



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Įtemptojo gelžbetonio, dėžinio skerspjūvio tiltų stiprinimo būdai

Magistro baigiamasis projektas

Liudas Vaščėga
Projekto autorius

Lekt. Saulius Zadlauskas
Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Įtemptojo gelžbetonio, dėžinio skerspjūvio tiltų stiprinimo būdai

Magistro baigiamasis projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Liudas Vaščėga
Projekto autorius

Lekt. Saulius Zadlauskas
Vadovas

Doc. Mindaugas Augonis
Recenzentas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Liudas Vaščėga

Įtemptojo gelžbetonio, dėžinio skerspjuvio tiltų stiprinimo būdai

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Liudo Vaščėgos, baigiamasis projektas tema „Įtemptojo gelžbetonio, dėžinio skerspjuvio tiltų stiprinimo būdai“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir 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)

Vaščėga, Liudas. Įtemptojo gelžbetonio, dėžinio skerspjūvio tiltų stiprinimo būdai. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. Saulius Zadlauskas; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Inžinerijos mokslai, Statybos inžinerija.

Reikšminiai žodžiai: stiprinimas, dėžinio skerspjūvio sija, įtemptasis gelžbetonis, rėminio tipo viadukas.

Kaunas, 2019. 58 p.

Santrauka

Tiek Lietuvoje, tiek kitose Europos valstybėse opi problema yra įtemptojo gelžbetonio, dėžinio skerspjūvio tiltų, statytų pusiausvyruoju būdu 1965-1985 metais, eksploatacija. Dėl eksploatacijos metu atsirandančių defektų ir pažeidų, nuolat didėja šio tipo viadukų perdangos įlinkis. Norint stabilizuoti įlinkį, vykdomas šių viadukų perdangos stiprinimas. Taip pailginant statinio eksploatacijos laikotarpį.

Magistro baigiamajame projekte apžvelgti Lietuvoje ir užsienyje taikyti įtemptojo gelžbetonio, dėžinio skerspjūvio tiltų stiprinimo būdai. Tyrimo metu sudarytas tiriamojo objekto (viaduko) skaitinis modelis, atitinkantis realius tilto stebėjimo duomenis. Tiriamuoju objektu pasirinktas įtemptojo gelžbetonio, dėžinio skerspjūvio, automobilinis viadukas per A1 magistralę (ties Babtais). Skaitiniame modelyje sumodeliuoti trys Lietuvoje naudoti šio tipo tiltų ir viadukų stiprinimo būdai ir atlikta jų skaitinė analizė. Skaičiavimuose įvertintos statybos stadijos, betono ilgalaikė elgsena (valkšnumas ir susitraukimas), įtemptosios armatūros nuostoliai.

Išanalizuoti ir palyginti darbo metu gauti naudojamų įtemptojo gelžbetonio, dėžinio skerspjūvio tiltų (viadukų) stiprinimo būdų privalumai ir trūkumai. Pateiktos išvados ir rekomendacijos tiltų (viadukų) stiprinimo būdų taikymui praktikoje bei tolimesnei jų analizei.

Vaščėga, Liudas. Strengthening methods of prestressed concrete box girder bridges. Master's Final Degree Project / supervisor lect. Saulius Zadlauskas; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering sciences, Civil engineering.

Keywords: strengthening, box girder, prestressed concrete, framed sceme viaduct.

Kaunas, 2019. 58 pages.

Summary

In Lithuania and other European countries exploitation of prestressed concrete box girder bridges, built by cantilever method in 1965-1985, is a big problem. Due to defects risen from bridge exploitation bridge deck's deflection is constantly increasing. Strengthening of prestressed concrete box girder bridges is used to stop deflection increase. Bridge exploitation time is extended by stopping deflection increase.

The Master's Thesis gives an overview of strengthening methods of prestressed concrete box girder bridges used in Lithuania and other countries. During the research calculation model of the object of analysis was made according to real viaduct monitoring results. Prestressed concrete box girder bridge over A1 highway (by Babtai town) has been selected as the object of analysis. 3 different strengthening methods used in Lithuania are designed and analyzed in the calculation model. Construction stages, concrete long term effects (creep and shrinkage), the loss of prestressing steel are included in the calculation.

