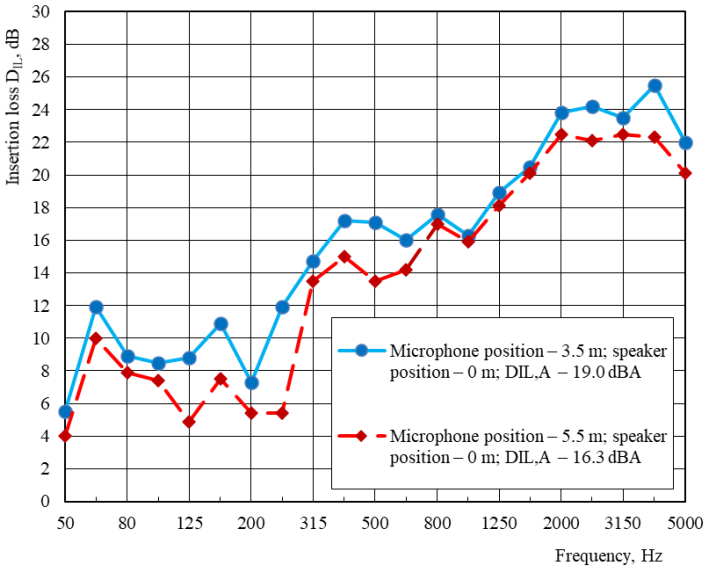


Fig. S.3.2. Results of measurements when the loudspeaker is placed at the level of the rail head

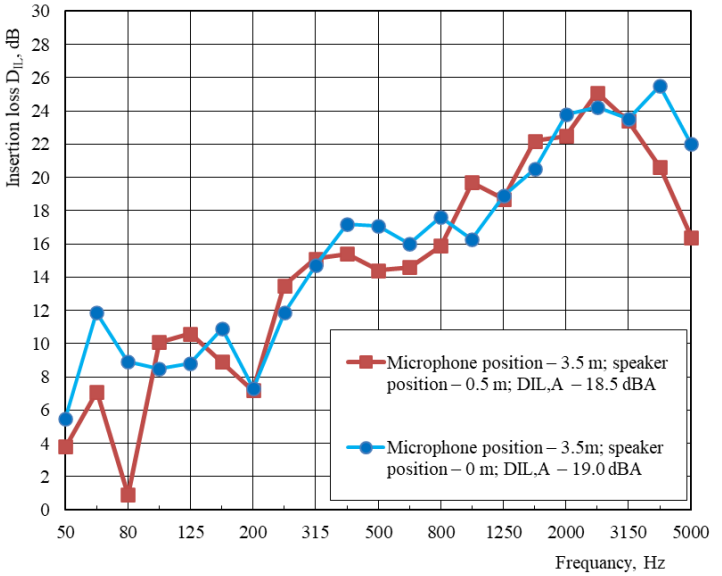


Fig. S.3.3. Results of measurements when the microphone is 3.5 m above the level of the rail head

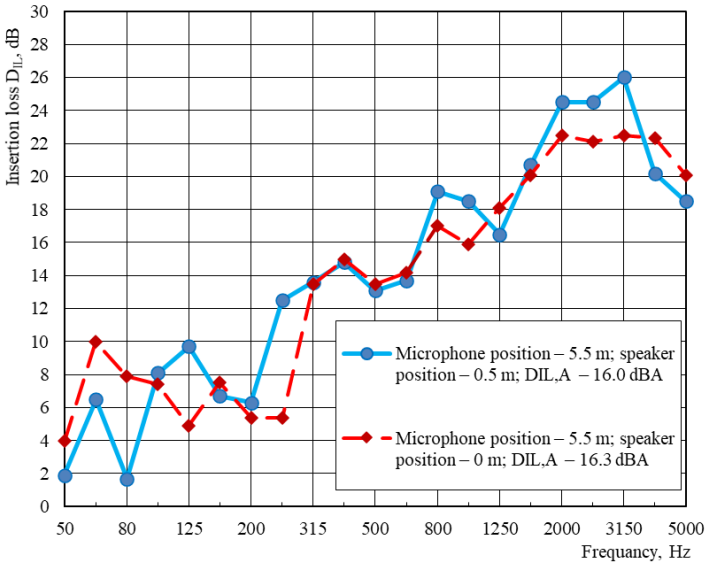


Fig. S.3.4. Results of measurements when the microphone is 5.5 m above the level of the rail head

The numerical modelling of rolling stock noise and noise barriers of different heights was carried out by the CadnaA package program (The CNOSSOS-EU methodology). The calculation results are presented in Tables S.3.1 and S.3.2.

