



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Vytautas Petrauskas

**GELŽBETONINIŲ TILTŲ PERDANGŲ STIPRUMO IR
DEFORMATYVUMO TYRIMAI**

Baigiamasis magistro darbas

Vadovas

Lekt. dr. Saulius Zadlauskas

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

Doc. dr. Mindaugas Augonis

**GELŽBETONINIŲ TILTŲ PERDANGŲ STIPRUMO IR
DEFORMATYVUMO TYRIMAI**

Baigiamasis magistro darbas

Statybos inžinerija (621H20001)

Vadovas

Lekt. dr. Saulius Zadlauskas

Recenzentas

Darbą atliko

Vytautas Petrauskas

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

(Fakultetas)

(Studento vardas, pavardė)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo darbo „Gelžbetoninių tiltų perdangų stiprumo ir deformatyvumo tyrimai“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 _____ m. _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Vytauto Petrausko** baigiamasis darbas tema „**Gelžbetoninių tiltų perdangų stiprumo ir deformatyvumo tyrimai**“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Magistro baigiamasis darbas

„Gelžbetoninių tiltų perdangų stiprumo ir deformatyvumo tyrimai”

Vytautas Petrauskas

Anotacija

Pastaruoju metu Lietuvoje ir kitose Europos valstybėse išaugo susidomėjimas gelžbetoninių tiltų saugumo įvertinimu. Senesnės statybos tiltai yra suprojektuoti daug mažesnės bendrosios masės sunkiasvorėms transporto priemonėms ir mažesniems jų srautams. Dėl eksploatacijos metu atsiradusių defektų, kintančiu dinaminių koeficientų ir pasitaikančiu perkrovų, tiltų laikomoji galia yra sumažėjusi ir sutrumpėjęs jų naudojimo laikas.

Magistro baigiamajame darbe apžvelgta Lietuvoje pastatytų gelžbetoninių tiltų būklė, pagrindiniai defektai ir pažeidimai bei galimos jų atsiradimo priežastys (betono karbonizacija, armatūros korozija, chloridų poveikis), pristatyta Slovėnijoje tiltininkų naudojama gelžbetoninių tiltų saugos faktoriaus apskaičiavimo metodika.

Tiriamuoju objektu pasirinktas automobilinis tiltas per Kauno HE. Tyrimų metu buvo atlikta esminė apžiūra, statinis ir dinaminis bandymai, perdangos betono laboratoriniai tyrimai ir nustatyta armatūros korozijos įtaka perdangos standumui ir deformatyvumui. Tilto tyrimams pritaikyta Slovėnijos mokslininkų pasiūlyta gelžbetoninių tiltų saugos faktoriaus apskaičiavimo metodika įvertinant bendrą statinio būklę, nuolatinių ir kintamų apkrovų efektus, sunkiasvorių transporto priemonių srautus ir jų sukiamų dinaminių apkrovų įtaką statiniui.

Darbo metu gauti eksperimentiniai rezultatai palyginti su teoriniais. Darbo pabaigoje pateiktos apibendrinančios išvados.

Darbo apimtis – 82 puslapiai, 46 paveikslai, 35 lentelės, 29 formulės, 29 literatūros šaltiniai.

Reikšminiai žodžiai:

Gelžbetoninis tiltas, saugos faktorius, armatūros korozija, stiprumas ir deformatyvumas.

KAUNAS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE
DEPARTMENT OF BUILDING STRUCTURES

Master's thesis

“Research on the Strength and Deformability of Span Structures of Reinforced Concrete Bridges”

Vytautas Petrauskas

Annotation

Recently, Lithuania and other European countries have got an increased interest in the safety assessment of reinforced concrete bridges. Bridges of old construction are designed for a much lower total weight of heavy vehicles and their much lower traffic flows. Due to defects during bridge operation, changing dynamic factors and occurring overloads, a load-carrying capacity of bridges has decreased, their service life has shortened.

The Master's Thesis gives an overview of reinforced concrete bridge condition in Lithuania, the main defects and damages, and their possible causes (concrete carbonation, reinforcement corrosion, action of chlorides), introduces the reinforced concrete bridge safety factor calculation methodology used by the Slovenian bridge researchers.

The bridge over the Kaunas HE has been selected as the object of analysis. During the research the main inspection was carried out, also static and dynamic tests and laboratory investigations of concrete span structure. The effect of reinforcement corrosion on stiffness and deformability of the span structure was determined.

For bridge research the reinforced concrete bridge safety factor calculation method, suggested by the Slovenian scientists, was used to evaluate the general condition of bridge structure, the effect of dead loads and moving loads, the flows of heavy vehicles and the influence of dynamic loads on bridge structure.

The obtained experimental results were compared with the theoretical results. The conclusions are given at the end of the Thesis.

The thesis size: 81 pages, 46 pictures, 35 tables, 29 formulas, 29 literature sources.

Keywords:

Reinforced concrete bridge, safety factor, reinforced bar corrosion, strength and deformability.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS	10
SANTRUMPOS	12
SIMBOLIAI	13
DARBO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI	14
ĮVADAS	15
1. LITERATŪROS APŽVALGA	16
1.1. Betono karbonizacija	16
1.2. Chloridai	17
1.3. Plieninės armatūros korozija	17
1.4. Lietuvoje esančių gelžbetoninių tiltų būklės analizė.....	19
1.5. Tiltų saugos faktoriaus skaičiavimas pagal Slovėnijoje parengtą metodiką	23
1.6. Pirmo skyriaus išvados (tikslinti)	26
2. TIRIAMASIS OBJEKTAS	27
2.1. Tiltų bendrieji duomenys.....	28
2.2. Tiltų vieta.....	29
2.3. Betono ir armatūros būklės nustatymas.....	30
2.4. Tiltų važiuojamosios dalies dangos niveliacijos duomenys.....	30
2.5. Tiltų apžiūros duomenys	31
2.6. Betono stiprumo tyrimai.....	38
2.7. Antro skyriaus išvados	39
3. PERDANGOS KONSTRUKCIJŲ TEORINIAI SKAIČIAVIMAI	40
3.1. Projektinės apkrovos	40
3.2. Ekscentrinio gniuždymo metodas.....	43
3.3. Skersinio pasiskirstymo koeficientų skaičiavimas	44
3.4. Lenkimo momentų skaičiavimas nuo H-13 ir Hr-60 apkrovų	45
3.5. Lenkimo momentų skaičiavimas nuo LST – EN 1-ojo modelio	46
3.6. Bandymo apkrovos parinkimas	48
3.7. Trečio skyriaus išvados	49
4. KOMPIUTERINIS PERDANGOS SKAIČIAVIMAS.....	50
4.1. Kompiuterinis perdangos modelis	50
4.2. Teorinių perdangos įlinkių skaičiavimas.....	50
4.3. Apskaičiuotos įrašos tiltų perdangoje.....	52
4.4. Projektinio perdangos sijų armavimo patikrinimas.....	52
4.5. Pagrindinės sijos armavimo skaičiavimas	53
4.6. Ketvirto skyriaus išvados.....	55
5. TILTO STATINIS BANDYMAS	56

5.1. Bandymo tikslas ir apkrovos	56
5.2. Bandymo statine apkrova eiga.....	57
5.3. Matavimo prietaisų išdėstymas	59
5.4. Įrašos nuo projektinių charakteristinių ir bandymo apkrovų	59
5.5. Statinio bandymo rezultatai ir jų analizė	60
5.6. Tilto įlinkių analizė vertinant armatūros koroziją (papildyti)	64
5.7. Perdangos plyšių pločių pokyčių analizė	66
5.8. Deformacijų matavimai ir įtempiai sijose	67
5.9. Penkto skyriaus išvados.....	69
6. TILTO DINAMINIS BANDYMAS	70
6.1 Bandymo tikslas ir programa.....	70
6.2. Matavimo prietaisai ir jų išdėstymas	70
6.3. Dinaminių bandymų rezultatai ir analizė.....	71
6.4. Tilto perdangos virpesių grafikai.....	71
6.5. Šešto skyriaus išvados	73
7. SAUGOS FAKTORIUS IR LEISTINA SLANKIOJI APKROVA	74
7.1. Tilto saugos faktoriaus apskaičiavimas	74
7.2. Tilto leistinos slankiosios apkrovos apskaičiavimas	77
7.3. Septinto skyriaus išvados.....	78
BENDROSIOS IŠVADOS.....	79
LITERATŪRA	80

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.	1.1 pav. Plieno korozijos elektrocheminis procesas [17]	18
2.	1.2 pav. Kiauros hidroizoliacijos pažaidos	20
3.	1.3 pav. Šulinėlių įrengimo klaidos	20
4.	1.4 pav. Deformaciniai pjūviai	21
5.	1.5 pav. Plyšiai gelžbetoninėje perdangoje.....	22
6.	1.6 pav. Kintamų apkrovų koeficiento (γ_Q) apskaičiavimo blokinė schema	24
7.	2.1 pav. Bendras vaizdas nuo žemupio pusės.....	27
8.	2.2 pav. Tiltu vaizdas nuo Petrašiūnų pusės	27
9.	2.3 pav. Tiltu vieta	29
10.	2.4 pav. Išgręžtas betoninis kernas iš pirmojo tarpatramio perdangos trečios pagrindinės sijos.....	38
11.	2.5 pav. Išgręžtas betoninis kernas iš pirmojo tarpatramio perdangos ketvirtos pagrindinės sijos.....	38
12.	2.6 pav. Išgręžtas betoninis kernas iš pirmojo tarpatramio perdangos penktos pagrindinės sijos.....	38
13.	3.1 pav. Automobilių išdėstymas pagal H-13 apkrovą.....	40
14.	3.2 pav. Vikšrinės apkrovos HG–60 schema.....	41
15.	3.3 pav. Perdangos skersinis pjūvis	43
16.	3.4 pav. Ekscentrinio gniuždymo metodu sudarytos influentės apkrovimas H-13 ir HG-60 projektinėmis apkrovomis	44
17.	3.5 pav. Ekscentrinio gniuždymo metodu sudarytos influentės apkrovimas LST-EN 1-mu apkrovos modeliu	44
18.	3.6 pav. Tiltu per Kauno HE perdangos lenkimo momentų influentės apkrovimas H-13 ir HG-60 projektinėmis apkrovomis	45
19.	3.7 pav. Tiltu per Kauno HE perdangos lenkimo momentų influentės apkrovimas LST-EN 1-mu apkrovos modeliu	48
20.	3.8 pav. Sunkvežimio modelis taikytas parengiamuosiuose skaičiavimuose.....	49
21.	3.9 pav. 1–mas apkrovos modelis pagal LST-EN	49
22.	4.1 pav. Erdvinis sijyno modelis.....	50
23.	4.2 pav. Kraštinės sijos įlinkis nuo charakteristinės NG-60 apkrovos	51
24.	4.3 pav. Antros sijos įlinkis nuo NG-60	51
25.	4.4 pav. Įlinkiai įvertinus paklotą ir betoną	51
26.	4.5 pav. Įlinkiai nuo 4 sunkiasvorių automobilių	51

27. 4.6 pav. Įrašų ir įlinkių reikšmės nuo projektinės NG-60 apkrovos.....	52
28. 4.7 pav. Antros sijos įrašų ir įlinkių reikšmės, nuo maksimalios bandymo apkrovos	52
29. 4.8 pav. Tiltu per Kauno HE perdangos pagrindinės sijos bendras vaizdas pagal 1961 m. projektą.....	52
30. 4.9 pav. Perdangos sijos armavimas pagal 1961 m. projektą	53
31. 4.10 pav. Sijos skerspjūvis kompiuterinėje programoje	54
32. 4.11 pav. Reikiamas išilginis armavimas perdangos sijoje prie veikiančių diafragmų	54
33. 4.12 pav. Reikiamas išilginis armavimas perdangos sijoje prie nutrūkusių diafragmų.....	55
34. 5.1 pav. Mobilus apžiūrų bokštelis „MOOG“	57
35. 5.2 pav. Pirmojo tarpatramio perdanga apkrauta tiltų apžiūros bokštelio „MOOG“ ir dviem sunkiasvoriais automobiliais	58
36. 5.3 pav. Pirmojo tarpatramio perdanga apkrauta apžiūros bokštelio „MOOG“ ir trimis sunkiasvoriais automobiliais	58
37. 5.4 pav. Pirmojo tarpatramio perdanga apkrauta keturiais sunkiasvoriais automobiliais, sustatytais galais vienas į kitą	58
38. 5.5 pav. Tiltu perdangos įlinkio matavimas su nivelyru.....	58
39. 5.6 pav. Trečiojo tarpatramio perdanga apkrauta dviem sunkiasvoriais automobiliais.....	59
40. 5.7 pav. Trečiojo tarpatramio perdanga apkrauta keturiais sunkiasvoriais automobiliais.....	59
41. 5.8 pav. Normalinio plyšio pločio pokyčio matavimas pirmojo tarpatramio perdangos penktos pagrindinės sijos viduryje, apatinėje lentynoje	66
42. 5.9 pav. Istrižojo plyšio pločio pokyčio matavimas pirmojo tarpatramio perdangos ketvirtos pagrindinės sijos viduryje	66
43. 6.1 pav. Poslinkių jutikliu, pirmojo tarpatramio perdangos viduriniame pjūvyje, užregistruotas dinaminio įlinkio grafikas	71
44. 6.2 pav. Pagreičių jutikliu pirmojo tarpatramio perdangos viduriniame pjūvyje, užregistruotas perdangos virpesių grafikas.....	72
45. 6.3 pav. Pagreičių jutikliu, pirmojo tarpatramio perdangos viduriniame pjūvyje, užregistruotų pagreičių grafikas	73
46. 6.4 pav. Pagreičių jutikliu, pirmojo tarpatramio perdangos viduriniame pjūvyje, užregistruotų pagreičių grafikas	73

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.	1.1 lentelė. Santykis tarp būklės vertės ir nusidėvėjimo faktoriaus	24
2.	2.1 lentelė. Tiltu per Kauno HE bendrieji duomenys.....	28
3.	2.2 lentelė. Tiltu per Kauno HE techniniai rodikliai.....	28
4.	2.3 lentelė. Karbonizacijos gylio, apsauginio betono sluoksnio storio ir chloridų kiekio betone nustatymo rezultatai.....	30
5.	2.4 lentelė. Tiltu defektų apžvalga	31
6.	3.1 lentelė. Automobilinių tiltų projektinių apkrovų duomenys pagal H-106-53 normas .	40
7.	3.2 lentelė. Dinamiškumo koeficientai taikomi gelžbetoniniams tiltams	41
8.	3.3 lentelė. Ratinės ir vikšrinių apkrovų duomenys pagal H-106-53 normas.....	42
9.	3.4 lentelė. Pirmojo ir trečiojo tarpatramių perdangose atsirandančių įrašų skaičiavimas nuo projektinių H-13 ir HG- 60 apkrovų	42
10.	3.5 lentelė. Lenkimo momentų skaičiavimas labiausiai apkrautoje kraštinėje sijoje nuo H-13 projektinės apkrovos	45
11.	3.6 lentelė. Apkrovos Q_{ik} , q_{ik} , q_{rk} pirmojo ir trečiojo tarpatramių perdangoms	47
12.	3.7 lentelė. Apkrovimo koeficientai (α_{Qr} , α_{qi} ir α_{qr}) pirmojo ir trečiojo tarpatramių perdangoms	47
13.	3.8 lentelė. Lenkimo momentų skaičiavimas tiltu per Kauno HE perdangos viduriniame pjūvyje nuo preliminarios bandymo apkrovos.....	49
14.	4.1 lentelė. Nuolatinės apkrovos pagal N-106-53 ir LST-EN	53
15.	5.1 lentelė. Bandymui naudotų automobilių masės.....	56
16.	5.3 lentelė. Lenkimo momento skaičiavimas labiausiai apkrautoje sijoje įvertinant skersinio pasiskirstymo koeficientą.....	60
17.	5.4 lentelė. Lenkimo momentai pirmojo tarpatramio perdangos labiausiai apkrautos sijos viduriniame pjūvyje nuo projektinės charakteristinės HG-60 ir bandymo apkrovų	60
18.	5.5 lentelė. Koeficiento β reikšmės išbandant pirmojo tarpatramio perdangos vidurinį pjūvį	61
19.	5.6 lentelė. Koeficiento β reikšmės išbandant trečiojo tarpatramio perdangos vidurinį pjūvį	61
20.	5.7 lentelė. Pirmojo tarpatramio perdangos išmatuoto ir teorinio įlinkio santykio skaičiavimas nuo didžiausios simetrinės bandymo apkrovos	62
21.	5.8 lentelė. Trečiojo tarpatramio perdangos išmatuoto ir teorinio įlinkio santykio skaičiavimas nuo didžiausios simetrinės bandymo apkrovos	62

22.	5.9 lentelė. Koeficiento α reikšmės išbandant pirmojo tarpatramio perdangos vidurinį pjūvį	63
23.	5.10 lentelė. Koeficiento α reikšmės išbandant trečiojo tarpatramio perdangos vidurinį pjūvį	63
24.	5.11 lentelė. Faktinio ir teorinio įlinkio santykio skaičiavimas.....	64
25.	5.12 lentelė. Faktinio ir teorinio įlinkio santykio skaičiavimas.....	65
26.	5.13 lentelė. Perdangos sijose matuotų plyšių pločių pokyčių reikšmės.....	66
27.	5.14 lentelė. Tilto pirmojo tarpatramio perdangos sijų deformacijų kitimas bandymo metu.....	68
28.	5.15 lentelė. Tilto per Kauno HE perdangos sijų deformacijų skaičiavimas.....	68
29.	5.16 lentelė. Teorinių ir faktinių įtempių palyginimas	69
30.	6.1 lentelė. Tilto perdangos dinaminio bandymo pradiniai duomenys.....	70
31.	6.2 lentelė. Tilto pirmojo tarpatramio perdangos dinaminiai rodikliai užfiksuoti dinaminio bandymo metu.....	71
32.	7.1 lentelė. Pagrindiniai duomenys tilto perdangos saugos faktoriaus (RF) apskaičiavimui pagal jos stiprumą	74
33.	7.2 lentelė. Tilto elementų nusidėvėjimo faktoriaus reikšmė.....	75
34.	7.3 lentelė. Kintamų apkrovų poveikio koeficientai priklausomai nuo sunkiasvorių transporto priemonių srautų per tiriamą tiltą.....	76
35.	7.4 lentelė. Dažniausiai pasitaikančios sunkiasvorės transporto priemonės [4] kurios gali ir negali prasilenkti ant tilto per Kauno HE.....	78

SANTRUMPOS

<i>STR</i>	-	Statybos Techninis Reglamentas;
<i>m</i>	-	metrai;
<i>%</i>	-	procentai;
<i>kt</i>	-	kita;
<i>kg</i>	-	kilogramai;
<i>t</i>	-	tona;
<i>Hz</i>	-	hercas;
<i>pav.</i>	-	paveikslas;
<i>g/b</i>	-	gelžbetonis;
<i>kN</i>	-	kiloniutonas;
<i>MPa</i>	-	megapaskalis;
<i>mm</i>	-	milimetrai;
<i>VšĮ</i>	-	Viešoji įstaiga;

SIMBOLIAI

DAF	- dinamiškumo koeficientas;	M_{crc}	- pleišėjimo momentas;
Φ	- skerspjūvio stiprumo sumažinimo indeksas;	G_n	- nuolatinių apkrovų efektas;
μ_{din}	- dinamiškumo koeficientas (pagal rusiškas projektavimo normas);	G_Q	- kintamų apkrovų efektas;
D_{dyn}	- dinaminis įlinkis;	σ_x	- normaliniai įtempiai;
D_{sta}	- statinis įlinkis;	γ_Q	- patikimumo koeficientas kintamoms apkrovoms;
n_0	- dažnis;	$k_{\alpha Q}$	- skersinio pasiskirstymo koeficientas;
E	- tamprumo modulis;	γ_G	- patikimumo koeficientas nuolatinėms apkrovoms;
I	- inercijos momentas;	w_v	- vertikalus judančios masės poslinkis;
g	- laisvojo kritimo pagreitis;	u''_c	- sijos taško pagreitis;
Φ	- inercijos jėga;	m_v	- krovinio masė;
g	- laisvojo kritimo pagreitis;	V	- tiriamo elemento atsparumo kitimo koeficientas
R_d	- skerspjūvio laikomoji galia;	μ_j	- nedimensiniai parametras;
g	- laisvojo kritimo pagreitis;	A_i, B_i	- konstantos;
ξ_n	- slopinimo santykis;	C_i, D_i	- konstantos;
E	- tamprumo modulis;	β_C	- Saugumo rodiklio vertė;
I	- inercijos momentas;	δ	- virpesių slopinimo koeficientas;
n_0	- savųjų svyravimų dažnis;	α_R	- nusidėvėjimo faktorius parodantis konstrukcijos būklę;
u	poslinkis;	\dot{w}_g	- transporto vertikalus greitis;
\dot{u}	- greitis;	A_{max}	- didžiausia virpesių amplitudė.
\ddot{u}	- pagreitis;	Δx	- absoliučioji paklaida;
ω_{bn}	- n -osios modos svyravimų dažnis;	$\Delta x / x$	- santykinė paklaida;
ω_b	- slopinimo dažnis;	W_{red}	- redukuotas skerspjūvio atsparumo momentas;
$q(t)$	- n -osios modos amplitudė;	W_{pl}	- plastinis atsparumo momentas;

DARBO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI

Darbo tikslas: pasiūlyti Lietuvoje esančių gelžbetoninių tiltų saugos faktoriaus apskaičiavimo metodiką įvertinant bendrą tiltų būklę, eksploatacijos metu atsiradusių defektų įtaką ir sunkiasvorių transporto priemonių srautus.

Darbo uždaviniai:

1. Apžvelgti Lietuvoje esančių gelžbetoninių tiltų būklę;
2. Išanalizuoti tilto per Kauno HE eksploatacijos metu atsiradusius defektus (betono karbonizacija, armatūros korozija) ir jų įtaką perdangos deformatyvumui;
3. Atlikti tilto per Kauno HE perdangos standumo analizę įvertinant ir neįvertinant armatūros korozijos įtakos;
4. Apskaičiuoti tilto saugos faktorių įvertinant esamą jo būklę ir jį veikiančių kintamų apkrovų poveikį;
5. Atlikti teorinių ir eksperimentinių rezultatų analizę ir pateikti darbo išvadas.

Darbo naujumas: pasiūlytas gelžbetoninių tiltų saugos faktoriaus apskaičiavimo metodas įvertinant pagrindinius tiltus charakterizuojančius parametrus.

Darbo praktinė vertė: pasiūlytą gelžbetoninių tiltų saugos faktoriaus apskaičiavimo metodą galima taikyti įvairių gelžbetoninių perdangų tipų analizei.

IVADAS

Tiltai yra sudėtingi ir brangūs susisiekimo statiniai, turintys didelę reikšmę ekonominiams, politiniams ir kultūriniais ryšiams. Ilgą laiką vyravo nuomonė, kad gelžbetoniniai tiltai yra ilgaamžiai statiniai, kuriems pakanka tik įprastos nuolatinės priežiūros, bet pastaraisiais dešimtmečiais visose šalyse pastebimas intensyvus fizinis ir moralinis šių statinių senėjimas.

Gelžbetonis yra ekonomiška, universali ir labai plačiai naudojama medžiaga visame pasaulyje. Gelžbetonio panaudojimo pradžia siejama su prancūzų Lamblo, Kuanje, Monjė (Lamblot, Coignet, Monnier) vardais. Versalio sodininkas J. Monje, 1867 m. užpatentavo naują statybos medžiagą – gelžbetonį ir pritaikė gėlių dėžių, vandens talpų ir perdangos plokščių gamybai. Tiltų statyboje gelžbetonis imtas taikyti tik XIX a. pabaigoje, o plačiausiai paplito XXa.