Obtained results of different strengthening methods of prestressed concrete box girder bridges are analyzed and compared. Advantages and disadvantages of all strengthening methods used in Lithuania are shown. Conclusions and recommendations for bridges strengthening methods usage in practise and recommendations for further analysis are given at the end of the Thesis.

Turinys

Įvadas.....	12
1. Praktinė patirtis užsienio ir Lietuvos literatūroje.....	16
1.1. Ilgalaikės betono elgsenos vertinimas.....	16
1.2. Užsienyje taikomi viadukų stiprinimo būdai	18
1.2.1. Tilto stiprinimas iš anksto įtemptos armatūros lynais, įtemptais dėžinio skerspjūvio sijos vidinėje dalyje	18
1.2.2. Stiprinimas plieninėmis plokštėmis ir fibromis armuotu polimeru	20
1.3. Lietuvoje taikomi viadukų stiprinimo būdai	23
1.4. Literatūros apžvalgos išvados	27
2. Tiriamo viaduko skaitinis modelis	28
2.1. Tyrimo objektas	28
2.1.1. Bendri duomenys	28
2.1.2. Viaduko konstrukcija.....	29
2.2. Duomenys skaičiavimams.....	30
2.2.1. Charakteristinės nuolatinių apkrovų reikšmės	30
2.2.2. Charakteristinės kintamų apkrovų reikšmės	30
2.2.3. Betono susitraukimas ir valkšnumas	31
2.2.4. Konstrukcijoms naudojamas betonas	31
2.2.5. Naudojamos įtemptosios armatūros gniūžtės	32
2.3. Visuminis viaduko modelis.....	32
2.3.1. Statybos etapai	33
2.3.2. Redukuotas perdangos sijos skerspjūvis.....	35
2.4. Rezultatai.....	36
2.4.1. Viaduko įlinkis nuo statybų pradžios iki 19 eksploatavimo metų	36
2.4.2. Viaduko įlinkio kitimas pagal tiriamo viaduko stebėjimo duomenis	39
2.4.3. Viaduko įlinkių ir įtempių rezultatai iki sustiprinimo (36 metų eksploatacijos laikotarpiu). 42	
3. Modeliuojami viaduko stiprinimo būdai.....	44
3.1. Stiprinimas, įrengiant papildomą tarpinę atramą	44
3.1.1. Teorinis aprašymas	44
3.1.2. Gauti rezultatai.....	46
3.2. Stiprinimas, išdėstant papildomą įtemptąją armatūrą skerspjūvio viršuje ir apačioje	48
3.2.1. Teorinis aprašymas	48
3.2.2. Gauti rezultatai.....	48

3.3. Stiprinimas, išdėstant papildomą įtemptąją armatūrą pagal lenkimo momentų gaubtinę.....	50
3.3.1. Teorinis aprašymas	50
3.3.2. Gauti rezultatai.....	51
3.4. Viaduko stiprinimo būdų palyginimas	54
Išvados	56
Literatūros sąrašas	57
Priedai.....	59