Table S.3.1. Calculated noise levels of all modelled noise barrier variants

Distance from the track axis,	Microphone height, m	Current situation		I opt.	II opt.	III opt.	IV opt.	V opt.	VI opt.
		dBA							
		without noise barrier	H– 3.5 m, L 45 m, at a distance of 4 m	H– 0.76 m, L 45 m, at a distance of 1.75 m	H 1.2 m, L 45 m, at a distance of 2.6 m	H 1.0 m, L 45 m, at a distance of 3.5 m. L-shaped bracket 0.9 m	H– 1.10 m, L 45 m, at a distance of 2.45 m	H 1.3 m, L 45 m, at a distance of 3.1 m. L-shaped bracket 0.65	H –1.3 m, L 100 m, at a distance of 2.75 m. L-shaped bracket 0.3 m
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
50 km/h									
7.5	1.5	71.3	49.4	68.6	63.4	66.8	64.9	63.5	63.5
	3.5	71.2	58.2	71.2	71.2	71.2	71.2	71.2	71.2
	5.5	69.9	69.9	69.9	69.9	69.9	69.9	69.9	69.9
45	1.5	61.0	55.5	57.6	56.3	56.8	56.6	56.4	52.2
	3.5	61.2	55.9	58.7	57.1	57.8	57.5	57.2	54.2

End of Table S.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	5.5	61.7	57.2	60.2	58.7	59.4	59.0	58.7	56.8
80 km/h									
7.5	1.5	72.4	50.7	69.7	64.9	67.8	66.3	65.0	65.0
	3.5	72.3	59.9	72.3	72.3	72.3	72.3	72.3	72.3
	5.5	71.1	71.1	71.1	71.1	71.1	71.1	71.1	71.1
45	1.5	62.4	57.0	59.1	57.9	58.3	58.2	57.9	54.0
	3.5	62.7	57.5	60.0	58.7	59.3	59.1	58.7	55.9
	5.5	63.1	58.6	61.6	60.0	60.6	60.3	60.0	58.2
120 km/h									
7.5	1.5	74.0	52.0	71.3	66.5	69.3	67.9	66.6	66.6
	3.5	73.9	61.4	73.9	73.9	73.9	73.9	73.9	73.9
	5.5	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6
45	1.5	64.2	58.7	60.8	59.6	60.0	59.9	59.6	55.6
	3.5	64.4	59.2	61.7	60.4	61.0	60.8	60.5	57.5
	5.5	64.8	60.3	63.4	61.7	62.3	62.0	61.7	59.8
160 km/h									
7.5	1.5	75.2	52.9	72.6	67.6	70.5	69.0	67.7	67.7
	3.5	75.1	62.3	75.1	75.1	75.1	75.1	75.1	75.1
	5.5	73.9	73.9	73.9	73.9	73.9	73.9	73.9	73.9
45	1.5	65.4	59.9	62.0	60.8	61.2	61.0	60.8	56.6
	3.5	65.6	60.4	62.9	61.6	62.2	62.0	61.6	58.6
	5.5	66.1	61.6	64.7	63.0	63.6	63.2	63.0	61.1
200 km/h									
7.5	1.5	76.1	53.6	73.6	68.4	71.4	69.9	68.5	68.5
	3.5	76.1	62.9	76.1	76.1	76.1	76.1	76.1	76.1
	5.5	74.8	74.8	74.8	74.8	74.6	74.8	74.8	74.8
45	1.5	66.3	60.8	62.8	61.6	62.0	61.8	61.6	57.2
	3.5	66.5	61.2	63.8	62.4	63.0	62.8	62.5	59.4
	5.5	67.0	62.5	65.6	63.9	64.5	64.1	63.9	62.0
240 km/h									
7.5	1.5	79.0	56.6	76.4	71.7	74.5	73.0	71.8	71.8
	3.5	78.9	66.9	78.9	78.9	78.9	78.9	78.9	78.9
	5.5	77.7	77.7	77.7	77.7	77.7	77.7	77.7	77.7
45	1.5	69.1	63.9	65.9	64.8	65.1	65.0	64.8	61.2
	3.5	69.3	64.4	66.8	65.5	66.1	65.9	65.5	62.9
	5.5	69.8	65.6	68.4	66.9	67.5	67.1	66.9	65.1
250 km/h									
7.5	1.5	79.3	57.0	76.8	72.1	74.9	73.4	72.2	72.2
	3.5	79.3	67.4	79.3	79.3	79.3	79.3	79.3	79.3
	5.5	78.1	78.1	78.1	78.1	78.1	78.1	78.1	78.1
45	1.5	69.5	64.3	66.3	65.2	65.5	65.4	65.2	61.6
	3.5	69.7	64.8	67.2	65.9	66.5	66.3	65.9	63.3
	5.5	70.2	66.0	68.8	67.3	67.9	67.5	67.3	65.5