Lietuvoje apie 94 % tiltų yra gelžbetoniniai. Dažniausiai pasitaikantys defektai yra betono karbonizacija, armatūros korozija bei laikančiųjų perdangų konstrukcijų pleišėjimas (Z. Kamaitis 2000; Broomfield, J.P. 2007). Nepalankios naudojimo sąlygos, intensyvėjančios bei sunkėjančios transporto priemonės greitina tilto degradacijos procesą. Todėl yra poreikis atlikti mokslinius tyrimus, kurių pagalba būtų galima detaliai įvertinti konstrukcijų stiprumą ir ilgaamžiškumą. Vienas iš skaičiavimų yra „tiltų saugos faktoriaus“ skaičiavimas, kuriame yra įvertinama: esama tilto būklė; nuolatinių apkrovų efektas; kintamų apkrovų efektas; dinaminių apkrovų ir perkrovų efektas. Šiuo metu Europoje galiojančiose projektavimo normose [2, 3, 4] nėra aprašyta kaip įvertinti naudojamų tiltų saugumo faktorių, nes išvardinti patikimumo koeficientai yra apibrėžti tik naujiems tiltams, tačiau nėra jokių rekomendacijų dėl koeficientų taikymo seniems tiltams, suprojektuotiems ne pagal Europines normas. Slovėnijos mokslininkai sukūrė saugos faktoriaus skaičiavimo metodiką, kurią galima būtų taikyti ir Lietuvoje [22, 23, 24].

Šiame moksliniame darbe kaip tiriamasis objektas pasirinktas automobilinis tiltas per Kauno HE, kuriam atlikti teoriniai, eksperimentiniai skaičiavimai, paskaičiuotas tilto saugos faktorius ir leistina slankioji apkrova.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Betono karbonizacija

Betono karbonizacijos priežastys yra šios:

- oras, kuriame yra anglies dioksido (CO₂); normali jo koncentracija ore yra maždaug 0,6 mg/l, tačiau pramoniniuose rajonuose šis rodiklis gali būti didesnis;
- cementas, kuriame yra kalkių (Ca(OH₂));
- vanduo betone.

Kai betone yra nuo 0,5% iki 1% laisvo vandens, o santykinė drėgmė – nuo 50% iki 60%, vyksta karbonizacijos reakcija:



Proceso intensyvumas priklauso nuo betono tankio, laidumo dujoms ir vandeniui prasiskverbti. Kuo poringesnis betonas, tuo giliau „keliauja“ karbonizacija. O kuo storesnis karbonatizuoto betono sluoksnis, tuo greičiau gali prasidėti armatūros korozija. Kai betonas laidus, karbonizacija vyksta labai greitai ir per 5–7 metus pasiekia 20–25 mm gylį, t. y. pereina per visą betono apsauginį sluoksnį ir pradeda ardyti armatūrą [17].

Betono karbonizacija konstrukcijai nėra labai kenksminga, jeigu ji pasireiškia tik paviršutiniame sluoksnyje ir jame nėra plyšių bei porų. Kai betono karbonizacijos frontas pasiekia plieninę armatūrą, jos plona oksidų plėvelė, saugojanti armatūrą nuo korozijos, suardoma; pH rodiklis gali būti mažesnis kaip 9. Armatūra pradeda rūdyti, „atkeliavus“ drėgmei ir deguoniui. Betonas sparčiai karbonizuoja, kai santykinė drėgmė ~ 60% ir labai lėtai, kai santykinė drėgmė lygi 25% arba 100%

Mūsų šalies, (kai kuriuose) gelžbetoniniuose tiltuose betono karbonizacijos matavimo duomenys rodo, kad karbonizacijos gylis lygus 20, 35 ir net daugiau kaip 50 mm. Todėl, kai kuriuose gelžbetoniniuose tiltuose karbonizacijos frontas jau yra pasiekęs armatūrą.

1.2. Chloridai

Apsaugant kelių ir tiltų dangas nuo apledėjimo, ant jų laistomi druskų tirpalai, kuriuose yra chloridų, t. y. chloro junginių su metalais. Ypač agresyvūs yra magnio ir kalcio chloridai. Chloridų jonai, patekę ant gelžbetoninių konstrukcijų, sukelia reakciją tarp cementinio akmens, kalcio hidroksido ir magnio chlorido. Šios reakcijos produktai didina betono poringumą ir sudaro sąlygas chloridų jonams skverbtis gilyn į betoną, kurie pasiekę armatūrą gali sukelti jos koroziją net esant aukštam pH rodikliui. Kartu su vandeniu ir deguonimi chloridų jonai ne tik sužadina elektrocheminį procesą, bet padidina elektros laidumą betone ir pagreitina armatūros koroziją [18]. Be to, chloridai gali sukelti armatūros lokalinę (taškinę) koroziją, kuri yra pavojinga tuo, kad vizualiai jos galima nepastebėti, nes korozijos produktų tūris beveik nepadidėja ir ant betono paviršiaus korozijos pėdsakų nesimato.

Pagal įvairių užsienio šalių nurodymus yra reikalaujama, kad tiltų remonto metu iš konstrukcijų pažeistas betonas turi būti pašalintas, jeigu ties armatūra chloridų kiekis betone yra didesnis kaip 0,2–0,3% nuo cemento masės.

Tiriant senstančius tiltus, dažnai cemento kiekis betone yra abejotinas arba nežinomas, todėl chloridų procentinis kiekis nustatomas nuo betono masės. Chloridų kiekio pavojus armatūros korozijai vertinamas taip:

- mažiau kaip 0,02% – nepavojingas;
- nuo 0,02 iki 0,05% – mažai pavojingas;
- nuo 0,05 iki 0,15% – pavojingas;
- daugiau kaip 0,15% – labai pavojingas.

Suomijos Automobilių kelių direkcijos leidinyje apie tiltų remontą, rekomenduojama remonto metu pašalinti betono sluoksnį, kuriame chloridų kiekis yra 0,07 % nuo betono masės, jei matuojama rūgšties tirpale ir 0,05 % – jei matuojama vandenyje.

1.3. Plieninės armatūros korozija

Suvokus betono karbonizacijos procesą, galima teigti, kad armatūra, apsaugota šarmingo ir sveiko betono, nerūdija. Tačiau nušarminas ir poringas betonas leidžia plienui rūdyti. Labai agresyvūs chloro jonai Cl^- pro ploną betoninį apsauginį sluoksnį patekusi jų „kariuomenė“ greitai suardo armatūros paviršiuje esančią pasyviają plėvelę ir armatūra pradeda rūdyti (visų pirma, atskiruose taškuose), nors betonas ir gali būti sveikas ir šarmingas.

Plieno korozija yra elektrocheminis procesas (žr. 1.1 pav.), lydymas oksidacijos ir redukcijos reakcijų. Prie armatūros susidariusiam elektrolitui susilietus su plieniniu paviršiumi, susidaro potencialų skirtumas.

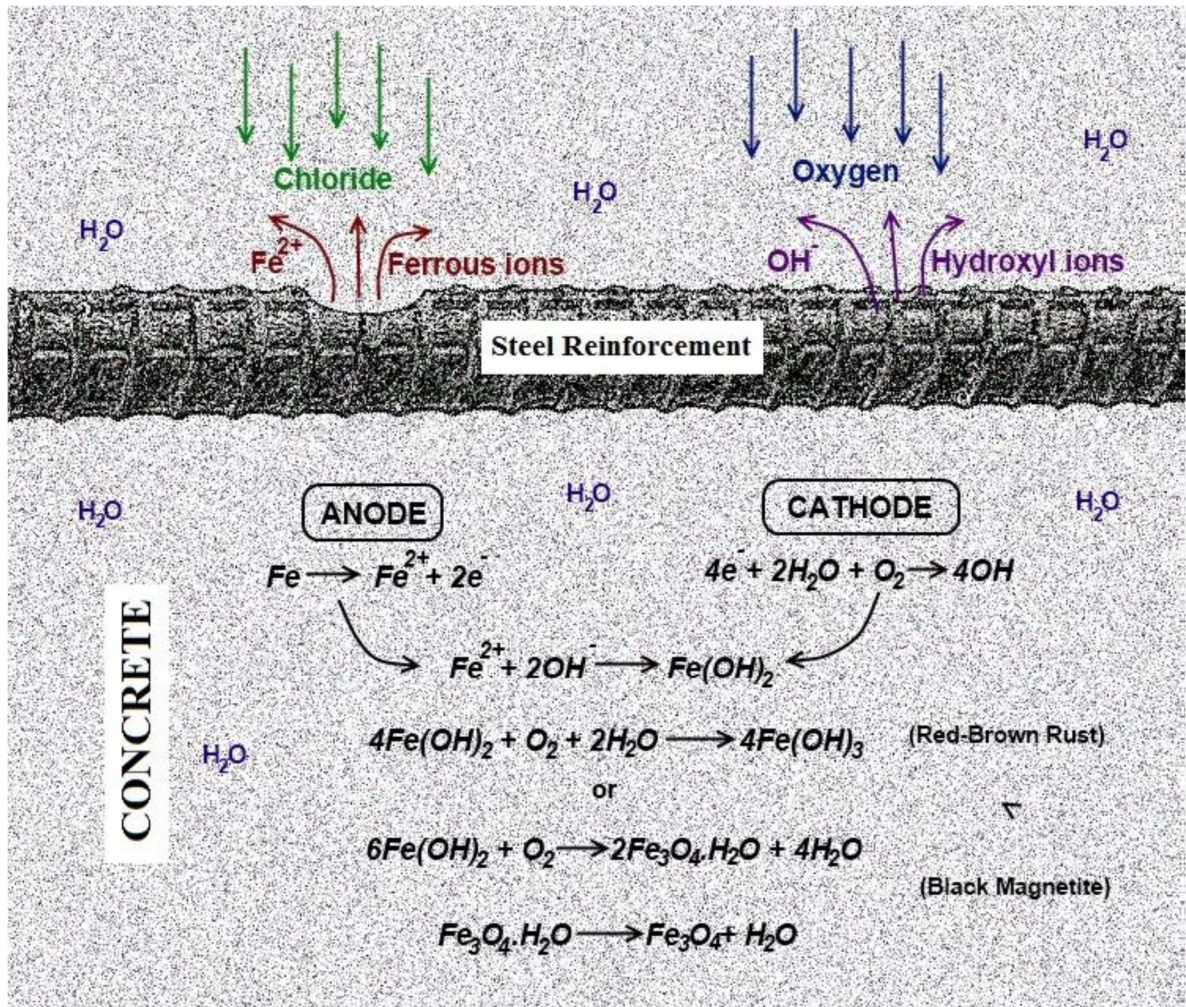
Ties anodu (korozijos celė) metalas virsta į jonus ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$). Išsiskyre elektronai teka į katodą, jungiasi su deguonimi, vandeniu ir išsiskiria hidroksilo jonai



kurie jungiasi su geležies jonais; šitaip susidaro rūdys.



Tai yra ruda ar juoda plieno oksidavimosi medžiaga. Vadinasi, plienas koroduos, jeigu ties katodu nuolat atkeliaus deguonis ir drėgmė.



1.1 pav. Plieno korozijos elektrocheminis procesas [17]

Apskritai patirtis rodo, kad praeityje gamintas gelžbetonis nėra patvari medžiaga. Ypač didelį rūpestį kelia įtemptasis gelžbetonis, buvęs ar tebesantis agresyvioje aplinkoje. Neįtemptosios armatūros korozijos požymiu pastebime plika akimi. Tačiau įtemptosios armatūros (josios inkarų, didelio stiprumo vielų) galimasis korozinis pleišėjimas yra pasislėpęs, jį aptikti nėra lengva. Tokia armatūra gali visiškai nelauktai nutrūkti, o tiltas – sugriūti. Taip yra atsitikę Anglijoje (1967 m.), Velse (1985 m.), Belgijoje (1992 m.). Po tokių skaudžių avarių tiltų priežiūra, aišku susirūpinama labai rimtai.

1.4. Lietuvoje esančių gelžbetoninių tiltų būklės analizė

Tiltai yra ilgaamžiais statiniai, bet bėgant laikui jų konstrukcijos sensta, yra ardamos, tiltai nusidėvi. Degradacijos procesą greitina mainios klimatinės ir nepalankios naudojimo sąlygos, intensyvėjančios bei sunkėjančios transporto priemonės, netinkama priežiūra. Vertinant tiltų techninę būklę, vienas svarbiausių faktorių yra tilto naudojimo trukmė.

Pagal amžių Lietuvos tiltus sąlyginai galima suskirstyti į tris grupes: senieji tiltai, pastatyti 1872-1953 m. (jų yra ~15%); „sovietmečio tiltai“, pastatyti 1953-2001 m. (jų yra daugiausia, ~80%), o nuo 2001 m. iki 2016 m. pastatytus tiltus galima priskirti šiuolaikinei statybai (jų yra ~5%).

Kiekvienai „amžiaus grupei“ yra būdingos kitokios tiltų projektavimo normos, statybos būdai, darbų technologijos, medžiagos, pagaliau,- darbų kokybė. Pvz., senųjų tiltų masyvios atramos buvo įrengiamos ant natūralių pagrindų, daugelio tiltų ramentai - iš akmens mūro, perdangos - monolitinės, išbetonuotos vietoje. Didesni tiltų tarpatramiai būdavo perdengiami arkomis arba santvaromis. Tiltai buvo statomi ilgai, rūpestingai, ne vienas iš jų iki šiol naudojamas (apžiūrų metu aptinkama ~1930 m. pastatytų nedidelių, puikiai išsilaikiusių geros būklės tiltų).

Sovietmečiu tiltų statybai buvo suprojektuoti ir pagaminti unifikuoti elementai (sijos, plokštės, poliai ir kt.). TSRS projektavimo normose [6], taupant medžiagas, gaminiamas buvo rekomenduoti minimalūs betono apsauginiai sluoksniai, elementų gamyba nebuvo ištobulinta, buvo daroma daug gamybos broko (blogai parinkta betono mišinio sudėtis, mišiniai nepakankamai sutankinti, elementų gamybos metu armatūros tinklai pasislinkdavo klojiniuose, „išlįsdavo“ į gaminamų elementų paviršių ir kt.), tiltų buvo statoma daug ir greitai. Blogiausia, kad nekokybiškai pagamintus, su per plonu apsauginiu betono sluoksniu laikančiųjų konstrukcijų elementus nuo žalingo vandens poveikio turėjo apsaugoti netobulos konstrukcijos, iš neilgaamžių, netinkamų medžiagų įrengti ir laiku nekeičiami pakloto elementai. Projektų netobulumai (pvz., nekloti hidroizoliacijos po šalitilčiais), elementų įrengimo darbų klaidos, ilgametė nepriežiūra lėmė tai, kad daugumos „sovietmečiu“ pastatytų tiltų pakloto elementai greitai nusidėvėjo. Apžiūrų metu galima pamatyti, kad kai kuriuose krašto ir beveik visuose rajoninės reikšmės keliuose esančių to laikmečio tiltų yra su senais, dar statybos metu įrengtais pakloto elementais, kurie pasenę morališkai ir nusidėvėję fiziškai, nebeatlieka savo funkcijos saugoti laikančiąsias konstrukcijas (magistraliniuose ir daugelyje krašto kelių, senieji pakloto elementai yra pakeisti naujais). Pakloto elementų būklė tilto laikančiosioms konstrukcijomis yra labai svarbi. Kaip taisyklė – nusidėvėję, nefunkcionuojantys pakloto elementai beveik visada būna perdangos, o kartais ir atramų pažaidų atsiradimo priežastimis.

Svarbiausiais pakloto elementais galima laikyti tuos, kurie neleidžia vandeniui patekti ant laikančių konstrukcijų - hidroizoliaciją, deformacinius pjūvius ir vandens nuleidimo įrenginius.

Hidroizoliacija labai svarbi, ji saugo perdangą, jos negalima apžiūrėti ir suremontuoti, o norint pakeisti – reikia demontuoti visus pakloto elementus. Kiaura hidroizoliacija, tai šlampanti ir irstanti perdanga. “Sovietmečiu“ statytuose tiltuose hidroizoliacija dažniausiai buvo įrengiama iš toliaus ruberoido, ant mažų tiltų visai neklojama, kartais klojant asfaltą pažeidžiama ir jau nuo tilto naudojimo pradžios kiaura (žr: 1.2 pav.).



1.2 pav. Kiauros hidroizoliacijos pažaidos

Hidroizoliacijos būklę blogino ir tai, kad nebuvo ant jos susikaupusio vandens surinkimo ir nuleidimo sistemos. Per asfaltą prasisunkęs vanduo kaupiasi ant hidroizoliacijos, užsilaiko nelygumuose, sunkiasi į perdangos plokštę, skersiniais nuolydžiais nuteka į kraštus, ardo prie šaltilėčių užriestą hidroizoliaciją (po šaltilėčiais hidroizoliacijos neklodavo), skverbiasi po šaltilėčiais, o išsisunkęs iš po jų - teka ant kraštinių perdangos elementų. Beveik visų to laikmečio tiltų perdangų plokščių kraštai „nugriaužti“, kraštinių sijų būklė daug blogesnė nei vidurinių [9].



1.3pav. Šulinėlių įrengimo klaidos

Senuosiuose, vidutinio didumo tiltuose, dažniausiai yra įrengti uždaro tipo deformaciniai pjūviai su skardos kompensatoriais. Tai nėra tobulo konstrukcijos elementas. Virš tokių pjūvių nuolat sutrūksta ir ardoma važiuojamosios dalies asfalto danga, pjūvių kompensatoriai užkemšami, sukoroduoja.



1.4pav. Deformaciniai pjūviai

Tokius deformacinius pjūvius tinkamai prižiūrėti ir suremontuoti nėra kaip ir apžiūrų metu retai kada randamas pjūvis su skardos kompensatoriumi nekiauras. Dideliuose tiltuose būna perdengtieji deformaciniai pjūviai (tarpas perdengtas metalo lakštais, „šukomis“). Nuo transporto priemonių smūgių kenčia važiuojamojoje dalyje esančios metalinės dalys, o po pjūviais įrengti vandens surinkimo ir nuleidimo latakai dažniausiai būna pilni purvo ir surūdiję (žr: 1.4 pav.).

Plyšiai gelžbetoniniuose elementuose gali atsiverti elementus gaminant, pervežant, montuojant arba eksploatuojant. Neplatūs (iki ~0,10 mm), trumpi, paviršiniai plyšiai, atsivėrę betonui susitraukiant, dažniausiai yra nepavojingi. Tačiau kitokie plyšiai, atsivėrę tilto statybos bei eksploatacijos metu, pažeidžia konstrukcijų vientisumą ir visados sukelia rūpesčių, iškelia klausimus dėl konstrukcijų saugaus ir ilgalaikio tarnavimo. Senstančiuose tiltuose aptinkamų plyšių atsivėrimo priežastys įvairios: projektuotojų ar gamintojų klaidos, netobuli konstrukcijų skaičiavimo metodai, netolygūs pagrindų nuosėdžiai, pasunkėjusios transporto priemonės, padidėjęs paslankiosios apkrovos dinaminis poveikis į perdangą, pastorintos tilto važiuojamosios dalies dangos, agresyvus aplinkos poveikis, bloga hidroizoliacija, armatūros ar kitų plieninių elementų korozija ir t. t. Dažnai plyšiai atsiveria ne dėl vienos, o dėl kelių priežasčių nepalankaus derinio.

Tilto perdangos elementuose gali atsiverti normaliniai (skersiniai), išilginiai bei įstrižieji plyšiai. Pagal atsivėrimo formą plyšiai gali būti: *nenutrūkstantieji, nutrūkstantieji, išsišakoję;*

pagal prasiskverbimo gylį: *paviršiniai arba kiauriniai*; pagal plitimo pobūdį: *stabilūs, palaipsniui atsiveriantieji, periodiškai atsiveriantieji ir užsiveriantieji*.

Normaliniai plyšiai gali atsiverti gelžbetonio lenkiamuose elementuose. Įtempto gelžbetonio elementuose normaliniai plyšiai yra neleistini. Išilginiai plyšiai gali atsiverti dėl armatūros korozijos arba dėl didelių gniuždymo jėgų ties įtemptą armatūrą. Laikoma, kad korozinių plyšių plotis apytiksliai lygus korozijos produktų ant armatūros strypo dvigubam storiumi, o rūdžių storis yra 2,5–3 kartus didesnis už armatūrinio strypo sukorodavusio sluoksnio storį.

Istriži arba pasvirusios krypties plyšiai dažniausiai atsiveria plonesniuose perdangų elementuose. Tipiški istriži (~45°) plyšiai gali atsiverti paprastojo gelžbetonio sijų sienelėse arti atramų. Lėkštesni (10°~20°) plyšiai gali atsiverti įtemptojo gelžbetonio dėžinių perdangų sienelėse, pvz., surenkamų rėminių nekarpytų viadukų dėžinio skerspjuvio sijose. Laikoma, kad tokie plyšiai yra pavojingi, kai jų vienas galas – ties sienelės ir viršutinės plokštės sandūra, kitas – blokų sandūroje, o jų plotis – didesnis už 0,3 mm.



1.5pav. Plyšiai gelžbetoninėje perdangoje.

1.5. Tiltų saugos faktoriaus skaičiavimas pagal Slovėnijoje parengtą metodiką

Slovėnijoje veikiančio Tiltų ir statinių tyrimo instituto „ZAG“ mokslininkai yra parengę metodiką kaip apskaičiuoti tiltų saugumo faktorių. Slovėnijoje tiltų saugumo faktorius apskaičiuojamas pagal formulę:

$$RF = \frac{\Phi \cdot R_d - \gamma_G \cdot G_n}{\gamma_Q \cdot G_Q \cdot DAF}, \quad (1.5.1)$$

čia: Φ – skerspjūvio stiprumo sumažinimo indeksas; R_d – skerspjūvio laikomoji galia; G_n – nuolatinių apkrovų efektas; G_Q – kintamų apkrovų efektas; γ_Q – patikimumo koeficientas kintamoms apkrovoms; γ_G – patikimumo koeficientas nuolatinėms apkrovoms; DAF – dinamiškumo koeficientas.

„ZAG“ instituto mokslininkai savo sudarytoje metodikoje pažymėjo, kad siekiant užtikrinti tilto saugumą eksploatacijai, saugumo faktoriaus koeficientas turi būti $> 1,0$. Sudarytoje metodikoje tilto perdangos dinamiškumo koeficientas apskaičiuojamas pagal vokiškose tiltų projektavimo normose (DIN 1072) pateiktą formulę:

$$DAF = 1,4 - 0,008 \cdot L, \quad (1.5.2)$$

čia: L – tilto tarpatramio ilgis (m).