Paveikslų sąrašas

1 pav. Rėminio tipo, dėžinio skerspjuvio, įtempto gelžbetonio perdangos viaduko schema [1]	12
2 pav. Pagrindiniai defektai ir pažeidimai [2]: a – Nesandari blokų sandūra; b – Viduriniame tarpatramyje koroduoja vielapluoščiai, kurių dalis nutrūkė; c – Įstrižas plyšys bloko sienutėje, vidinėje pusėje; d – Įstrižas plyšys bloko sienutėje, išorinėje pusėje.....	13
3 pav. Viadukų įlinkių kitimo kreivės per 13 metų stebėjimo laikotarpį [2]	14
4 pav. Tilto Palau įlinkio kitimo grafikas (0–19m.), apskaičiuotas skirtingais skaičiavimo modeliais (rombai žymi realius tilto stebėjimo duomenis) [18]	16
5 pav. Tilto Palau įlinkio kitimo grafikas (0–150m.), apskaičiuotas skirtingais skaičiavimo modeliais (rombai ir apskritimai žymi realius tilto stebėjimo duomenis) [18].....	17
6 pav. Japonijoje statytų tiltų įlinkio kitimo grafikai, apskaičiuoti pagal skirtingus skaičiavimo modelius (apskritimai žymi realius tilto stebėjimo duomenis) [18].....	18
7 pav. Grand-Mere tilto konstrukcijos schema [4].....	19
8 pav. Stiprinimo gniūžčių išdėstymo schema [4].....	19
9 pav. Vidurinio tarpatramio įlinkio dydis [mm] [4].....	20
10 pav. Tilto ir perdangos skerspjuvio schema [8].....	21
11 pav. Perdangos stiprinimas išorine, iš anksto įtempta armatūra [8]	21
12 pav. Perdangos stiprinimas FRP ir plieninėmis plokštelėmis [8].....	22
13 pav. Nuo eksploatacijos laikotarpio priklausantis perdangos plokštės įlinkis [8].....	23
14 pav. Nuo tilto apkrovos priklausantis perdangos plokštės įlinkis [8].....	23
15 pav. Viadukas, sustiprintas įrengus tarpines atramas (A2 ir E272 kelių sankirta) [15]	24
16 pav. Viadukas, kurio tik viena sija sustiprinta (pažymėta rodyklėmis) [16]	25
17 pav. Įtemptosios armatūros išdėstymas	25
18 pav. Įtemptosios armatūros išdėstymas (Babtų viadukas).....	26
19 pav. Įtemptosios armatūros išdėstymas (Nemenčinės viadukas).....	26
20 pav. Viaduko bendras vaizdas	28
21 pav. Viaduko fasado schema	28
22 pav. Viaduko skersinis pjūvis.....	28
23 pav. Nepaslankus šarnyras.....	29
24 pav. Skersinės sijos, jungiančios dėžines sijas tarpusavyje.....	30
25 pav. Skaičiavimuose naudojamo sunkiasvorio automobilio schema.....	31
26 pav. Įtemptosios armatūros gniūžčių išdėstymo schema.....	32
27 pav. Skerspjuvio viršuje esančių gniūžčių išdėstymo schema (ties atramomis Nr. 2 ir Nr.3)	32
28 pav. Skerspjuvio apačioje esančių gniūžčių išdėstymo schema (ties 48,0 m tarpatramio viduriu)	32

29 pav. Visuminio modelio schema baigtinių elementų programoje „SOFISTIK“	33
30 pav. Nagrinėjamo viaduko skaičiuojamoji schema	33
31 pav. Surenkamų, dėžinio skerspjuvio sijų išdėstymo schema (1/2 dalis).....	35
32 pav. Surenkamų, dėžinio skerspjuvio sijų išdėstymo schema (2/2 dalis).....	35
33 pav. Redukuotas monolitinės g/b diafragmos skerspjuvis angos viduryje.....	35
34 pav. Monolitinės atramos konstrukcijos B-0 skerspjuvis.....	36
35 pav. Redukuotas sijų B-1, B-2, B-3, B-4, B-5, B-6 skerspjuvis.....	36
36 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio įlinkis prieš II lynų gniūžčių įtempimo stadiją (mm).....	37
37 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio išlinkis po II lynų gniūžčių įtempimo stadijos (mm).....	37
38 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio išlinkis, praėjus 28 d. po II lynų gniūžčių įtempimo stadijos (mm)	37
39 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio išlinkis, įrengus monolitinę g/b plokštę (mm)	37
40 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio išlinkis, įrengus paklotą (mm).....	38
41 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio įlinkis po 19 metų eksploataavimo (mm)	38
42 pav. Viaduko įlinkių rezultatai per pirmus 19 eksploatacijos metų	39
43 pav. Viaduko įlinkio 19-36 eksploataavimo metais grafikas (faktinės stebėjimų reikšmės)	39
44 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio įlinkis po 36 metų eksploataavimo, neįvertinus armatūros nuostolių dėl korozijos (mm).....	40
45 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio įlinkis po 36 metų eksploataavimo, įvertinus armatūros nuostolius dėl korozijos (mm)	40
46 pav. Pagrindiniai pjūviai, kuriuose rodomi betono įtempiai	42
47 pav. Betono įtempiai sijoje išilgai viaduko, nevertinant laikinos apkrovos (viršuje – įtempiai skerspjuvio viršuje, apačioje – įtempiai skerspjuvio apačioje) (MPa)	43
48 pav. Viadukas, sustiprintas įrengus tarpines atramas (A2 ir E272 kelių sankirta) [14]	44
49 pav. Perdangos atrėmimas į tarpines atramas [15]	44
50 pav. Konstrukcijos skaičiuojamoji schema po sustiprinimo	45
51 pav. Perdangos plokštės lenkimo momentų diagramos schema prieš sustiprinimą	45
52 pav. Perdangos plokštės lenkimo momentų diagramos schema po sustiprinimo.....	45
53 pav. Viaduko įlinkis 19-100 eksploataavimo metais, nevertinant laikinos apkrovos	46
54 pav. Lenkimo momentų gaubtinių diagrama nuo kintamos apkrovos prieš sustiprinimą (skerspjuvio viršutinėje dalyje – raudona spalva, apatinėje dalyje – mėlyna spalva)	47
55 pav. Lenkimo momentų gaubtinių diagrama nuo kintamos apkrovos po sustiprinimo (skerspjuvio viršutinėje dalyje – raudona spalva, apatinėje dalyje – mėlyna spalva).....	47
56 pav. Įtemptosios armatūros gniūžčių išdėstymo schema.....	48
57 pav. Lenkimo momentai, atsirandantys nuo papildomos įtemptosios armatūros.....	48