Table S.3.2. Calculated insertion loss values of all modelled noise barrier variants

Distance from the track axis, m	Microphone height, m	Current situation	I opt.	II opt.	III opt.	IV opt.	V opt.	VI opt.
		dBA						
		H– 3.5 m, L 45 m, at a distance of 4 m	H– 0.76 m, L 45 m, at a distance of 1.75 m	H 1.2 m, L 45 m, at a distance of 2.6 m	H 1.0 m, L 45 m, at a distance of 3.5 m. The length of the L-shaped bracket 0.9 m	H 1.10 m, L 45 m, at a distance of 2.45 m	H 1.3 m, L 45 m, at a distance of 3.1 m. The length of the L-shaped bracket 0.65	H –1.3 m, L 100 m, at a distance of 2.75 m. The length of the L-shaped bracket 0.3 m
1	2	3	4	5	6	7	8	9
50 km/h								
7.5	1.5	21.9	2.7	7.9	4.5	6.4	7.8	7.8
	3.5	13	0	0	0	0	0	0
	5.5	0	0	0	0	0	0	0
45	1.5	5.5	3.4	4.7	4.2	4.4	4.6	8.8
	3.5	5.3	2.5	4.1	3.4	3.7	4	7
	5.5	4.5	1.5	3	2.3	2.7	3	4.9
80 km/h								
7.5	1.5	21.7	2.7	7.5	4.6	6.1	7.4	7.4
	3.5	12.4	0	0	0	0	0	0
	5.5	0	0	0	0	0	0	0
45	1.5	5.4	3.3	4.5	4.1	4.2	4.5	8.4
	3.5	5.2	2.7	4	3.4	3.6	4	6.8
	5.5	4.5	1.5	3.1	2.5	2.8	3.1	4.9
120 km/h								
7.5	1.5	22	2.7	7.5	4.7	6.1	7.4	7.4
	3.5	12.5	0	0	0	0	0	0
	5.5	0	0	0	0	0	0	0
45	1.5	5.5	3.4	4.6	4.2	4.3	4.6	8.6
	3.5	5.2	2.7	4	3.4	3.6	3.9	6.9
	5.5	4.5	1.4	3.1	2.5	2.8	3.1	5
160 km/h								
7.5	1.5	22.3	2.6	7.6	4.7	6.2	7.5	7.5
	3.5	12.8	0	0	0	0	0	0
	5.5	0	0	0	0	0	0	0
45	1.5	5.5	3.4	4.6	4.2	4.4	4.6	8.8
	3.5	5.2	2.7	4	3.4	3.6	4	7
	5.5	4.5	1.4	3.1	2.5	2.9	3.1	5

End of Table S.3.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
200 km/h								
7.5	1.5	22.5	2.5	7.7	4.7	6.2	7.6	7.6
	3.5	13.2	0	0	0	0	0	0
	5.5	0	0	0	0.2	0	0	0
45	1.5	5.5	3.5	4.7	4.3	4.5	4.7	9.1
	3.5	5.3	2.7	4.1	3.5	3.7	4	7.1
	5.5	4.5	1.4	3.1	2.5	2.9	3.1	5
240 km/h								
7.5	1.5	22.4	2.6	7.3	4.5	6	7.2	7.2
	3.5	12	0	0	0	0	0	0
	5.5	0	0	0	0	0	0	0
45	1.5	5.2	3.2	4.3	4	4.1	4.3	7.9
	3.5	4.9	2.5	3.8	3.2	3.4	3.8	6.4
	5.5	4.2	1.4	2.9	2.3	2.7	2.9	4.7
250 km/h								
7.5	1.5	22.3	2.5	7.2	4.4	5.9	7.1	7.1
	3.5	11.9	0	0	0	0	0	0
	5.5	0	0	0	0	0	0	0
45	1.5	5.2	3.2	4.3	4	4.1	4.3	7.9
	3.5	4.9	2.5	3.8	3.2	3.4	3.8	6.4
	5.5	4.2	1.4	2.9	2.3	2.7	2.9	4.7

Calculations showed that the maximum efficiency would be achieved if the noise barrier was at least 100 m long (the noise-sensitive area at the epicentre of the barrier at a distance of 45 m), its height was 1.3 m above the rail head, and the barrier was “L”-shaped, the bracket was 0.3 m long (the vertical part is bent towards the railway). Calculations showed that the effectiveness of the noise barrier with these technical parameters would be higher than the currently installed ~45 m long and 3.5 m high noise barrier.