Tilto perdangos skerspjūvio stiprumo sumažinimo indeksas apskaičiuojamas pagal formulę:

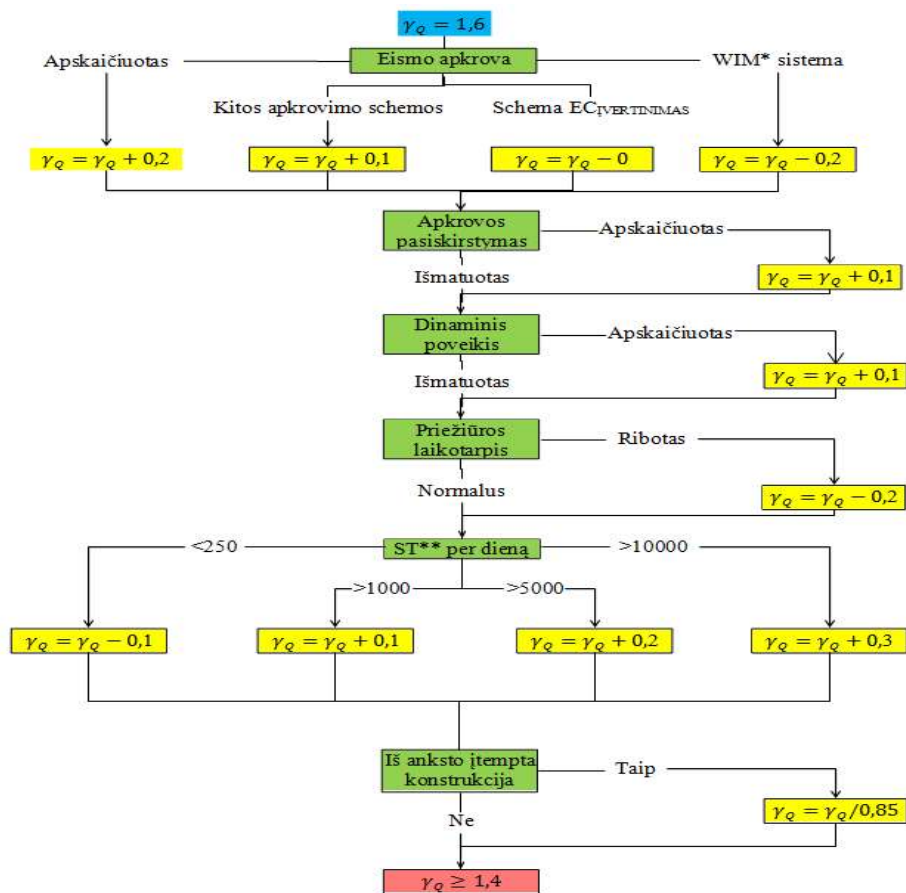
$$\Phi = B_R \cdot e^{\alpha_R \cdot \beta_C \cdot V}, \quad (1.5.3)$$

čia: B_R – laikomosios galios nuokrypis t.y. kritinio elemento ruožo esamo ar suprojektuoto vidutinio atsparumo santykis. Dažniausiai priimamas 1,0, jei neatlikti jokie išsamesni medžiagų tyrimai; α_R – nusidėvėjimo faktorius parodantis konstrukcijos būklę ir tolimesnę laikomosios galios mažėjimą iki kito patikrinimo (šio faktoriaus reikšmės pateiktos 1.1 lentelėje); V – tiriamo elemento atsparumo kitimo koeficientas, parodantis bandymo duomenų tikrumą, dažniausiai imamas tarp 10% ir 20%; β_C – planuojama saugumo rodiklio vertė, priimama 2,5 – ribotam eksploatacijos laikui (iki 6 metų), arba 3,5 – įprastam eksploatacijos laikui (iki 20 metų).

1.1 lentelė. Santykis tarp būklės vertės ir nusidėvėjimo faktoriaus

Klasė	Būklės apibūdinimas	Darbai kuriuos reikia atlikti	Būklės įvertis	Nusidėvėjimo faktorius, α_R
1	Labai gera	Nereikia atlikti jokių priežiūros ir remonto darbų	<5	0,3
2	Gera	Reikalinga reguliari priežiūra	3 – 10	0,4
3	Patenkinama	Intensyvi priežiūra, remonto darbai atliekami kas 6 metai	7 – 15	0,5
4	Pakenčiama	Esminiai remonto darbai būtini kas 3 metai	12 – 25	0,6
5	Netinkama	Reikalingas skubus remontas	22 – 35	0,7
6	Kritinė	Nedelsiant būtina uždaryti, atlikti remonto ir stiprinimo darbus	>30	0,8

Kintamų apkrovų patikimumo koeficiento reikšmė apskaičiuojama pagal 1.6 paveiksle pateiktą blokinę schemą.



1.6 pav. Kintamų apkrovų koeficiento (γ_Q) apskaičiavimo blokinė schema

Pastabos: * judančių sunkiasvorių transporto priemonių svėrimo sistema, **sunkiasvorių transporto priemonių srautas per parą.

Parengtoje metodikoje nuolatinėms apkrovoms patikimumo koeficientas yra priimtas $\gamma_G = 1,2$. Kintamų apkrovų patikimumo koeficientas (γ_Q) parenkamas pagal Slovėnijos mokslininkų sudarytą algoritmą (žr. 1.6 pav.), pagal kurį labai svarbu atsižvelgti į šiuos veiksnius:

1. Surinkti visą informaciją apie sunkiasvorių transporto priemones:
 - sunkiasvorių transporto priemonių skaičius;
 - perkrautos sunkiasvorių transporto priemonės.
2. Išanalizuoti sunkiasvorių apkrovų įtaką tiriamoms konstrukcijoms:
 - dinaminė apkrovų efektas;
 - sunkiasvorių transporto priemonių ašių apkrovos.
3. Išsiaiškinti kuriam laikotarpiui skaičiuojamas saugos faktorius. Trumpesniam laikotarpiui prognozuojant saugos faktorių (keliems metams) užtenka mažiau duomenų apie sunkiasvorių transporto priemonių srautus ir jų daromą įtaką tiltams, tačiau prognozuojant saugos faktorių ilgesniam laikotarpiui būtina detaliau išsiaiškinti sunkiasvorių transporto priemonių srautus ir jų kitimo tendencijas.
4. Reikia tiksliai išanalizuoti transporto srautų sudėtį, kiek įmanoma tiksliau išsiaiškinti sunkiasvorių transporto priemonių skaičių, kiek ir kokio tipo jų yra viename ar kitame kelyje.

Slovėnijos mokslininkų parengtos metodikos išvadose nurodoma, kad:

- sudaryta metodika pritaikyta tik skaičiuojant gelžbetoninių tiltų saugumo faktorių, nes kito tipo tiltų Slovėnijoje nėra;
- šią metodiką pritaikyti yra nesudėtinga, kai analizuojami tiltai yra geros būklės, turima visa archyvinė ir projektinė dokumentacija, paprasta tiltų skaičiuojamoji schema, labai mažas defektų ir pažeidimų kiekis tiltų konstrukcijose;
- norint tiksliai suskaičiuoti tilto saugumo faktorių būtina žinoti tikslius perdangos skerspjūvio matmenis, tikslų armavimą, tikslias apkrovas, tiksliai įvertinti visus defektus ir pažeidimus, žinoti judančių kintamų apkrovų įtaką tiltų perdangoms ir jų reakciją į šias apkrovas.

1.6. Pirmo skyriaus išvados

Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad:

- pagrindinės priežastys sąlygojančios gelžbetoninių tiltų eksploatacijos trukmę: betono karbonizacija, armatūros korozija, chloridų poveikis ir dinaminiai poveikiai;
- Slovėnijos mokslininkai tiltų charakterizuojamus parametrus įvertina skaičiuodami tilto saugos faktorių;
- norint Lietuvos tiltus vertinti ir suklasifikuoti pagal saugą tai pat būtina sudaryti tiltų saugos faktoriaus apskaičiavimo metodiką.



2.1 pav. Bendras vaizdas nuo žemupio pusės

2. TIRIAMASIS OBJEKTAS

Tiltas per Kauno HE



2.2 pav. Tilto vaizdas nuo Petrašiūnų pusės

2.1. Tiltu bendrieji duomenys

2.1 lentelė. Tiltu per Kauno HE bendrieji duomenys

Objektas	Automobilinis tiltas per Kauno HE
Objekto vieta	Kauno miestas
Indeksas	SKNKG005T1961G070NEM
Statybos metai	1961 m.
Apkrovos klasė	1953 metų normos, N-13 ir NG-60.
Tarpatramių perdangos skaičiuojamieji ilgiai	22,00 m + 22,00 m + 22,00 m.
Tiltu ilgis	70,20 m
Tiltu plotis	9,95 m
Tiltu važiuojamosios dalies plotis	7,00 m
Atstumas tarp perdangos pagrindinių sijų	1,65 m
Atstumas tarp perdangos skersinių sijų	2,15 m

2.2 lentelė. Tiltu per Kauno HE techniniai rodikliai

Perdangos tipas	Sijinė, karpyta, su paklotu sijų viršuje.
Perdanga	Sudaryta iš 6-ių neįtemptojo gelžbetonio dvitėjinio skerspūvio sijų, kurios tarpusavyje yra sujungtos skersinėmis diafragmais. Skersinės diafragmos tarpusavyje sujungtos plieniniais lakštais.
Važiuojamosios dalies danga	Asfaltas, 7,00 m pločio.
Šalitilčiai	Vienas, gelžbetoninis, surenkamas šalitiltis aukščiau pusėje. Einamosios dalies plotis – 1,25 m, danga – asfaltas.
Turėklas	Metalinis, 1,00 m aukščio, įrengtas ant šalitilčio plokštės.
Atitvarai	Metaliniai, barjeriniai, 0,56 m aukščio.
Bordiūrai	Surenkami, gelžbetoniniai, 0,30 m aukščio.
Vandens nuleidimo įrenginiai	Perdangoje yra įrengti metaliniai vandens nuleidimo šulinėliai.
Deformaciniai pjūviai	Du atviro tipo deformaciniai pjūviai įrengti virš pirmos ir ketvirtos atramų.
Ramtai	Atviri, masyvūs, g/b monolitiniai ramtai.
Taurai	Masyvūs, g/b monolitiniai taurai.
Atraminiai guoliai	Nepaslankūs atraminiai guoliai – metaliniai, išgaubti, bebriauniai. Paslankūs atraminiai guoliai – švytuokliniai (balansyriniai).
Kūgių šlaitai	Nesutvirtinti.
Vandentėkmės reguliavimo statiniai	Po tiltu yra Kauno HE reguliavimo mechanizmai.
Šlaitiniai laiptai	Vieni, ties ketvirta atrama, pakopos gelžbetoninės, iš surenkamų elementų, turėklai plieniniai.
Inžinerinės sistemos	Prie perdangos bei atramų pritvirtinti komunikacijų ir elektros kabeliai.

2.2. Tilto vieta



2.3 pav. Tilto vieta

● - tilto per Kauno HE vieta

2.3. Betono ir armatūros būklės nustatymas

Prieš tilto apžiūrą buvo atliktas betono karbonizacijos ir chloridų poveikio įvertinimas tilto perdangos konstrukcijoms. Karbonizuoto betono storio matavimų vietos, išmatuoto karbonizuoto betono sluoksnio storiai ir chloridų kiekio betone nustatymo rezultatai pateikti 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Karbonizacijos gylio, apsauginio betono sluoksnio storio ir chloridų kiekio betone nustatymo rezultatai

Bandinio ėmimo vieta	Apsauginio sluoksnio storis, mm	Karbonizacijos gylis, mm	Natrio chloridų kiekio betone nustatymas	
			Bandinio paėmimo gylis, mm	Natrio chloridų kiekis, %
Pirmojo tarpatramio 5 sija nuo žemupio	sienutėse 22-42 apačioje 16-31	9	0-25	0,042
			25-50	0,032
Pirmojo tarpatramio 6 sija nuo žemupio	sienutėse 20-35 apačioje 16-18	4	0-25	0,062
			25-50	0,026
Antrojo tarpatramio 5 sija nuo žemupio	sienutėse 24-40 apačioje 14-22	2	0-25	0,030
			25-50	0,024
Antrojo tarpatramio 6 sija nuo žemupio	sienutėse 20-38 apačioje 16-30	2	0-25	0,052
			25-50	0,032

Matavimų rezultatai parodė, kad sijų pagrindinės armatūros strypus ne visur dengia pakankamo storio apsauginis betono sluoksnis, pagal [28] apsauginis betono sluoksnis turi būti ne plonesnis kaip 30 mm. Matavimų metu ypač mažas apsauginis betono sluoksnis aptiktas pagrindinių sijų apatinėse lentynose. Pagal betono karbonizacijos gylio rezultatus nustatyta, kad karbonizacija į betoną įsiskverbusi negiliai. Vidurinių sijų betone nustatytas nedidelis natrio chloridų kiekis, šis kiekis įtakos armatūrai nedaro. Kraštinių sijų paviršiniame betone chloridų kiekis kiek didesnis (pagal [20] sąlygos armatūros korozijai atsirasti ir vystytis yra tada, kai chloridai sudaro daugiau kaip 0,05 % betono masės), todėl šių sijų apatinės lentynos yra supleišėjusios ir koroduoja pagrindinė armatūra (vielapluoščiai).

2.4. Tiltu važiuojamosios dalies dangos niveliacijos duomenys




Atlikus tilto važiuojamosios dangos niveliaciją, nustatyta, kad išilginio dangos nuolydžio nėra. Pagal [8] tilto išilginis nuolydis turi būti ne mažesnis kaip 0,5%. Dėl ypač intensyvaus transporto srauto, tilto važiuojamosios dalies skersinis nuolydis neišmatuotas.

2.5. Tiltu apžiūros duomenys



2.4 lentelė. Tiltu defektų apžvalga

<i>Defektų (pažaidų) vieta ir aprašymas</i>	<i>Galimos defektų (pažaidų) atsiradimo priežastys</i>
<i>1</i>	<i>2</i>
<u>PAKLOTAS</u> Važiuojamosios dalies danga	
<ul style="list-style-type: none"> Tiltu važiuojamojoje dalyje susiformavo apie 4 cm gylio provėžos, danga banguota. 	Intensyvus krovinių transporto priemonių eismas.
	
<i>Turėklai</i>	
<ul style="list-style-type: none"> Turėklų paviršius paveiktas korozijos, dažų likučių ar antikorozinės dangos nėra. Korozijos laipsnis Ri 4. 	Elemento nusidėvėjimas, aplinkos poveikis, priežiūros stoka.
	







2.4 lentelės tęsinys

<i>Defektų (pažaidų) vieta ir aprašymas</i>	<i>Galimos defektų (pažaidų) atsiradimo priežastys</i>
<i>1</i>	<i>2</i>
Deformaciniai pjūviai	
<ul style="list-style-type: none"> Deformaciniai pjūviai nehermetiški, trūksta metalinių elementų. Pjūviai stipriai nusidėvėję. 	<p>Elementų nusidėvėjimas, intensyvus transporto srautas.</p> 
Hidroizoliacija	
<ul style="list-style-type: none"> Perdangos plokštėje matyti išsisunkę karbonatiniai produktai. 	<p>Kiaura hidroizoliacija.</p>
Vandens nuleidimo įrenginiai	
<ul style="list-style-type: none"> Šulinėliai per trumpi, daugelyje vietų jų nedengia metalinės grotelės. 	<p>Netinkamas įrengimas, priežiūros trūkumas.</p>
Inžinerinės sistemos	
<ul style="list-style-type: none"> Ryšių kabelis (pirmame ir trečiame tarpatramiuose), ties žemupio pusės šaltilčiu, netinkamai pritvirtintas prie tilto konstrukcijos. 	<p>Laiko poveikis, priežiūros stoka.</p> 





2.4 lentelės tęsinys

<i>Defektų (pažaidų) vieta ir aprašymas</i>	<i>Galimos defektų (pažaidų) atsiradimo priežastys</i>
<i>1</i>	<i>2</i>
<u>PERDANGA</u>	
<i>Pagrindinės sijos</i>	
<ul style="list-style-type: none">• Gelžbetoninės perdangos betonas prastai sutankintas, porėtas, supleišėjęs, daugelyje vietų koroduoja sijos esanti armatūra. Dėl nesandarios hidroizoliacijos, perdanga nuolat drėkinama. Lietaus šulinėliai per trumpi. Visų parpatramių pagrindinių sijų sienutėse užfiksuoti atsivėrę normaliniai ir įstrižieji plyšiai, apatinėse lentynose nustatyti išilginiai plyšiai, matosi armatūros korozijos žymių.	Tilto perdangos pagrindinių sijų supleišėjimui įtakos turėjo per plonas apsauginis betono sluoksnis, intensyvi armatūros korozija, taip pat padidėjusios transporto priemonių apkrovos, bei atsiradę papildomi dinaminiai smūgiai tilto perdangai, judant sunkiasvorėms transporto priemonėms per prastos būklės deformacinius pjūvius.
	
<p>Pagrindinių sijų apačioje nustatyti išilginiai plyšiai, matosi armatūros korozijos žymių. Nuotraukoje pateikta pirmojo tarpatramio perdangos, trečia pagrindinė sija.</p>	
	
<p>Pagrindinių sijų apatinėje dalyje nustatyti horizontalūs plyšiai. Vietomis plyšių plotis siekia iki 1,0 mm.</p>	

2.4 lentelės tęsinys

<i>Defektų (pažaidų) vieta ir aprašymas</i>	<i>Galimos defektų (pažaidų) atsiradimo priežastys</i>
1	2
 <p>Pirmojo tarpatramio penktos sijos (ties pirma atrama) sienutėje atsivėręs įstrižas plyšys. Tokia pati pleišėjimo tendencija pastebėta visų tarpatramių visose sijose ir per visą jų ilgį.</p>  <p>Normaliniai plyšiai pirmojo tarpatramio perdangos antros pagrindinės sijos sienutėje, plyšių plotis iki 0,7 mm. Normaliniai plyšiai</p>  <p>pastebėti ir kitose sijose ir jie vyrauja per visą tarpatramio ilgį. Horizontalūs plyšiai antrojo tarpatramio perdangos pirmoje pagrindinėje sijoje.</p>	 <p>Įstrižas plyšys pirmojo tarpatramio perdangos ketvirtos pagrindinės sijos sienutėje, plotis iki 1,0 mm.</p>  <p>Įstrižas plyšys antrojo tarpatramio perdangos trečioje pagrindinėje sijoje, plyšio plotis siekia iki 0,50 mm.</p>  <p>Plyšio pločio matavimas tilto apžiūros metu su elektroninių plyšiomačiu.</p>

2.4 lentelės tęsinys

<i>Defektų (pažaidų) vieta ir aprašymas</i>	<i>Galimos defektų (pažaidų) atsiradimo priežastys</i>
<i>1</i>	<i>2</i>
Plokštė	
<ul style="list-style-type: none"> Perdangos kraštinių sijų viršutinės lentynos patakuotos, matosi korduojanti armatūra. Šeštos pagrindinės sijos (žemupio pusėje) bendri vaizdai. 	<p>Ilgalaikis lietaus ir laiko poveikis.</p>
	
Šeštos pagrindinės sijos vaizdas žemupio pusėje žiūrint nuo antros atramos link pirmos.	Šeštos pagrindinės sijos vaizdas žemupio pusėje žiūrint nuo pirmos atramos link antros.
Skersinės diafragmos	
<ul style="list-style-type: none"> Vietomis skersinėse diafragmose armatūros nedengia betono apsauginis sluoksnis, dalis diafragmas jungiančių lakštų atitrūkę. 	Netinkamas įrengimas, priežiūros stoka.
	
Sutrūkusios tilto trečiojo tarpatramio 5, 6 ir 7 skersinių diafragmų sandūros, tarp ketvirtos ir penktos pagrindinių sijų.	Visuose tarpatramiuose, tarp visų sijų, užfiksuotas netinkamai tilto statybos metu įrengti skersinių diafragmų sujungimo mazgai.

2.4 lentelės tęsinys

<i>Defektų (pažaidų) vieta ir aprašymas</i>	<i>Galimos defektų (pažaidų) atsiradimo priežastys</i>
<i>1</i>	<i>2</i>

ATRAMOS

- Atramų gelžbetoninės konstrukcijos aptrupėjusios, matosi koroduojanti armatūra, atraminės aikštelės užneštos purvu bei betono nuotrupomis.

Priežiūros stoka.







Trečiojo tarpatramio perdangos trečioje atramoje (žiūrint nuo ketvirtos atramos), po trečia sija, susiformavęs vertikalus plyšys, plyšio plotis apie 0,90 mm ir jis tęsiasi apie 3 m nuo atramos viršaus žemyn.



Betono ir metalo nuolaužos virš pirmos atramos (vaizdas žiūrint nuo antros atramos link pirmos).



Betono ir metalo nuolaužos virš ketvirtos atramos (vaizdas žiūrint nuo trečios atramos link ketvirtos).

Defektų (pažaidų) vieta ir aprašymas	Galimos defektų (pažaidų) atsiradimo priežastys
1	2
Atraminiai guoliai	
<ul style="list-style-type: none"> Tilto paslankūs atraminiai guoliai stipriai paveikti korozijos, nesutepti, neprižiūrėti, guolių gelžbetoninis intarpas daugelyje vietų sutrūkęs. 	<p>Priežiūros stoka, perkrovų ir dinaminių poveikių įtaka į tilto atramas dėl nusidėvėjusių deformacinių pjūvių. Aplinkos poveikis.</p>
 	 
<u>PRIETILČIAI</u>	
Kelio ir tilto sandūra	
<ul style="list-style-type: none"> Nesklandi kelio sandūra, ties tilto deformaciniais pjūviais. 	<p>Sunkiasvorių transporto priemonių įtaka.</p>

2.6. Betono stiprumo tyrimai

Iš tilto per Kauno HE pirmojo tarpatramio perdangos 3, 4 ir 5 pagrindinių sijų buvo išgręžti trys betono bandiniai (žr. 2.4, 2.5 ir 2.6 pav.).



2.4 pav. Išgręžtas betoninis kernas iš pirmojo tarpatramio perdangos trečios pagrindinės sijos



2.5 pav. Išgręžtas betoninis kernas iš pirmojo tarpatramio perdangos ketvirtos pagrindinės sijos



2.6 pav. Išgręžtas betoninis kernas iš pirmojo tarpatramio perdangos penktos pagrindinės sijos

Tilto perdangos betoninių kernų įvertinimas atliktas Kauno technologijos universiteto, Statybos ir architektūros fakulteto, Statybinių medžiagų ir konstrukcijų tyrimų centre. Pagrindinės betoninių kernų tyrimo išvados yra tokios:

- visų betoninių kernų suirimas atliekant gniuždymo stiprio bandymą buvo tinkamas;
- 3 pagrindinėje sijoje nustatytas betono stipris gniuždant kito ribose nuo 45,2 MPa iki 48,2 MPa, 4 pagrindinėje sijoje nustatytas betono stipris gniuždant kito ribose nuo 60,3 MPa iki 63,2 MPa, 5 pagrindinėje sijoje nustatytas betono stipris gniuždant kito ribose nuo 46,7 MPa iki 49,5 MPa;
- tyrimų metu nustatyta, kad kerno (išgręžto iš 3 pagrindinės sijos) betono vidutinis tankis – 2376 kg/m³, kerno (išgręžto iš 4 pagrindinės sijos) betono vidutinis tankis – 2367 kg/m³, kerno (išgręžto iš 5 pagrindinės sijos) betono vidutinis tankis – 2385 kg/m³;
- tyrimų metu nustatyta, kad kerno (išgręžto iš 3 pagrindinės sijos) betono dinaminis tamprumo modulis – 28,48 GPa, kerno (išgręžto iš 4 pagrindinės sijos) betono dinaminis tamprumo modulis – 26,21 GPa, kerno (išgręžto iš 5 pagrindinės sijos) betono dinaminis tamprumo modulis – 31,91 GPa.