58 pav. Viaduko įlinkis 19-100 eksploatavimo metais, nevertinant laikinos apkrovos	49
59 pav. Lenkimo momentai, atsirandantys nuo papildomos įtemptosios armatūros.....	50
60 pav. Įtemptosios armatūros gniūžčių išdėstymo pagal lenkimo momentų diagramą schema	50
61 pav. Lenkimo momentai, atsirandantys nuo papildomos įtemptosios armatūros.....	50
62 pav. Viaduko įlinkis 19-100 eksploatavimo metais, nevertinant laikinos apkrovos	52
63 pav. Viaduko įlinkis 19-100 eksploatavimo metais, nevertinant laikinos apkrovos	53
64 pav. III a variantas. Lenkimo momentai, atsirandantys nuo papildomos įtemptosios armatūros.	53
65 pav. III b variantas. Lenkimo momentai, atsirandantys nuo papildomos įtemptosios armatūros	53
66 pav. Viaduko įlinkis 19-100 eksploatavimo metais, nevertinant laikinos apkrovos	55

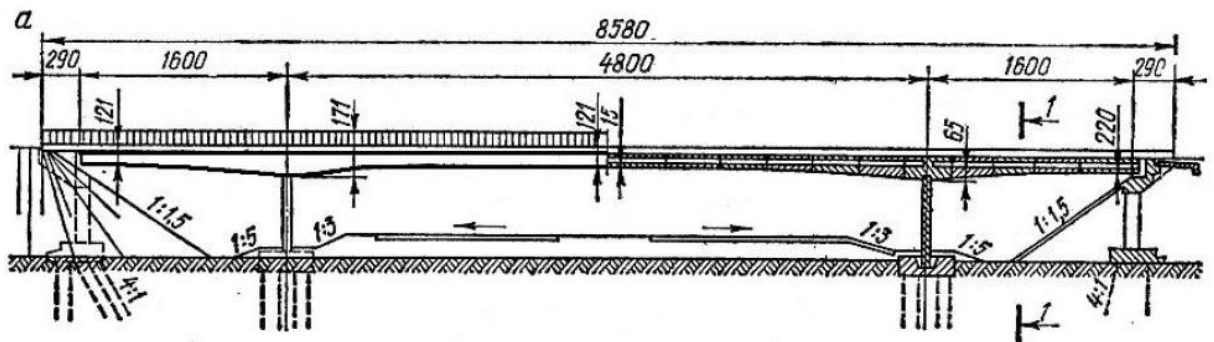
Lentelių sąrašas

1 lentelė. Charakteristinės nuolatinių apkrovų reikšmės	30
2 lentelė. Naudojamos betono klasės.....	31
3 lentelė. 1970-1980 metais naudotų ir šiuo metu naudojamų betono klasių atitikmenys	31
4 lentelė. Viaduko statybos stadijos įvertinamos skaitiniame modelyje	34
5 lentelė. Viaduko įtemptosios armatūros gniūžčių duomenys	41
6 lentelė. Viaduko įlinkių rezultatai iki sustiprinimo (36 metų eksploatacijos laikotarpiu).....	42
7 lentelė. Betono įtempiai sijų pagrindiniuose pjūviuose, nevertinant laikinos apkrovos	42
8 lentelė. I variantas. Viaduko įlinkis ir betono įtempiai pagrindiniuose pjūviuose	46
9 lentelė. II variantas. Viaduko įlinkis ir betono įtempiai pagrindiniuose pjūviuose	49
10 lentelė. III variantas. a – 6 gniūžtės. Viaduko įlinkis ir betono įtempiai pagrindiniuose pjūviuose	51
11 lentelė. III variantas. b – 8 gniūžtės. Viaduko įlinkis ir betono įtempiai pagrindiniuose pjūviuose	52
12 lentelė. Rezultatų palyginimas. Viaduko įlinkis ir betono įtempiai pagrindiniuose pjūviuose	54