To determine how much the insertion loss of the noise barrier with a bent upper element (inverted L-shaped bracket) is influenced by the bending angle of the upper element, calculations were additionally performed for a 100 m long wall with the upper element bent at different angles (15º, 30º, and 60º). An additional study was carried out by calculating the insertion loss of low noise barriers, straight barriers, and barriers of similar parameters with the upper element bent towards the railway tracks (inverted L-shaped bracket) to determine which barriers give higher insertion loss. Considering the speed of the rolling stock has almost no influence on the insertion loss of the noise barrier, all additional barriers were modelled at the same speed as the rolling stock of 250 km/h. The results of the additional simulation are presented in Table S.3.3.

Table S.3.3. Calculated insertion loss values of the additionally modelled noise barrier variants

Distance from the track axis, m	Microphone height, m	Current situation	I opt.	II opt.	III opt.	IV opt.	V opt.	VI opt.	Current situation
		dBA							
		H 3.5 m, L 45 m, at a distance of 4 m	H 1.0 m, L 45 m, 3 at a distance of 3.75 m	H 1.3 m, L 45 m, at a distance of 3.1 m	H –1.3 m, L 45 m, at a distance of 2.75 m	H 1.3 m, L 100 m, at a distance of 2.75 m	H 1.3 m, L 100 m, at a distance of 2.75 m. The leg is bent at an angle of 15°	H 1.3 m, L 100 m, at a distance of 2.75 m. The leg is bent at an angle of 30°	H 1.3 m, L 100 m, at a distance of 2.75 m. The leg is bent at an angle of 60°
250 km/h									
7.5	1.5	22.3	0.2	5.6	6.2	6.2	6.2	6.2	6.3
	3.5	11.9	0	0	0	0	0	0	0
	5.5	0	0	0	0	0	0	0	0
45	1.5	5.2	3.3	4.1	4.2	7.3	7.3	7.3	7.4
	3.5	4.9	2.5	3.4	3.5	5.7	5.7	5.7	5.8
	5.5	4.2	1.2	2.6	2.8	4.4	4.4	4.4	4.5

An experimental numerical simulation study found that high noise barriers are highly effective in protecting adjacent noise-sensitive areas, but with distance from the railway track, the insertion loss decreases, and the calculated insertion loss levels are quite similar to the levels of insertion loss of some analysed low noise barriers. A statistical analysis found that the insertion loss does not depend on the speed (p-value, $p=0.996$), but it differs statistically significantly depending on the height of the noise barrier ($p<0.0001$), on the distance from which the noise barrier is located ($p< 0.0001$), from the folding angle of the upper element of the noise barrier ($p<0.001$).

General conclusions

The following conclusions have been reached after summarising the results of experimental research of this dissertation:

1. After performing the analysis of the effectiveness of noise mitigation measures applied on railway tracks, it was found that low noise barriers can not only be acoustically effective under certain conditions, i.e., their insertion loss is sufficient to protect the noise-sensitive areas away from the track from the negative effects of noise, but also to ensure safe traffic conditions, not to visually pollute the environment, and to save installation costs compared to high noise barriers. The developed low noise barrier application algorithm allows for a quick and efficient assessment of local conditions (limit noise levels, rolling stock speed, etc.) to determine when a low noise barrier is the most appropriate measure of environmental protection from the noise emitted by railway tracks.

2. After evaluating traffic safety, the implementation period (complexity), acceptability to the public, and the impact on the environment using the multi-criteria TOPSIS method, it was determined that the most rational is to use low noise barriers (rationality coefficient 0.89). The most irrational measure of noise reduction is rail grinding (rationality coefficient 0.31).