2.7. Antro skyriaus išvados

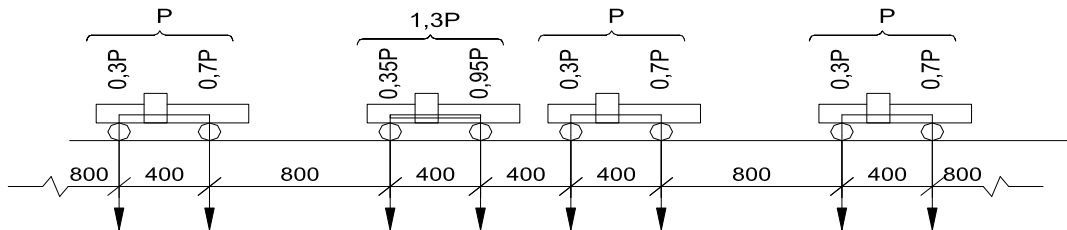
Atlikus pirminius tyrimus tiltui per Kauno HE nustatyta, kad:

- betono apsauginis sluoksnis daug kur per plonas; karbonizacija įsiskverbusi negiliai; chloridų kiekis viršija tik kraštinėse sijose todėl koroduoja pagrindinė armatūra; įšilginio dangos profilio nuolydžio nėra;
- pagrindiniai defektai: nusidėvėję pakloto elementai, įstrižieji plyšiai perdangoje, sutrūkusios skersinių diafragmų sandūros ir koroduojantys tilto atraminiai guoliai;
- atlikus betono bandinių (kernų) stiprumo tyrimus nustatyta, kad betono stipris gniuždant viršija betono stiprio klasei C30/37 (~M400 – projektinė klasė) keliamus reikalavimus.

3. PERDANGOS KONSTRUKCIJŲ TEORINIAI SKAIČIAVIMAI

3.1. Projektinės apkrovos

Tiltas per Kauno HE suprojektuotas pagal rusiškas tiltų projektavimo normas H–106–53. Tiltlo perdangos įrašoms skaičiuoti buvo taikytos H-13 (automobilių kolona) ir HG-60 (vikšrinė apkrova) projektinės apkrovos (žr. 3.1 ir 3.2 pav.). Automobilinių tiltų projektinių apkrovų duomenys pagal H–106–53 projektavimo normas pateikti 3.1 lentelėje.



3.1 pav. Automobilų išdėstymas pagal H-13 apkrovą

3.1 lentelė. Automobilinių tiltų projektinių apkrovų duomenys pagal H-106-53 normas

Duomenų pavadinimas	Apkrovos schema							
	H-18		H-13		H-10		H-8	
	Sunkus automobilis	Pagrindinis automobilis	Sunkus automobilis	Pagrindinis automobilis	Sunkus automobilis	Pagrindinis automobilis	Sunkus automobilis	Pagrindinis automobilis
Pakrauto automobilio masė, t	30	18	16,9	13	13	10	10,4	8
Galinės ašies masė, t	2×12	12	12,35	9,1	9,5	7,0	7,6	5,6
Priekinės ašies masė, t	6	6	4,55	3,9	3,5	3,0	2,8	2,4
Užpakalinio rato plotis, m	0,7	0,7	0,6	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
Priekinio rato plotis, m	0,30	0,30	0,25	0,2	0,2	0,15	0,15	0,15
Rato lietimosi su danga ilgis	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Kėbulo plotis, m	2,9	2,9	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
Automobilio bazė, m	6,8	6	4	4	4	4	4	4
Atstumas tarp ratų ašių skersine automobilio kryptimi	1,9	1,9	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7

Automobilių kolonos ant tilto išdėstomos pavojingiausiose padėtyse išilgine ir skersine kryptimis. Kolonų skaičius tilto plotyje yra neribojamas, t.y. kiek leidžia gabaritas, tačiau automobilių kėbulai turi tilpti gabarite, be to, atstumas tarp gretimai esančių automobilių kolonų kėbulų turi būti ne mažesnis, kaip 0,1 m.

Jeigu skersine tilto kryptimi yra daugiau, kaip dvi kolonos, apskaičiuotos įrašos dauginamos iš koeficientų:

- a) jei apkrauta trimis kolonomis – 0,85;
- b) jei apkrauta keturiomis kolonomis, ar daugiau, kaip keturiomis – 0,75.

Apskaičiuotos įrašos dauginamos iš dinamiškumo koeficiento.

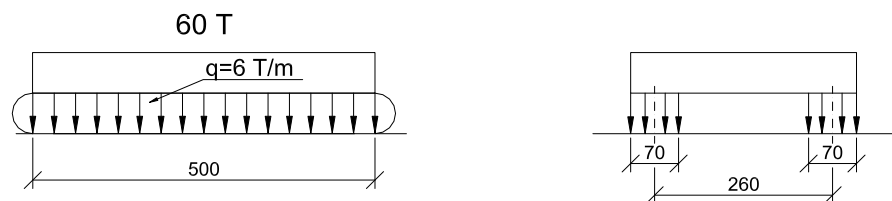
Dinamiškumo koeficientai gelžbetoniniams tiltams pateikti 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Dinamiškumo koeficientai taikomi gelžbetoniniams tiltams

Konstrukcijos pavadinimas	Koeficientas
Sijiniai ir rėminiai tiltai, važiuojamoji dalis, arkų antstatas: kai $l \leq 5$ m kai $l \geq 45$ m	1,3 1,0
Arkiniai tiltai su atskiromis arkomis: kai $l \leq 20$ m kai $l \geq 70$ m	1,15 ÷ 1,2* 1,0
Arkiniai tiltai su vientisomis arkomis ir spragotiniu antstatu: kai $l \leq 20$ m kai $l \geq 70$ m	1,15 1,0

Pastaba: tarpinėms tarpatamių reikšmėms dinaminis koeficientas randamas interpoliuojant.

*1,20 – miesto tiltams.



3.2 pav. Vikšrinės apkrovos HG–60 schema

Atliekant skaičiavimus, viena ratinė arba vikšrinė važiuoklė statoma į pavojingiausią padėtį, bet ne arčiau, kaip 0,25 m nuo bordiūro, matuojant nuo rato ar vikšro krašto. Dinamiškumo koeficientas skaičiavimuose nepriimamas. Važiuklių duomenys pagal apkrovų klases, pateikti 3.3 lentelėje.

Pastaba: skaičiavimuose priimta, kad H-13 apkrovai dinamiškumo koeficientas yra 1,15, o patikimumo koeficientas – 1,0. HG-60 apkrovai patikimumo koeficientas priimtas 1,0.

3.3 lentelė. Ratinės ir vikšrinių apkrovų duomenys pagal H-106-53 normas

Duomenys	HK-80	HG-60	HG-30
Visa važiuoklės masė, t	80	60,0	30,0
Vikšro slėgimas 1 m ilgyje, t	–	6,0	3,75
Ašies masė, t	20	–	–
Vikšro ilgis, m	–	5,0	4,0
Rato lietimosi su danga ilgis išilgine kryptimi, m	0,2	–	–
Vikšro arba rato plotis, m	0,8	0,7	0,5
Atstumas tarp ratų arba vikšrų ašių, m	2,7	2,6	2,5
Atstumas tarp ratų ašių išilgine kryptimi, m	1,2	–	–

Žmonių minios vertikali apkrova 300 kg/m². Ši apkrova išdėstoma tik šaliteljose ir priimama kartu su automobiline apkrova. Su ratine ir vikšrine apkrovomis žmonių minios apkrova nepriimama.

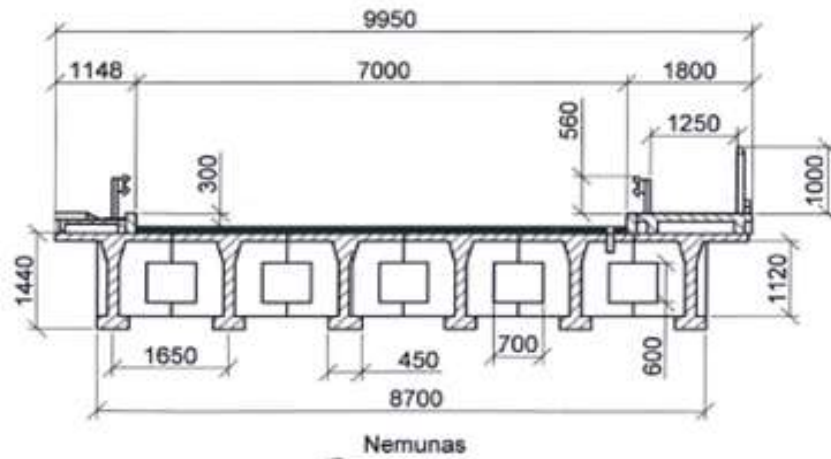
Pirmojo ir trečiojo tarpatriamųjų perdangose atsirandančių įrašų skaičiavimas nuo projektinių **H-13** ir **HG-60** apkrovų pateiktas 3.4 lentelėje.

3.4 lentelė. Pirmojo ir trečiojo tarpatriamųjų perdangose atsirandančių įrašų skaičiavimas nuo projektinių **H-13** ir **HG-60** apkrovų

Įrašo tipas	Pjūvis	Apkrovos tipas			
		Įrašos atsirandančios nuo charakteristinės H-13 apkrovos	Įrašos atsirandančios nuo skaičiuojamos H-13 apkrovos	Įrašos atsirandančios nuo charakteristinės HG-60 apkrovos	Įrašos atsirandančios nuo skaičiuojamos HG-60 apkrovos
Lenkimo momentas, kNm	I ir III tarpatriamųjų perdangos vidurys	2182	2509	2879	2879

3.2. Ekscentrinio gniuždymo metodas

Prenkant tiltui per Kauno HE bandymo apkrovą buvo taikomas ekscentrinio gniuždymo metodas. Taikant šį metodą surandama apkrova tenkanti vienai sijai ir ta sija skaičiuojama kaip atskiras elementas, kurio apkrova yra žinoma. Kadangi perdanga yra standi skersine linkme, su didelio standumo skersinėmis sijomis (žr. 3.3 pav.), todėl taikant ekscentrinio gniuždymo metodą gaunamos pakankamai tikslios įrašos labiausiai apkrautoje sijoje.



3.3 pav. Perdangos skersinis pjūvis

Skersinio pasiskirstymo influentės ordinatės apskaičiuojamos pagal formulę:

$$y_i = 1/n \pm (e b_j) / \sum b_i^2, \quad (3.2.1)$$

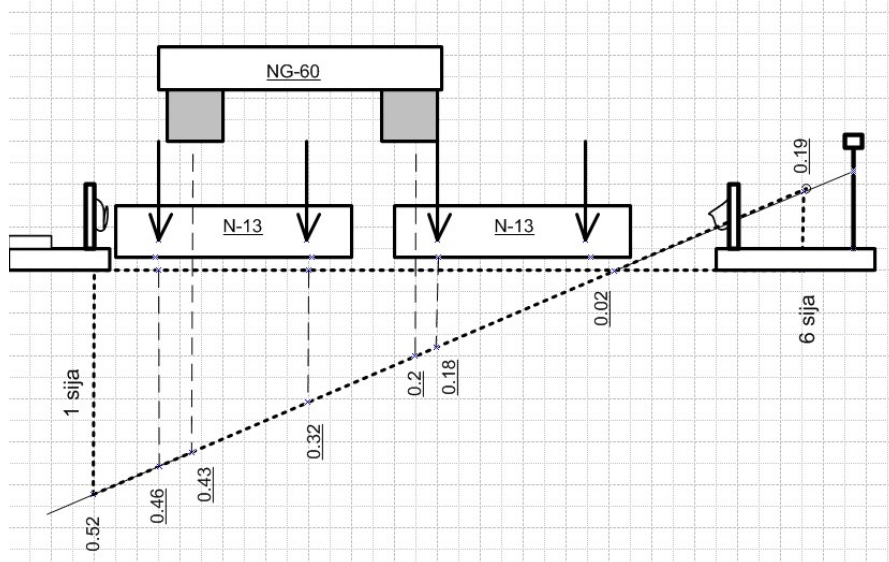
čia: n – sijų skaičius; e – vienetinės jėgos $P = 1$ ekscentricitetas perdangos ašies atžvilgiu; b_j – atstumas tarp sijos, kurios influentė sudaroma, ir jai veidrodžiškai simetriškos sijos kitoje perdangos pusėje ašių (tai dvigubas atstumas tarp nagrinėjamosios sijos ir perdangos ašių); b_i – atstumai tarp sijų, vienodai nutolusių nuo perdangos ašies.

Kauno HE perdangos pagrindinių sijų ilgis – 23 m, skaičiuojamasis sijų ilgis – $L_{sk} = 22$ m. Atstumas tarp sijų ašių – 1,65 m, atstumas tarp kraštinių 1-6 sijų ašių – 8,25 m, atstumas tarp 2-5 sijų – 4,95 m, atstumas tarp vidinių 3-4 sijų – 1,65 m (žr. 3.3 pav.).

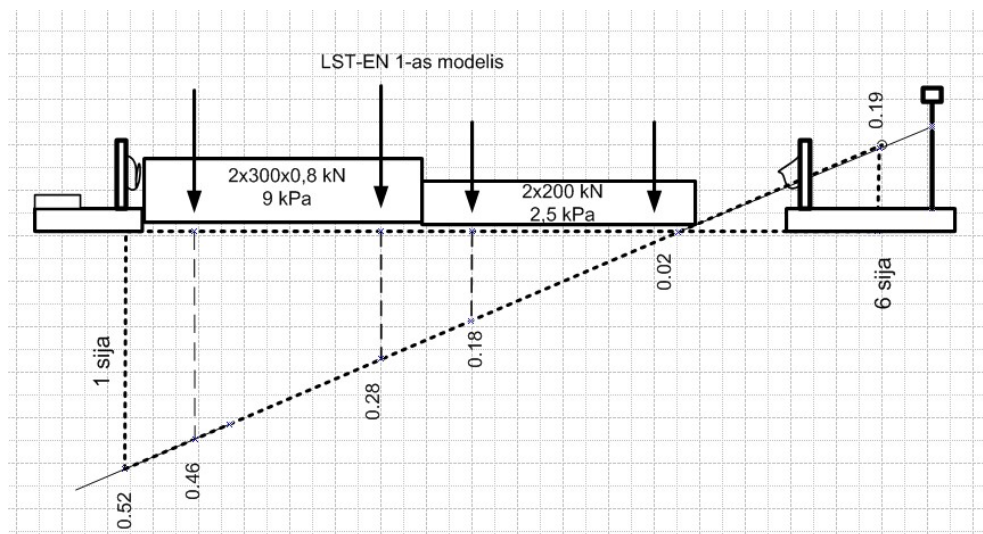
Ekscentricitetas iki kraštinės sijos – $8,25 / 2 = 4,125$ m, $b_i = 1,65^2 + 4,95^2 + 8,25^2 = 95,288$,
 $y_i = 1/n \pm (e b_j) / \sum b_i^2 = 1/6 \pm (4,125 \times 8,25) / 95,288 = 0,1667 \pm 0,357 = +0,52 - 0,19$ (žr. 3.4-3.5 pav.)

3.3. Skersinio pasiskirstymo koeficientų skaičiavimas

Ekscentrinio gniuždymo metodu sudarytos influentės apkrovimas H-13 ir HG-60 projekcinėmis apkrovomis detaliai pavaizduotas 3.4 paveiksle. Ekscentrinio gniuždymo metodu sudarytos influentės apkrovimas LST-EN 1-mu apkrovos modeliu pateiktas 3.5 paveiksle.



3.4 pav. Ekscentrinio gniuždymo metodu sudarytos influentės apkrovimas H-13 ir HG-60 projekcinėmis apkrovomis



3.5 pav. Ekscentrinio gniuždymo metodu sudarytos influentės apkrovimas LST-EN 1-mu apkrovos modeliu

$$1 \text{ juostai} - 0,46 + 0,28 = 0,74 / 2 = 0,37; \quad 2 \text{ juostai} - 0,18 + 0,02 = 0,2 / 2 = 0,1.$$

Skersinio pasiskirstymo koeficientai nuo H-13 projekcinės apkrovos:

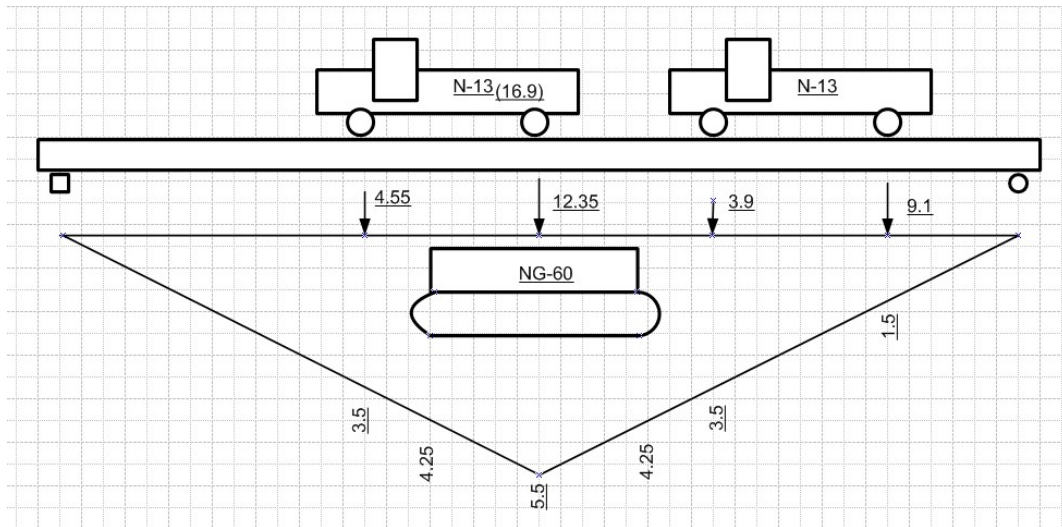
- 1 juostai – $0,46 + 0,32 = 0,78 / 2 = 0,39$;
- 2 juostai – $0,18 + 0,02 = 0,2 / 2 = 0,1$.

Skersinio pasiskirstymo koeficientai nuo HG-60 projekcinės apkrovos:

- pastačius apkrovą pavojingiausioje padėtyje – $0,43 + 0,2 = 0,63 / 2 = 0,315$.

3.4. Lenkimo momentų skaičiavimas nuo H-13 ir HG-60 apkrovų

Tilto per Kauno HE perdangos sudarytos lenkimo momentų influentės apkrovimas H-13 ir HG-60 projekcinėmis apkrovomis pateiktas 3.6 paveiksle.



3.6 pav. Tiltlo per Kauno HE perdangos lenkimo momentų influentės apkrovimas H-13 ir HG-60 projekcinėmis apkrovomis

Tilto per Kauno HE perdangos labiausiai apkrautoje kraštinėje sijoje atsirandančio lenkimo momento skaičiavimas nuo H-13 projekcinės apkrovos pateiktas 3.5 lentelėje.

3.5 lentelė. Lenkimo momentų skaičiavimas labiausiai apkrautoje kraštinėje sijoje nuo H-13 projekcinės apkrovos

Apkrovos juosta	Ašių apkrovos dydis, kN	Pasiskirstymo koeficientas	Lenkimo momentų (M) influentės ordinatės	Charakteristinis lenkimo momentas, kNm
1-ma eismo juosta, 2 automobiliai, 4 ašys	44,60	0,39	3,50	61
	121,20		5,50	260
	38,30		3,50	52
	89,30		1,50	52
2-ra eismo juosta, 2 automobiliai, 4 ašys	44,60	0,10	3,50	16
	121,20		5,50	67
	38,30		3,50	13
	89,30		1,50	13
Kitos apkrovos	-	-	-	
Suminis lenkimo momentas kraštinei sijai				534

Charakteristinis lenkimo momentas kraštinei sijai nuo HG-60 projekcinės apkrovos apskaičiuojamas:

- lenkimo momentų influentės plotas po HG-60 apkrova – 24,40 m²;

$$M_k = 118 \cdot 0,32 \cdot 24,40 = 921 \text{ kNm} \quad (3.4.1)$$

Skaičiuojant perdangos pagrindinių sijų armavimą, išskirstyta apkrova 5 m ilgyje tenkanti kraštinei sijai išreiškiama: $q = 118 \cdot 0,32 = 38 \text{ kN / m}$

Jei diafragmos pažeistos, kiekviena sija dirba atskirai, todėl šiai sijai teks vieno vikšro slėgis (59 kN/m^2), $59/37,8 = 1,56$ karto didesnė apkrova nei perdangoje su diafragmomis.

Jei diafragmos pažeistos, sijos nedirba drauge, todėl charakteristinis lenkimo momentas perdangoje nuo projektinės HГ-60 apkrovos ($M_{kNG-60} = 24,4 \cdot 59 = 1440 \text{ kNm}$) 1,56 karto padidėja, nes $1440/921 = 1,56$.

Kai diafragmos nepažeistos skaičiuotinės lenkimo momento reikšmės nuo H-13 ir HГ-60 projektinių apkrovų – $M_{dN-13} = 535 \cdot 1,4 \cdot 1,15 = 861 \text{ kNm}$,
 $M_{dNG-60} = 921 \cdot 1,1 = 1013 \text{ kNm}$

Kai diafragmos pažeistos skaičiuotinės lenkimo momento reikšmės nuo projektinės HГ-60 apkrovos – $M_{dNG-60} = 1440 \cdot 1,1 = 1584 \text{ kNm}$

3.5. Lenkimo momentų skaičiavimas nuo LST – EN 1–ojo modelio

LM-1 apkrovos modelį pagal [2, 3, 4] sudaro:

1. Dviašė koncentruota apkrova, kurios vienos ašies svoris $\alpha_Q Q_k$;
čia: α_Q – apkrovos koeficientas.
2. Tolygiai išskirstyta apkrova, kurios svorio intensyvumas (kN/m^2): $\alpha_q q_k$;
čia: α_q – apkrovimo koeficientas.

Vienoje eismo juostoje, per visą tilto ilgį, pastatoma tik viena dviašė koncentruota apkrova. Kiekvienoje eismo juostoje dviašė apkrova pastatoma nepalankiausia padėtimi.

Kiekviena ašis turi du vienodus ratus, kurių svoris $0,5\alpha_Q Q_k$. Rato sąlyčio su dangą plotas yra kvadratas $0,4 \times 0,4 \text{ m}$. Šis apkrovos modelis taikomas visoms eismo juostoms bei likusiems plotams. Eismo juostai „i“ apkrovos dydžiai išreikšti $\alpha_{qi} Q_{ik}$ ir $\alpha_{qi} q_{ik}$.

Likusiems plotams – $\alpha_{qr} q_{rk}$. Apkrovų Q_{ik} , q_{ik} ir q_{rk} reikšmės pirmojo ir trečiojo tarpatramių perdangoms pateiktos 3.6 lentelėje. Koeficientai (α_{Qi} , α_{qi} ir α_{qr}) abiejų tarpatramių perdangų skaičiavimui pateikti 3.7 lentelėje.

Apkrovų parinkimas

Važiuojamosios dalies plotis:

$$w = 7,0 \text{ m}; \quad (3.5.1)$$

Eismo juostų skaičius:

$$n_l = \text{Int}(w/3) = \text{Int}(7,0/3) = 2; \quad (3.5.2)$$

Likusio ploto plotis:

$$w - 3 \cdot n_l = 1,0 \text{ m}; \quad (3.5.3)$$

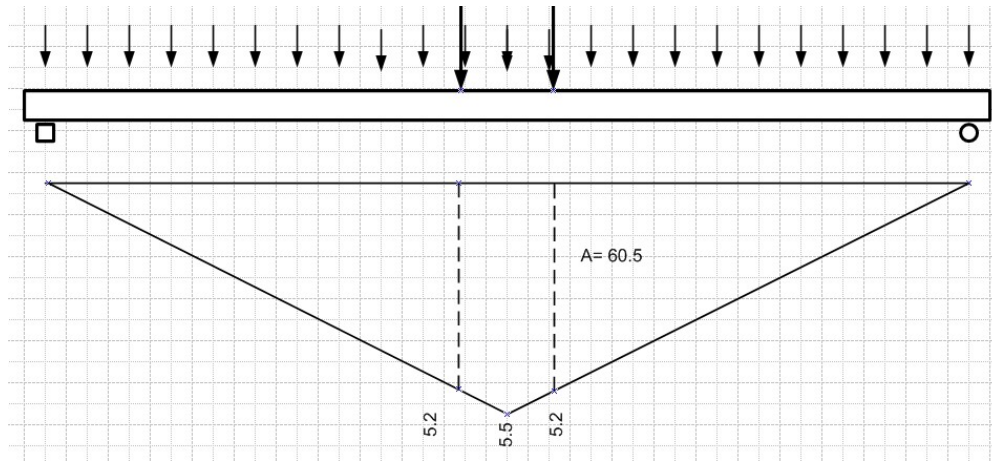
3.6 lentelė. Apkrovos Q_{ik} , q_{ik} , q_{rk} pirmojo ir trečiojo tarpatriamųjų perdangoms

Apkrovos padėtis	Dviašė apkrova, kN	Tolygiai išskirstyta apkrova, kN/m ²	Tolygiai išskirstyta apkrova į tiesinį metrą su apkrovos patikimumo koeficientu, kN/m
	Ašies svoris $Q_{ik} \cdot \alpha_{Qi}$	$q_{ik} \cdot \alpha_{qi}$ (arba $q_{rk} \cdot \alpha_{qr}$), q_{fk}	$q_{ik} \cdot \alpha_{qi} \cdot w_l \cdot \gamma_f$ (arba $q_{rk} \cdot \alpha_{qr} \cdot w_l \cdot \gamma_f$), $q_{fk} \cdot w_l \cdot \gamma_f$
1 eismo juosta	300*0,80 = 240	9,0*1,0 = 9,0	9,0*3,0*1,35 = 36,45
2 eismo juosta	200*1,0 = 200	2,50*1,0 = 2,50	2,50*3,0*1,35 = 10,13
Suminis			46,58

3.7 lentelė. Apkrovimo koeficientai (α_{Q1} , α_{Q2} ir α_{qr}) pirmojo ir trečiojo tarpatriamųjų perdangoms

Tilto klasė	α_{Q1}	α_{Q2}	α_{q1}	α_{q2}	α_{qr}
Šalies valstybinių ir vietinių kelių tiltai	0,80	1,0	1,0	1,0	1,0

Tilto perdangos lenkimo momento influentės apkrovimas LST-EN 1-mu apkrovos modeliu pateiktas 3.7 paveiksle.



3.7 pav. Tiltu per Kauno HE perdangos lenkimo momentų influentės apkrovimas LST-EN 1-mu apkrovos modeliu

Apkraunant tiltu perdangą projekcinėmis H-13 ir HG-60 apkrovomis ir LST-EN 1-mu apkrovos modeliu, labiausiai apkraunama 1 pagrindinė sija esanti aukštupio pusėje (aukštupio pusėje šalitilčio nėra).

Dviejų eismo juostų apkrova:

$$2 \times 300 \times 0,80 + 2 \times 200 + 9 \times 3 \times 2 + 2,5 \times 2,6 \times 22 = 480 + 400 + 594 + 143 = 1617 \text{ kN.}$$

Su skersiniu pasiskirstymu sijai:

$$\text{Sutelktos: } 480 \times 0,37 + 400 \times 0,10 = 2 \times (88,8 + 20) = 2 \times 108,8 \text{ kN atstumu } 1,2 \text{ m.}$$

$$\text{Išskirstytos ilgyje: } 594 \times 0,37 + 143 \times 0,1 = 234 \text{ kN, tiesinė } 234 / 22 = 10,6 \text{ kN/m.}$$

Charakteristinis lenkimo momentas kraštinėje sijoje nuo LST-EN 1-mo apkrovos modelio:

$$1. \quad M_k = G_d + Q_k = 19,7 \cdot 60,5 + 2 \cdot 108,8 \cdot 5,2 + 10,6 \cdot 60,5 = 1192 + 1773 \text{ kNm}$$

Skaičiuotinis lenkimo momentas kraštinėje sijoje nuo LST-EN 1-mo apkrovos modelio:

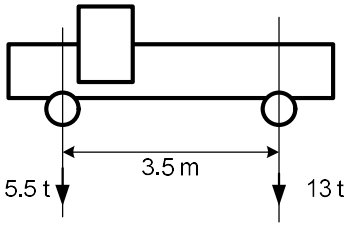
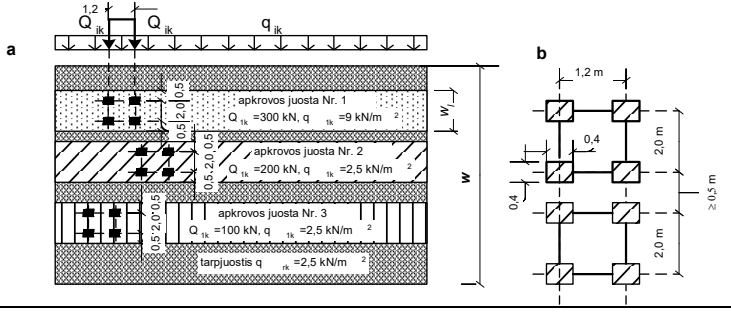
$$2. \quad M_d = G_k \cdot 1,35 + Q_k \cdot 1,35 = 1192 \cdot 1,35 + 1773 \cdot 1,35 = 1606 + 2394 \text{ kNm}$$

3.6. Bandymo apkrovos parinkimas

Parunkta bandymo apkrovą tokią, kad nuo bandymo apkrovos lenkimo momentas perdangoje sudarytų apie 85% projekcinės charakteristinės HG-60 apkrovos:

$$M_{k.band} = 0,85 \cdot M_{kHG-60} = 921 \cdot 0,85 = 783 \text{ kNm.} \quad (3.6.1)$$

Bandymo apkrovos (sunkiasvorių automobilių) parametrai parinkti pagal ankstesnių bandymų duomenis (žr. 3.8 pav.): vidutinis sunkiasvorio automobilio svoris – 18,5 t (priekinės ašies masė 5,5 t, galinės ašies masė 13 t), atstumas tarp automobilio pirmos ir antros ašies – 3,5 m, iki sekančio sunkvežimio ašies – 3,0 m. Skersai tilto – 1,9 m + 2 x 0,30 = 2,5 m, 0,5 m tarp bortų. Išdėstymo skersai tilto schema – 2,5 + 0,5 + 2,5 m.

	
<p>3.8 pav. Sunkvežimio modelis taikytas parengiamuosiuose skaičiavimuose</p>	<p>3.9 pav. 1–mas apkrovos modelis pagal LST-EN</p>

Skersinio pasiskirstymo koeficientai 1 – ai automobilių vorai 0,4, antrai vorai – 0,12. Tiltu per Kauno HE perdangos labiausiai apkrautos sijos viduriniame pjūvyje lenkimo momentų skaičiavimas nuo preliminarios bandymo apkrovos pateiktas 3.8 lentelėje.

3.8 lentelė. Lenkimo momentų skaičiavimas tilto per Kauno HE perdangos viduriniame pjūvyje nuo preliminarios bandymo apkrovos

Bandymo apkrovos juosta	Ašių apkrovos dydis, kN	Pasiskirstymo koeficientas	Lenkimo momentų influentės ordinatės	Charakteristinis lenkimo momentas
1-ma juosta, 2 automobiliai, 4 ašys	54	0,40	3,7	80
	128		5,5	282
	54		3,9	84
	128		1,8	92
2-ra juosta 1 automobilis, 2 ašys	54	0,12	3,7	24
	128		5,5	85
Viso	-	-	-	647

3.7. Trečio skyriaus išvados

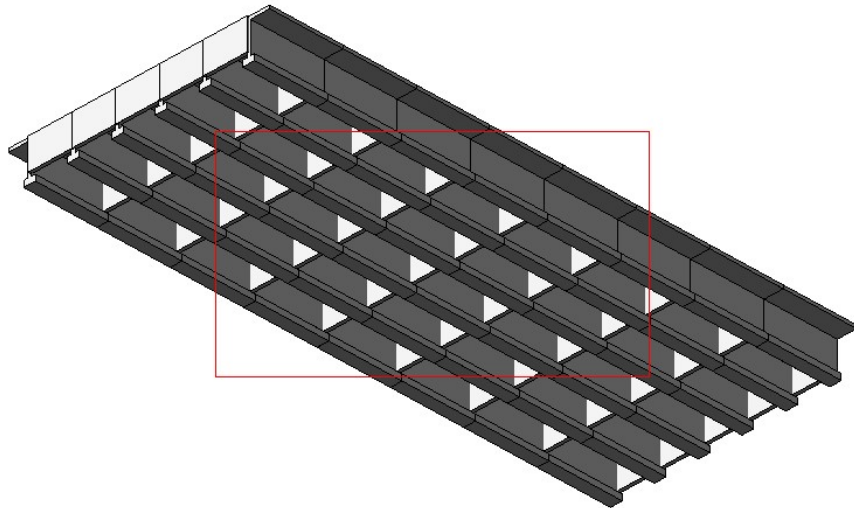
- palyginus charakteristinius ir skaičiuojamuosius lenkimo momentus kraštinėje sijoje nuo HG-60 projektinės apkrovos su charakteristiniais ir skaičiuojamaisiais lenkimo momentais gautais toje pačioje sijoje nuo LST-EN 1-mo apkrovos modelio nustatyta, kad charakteristinis lenkimo momentas nuo LST-EN 1-mo apkrovos modelio yra apie 1,93 karto didesnis, o skaičiuojamasis lenkimo momentas nuo LST-EN 1-mo apkrovos modelio yra apie 2,36 karto didesnis nei lenkimo momentai gauti nuo HG-60 projektinės apkrovos.

4. KOMPIUTERINIS PERDANGOS SKAIČIAVIMAS

4.1. Kompiuterinis perdangos modelis

Skaičiavimuose taikytas atskiros sijos modelis ir erdvinis sijyno modelis (žr. 4.1 pav.). Taikant atskiros sijos modelį buvo apskaičiuoti įlinkiai nuo kintamosios projektinės ir bandymo apkrovų, kurių dydis, tenkantis pavienei sijai, apskaičiuotas taikant skersinio pasiskirstymo koeficientus bei įvertinant veikiančių bei nutrūkusių diafragmų atvejus. Abiems diafragmų atvejams apskaičiuotas reikiamas armavimas ir palygintas su projektiniu.

Erdviniame sijyno modelyje apskaičiuoti įlinkiai ir įrašos nuo projektinių ir bandymo apkrovų.



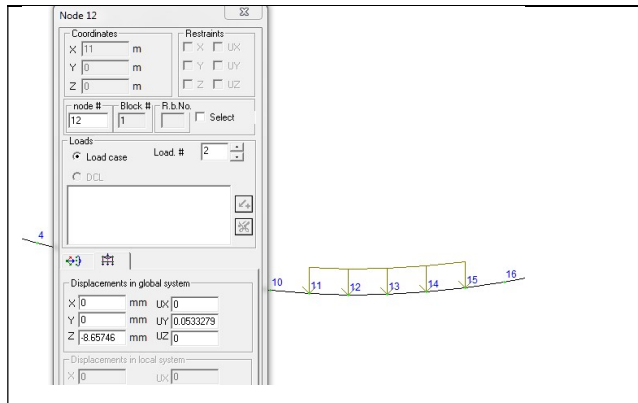
4.1 pav. Erdvinis sijyno modelis

4.2. Teorinių perdangos įlinkių skaičiavimas

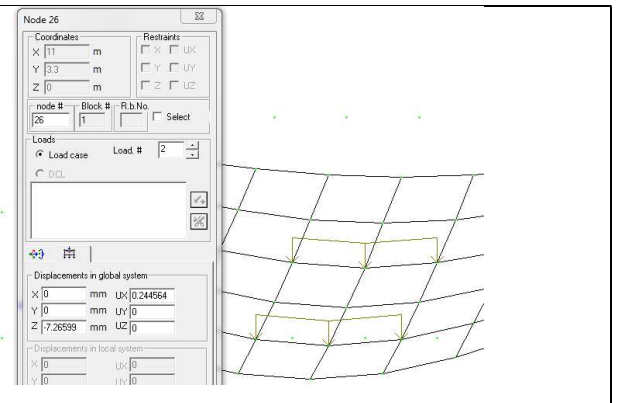
Kaip matyti iš 4.2 ir 4.3 pav. pateiktų grafikų bandymo metu išmatuoti perdangos įlinkiai buvo dukart mažesni, nei apskaičiuoti, tačiau pagal lenkimo momentų santykį jie turėtų būti tik 15 procentų mažesni. Bandymų praktika rodo, kad išmatuoti įlinkiai dažniausiai būna mažesni nei apskaičiuoti teoriniu būdu. Perdangos standumui ir įlinkiams didelę įtaką turi pakloto elementai: išlyginamasis betono sluoksnis, asfaltbetonis, turėklai ir atitvarai. Kol apkrova yra sąlyginai nedidelė, šie pakloto elementai įsijungia į bendrą darbą su laikančiomis sijomis ir žymiai padidina perdangos standumą (žr. 4.4 ir 4.5 pav.).

Pakloto teigiamos įtakos negalima vertinti skaičiuojant laikomąją galią, nes apkrovai didėjant,

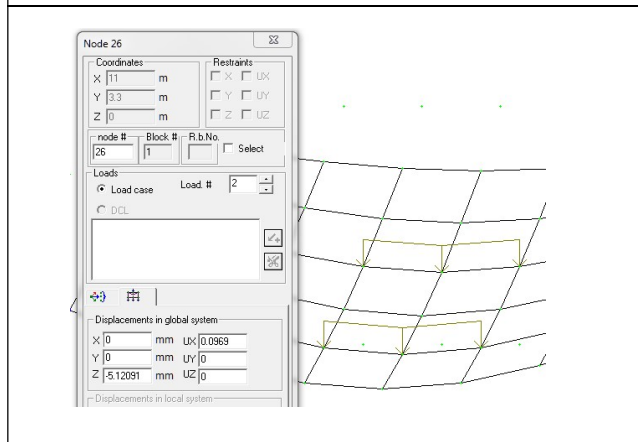
artėjant prie ribinės, pakloto elementai išsijungs iš bendro su sijomis darbo, išlyginamasis sluoksnis supleišės ir atsiskirs nuo sijų plokštės.



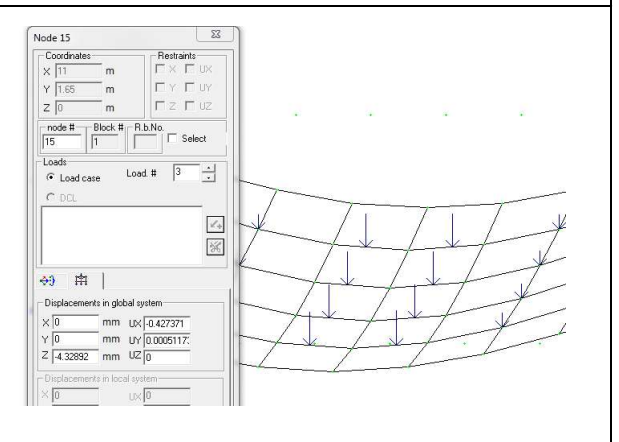
4.2 pav. Atskirai nagrinėjamos labiausiai apkrautos kraštinės sijos įlinkis nuo charakteristinės NG-60 apkrovos – 8,7 mm. Apkrova sijai apskaičiuota kaip apjungto diafragmomis sijyno (ekscentrinio gniuždymo metodas)



4.3 pav. Erdvinis sijyno modelis (žr. 4.1 pav.), sijų $E=2,7e6$ kPa, antros sijos įlinkis nuo NG-60 – 7,3 mm, kraštinės sijos – 7,5 mm



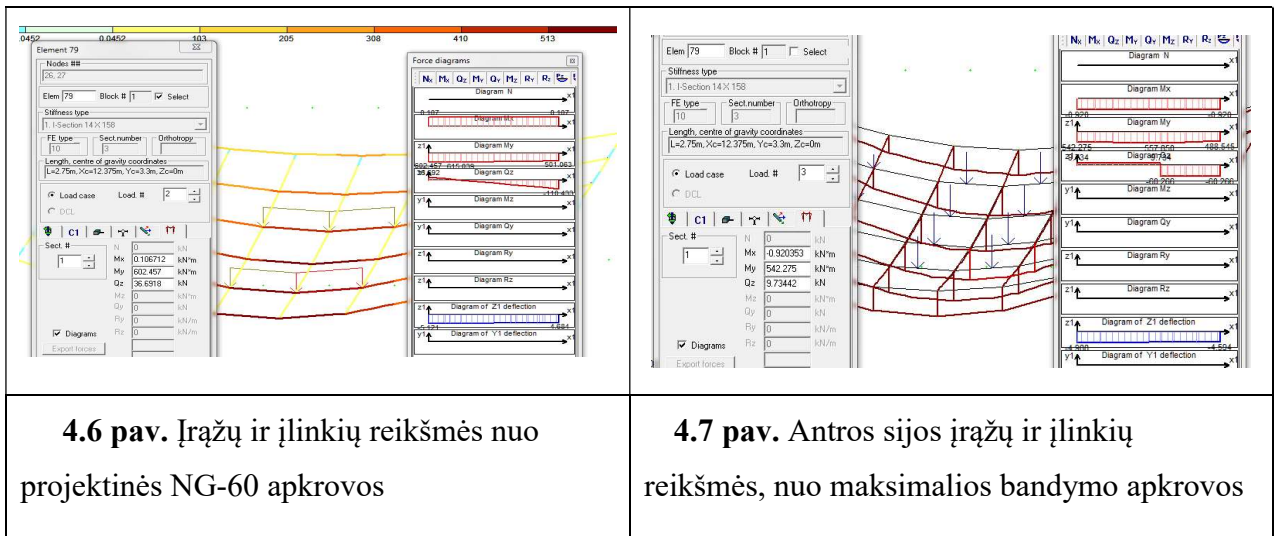
4.4 pav. Įvertinus pakloto 8 cm ir betono $E=30e6$ gauname mažesnius įlinkius nuo NG-60 apkrovos: antros sijos įlinkis – 5,1 mm, kraštinės sijos įlinkis – 5,1 mm



4.5 pav. Įvertinus pakloto 8 cm ir betono $E=30e6$ gauname mažesnius įlinkius nuo 4 sunkiasvorių automobilių bandymo apkrovos: kraštinės sijos įlinkis – 3,4 mm; antros sijos įlinkis – 3,6 mm

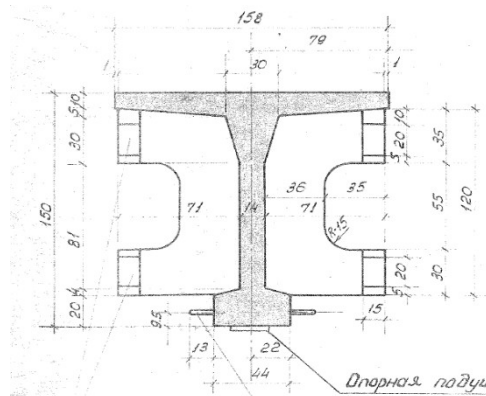
4.3. Apskaičiuotos įrašos tilto perdangoje

Taikant erdvinę sijyno schemą (žr. 4.1 pav.) apskaičiuotos įrašos nuo projekcinės NG-60 ir didžiausios bandymo apkrovos – 4 sunkiasvoriai automobiliai (žr. 4.6 pav. ir 4.7 pav.). Erdviniame kompiuteriniame modelyje apskaičiuoti lenkimo momentai yra mažesni, nei apskaičiuoti taikant tradicinį ekscentrinio gniuždymo metodą ir skersinio pasiskirstymo koeficientą. Perdanga skersine linkme deformuojasi ne tiesiškai, kaip priimta ekscentrinio gniuždymo metode, bet lengvai išsikreivina.



4.4. Projektinio perdangos sijų armavimo patikrinimas

Tilto per Kauno HE pagrindinės perdangos sijos bendras vaizdas pagal 1961 m. projektą pateiktas 4.8 paveiksle.



4.8 pav. Tilto per Kauno HE perdangos pagrindinės sijos bendras vaizdas pagal 1961 m. projektą
Apskaičiuotas reikiamas armavimas nuo nuolatinės ir projekcinės NG-60 apkrovos paskirstytos 5 m ilgyje – $118 \times 0,315 = 37,2 \text{ kN/m}$

Tilto per Kauno HE nuolatinių apkrovų skaičiavimas pateiktas 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Nuolatinės apkrovos pagal N-106-53 ir LST-EN

Apkrova	Tiesinė g _k , kN/m'	x perkrovimo koef. = g _d	LST-EN
Asfaltbetonis (10 cm)	0,1 x 25 x 12,65 = 4,125	x 1,56 = 6,2	x 1,35
Išlyginamasis sluoksnis su hidroizoliacija (6 cm)	0,06 x 24 x 1,65 = 2,38	x 1,5 = 3,6	x 1,35
Sija 304/23=13,2	13,2	x 1,1 = 14,52	x 1,35
Viso g_k	19,7	24,3, vidut. Koef. 1,235	26,6 kN/m

Sija su paklotu 19,7 x 23 = 453 kN = 46 t

Veikiančios diafragmos

Derinys armavimui: $G_k \times 1,235 + Q_k \times 1,1 = 19,7 \times 1,235$ (22 m ilgyje) + $37,2 \times 1,1$ (5 m ilgyje). (4.4.1)

Perskaičiuojame NG-60 į 6 m apkrovimo ilgį $37,2 \times 5 / 6 = 31 \text{ kN/m}'$

Nutrūkusios diafragmos

$G_k \times 1,235 + Q_k \times 1,1$; $g_k = 59 \text{ kN/m}'$; perskaičiuojame į 6 m apkrovimo ilgį $59 \times 5/6 = 49,2 \text{ kN/m}$. (4.4.2)

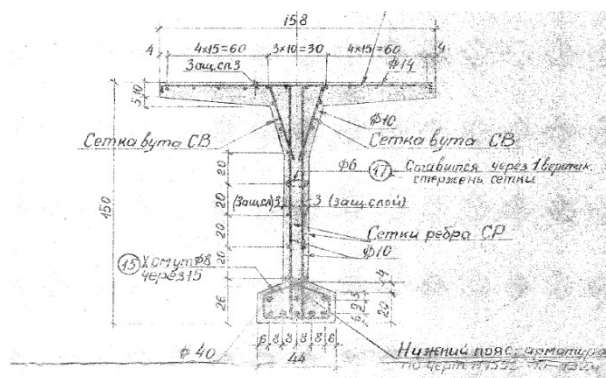
Erdvinis sijyno modelis $8 \times 2,75 = 22 \text{ m}$., skersai $5 \times 1,65 \text{ m}$, diafragmos $115 \times 12 \text{ cm}$ su $E_c = 25e6$.