3. As experimentally tested in field conditions, the high noise barrier effectively reduces the level of rolling noise with a typical range of 100 to 5000 Hz; i.e., measured insertion loss is 7.2–25.1 dB when the microphone is placed 3.5m above railhead level and 6.3–26.0 dBA when the microphone is placed 5.5 m above railhead level. At a frequency ≥ 250 Hz, the insertion loss of at least 10.0 dB was determined for both microphone positions. It was found that when the microphone is in a lower position, i.e., at a height of 3.5 m above the level of the rail head, in most cases, the insertion loss is higher than at a height of 5.5 m above the level of the rail head, but the sound is not completely mitigated.

4. An experimental numerical simulation study found that high noise barriers are highly effective in protecting adjacent noise-sensitive areas, but with distance from the railway track, the insertion loss decreases, and the calculated insertion loss levels are quite similar to the levels of insertion loss of some analysed low noise barriers. The insertion loss of a 45 m long 3.5 m high noise barrier, determined at a 45 m distance from the railway track axis, is only 20.93% 30.0% higher than the insertion loss of different parameters but of the same length 1.0 1.3 m high barriers, and 34.17 % lower than 100 m long 1.3 m high noise barriers. The insertion loss of a 3.5 m high noise barrier located at a distance of 4.0 m from the railway track axis, determined at a height of 1.5 m from the top of the tracks, at a distance of 7 m from the railway track axis, is even 8–9 times higher (depending on the running speed of the rolling stock) than the extremely low, 0.76 m high noise barriers located 1.75 m from the railway track axis.

5. A statistical analysis found that the insertion loss does not depend on the speed (p-value, $p=0.996$), but it differs statistically significantly depending on the height of the noise barrier ($p<0.0001$), on the distance from which the noise barrier is located ($p< 0.0001$), from the folding angle of the upper element of the noise barrier ($p<0.001$). The calculated insertion loss is statistically different only between the barriers that are without bracket, i.e., the bracket bend angle is 0º (average insertion loss - 3.36 dBa) and when the bracket bend angle is 90º (average insertion loss - 4.62 dBa). The average insertion loss of the 100 m long noise barrier was higher than the average insertion loss of the 45 m long noise barrier, 4.37±3.29 and 3.49±4.07, respectively, so the difference can still be considered statistically significant ($p=0.068$).

6. A statistical linear regression analysis found that the insertion loss is statistically significant depending on two variables, height ($p<0.0001$) and length ($p<0.0001$) of the noise reduction wall. Both parameters are positive, i.e., the longer and higher the barrier, the higher the insertion loss (determination coefficient $R2 = 0.67$). A 1-metre increase in the height of the noise barrier results in an average increase of 2.53 dBA in insertion loss, and a 1-meter increase in barrier length results in an average increase in insertion loss of 0.045 dBA, all other parameters remaining constant. The insertion loss of the noise barrier with a 90º angle is on average 0.6867 dBa higher than that of the barrier without the bracket ($p=0.02$).

Recommendations

1. When modelling low noise barriers at a greater distance from the axis of the railway track, it is recommended:

– to provide a sufficient length noise barrier which is 1.0–1.3 m high, ensuring good conditions for safe traffic and visual aesthetics;

– to select a noise barrier, which is 25–30 m longer than the noise-sensitive areas to be protected so that they are not affected by the railway track noise emitted by the rolling stock passing through the barrier;

– if the provided noise barrier does not reach the required level of insertion loss, provide a barrier with an inverted L-shaped upper element (bracket) bent at an angle of 90º towards the railway track. The length of this element must be such that it does not enter the gauge of the railway track.

2. It is recommended to continue research with barriers with different sound absorption coefficients and with upper elements of a different shape.

3. It is recommended to install an experimental noise barrier of height of 1.0–1.3 m at a distance of 2.45–3.1 m from the railway track axis to determine the insertion loss values under real conditions.

Aja TUMAVIČĖ

GELEŽINKELIO TRANSPORTO SUKELIAMĄ
TRIUKŠMĄ MAŽINANČIŲ SIENUČIŲ PARAMETRŲ TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Statybos inžinerija (T 002)

RESEARCH OF PARAMETERS OF RAILWAY NOISE BARRIERS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Civil Engineering (T 002)

Lietuvių kalbos redaktorė Deimantė Grigaitė

Anglų kalbos redaktorė Jūratė Griškėnaitė

2025 02 10. 13,7 sp. l. Tiražas 20 egz.
Leidinio el. versija *https://doi.org/10.20334/2025-006-M*
Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius
Spausdino UAB „Ciklonas“,
Žirmūnų g. 68, 09124 Vilnius