G nuolatinė $g_k + (19,7 - 13,2 = 6,5) \text{ kN/m}'$, kraštinei po šalitilčiu $10 \text{ kN/m}'$

NG-60 išskirstome į $2 \times 2 \times 2,75 \text{ m}$ ilgio elementus $60 \times 9,81 / (4 \times 2,75) = 53,5 \text{ kN/m}'$

4.5. Pagrindinės sijos armavimo skaičiavimas

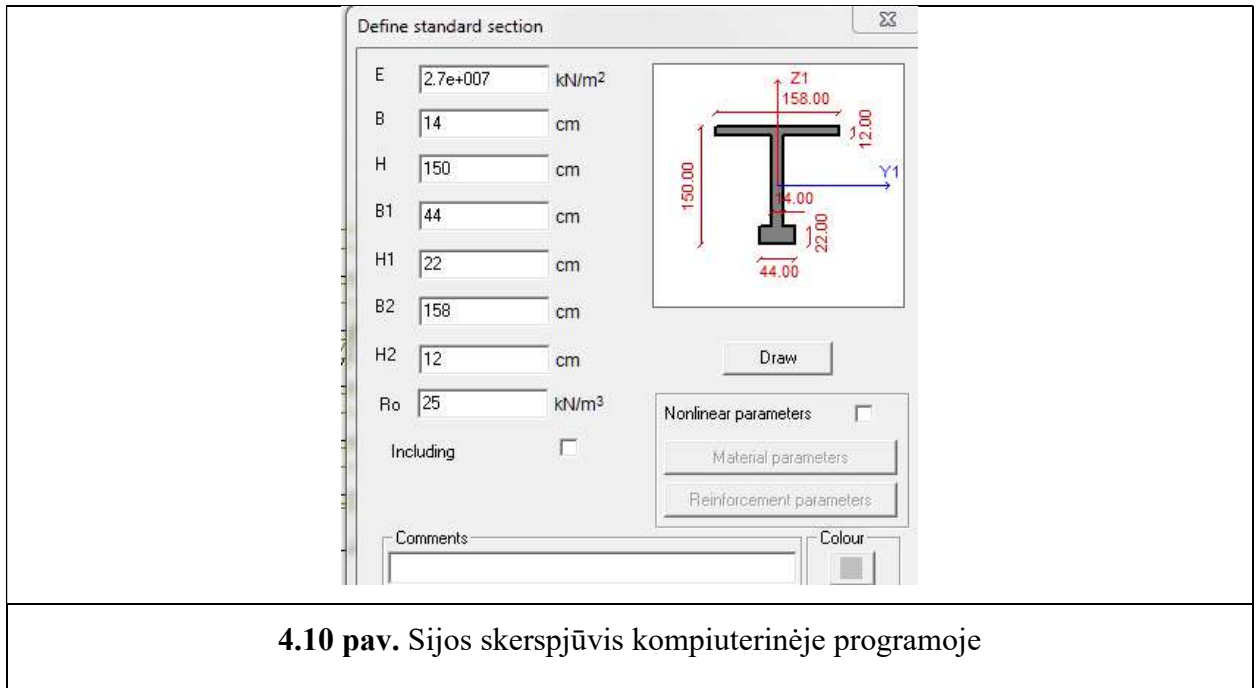
Tilto perdangos sijos armavimas pagal 1961 m. projektą pateiktas 4.9 paveiksle.



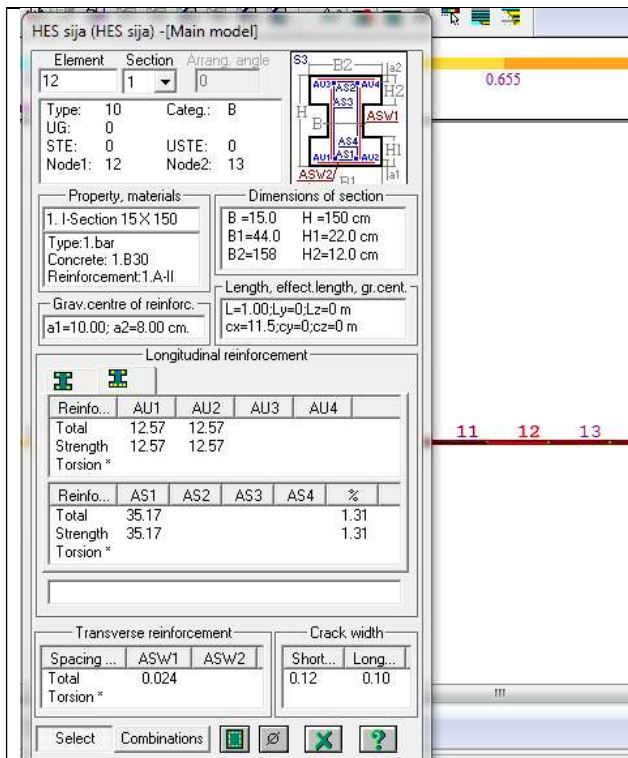
4.9 pav. Perdangos sijos armavimas pagal 1961 m. projektą

Reikiamo perdangos sijos armavimo skaičiavimas atliktas pagal NG-60 modelio apkrovą, tenkančią vienai sijai, pagal SNIP 83 metodiką su kompiuterine programa Lira 9.6.

Tilto perdangos sijos skerspjūvis kompiuterinėje programoje pavaizduotas 4.10 paveiksle, sijos armavimo skaičiavimas pavaizduotas 4.11 ir 4.12 paveiksluose.



4.10 pav. Sijos skerspjūvis kompiuterinėje programoje



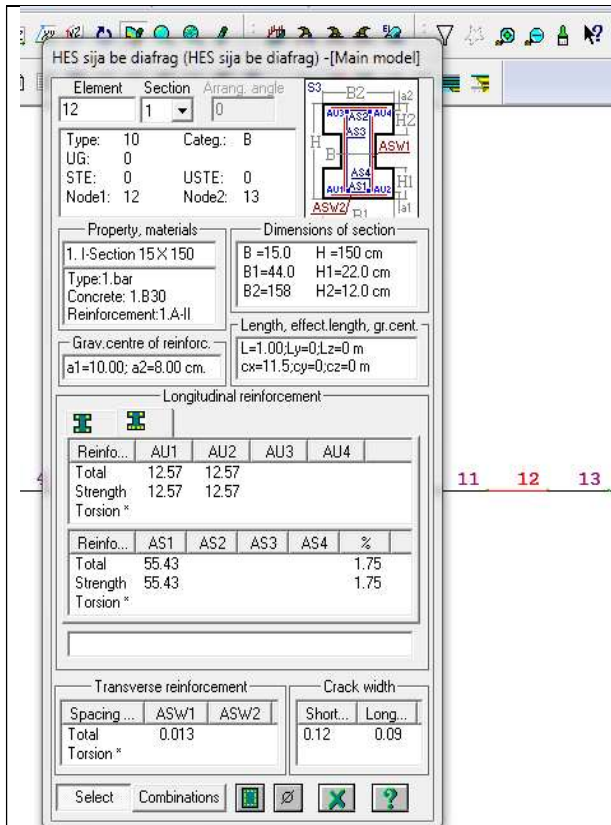
4.11 pav. Reikiamas išilginis armavimas perdangos sijoje prie veikiančių diafragmų

Perdanga su veikiančiomis diafragmomis

SNiP 83. Sijos projektinės būklės, diafragmos dirba ir išilginė St-5 priskiriama AII klasei, betonas šutintas prilygintas B30 klasei.

Reikiamas išilginės armatūros kiekis:
 $12,57 + 12,57 + 35,17 = 25,14 + 20,9 = 60,3 \text{ cm}^2$.

Pagal 1961 m projektą armuota $8 \times \text{Ø}40$ St-5, $A_s = 100,8 \text{ cm}^2$.



Perdanga be diafragmų (nutrūkusios)

Reikiamas išilginis armavimas apačioje, kai diafragmos nutrūkusios, nedirba, o išilginė armatūra AII klasės, betonas šutintas B30 klasės.

$$12,57 + 12,57 + 55,43 = 25,14 + 55,43 = 80,6 \text{ cm}^2$$

Pagal 1961 m., projektą armuota 8xØ40 St-5, $A_s = 100,8 \text{ cm}^2$

4.12 pav. Reikiamas išilginis armavimas perdangos sijoje prie nutrūkusių diafragmų

4.6. Ketvirto skyriaus išvados

Atlikus kompiuterinį perdangos skaičiavimą pastebėta, kad:

- įlinkių nuo bandymo apkrovos ir projektinės NG-60 apkrovos santykiai pirmai sijai – $4,3/5,1 = 0,84$, antrai sijai $4,9/5,1 = 0,96$. Faktiškai išmatuotų ir teoriškai apskaičiuotų didžiausių įlinkių kraštinėje perdangos sijoje santykis $3,5/3,4 = 1,03 > 0,6$ tenkina [1] reikalavimus;
- didžiausias lenkimo momentų (nuo maksimalios bandymo apkrovos ir projektinės NG-60 apkrovos) santykis labiausiai apkrautoje sijoje ($545 / 615 = 0,88$) yra artimas apskaičiuotam supaprastintu metodu;
- reikiamo armavimo projektinei NG-60 apkrovai skaičiavimai parodė, kad pagrindinės išilginės armatūros įdėta daugiau, nei reikia apkrovai NG-60 kartu su perdangos savuoju svoriu atlaikyti. Išilginio armavimo pakaktų atlaikyti 1953 m. projektinę apkrovą ir prie neveikiančių, nutrūkusių diafragmų, jei sijų būklė būtų normali, be korozijos židinių ir neleistino pločio plyšių.

5. TILTO STATINIS BANDYMAS

5.1. Bandymo tikslas ir apkrovos

Tilto statinio bandymo metu buvo naudojami sunkiasvoriai automobiliai, kurie prieš bandymą buvo pasverti (nustatyti svoriai, tenkantys priekinei ir užpakalinei automobilio ašims). Svėrimo rezultatus žr. 5.1 lentelėje.

5.1 lentelė. Bandymui naudotų automobilių masės

Eil. Nr.	Automobilio valstybinis Nr.	Priekinės ašies masė, t	Antros ašies masė, t	Bendra masė, t
1	HPL 417	7,50	11,80	19,30
2	ZPP 526	6,35	13,25	19,60
3	ARZ 503	6,15	13,40	19,55
4	ZKO 001	7,25	13,45	20,70

Bendra apkrovos masė tilto perdangai buvo 79,15 t. Sunkiasvorių transporto priemonių ilgiai kito nuo 8,0 iki 8,4 m. Atstumas tarp pirmos ir antros sunkiasvorių automobilių ašių kito nuo 3,3 m iki 4,0 m, jų plotis buvo apie 2,5 m.

Bandymas statine apkrova atliktas prisilaikant [1] reikalavimų. Bandymo apkrova turi sukelti įrašas konstrukcijose dydžiu 0,7-1,0 lyginant su projektinėmis charakteristinėmis apkrovomis. Kadangi įrašas arba įtempis nėra matuojamas, o tik apskaičiuojamas dydis, tai lyginami įlinkiai nuo bandymo ir projektinių charakteristinių (norminių) apkrovų. Bandymo apkrovos – sunkiasvorių transporto priemonių skaičius ir jų padėtis važiuojamoje dalyje parinkti tradiciniais skaičiavimais ir kompiuterinio modeliavimo būdu.

Tilto per Kauno HE statinio bandymo metu buvo naudojami 4 dviašiai sunkiasvoriai automobiliai, kurių vidutinis svoris – 19,8 t ir apžiūros bokštelis „MOOG“, kurio bendra masė 11 t. Bandymo dieną sunkiasvoriai automobiliai buvo statomi vienas šalia kito galais. Pirmoje eismo juostoje galais buvo statomi du sunkvežimiai, antroje eismo juostoje (prie šalitilčio žemupio pusėje) buvo statomas apžiūros bokštelis „MOOG“, prie kurio galu buvo pristatomas trečias automobilis. „MOOG“ bokšteliui nuvažiavus nuo tilto, galais buvo sustatomi visi 4 sunkiasvoriai automobiliai.

Bandymo metu didelę įtaką apkrovos išdėstymui turėjo apžiūros bokštelis „MOOG“ (žr. 5.1 pav.), nuo kurio buvo montuojama bandymo įranga, stebimos pagrindinių sijų deformacijos ir jose atsivėrusių įstrižųjų plyšių plokčių pokyčiai. Dėl šio priežasties buvo labiausiai apkraunama vidinė perdangos pusė, prie pirmos sijos, aukštupio pusėje.



5.2. Bandymo statine apkrova eiga

Tilto per Kauno HE statinio bandymo dieną statiškai ir dinamiškai buvo išbandyta pirmojo ir trečiojo tarpatramių perdangos. Pirmojo tarpatramio perdangos apkrovimo metu buvo stebima pagrindinių ir skersinių sijų būklė, plyšių vystymasis sijose, matuojami įlinkiai ir deformacijos.

Pirmojo tarpatramio perdanga buvo bandyta pagal tokią seką:

1. Perdanga neapkrauta;
2. Perdanga apkrauta apžiūros bokštelio „MOOG“;
3. Perdanga apkrauta apžiūros bokštelio „MOOG“, vienu ir po to 2 sunkiasvoriais automobiliais, sustatytais galais vienas šalia kito (žr. 5.2 pav.);
4. Perdanga apkraunama trečiu savivarčiu galu į keltuvą (žr. 5.3 pav.);
5. Apžiūros bokštelio „MOOG“ nuvažiavus, perdanga apkraunama 4 savivarčiais, sustatomais galais (žr. 5.4 pav.);
6. Perdanga nukrauta, sunkiasvoriai automobiliai sustatyti už perdangos ribų.

Kiekviena apkrova buvo išlaikoma ant tilto perdangos, kol įlinkių prieaugis per 5 min. tampa ne didesnis kaip 5%. Tiltu pirmojo tarpatramio perdangos simetrinio apkrovimo metu, perdanga buvo apkrauta keturiais sunkiasvoriais automobiliais. Nuo šios apkrovos perdangos viduriniame pjūvyje lenkimo momento dalis nuo projektinės charakteristinės (HG-60 apkrova) ir bandymo apkrovos buvo 94%.

Atlikus pirmojo tarpatramio perdangos simetrinį ir asimetrinį apkrovimo variantus buvo atliekamas trečiojo tarpatramio perdangos simetrinis apkrovimas. Trečiojo tarpatramio perdangos bandymo metu buvo matuojami tik perdangos įlinkiai nuo bandymo apkrovos.

Gelžbetoninių tiltų perdangų stiprumo ir deformatyvumo tyrimai
Baigiamasis magistro darbas

Trečiojo tarpatramio perdanga buvo bandyta pagal tokią seką:

1. Perdanga neapkrauta;
2. Perdanga apkrauta dviem sunkiasvoriais automobiliais, sustatytais galais vienas į kitą (žr. 5.6 pav.);
3. Perdanga apkrauta keturiais sunkiasvoriais automobiliais, sustatytais galais vienas į kitą (žr. 5.7 pav.);
4. Perdanga nukrauta, sunkiasvoriai automobiliai sustatyti už perdangos ribų.

	
<p>5.2 pav. Pirmojo tarpatramio perdanga apkrauta tiltų apžiūros bokšteliu „MOOG“ ir dviem sunkiasvoriais automobiliais</p>	<p>5.3 pav. Pirmojo tarpatramio perdanga apkrauta apžiūros bokšteliu „MOOG“ ir trimis sunkiasvoriais automobiliais</p>
	
<p>5.4 pav. Pirmojo tarpatramio perdanga apkrauta keturiais sunkiasvoriais automobiliais, sustatytais galais vienas į kitą</p>	<p>5.5 pav. Tiltų perdangos įlinkio matavimas su nivelyru</p>

	
<p style="text-align: center;">5.6 pav. Trečiojo tarpatramio perdanga apkrauta dviem sunkiasvoriais automobiliais</p>	<p style="text-align: center;">5.7 pav. Trečiojo tarpatramio perdanga apkrauta keturiais sunkiasvoriais automobiliais</p>

5.3. Matavimo prietaisų išdėstymas

Tilto per Kauno HE pirmojo ir trečiojo tarpatramių perdangų statinio bandymo metu įlinkiams matuoti buvo naudojamas vienas optinis nivelyras, pagrindinių sijų deformacijoms matuoti buvo naudojami mechaniniai deformacijų jutikliai, o sijose atsivėrusių įstrižųjų plyšių plokčių pokyčių matavimui buvo naudojami mechaniniai indikatoriai.

Tilto dinaminio bandymų metu buvo naudojami mobilios laboratorijos elektroniniai poslinkių ir pagreičių jutikliai.

5.4 Įrašos nuo projektinių charakteristinių ir bandymo apkrovų

Tiltas per Kauno HE suprojektuotas H-13 ir HG-60 projektinėms apkrovoms pagal rusiškas tiltų projektavimo normas. Tiltų perdangai pavojingesnė projektinė HG-60 apkrova.

Lenkimo momentas pirmojo tarpatramio perdangos labiausiai apkrautos sijos (1 pagrindinė sija aukštupio pusėje) viduriniame pjūvyje nuo projektinės charakteristinės (HG-60) apkrovos įvertinant skersinio pasiskirstymo koeficientą:

$$M_{proj}^{I-tarp.} = 921 kNm.$$

Lenkimo momentų skaičiavimas nuo bandymo apkrovos (4 sunkiasvoriai „MAZ“ tipo markės automobiliai, kurių vidutinis svoris 19,8 t) labiausiai apkrautoje sijoje (pirma pagrindinė sija aukštupio pusėje) įvertinant skersinio pasiskirstymo koeficientą pateiktas 5.3 lentelėje.

5.3 lentelė. Lenkimo momento skaičiavimas labiausiai apkrautoje sijoje įvertinant skersinio pasiskirstymo koeficientą

Bandymo apkrovos juosta	Ašių apkrova, kN	Skersinio pasiskirstymo koeficientas	Lenkimo momento influentės ordinatės	Charakteristinis lenkimo momentas sijoje, kNm	Suminis charakteristinis lenkimo momentas sijoje, kNm
1-ma, juosta, 2 sunkiasvoriai automobiliai, 4 ašys	71	0,38	3,5	94	864
	132		5,5	276	
	130		5,5	272	
	62		3,8	90	
2-ra juosta, 2 sunkiasvoriai automobiliai, 4 ašys	60	0,10	2,4	14	
	131		4,1	54	
	116		4,1	48	
	74		2,1	16	

Lenkimo momentų palyginimas pirmojo tarpatarmio perdangos labiausiai apkrautoje sijoje nuo projektinės charakteristinės (HG-60 apkrova) ir bandymo apkrovų pateiktas 5.4 lentelėje.

5.4 lentelė. Lenkimo momentai pirmojo tarpatarmio perdangos labiausiai apkrautos sijos viduriniame pjūvyje nuo projektinės charakteristinės HG-60 ir bandymo apkrovų

Apkrova	Lenkimo momentai nuo bandymo apkrovos, kNm	Lenkimo momentai nuo projektinės charakteristinės (HG-60 modelio apkrovos) kNm	Lenkimo momento dalis nuo projektinės charakteristinės (HG-60 apkrovos), %
1	370	921	40
2	732		79
3	800		87
4	864		94

5.5. Statinio bandymo rezultatai ir jų analizė

Tiltas per Kauno HE buvo suprojektuotas pagal rusiškas tiltų projektavimo normas, kurios šiuo metu nebegalioja, todėl pirmojo ir trečiojo tarpatramių perdangų darbą analizuojamas pagal pagal [1] ir rusišką [13] metodiką.

Tilto statinio bandymo metu matuotas perdangos įlinkis (poslinkis) bei liekamieji įlinkiai. Pagal šių dydžių santykinę reikšmę nustatoma ar konstrukcija dirba tamprioje stadijoje.

Teoriniai tilto pirmojo ir trečiojo tarpatramių perdangų įlinkiai buvo apskaičiuoti su kompiuterine programa „Lira 9.6“.

Tilto per Kauno HE perdangos darbo vertinimas pagal [1] reikalavimus

Konstrukcijų tamprųjų darbą apibūdina koeficientas β :

$$\beta = \frac{y_{pl}}{y_{tot}}; \quad (5.5.1)$$

čia: y_{pl} – liekamieji įlinkiai (poslinkiai) po deformacijų stabilizavimosi;

y_{tot} – suminiai įlinkiai (poslinkiai) po deformacijų stabilizacijos.

Gelžbetoninėms konstrukcijoms koeficientas $\beta \leq 0,25$.

Tampriųjų įlinkių, liekamųjų įlinkių ir koeficiento β skaičiavimo rezultatus žiūrėti 5.5 ir 5.6 lentelėse.

5.5 lentelė. Koeficiento β reikšmės išbandant pirmojo tarpatramio perdangos vidurinį pjūvį

Stadija	Apkrova	Matavimo vieta		Vidutinis įlinkis, mm	Koeficientas β
		Perdangos įlinkis ties aukštupio pusės atitvaru,	Perdangos įlinkis ties žemupio pusės atitvaru,		
0	Be apkrovos	0	0	0	-
1	Apžiūrų bokštelis „MOOG“	0	0,3	0,15	-
2	„MOOG“ + 1 automobilis	1,3	0,5	0,9	0,0
3	„MOOG“	-0,1	0,3	0,1	-
4	„MOOG“ + 2 automobiliai	3,0	0,8	1,9	-
5	„MOOG“ + 3 automobiliai	3,2	1,1	2,15	0,023
6	Be apkrovos	0	0,1	0,05	-
7	4 automobiliai	3,5	1,5	2,5	0,04
8	Be apkrovos	0	0,2	0,1	-

5.6 lentelė. Koeficiento β reikšmės išbandant trečiojo tarpatramio perdangos vidurinį pjūvį

Stadija	Apkrova	Matavimo vieta	Vidutinis įlinkis, mm	Koeficientas β
		Perdangos įlinkis ties aukštupio pusės atitvaru, mm		
0	Be apkrovos	0	0	-
1	2 automobiliai	3,0	3,0	-
2	4 automobiliai	3,5	3,5	0,0
3	„MOOG“	0	0	-

Išmatuoto (s_{eks}) ir teoriškai apskaičiuoto (s_{teor}) nuo statinės bandomosios apkrovos efektų santykis gelžbetoninėms konstrukcijoms turi būti šiose ribose:

$$\alpha_1 = 0,60 < \frac{s_{eks}}{s_{teor}} \leq \alpha_2 = 1,10; \quad (5.5.2)$$

čia: s_{eks} – išmatuotas įlinkis nuo statinės apkrovos;

s_{teor} – teoriškai apskaičiuotas įlinkis nuo statinės apkrovos.

Pirmojo tarpatramio perdangos išmatuoto ir teorinio įlinkio santykio skaičiavimas nuo didžiausios simetrinės bandymo apkrovos pateiktas 5.7 lentelėje, trečiojo tarpatramio perdangos 5.8 lentelėje.

5.7 lentelė. Pirmojo tarpatramio perdangos išmatuoto ir teorinio įlinkio santykio skaičiavimas nuo didžiausios simetrinės bandymo apkrovos

Apkrova	Matavimo vieta	Didžiausias vidutinis įlinkis nuo bandymo apkrovos (s_{eks}), mm	Teorinis įlinkis nuo bandymo apkrovos kraštinėje sijoje (s_{teor}), mm	Išmatuotų ir teorinių įlinkių santykis, s_{eks} / s_{teor}
	Perdangos įlinkis ties aukštupio pusės atitvaru, mm			
4 automobiliai	3,5	3,5	3,4	1,02

5.8 lentelė. Trečiojo tarpatramio perdangos išmatuoto ir teorinio įlinkio santykio skaičiavimas nuo didžiausios simetrinės bandymo apkrovos

Apkrova	Matavimo vieta	Didžiausias vidutinis įlinkis nuo bandymo apkrovos (s_{eks}), mm	Teorinis įlinkis nuo bandymo apkrovos kraštinėje sijoje (s_{teor}), mm	Išmatuotų ir teorinių įlinkių santykis, s_{eks} / s_{teor}
	Perdangos įlinkis ties aukštupio pusės atitvaru, mm			
4 automobiliai	3,5	3,5	3,4	1,02

Tilto per Kauno HE perdangos darbo vertinimas pagal [13] metodiką

Konstrukcijų tamprųjų darbą apibūdina koeficientas α :

$$\alpha = \frac{f_r}{f_{el}}; \quad (5.5.3)$$

čia: f_r – liekamasis įlinkis po deformacijų stabilizavimosi;

f_{el} – tamprusis įlinkis po deformacijų stabilizavimosi.

Koeficientas α eksploatuojamiems tiltams turi būti: $\alpha \leq 0,05$.

Tamprųjų įlinkių, liekamųjų įlinkių ir koeficiento α skaičiavimo rezultatus žiūrėti 5.9 ir 5.10 lentelėse.

5.9 lentelė. Koeficiento α reikšmės išbandant pirmojo tarpatrio perdangos vidurinį pjūvį

Matavimo vieta	Viso įlinkio dydis, mm	Liekamojo įlinkio dydis, mm	Tampraus įlinkio dydis, mm	Koeficientas α	Koeficiento α vidutinis dydis
Perdangos įlinkis ties aukštupio pusės atitvaru, mm	3,5	0,0	3,5	0,0	0,03

5.10 lentelė. Koeficiento α reikšmės išbandant trečiojo tarpatrio perdangos vidurinį pjūvį

Matavimo vieta	Viso įlinkio dydis, mm	Liekamojo įlinkio dydis, mm	Tampraus įlinkio dydis, mm	Koeficientas α	Koeficiento α vidutinis dydis
Perdangos įlinkis ties aukštupio pusės atitvaru, mm	3,5	0,0	3,5	0,0	0,0

Išbandžius pirmojo ir trečiojo tarpatrio perdangas nuo simetrinės apkrovos nustatyta, kad pirmojo tarpatrio perdangos vidutinių liekamųjų įlinkių santykis su tampriu įlinkiu nuo didžiausios bandymo apkrovos ($\alpha = 0,03$) ir trečiojo tarpatrio perdangos vidutinių liekamųjų

įlinkių santykiu su tampriu įlinkiu nuo didžiausios bandymo apkrovos ($\alpha = 0,0$) yra mažesnis, nei ribinis (0,05), pagal [13] reikalavimus.

Faktinius ir teorinius įlinkius nuo bandymo apkrovos palyginsime apskaičiuojant koeficientą K:

$$K = \frac{S_e}{S_{cal}} \quad (5.5.4)$$

čia: S_e – išmatuotas įlinkis nuo statinės apkrovos;

S_{cal} – teoriškai apskaičiuotas įlinkis nuo statinės apkrovos.

Skaičiavimo rezultatus žiūrėti 5.11 lentelėje.

5.11 lentelė. Faktinio ir teorinio įlinkio santykio skaičiavimas

Įlinkio matavimo vieta	Faktinis didžiausias sijų įlinkis nuo bandymo apkrovos S_e , mm	Teorinis sijų įlinkis nuo bandymo apkrovos S_{cal} , mm	Faktinio ir teorinio įlinkio santykis S_e / S_{cal}
Pirmojo tarpatriamio perdangos kraštinė sija po aukštupio pusės atitvaru	3,5	3,4	1,02
Trečiojo tarpatriamio perdangos kraštinė sija po aukštupio pusės atitvaru	3,5	3,4	1,02

Pagal [13] nurodoma, kad perdangos elementams, kuriuos skaičiuojant nepriimtas bendras perdangos ir pakloto darbas, koeficientas K yra 0,5 – 0,7 ribose. Koeficiento reikšmė mažesnė už 0,5 rodo konstrukcijos stiprumo atsargą. Mūsų atveju gautas koeficientas (1,02) yra didesnis už 0,7, tačiau tai yra todėl, kad skaičiuojant šį koeficientą buvo įvertintas bendras perdangos ir pakloto darbas.

5.6. Tiltų įlinkių analizė vertinant armatūros koroziją

Vertinant perdangos įlinkį dėl apatinės armatūros korozijos, jos skerspjūvio plotas (A_s) buvo atitinkamai mažinamas: 5%; 10%; 15% ir 20%. Pagal gautas reikšmes (žr. 5.12 lentelę) matyti, kad faktinis didžiausias įlinkis atitinka ~10% nukorodavusios armatūros teorinį įlinkį.

5.12 lentelė. Faktinio ir teorinio įlinkio santykio skaičiavimas

Eilės nr.	Apatinės armatūros skerspjūvio plotas A_s cm^2	Nukorodavimo procentas	Apskaičiuotas apatinės armatūros skerspjūvio plotas A_s cm^2	Faktinis didžiausias sijų įlinkis nuo bandymo apkrovos S_e , mm	Teorinis sijų įlinkis nuo bandymo apkrovos S_{cal} , mm
1	100,48	–	100,48	3,5	3,44
2		5%	95,46		3,49
3		10%	90,43		3,53
4		15%	85,41		3,58
5		20%	80,38		3,63

Išvada:

- statinio bandymo metu nustatyta, kad faktinis perdangos įlinkis 3,5 mm;
- teoriškai apskaičiuotas perdangos įlinkis nevertinant armatūros korozijos yra 3,44 mm;
- mažinant armatūros skerspjūvio plotą įvertinant korozijos įtaką nustatyta, kad sumažinus ~10% tempiamos armatūros skerspjūvio plotą faktinis ir teorinis įlinkiai sutampa.

5.7. Perdangos plyšių pločių pokyčių analizė

Statinio bandymo metu pirmojo tarpatramio perdangos ketvirtoje ir penktoje pagrindinėse sijos matavome atsivėrusių įstrižųjų ir normalinių plyšių pločių pokyčius (žr. 5.8 ir 5.9 pav.). Prieš bandymą pirmojo tarpatramio perdangos (ketvirtoje pagrindinėje sijoje) išmatuotas pradinis įstrižojo plyšio plotis buvo 0,40 mm, penktoje pagrindinėje sijoje įstrižojo plyšio plotis perdangos viduryje buvo 0,45 mm ir didžiausias normalinis plyšys perdangos sijos apatinėje lentynoje buvo 0,55 mm.



5.8 pav. Normalinio plyšio pločio pokyčio matavimas pirmojo tarpatramio perdangos penktos pagrindinės sijos viduryje, apatinėje lentynoje



5.9 pav. Įstrižojo plyšio pločio pokyčio matavimas pirmojo tarpatramio perdangos ketvirtos pagrindinės sijos viduryje

Tilto pirmojo tarpatramio perdangos statinio bandymo metu matuotų plyšių pločių pokytis pateiktas 5.13 lentelėje.

5.13 lentelė. Perdangos sijos matuotų plyšių pločių pokyčių reikšmės

Stadija	Apkrova	Pradinis plyšio plotis 4 sijoje (0,4 mm)	Pradinis normalinio plyšio plotis 5 sijoje (0,55 mm)	Pradinis įstrižojo plyšio plotis 5 sijoje (0,65 mm)
		Prietaisų sumontuotų ant plyšių parodymai, mm		
0	Be apkrovos	-	-	-
1	Bokštėlis „MOOG“	0,47	0,947	0,688
2	„MOOG“ + 1 auto.	0,47	0,947	0,688
3	„MOOG“	0,47	0,947	0,688

4	„MOOG“ + 2 auto.	0,469	0,946	0,687
5	„MOOG“ + 3 auto.	0,47	0,946	0,687
6	Be apkrovos	0,469	0,946	0,687

Statinio bandymo metu apkrovus pirmojo tarpatramio perdangą apžiūrų bokšteliu „MOOG“ ir palaiptui vienu bei dviem sunkiasvoriais automobiliais įstrižųjų ir normalinių plyšių plotis 4 ir 5 pagrindinėse sijose nepakito (žr. 5.13 lentelę).

Statinio bandymo metu, apkrovus perdangą 3 sunkiasvoriais automobiliais ir apžiūrų bokšteliu „MOOG“ stebimų plyšių plotis kito labai nežymiai (0,0015 mm). Tai rodo, kad bandymo apkrova, susidedanti iš 11 t sveriančio apžiūrų bokštelio ir 3 sunkiasvorių automobilių vidutiniškai sveriančių po 19,8 t, sukėlusi 3,2 mm įlinkį labiausiai apkrautoje perdangos sijoje neturėjo įtakos sijų pleišėjimui. Nukrovus perdangą visi plyšiai užsivėrė iki pradinio plyšio pločio.

Pastaba: apkrovus pirmojo tarpatramio perdangą 4 sunkiasvoriais automobiliais, apžiūrų bokšteliu „MOOG“ turėjo pasitraukti nuo tilto perdangos, todėl nebuvo galimybės stebėti sijose atsivėrusių plyšių pločių pokyčių.

5.8. Deformacijų matavimai ir įtempiai sijose

Statinio bandymo metu tilto pagrindinių sijų betono deformacijos matuotos pirmojo tarpatramio perdangos viduriniame pjūvyje 2, 3, 5 ir 6 pagrindinių sijų apatinėse lentynose. Sijų deformacijos matuotos su mechaniniais deformacijų jutikliais.

Mechaniniai deformacijų jutikliai perdangų sijų betono deformacijoms matuoti buvo išdėstyti taip:

- mechaninis deformacijų jutiklis Ind. 1 buvo įrengtas pirmojo tarpatramio perdangos antros pagrindinės sijos viduriniame pjūvyje, sijos apatinėje lentynoje;
- mechaninis deformacijų jutiklis Ind. 2 buvo įrengtas pirmojo tarpatramio perdangos trečios pagrindinės sijos viduriniame pjūvyje, sijos apatinėje lentynoje;
- mechaninis deformacijų jutiklis Ind. 3 buvo įrengtas pirmojo tarpatramio perdangos penktos pagrindinės sijos viduriniame pjūvyje, sijos apatinėje lentynoje;
- mechaninis deformacijų jutiklis Ind. 4 buvo įrengtas pirmojo tarpatramio perdangos 6 pagrindinės sijos viduriniame pjūvyje, sijos apatinėje lentynoje.

Pastaba: mechaninių deformacijų jutiklių matavimo bazė – 300 mm., skaičiavimuose priimta, kad betono tamprumo modulis – $E_b = 28867 \text{ MPa}$.

Kaip kito deformacijos palaiptui apkraunant perdangą, matyti 5.14 lentelėje.

5.14 lentelė. Tiltu pirmojo tarptračio perdangos sijų deformacijų kitimas bandymo metu

Stadija	Apkrova	Pagrindinė sija Nr. 2	Pagrindinė sija Nr. 3	Pagrindinė sija Nr. 5	Pagrindinė sija Nr. 6
		Deformacijų jutiklių parodymai, mm			
0	Be apkrovos	-	-	-	-
1	Bokštelis „MOOG“	0,414	0,475	0,451	0,507
2	„MOOG“ + 1 auto.	0,409	0,471	0,451	0,507
3	Bokštelis „MOOG“	0,415	0,471	0,451	0,507
4	„MOOG“ + 2 auto	0,401	0,461	0,455	0,507
5	„MOOG“ + 3 auto	0,401	0,461	0,442	0,503
6	Bokštelis „MOOG“	0,418	0,471	0,446	0,503

Perdangos sijų deformacijų skaičiavimas pateiktas 5.15 lentelėje.

5.15 lentelė. Tiltu per Kauno HE perdangos sijų deformacijų skaičiavimas

Stadija	Apkrova	Pagrindinė sija Nr. 2	Pagrindinė sija Nr. 3	Pagrindinė sija Nr. 5	Pagrindinė sija Nr. 6
		Apskaičiuotos deformacijos perdangos sijose			
2	„MOOG“ + 1 auto.	$17 \cdot 10^{-6}$	$13 \cdot 10^{-6}$	$0 \cdot 10^{-6}$	$0 \cdot 10^{-6}$
4	„MOOG“ + 2 auto	$43 \cdot 10^{-6}$	$47 \cdot 10^{-6}$	$13 \cdot 10^{-6}$	$0 \cdot 10^{-6}$
5	„MOOG“ + 3 auto	$43 \cdot 10^{-6}$	$47 \cdot 10^{-6}$	$30 \cdot 10^{-6}$	$13 \cdot 10^{-6}$
6	Bokštelis „MOOG“	$13 \cdot 10^{-6}$	$13 \cdot 10^{-6}$	$17 \cdot 10^{-6}$	$13 \cdot 10^{-6}$

Tiltu per Kauno HE teorinių ir faktinių įtempių palyginimas (nuo maksimalios bandymo apkrovos) pateiktas 5. 16 lentelėje.

5.16 lentelė. Teorinių ir faktinių įtempių palyginimas

Tarpatramis	Sija	Deformacijų jutiklis	Įtempiai nuo maksimalios bandymo apkrovos, MPa	
			Teoriniai	Faktiniai
1	2	Ind. 1	1,67	1,24
	3	Ind. 2	1,67	1,36
	5	Ind. 3	1,67	0,87
	6	Ind. 4	1,67	0,38
Pastaba: + tempimas, - gniuždymas				

5.9. Penkto skyriaus išvados

- Lenkimo momento, nuo didžiausios bandymo (4 sunkiasvariai automobiliai) apkrovos, santykis su lenkimo momentu nuo projektinės (HG-60) charakteristinės apkrovos – $864 / 921 = 0,94$. Pagal šiuo metu galiojančių ST 188710638.10:2005 taisyklių reikalavimus šis santykis turi būti ribose 0,7 – 1,0.
- išbandžius pirmojo ir trečiojo tarpatramių perdangas nuo simetrinės apkrovos nustatyta, kad pirmojo tarpatramio perdangos vidutinių liekamųjų įlinkių santykis su visu įlinkiu nuo didžiausios bandymo apkrovos ($\beta = 0,04$) ir trečiojo tarpatramio perdangos vidutinių liekamųjų įlinkių santykis su visu įlinkiu nuo didžiausios bandymo apkrovos ($\beta = 0,0$) yra žymiai mažesnis, nei ribinis (0,25), pagal [1] (žr. 5.6 lentelę)
- išbandžius pirmojo ir trečiojo tarpatramių perdangas nustatyta, kad perdangos eksperimentinių ir teorinių įlinkių reikšmių santykis (s_{eks} / s_{teor}) tenkina [1] reikalavimus (žr. 5.8 lentelę);
- apkrovas pirmojo ir trečiojo tarpatramių perdangas koeficiento K reikšmės labiausiai apkrautose sijose (pirma pagrindė sija aukštupio pusėje po aukštupio pusės atitvaru) tenkino [13] reikalavimus.
- įvertinus armatūros koroziją 10% faktinis didžiausias sijų įlinkis nuo bandymo apkrovos 3,5 mm beveik atitinka teorinį paskaičiuotą įlinkį 3,53 mm.
- apkrovas perdangą sunkiasvariais automobiliais įstrižųjų ir normalinių plyšių plotis nekito;
- statinio bandymo metu nustatyta, kad pirmojo tarpatramio perdangos sijose faktiškai išmatuoti betono tempimo įtempiai neviršijo teoriškai apskaičiuotų įtempių.

6. TILTO DINAMINIS BANDYMAS

6.1 Bandymo tikslas ir programa

Bandymo tikslas – nustatyti tilto perdangos svarbiausius dinامينius rodiklius, t. y. laisvųjų slopinamųjų virpesių dažnį, periodą, formą, dinamiškumo koeficientą, pagreičius.

Tilto perdangos virpesiams sukelti buvo panaudotas vienas dviejų ašių apie 20 t masės „MAZ“ tipo sunkiasvoris automobilis, važiuavęs tokia tvarka:

- 30 km/h greičiu per tiltą;
- 40 km/h greičiu per tiltą;
- 50 km/h greičiu per tiltą;
- 5 km/h, 10 km/h ir 15 km/h greičiais per medinį tašą padėtą pirmojo tarpatramio perdangos viduriniame pjūvyje.

Tilto per Kauno HE perdanga buvo bandyta (suvirpinta) dinamine apkrova 8 kartus (žr. 6.1 lentelę).

6.1 lentelė. Tilto perdangos dinaminio bandymo pradiniai duomenys

Bandymo numeris	Kliūtis vieta	Kliūtis (tašo) storis, mm	Automobilio greitis, km/h
1	-	-	30
2	-	-	40
3	-	-	50
4	Pirmojo tarpatramio perdangos vidurys	20	5
5			5
6			10
7			15
8			15

6.2. Matavimo prietaisai ir jų išdėstymas

Tilto perdangos sijų virpesiai nuo dinaminės apkrovos buvo užfiksuoti dinaminio bandymo laboratorijos elektroniniais poslinkių ir pagreičių jutikliais.

Tilto perdangoje sukeltus virpesius programinė įranga registravo 250 Hz dažniu. Signalų trikdžiai filtruoti „Chebechev“, „Betterwoth“ ir „Bessell“ būdais. Bandymo duomenų blokuose virpesių dažnio turinio analizei naudotos greitosios Furje transformacijos ir laipsniškas spektrinio tankio tyrimas.

6.3. Dinaminių bandymų rezultatai ir analizė

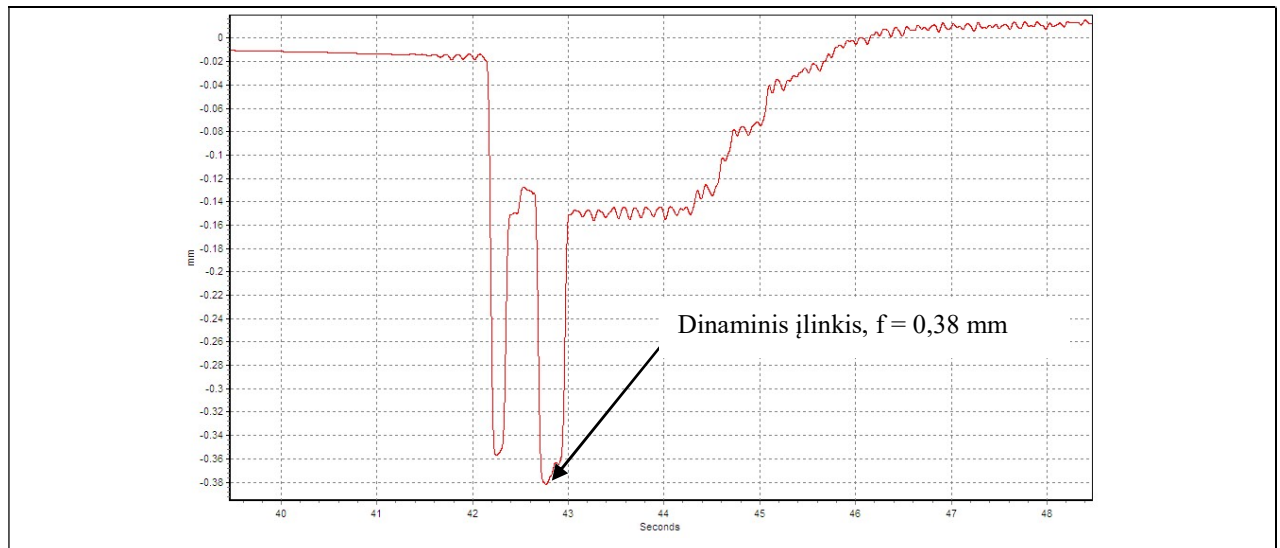
Tilto dinaminio bandymo, atlikto 2015 m. birželio 27 d., rezultatai: vibrogramos, virpesių galios spektrai, pagreičių grafikai pateikti 6.4 skyriuje. Pateiktų grafikų apačioje nurodytas bandymo numeris, jutiklio numeris ir būdingi dinaminiai rodikliai.

Visi tilto perdangos dinaminiai rodikliai pateikti 6.2 lentelėje.

6.2 lentelė. Tilto pirmojo tarpatramio perdangos dinaminiai rodikliai užfiksuoti dinaminio bandymo metu

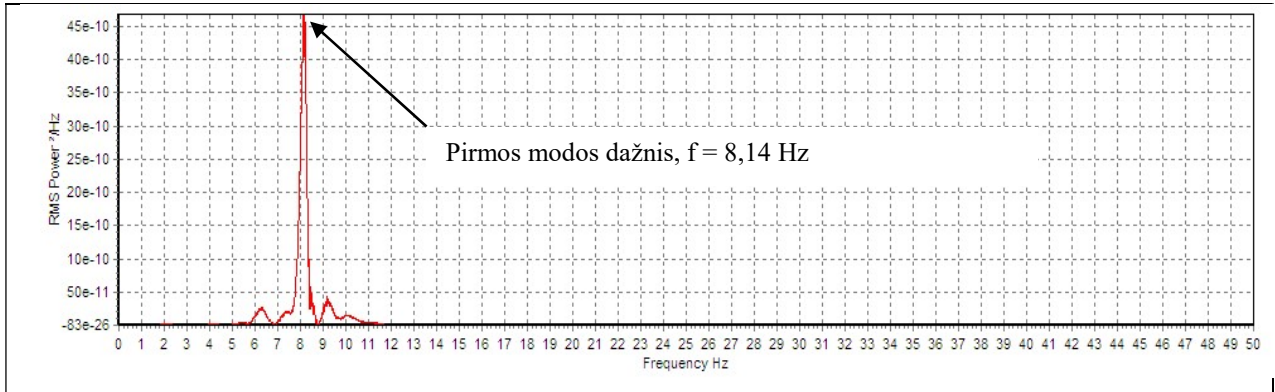
Bandymo Nr.	Judėjimo greitis, km/h	Dažnis, Hz	Periodas, s	Pagreitis, m/s ²	Dinaminis įlinkis	Dinamiškumo koeficientas $1 + \mu$
1	30	8,27	0,121	0,05493	-	-
2	40	8,34	0,120	0,08748	0,30	1,01
3	50	8,29	0,121	0,09155	0,31	1,05
4	5	8,35	0,120	0,73649	0,36	1,20
5	5	8,26	0,121	0,79956	0,37	1,20
6	10	8,14	0,123	1,16781	0,38	1,27
7	15	8,22	0,122	1,65405	0,34	1,13
8	15	8,34	0,120	1,32650	0,33	1,10
Vidurkis		8,28	0,121	-	-	-

6.4. Tilto perdangos virpesių grafikai



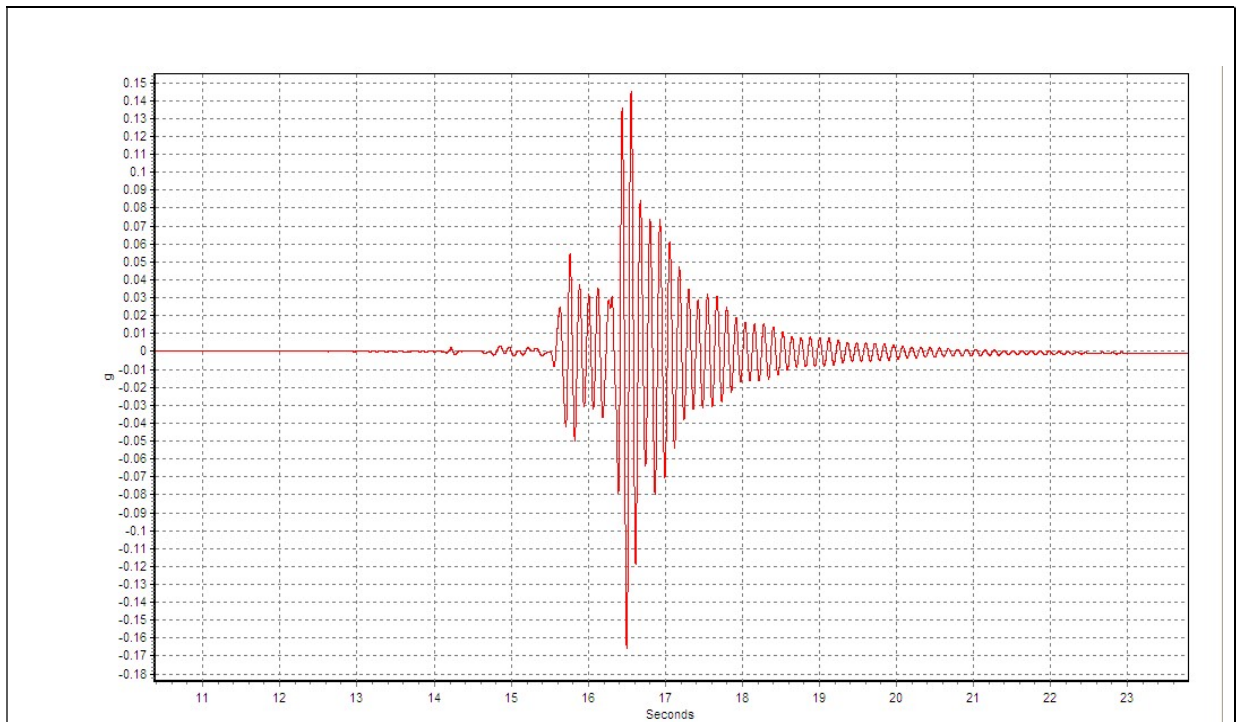
Bandymo Nr.	Jutiklio Nr.	Dinamiškumo koeficientas	
		$\mu_{din} = 1 + \mu = \frac{y_{din}}{y_{st}}$	(6.4.1)
6	Ch 01	1,27	

6.1 pav. Poslinkių jutikliu, pirmojo tarpatramio perdangos viduriniame pjūvyje, užregistruotas dinaminio įlinkio grafikas



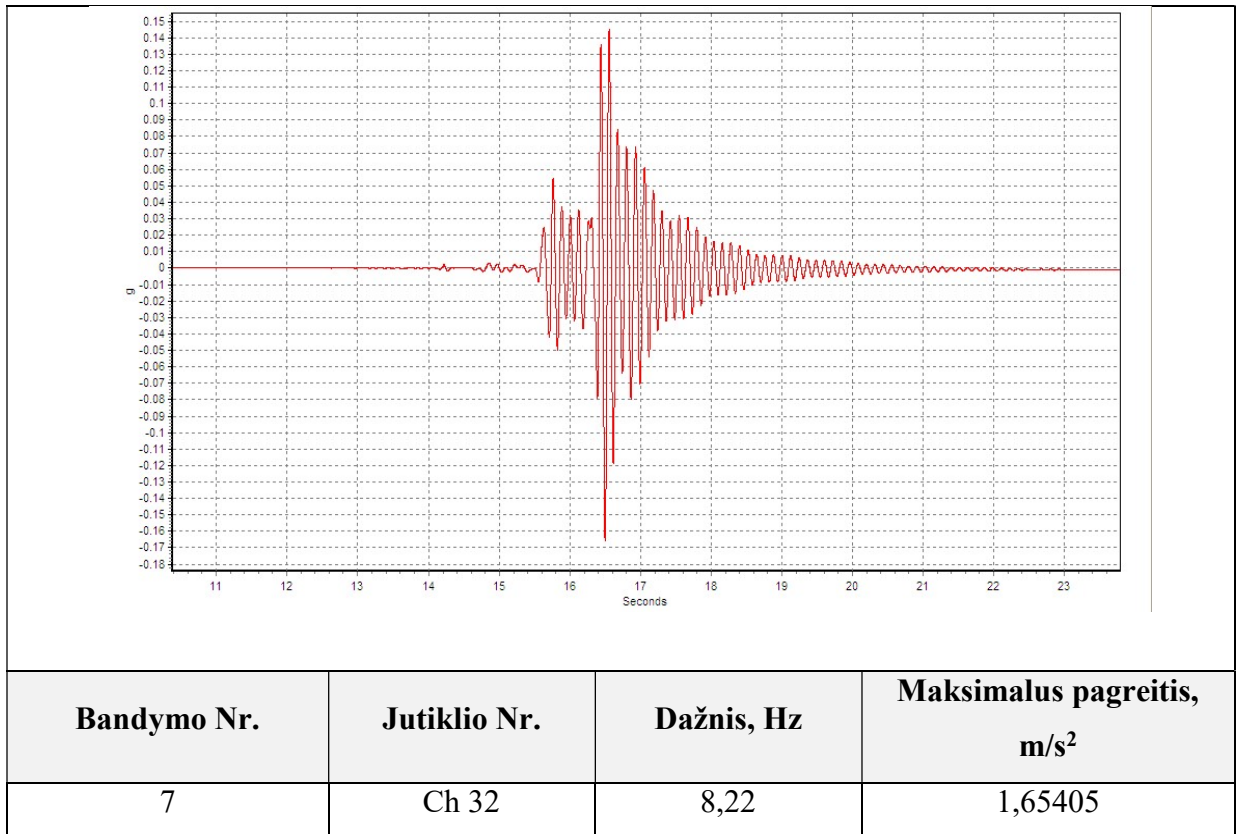
Bandymo Nr.	Jutiklio Nr.	Pagrindinio tono savųjų virpesių dažnis, HZ	Periodas T, s
6	Ch 32	8,14	0,123

6.2 pav. Pagreičių jutikliu pirmojo tarpatramio perdangos viduriniame pjūvyje, užregistruotas perdangos virpesių grafikas



Bandymo Nr.	Jutiklio Nr.	Dažnis, Hz	Maksimalus pagreitis, m/s ²
6	Ch 32	8,14	1,6781

6.3 pav. Pagreičių jutikliu, pirmojo tarpatramio perdangos viduriniame pjūvyje, užregistruotų pagreičių grafikas



6.4 pav. Pagreičių jutiklio, pirmojo tarpatramio perdangos viduriniame pjūvyje, užregistruotų pagreičių grafikas

6.5. Šešto skyriaus išvados

Atlikus dinaminį bandymą gauta:

- tilto pirmojo tarpatramio perdangos dinaminio bandymo metu nustatyta, kad neimituojant kelio dangos nelygumų didžiausias perdangos dinamiškumo koeficientas ($\mu_{din} = 1,05$) užfiksuotas, kai sunkiasvorė transporto priemonė judėjo 50 km/h greičiu;
- tilto pirmojo tarpatramio perdangos dinaminio bandymo metu nustatyta, kad imituojant kelio dangos nelygumus didžiausias perdangos dinamiškumo koeficientas ($\mu_{din} = 1,27$) užfiksuotas, kai sunkiasvorė transporto priemonė judėjo 10 km/h greičiu.
- projektinis tilto perdangos dinamiškumo koeficientas ($\mu_{din} = 1,15$). Tiltų perdanga nėra jautri dinaminių apkrovų poveikiui, nes faktiškai išmatuotas perdangos dinamiškumo koeficientas ($\mu_{din} = 1,05$) yra mažesnis už projektinį perdangos dinamiškumo koeficientą.

7. SAUGOS FAKTORIUS IR LEISTINA SLANKIOJI APKROVA

7.1. Tulto saugos faktoriaus apskaičiavimas

Tulto per Kauno HE saugos faktorius (RF) apskaičiuojamas:

- pagal perdangos stiprumą;

Tulto saugos faktorius (RF) pagal perdangos stiprumą apskaičiuojamas labiausiai apkrautai perdangos sijai, duomenys pateikti 7.1 lentelėje.

7.1 lentelė. Pagrindiniai duomenys tulto perdangos saugos faktoriaus (RF) apskaičiavimui pagal jos stiprumą

Skaičiuojamojo dydžio pavadinimas	Skaičiuojamojo dydžio reikšmė	Skaičiuojamojo dydžio reikšmė įvertinus armatūros koroziją (10%)
1) Tulto perdangos elementų būklės įvertis, balais	2	2
2) Tulto perdangos elementų nusidėvėjimo faktorius, α_R	0,25	0,25
3) Tulto perdangos stiprumą sumažinantis indeksas, Φ	0,78	0,78
4) Tulto perdangos dinamiškumo koeficientas, μ_{din}	1,27	1,27
5) Nuolatinių apkrovų patikimumo koeficientas, γ_G	1,20	1,20
6) Kintamų apkrovų poveikio koeficientas, γ_Q	1,60	1,60
7) Nuolatinių apkrovų efektas (G_N), kNm	1082	1082
8) Kintamų apkrovų efektas (G_Q), kNm	836	836
9) Tulto perdangos labiausiai apkrautos sijos normalinio pjūvio stiprumas (M_N), kNm	4129	3645
<u>Tulto saugos faktorius pagal perdangos stiprumą</u>	<u>1,13</u>	<u>0,91</u>

Pastaba: TTPT 10 taisyklėse [21] nurodoma, kad tilto būklė yra vertinama 5 balų sistemoje, pagal kurią:

- 1 – būklė labai bloga, reikia remontuoti ar keiti nedelsiant;
- 2 – būklė bloga, reikia suremontuoti per artimiausius trejus metus;
- 3 – būklė patenkinama, reikia suremontuoti per artimiausius penkerius metus;
- 4 – būklė pakankamai gera, esančius defektus gali ištaisyti priežiūros tarnyba;
- 5 – būklė gera.

Tilto per Kauno HE būklė pagal apžiūros duomenys yra bloga, todėl šis tiltas vertinamas 2.

Tilto elementų nusidėvėjimo faktorius tiesiogiai priklauso nuo tilto būklės įverčio, tačiau šis parametras negali būti išreikštas balais, todėl 7.2 lentelėje pateikiamos tilto elementų nusidėvėjimo faktoriaus reikšmės procentine išraiška.

Tilto saugos faktorius pagal perdangos stiprumą apskaičiuojamas:

$$RF = \frac{\Phi \cdot M_N - \gamma_G \cdot G_N}{\gamma_Q \cdot G_Q \cdot \mu_{din.}} = \frac{0,78 \cdot 4129 - 1,2 \cdot 1082}{1,60 \cdot 836 \cdot 1,27} = \frac{1923}{1699} = 1,13 \quad (7.1.1)$$

Įvertinus armatūros koroziją (10%) saugos faktorius gaunamas:

$$RF = \frac{\Phi \cdot M_N - \gamma_G \cdot G_N}{\gamma_Q \cdot G_Q \cdot \mu_{din.}} = \frac{0,78 \cdot 3645 - 1,2 \cdot 1082}{1,60 \cdot 836 \cdot 1,27} = \frac{1545}{1699} = 0,91 \quad (7.1.2)$$

7.2 lentelė. Tilto elementų nusidėvėjimo faktoriaus reikšmė

Tilto įvertis, balais	Tilto elementų nusidėvėjimo faktorius, α_R
5	0,05
4	0,10
3	0,20
2	0,25
1	0,35

čia:

Φ – tilto perdangos stiprumą sumažinantis indeksas. Šis dydis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\Phi = \frac{1}{e^{\alpha_R}} \quad (7.1.3)$$

čia:

α_R – tilto elementų nusidėvėjimo faktorius (žr. 7.2 lentelę);

M_N – tilto perdangos labiausiai apkrautos sijos normalinio pjūvio stiprumas,
 $M_N = 4129 kNm$ įvertinus armatūros koroziją (10%) $M_N = 3645 kNm$

γ_G – nuolatinių apkrovų patikimumo koeficientas. Tiltams suprojektuotiems pagal rusiškas projektavimo normas $\gamma_G = 1,20$;

G_N – nuolatinių apkrovų efektas apskaičiuotas įvertinant perdangos savąjį svorį ir pakloto apkrovas, $G_N = 1082 kNm$;

γ_Q – kintamų apkrovų poveikio koeficientas tiesiogiai priklausantis nuo sunkiasvorių transporto srautų per tiriamąjį tiltą. Per tiltą vidutiniškai per parą pravažiuoja 457 sunkiasvorės transporto priemonės, todėl $\gamma_Q = 1,60$ (žr. 7.3 lentelę);

7.3 lentelė. Kintamų apkrovų poveikio koeficientai priklausomai nuo sunkiasvorių transporto priemonių srautų per tiriamą tiltą

Sunkiasvorių transporto priemonių bendras srautas per parą	Kintamų apkrovų poveikio koeficientas
<250	1,50
>250<1000	1,60
>1000<5000	1,70
>5000	1,80

G_Q – kintamų apkrovų sukeltas efektas apskaičiuotas įvertinat, kad pačiu pavojingiausiu atveju ant tilto gali prasilenkti du keturašiai „MAN“ tipo sunkvežimiai sveriantys po 38 t, $G_Q = 836 kNm$;

μ_{din} – didžiausias perdangos dinamiškumo koeficientas užfiksuotas dinaminio bandymo metu sunkiasvorei transporto priemonei skirtingais greičiais važiuojant per tiltą. Tiltu per Kauno HE didžiausias perdangos dinamiškumo koeficientas ($\mu_{din} = 1,27$) užfiksuotas, kai sunkiasvorė transporto priemonė judėjo 10 km/h greičiu;

7.2. Tiltu leistinos slankiosios apkrovos apskaičiavimas

Tiltui leistina slankioji apkrova apskaičiuojama, kai tilto saugos faktorius (RF) yra mažesnis už 1,0. Taip pat, kai $RF < 1,0$ būtina apriboti sunkiasvorių autotransporto priemonių bendrąją masę. Jei tilto saugos faktorius $RF < 0,30$, tokio tilto eksploatuoti negalima.

Kai tilto saugos faktorius $RF > 1,0$, tiltą galima naudoti autotransporto eismui be apribojimų, tačiau laikantis LR galiojančių normatyvinių aktų [22] dėl didžiausių leidžiamų ašies apkrovų ir didžiausios bendrosios masės (44 t) visoms sunkiasvorėms transporto priemonėms.

Tilto per Kauno HE saugos faktorius:

- $RF = 0,91$, pagal perdangos stiprumą ;

Leistina slankioji apkrova tiltui per Kauno HE apskaičiuojama pagal labiausiai apkrautos sijos įlinkį, nes tilto saugos faktorius (RF) pagal įlinkį yra mažiau nei 1,0.

Leistina slankioji apkrova tiltui (pagal perdangos labiausiai apkrautos sijos įlinkį) apskaičiuojama:

$$L_A = \frac{W \cdot (RF - 0,30)}{0,70} = \frac{38 \cdot (0,91 - 0,30)}{0,70} = 33 t \quad (7.2.1)$$

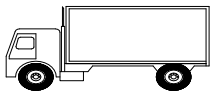
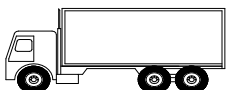
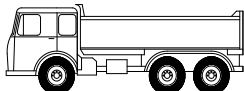
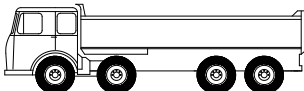
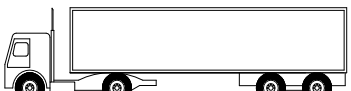

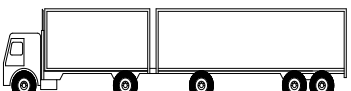
čia:

W – sunkiasvorės transporto priemonės, kuri sukelia didžiausią kintamų apkrovų efektą tiltui, bendras svoris.

Tiriamam tiltui priimame ($W = 38 t$). Laikantis LR galiojančių normatyvinių aktų [22] dėl didžiausių leidžiamų ašies apkrovų ir didžiausios bendrosios masės (44 t) visoms sunkiasvorėms transporto priemonėms.

Pagal šiuo metu Lietuvos respublikoje galiojančius normatyvinius aktus, dėl didžiausių leidžiamų ašies apkrovų ir didžiausios leidžiamos bendrosios sunkiasvorės transporto priemonės masės, tiltais gali judėti sunkiasvorės transporto priemonės kurių bendroji masė neviršija 44 t. 7.4 lentelėje pateikiame dažniausiai pasitaikančias sunkiasvores transporto priemones [22], jų parametrus, ir išvadas dėl galimybės dviem sunkiasvoriam automobiliam prasilenkti ant tilto.

7.4 lentelė. Dažniausiai pasitaikančios sunkiasvorės transporto priemonės [22] kurios gali ir negali prasilenkti ant tilto per Kauno HE

Eil. Nr.	Sunkiasvorio automobilio tipas	Atstumai tarp ašių (pateikti nuo pirmos ašies), m	Ašių svoriai, t	Bendra sunkiasvorio transporto masė, t	Galimybė prasilenkti ant tilto dviem tokio tipo transporto priemonėms
1.		4,50	10,0 11,5	21,50	2 automobiliai prasilenkti gali
2.		4,20 1,30	10,0 8,00 8,00	26,00	2 automobiliai prasilenkti gali
3.		3,50 1,40	9,50 9,50 9,50	28,50	2 automobiliai prasilenkti gali
4.		1,40 3,50 1,40	9,50 9,50 9,50 9,50	38,00	2 automobiliai prasilenkti negali
5.		3,40 6,00 1,80	10,0 11,50 9,00 9,00	37,50	2 automobiliai prasilenkti negali
6.		3,20 5,20 1,30 1,30	8,5 11,5 8,0 8,0 8,0	44,00	2 automobiliai prasilenkti negali
7.		4,80 3,60 4,40 1,30	10,0 9,0 9,0 8,0 8,0	44,00	2 automobiliai prasilenkti negali

7.3. Septinto skyriaus išvados

Paskaičiavus tilto saugos faktorių ir slankiąją apkrovą gauta:

- tilto saugos faktorius pagal perdangos stiprumą yra 1,13, o įvertinus armatūros koroziją 0,91 tai yra <1,0 todėl tilto leistina slankioji apkrova gaunama 33t

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Literatūros analizės metu nustatyta, kad gelžbetoninių tiltų ilgaamžiškumą įtakoja eksploatacijos metu atsiradę defektai. Norint įvertinti jų įtaką tilto saugai būtina apskaičiuoti tiltų saugos faktorių.
2. Iki šiol Lietuvoje nebuvo sudaryta jokių tiltų saugos vertinimo metodika, kuri kompleksiskai apimtų pagrindinius tiltų charakterizuojančius parametrus.
3. Tiriamajame darbe pasiūlytas Lietuvos tiltams pritaikytas saugos faktoriaus apskaičiavimo metodas pagal Slovėnijos mokslininkų pasiūlytą formulę, kurioje parenkami ir įvertinami tam tikri parametrai būdingi tik Lietuvos tiltų būklės vertinimo sistemai.
4. Tiriamuoju objektu buvo pasirinktas automobilinis tiltas per Kauno HE, kuriam atlikus perdangos tyrimus (betono laboratoriniai tyrimai, statinis ir dinaminis bandymai) nustatyta, kad tempiamos armatūros korozija turi įtaką tilto perdangos deformatyvumui. Atlikus standumo analizę nustatyta, kad įvertinus armatūros koroziją ir sumažinus tempiamos armatūros skerspjūvio plotą ~10% faktinis ir teorinis įlinkiai sutapo.
5. Tyriamajam objektui apskaičiavus saugos faktorių įvertinant perdangos standumo pokyčius dėl joje esančių defektų (armatūros korozija) nustatyta, kad:
 - nevertinant korozijos saugos faktorius $RF=1,13$ ir sunkiasvorių transporto priemonių bendrosios masės riboti nereikia;
 - įvertinus koroziją saugos faktorius sumažėja ~19,5% (iki $RF=0,91$) ir reikia riboti sunkiasvorių transporto priemonių bendrąją masę iki 33 t (pačiu pavojingiausiu atveju, kada tilto tarpatramio viduryje susitinka 2 keturašiai sunkvežimiai sveriantys po 38 t).

LITERATŪRA

1. Automobilių kelių tiltų bandymas. ST 188710638.10:2005, Vilnius, 2005 m.
2. LST L ENV 1991-3:2000. Eurokodas 1. Projektavimo pagrindai ir poveikiai konstrukcijoms. 3 dalis. Tiltų eismo apkrovos.
3. LST EN 1991-2:2004. Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms. 2 dalis. Tiltų eismo apkrovos.
4. LST EN 1991-1-2:2003. Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms. 2 dalis. Tiltų eismo apkrovos.
5. STR 2.05.05:2005 Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas.
6. Нормы подвижных вертикальных нагрузок для расчета искусственных сооружений на автомобильных дорогах (Н 106-53). Утверждены Госстроем СССР и введены с 1.04.53 г., даны в виде приложения к нормам проектирования автомобильных дорог (НиТУ 128-55).
7. Dažniausiai pasitaikančių defektų Lietuvos tiltuose albumas. TKTI, Kaunas, 1998 m.
8. Statybos techninių reikalavimų reglamentas STR 2.06.02:2001 „Tiltai ir tuneliai. Bendrieji reikalavimai“. LR Aplinkos ministerija. Vilnius, 2001 m.
9. Z. Kamaitis. Gelžbetoninių tiltų remontas. Vilnius, Technika, 2000, 168 psl.
10. J. Kivilša, Z. Kamaitis, A. Steponavičius. Miesto transporto statiniai. Vilnius: Mokslas, 1981, 331 psl.
11. LST EN 1990/A1:2006 lt. Lietuvos standartas Konstrukcijų projektavimo pagrindai. A2 priedas. Taikomas tiltams. 2006.
12. STR 2.06.02:2001. Tiltai ir tuneliai. Bendrieji reikalavimai. Vilnius, 2001
13. СНИП 2.05.03-84. Мосты и трубы. Госстрой СССР, Москва, 1988 (rusų kalba).
14. A. J. Notkus. Tiltų projektavimo pagrindai. Vilnius: Technika, 2010, 23, 151-227 p.
15. Ostaševičius, V. Mechaninių konstrukcijų dinamika ir modeliavimas., Kaunas, Technologija, 1998 m.
16. Baublys, P. Statybinė mechanika. Deformuojamų sistemų dinamika. Vilnius. 2001 m.
17. Broomfield, John P. Corrosion of Steel in Concrete. London: E&FN Spon, 2007. (anglų kalba).
18. Bertolini, L., B. Elsener, P. Pedferri, and R. Polder. Corrosion of Steel in Concrete – Prevention, Diagnosis, Repair. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004 (anglų kalba).

19. Tiltų laikomosios ir keliamosios galios (tilto saugos faktoriaus) bei leistinos slankiosios apkrovos apskaičiavimo metodikos projektas. KTTI, 2015 m.
20. VšĮ Kelių ir transporto tyrimo instituto tilto per Kauno HE tyrimo medžiaga, 2015.
21. Tiltų techninės priežiūros taisyklės TTPT 10. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. Vilnius, 2010 m.
22. Lietuvos Respublikos susisiekimo ministro įsakymas dėl maksimalių leidžiamų transporto priemonių matmenų, leidžiamų ašies (ašių) apkrovų, leidžiamos bendrosios masės patvirtinimo, 2002 m. vasario 18 d. Nr. 3-66, Vilnius.
23. Технические условия проектирования железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб. СН 200-62. Москва, 1962 г. (rusų kalba).
24. Leonardo Fernandez Troyano “Bridge engineering”, Thomas Telford 2003 (anglų kalba).
25. Konstrukcijų projektavimo ir modeliavimo programa „LIRA 9.6“.
26. R. W. Revie, M. Attard, A. Demoz, CORROSION/2000, Nace International, Houston, TX 2000 (anglų kalba).
27. Žnidarič, A. Lavrič, I. And Kalin, J., 2002. The Next Generation of bridge Weigh-In-Motion Systems. Orlando, Proceedings of the Fifth Weigh-In-Motion conference (anglų kalba).
28. Žnidarič, A. and Lavrič, I., 2010. Application of B-WIM technology to bridge assessment. Philadelphia, USA, Proceedings of IABMAS 2012 conference (anglų kalba).
29. Žnidarič, A. , Kreslin, M., Lavrič, I. Kalin, J., 2012. Simplified approach to modelling traffic loads on bridges. Athens, Greece, Elsevier publishing(anglų kalba).