Įvadas

Šiuo metu Lietuvoje yra daugiau kaip 4000 tiltų ir viadukų (vien Vilniaus mieste yra net 133). Didžioji dalis jų turi gelžbetonines perdangas (apie 90 %), likusioji dalis – plienines ar plienbetonines perdangas ir vos keli – medines ar mūrines [1]. Tiltai dažniausiai projektuojami šimto metų eksploatacijos laikotarpiui, todėl ypač svarbus faktorius – statinių ilgaamžiškumas.

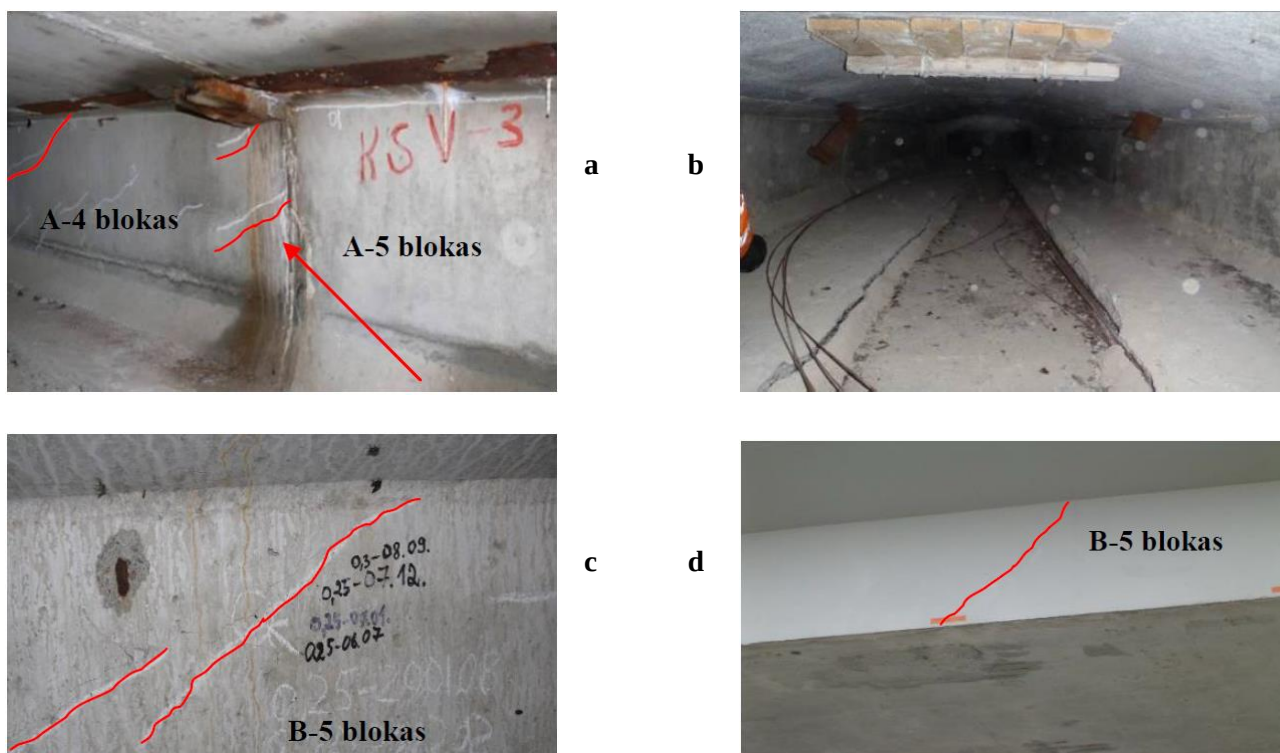
Atsirandantys defektai ir pažaidos – pirmasis požymis parodantis, kad statinio eksploatacijos trukmė mažėja. Dažnai defektų atsiranda gelžbetoniniuose tiltuose, ypač 1968 – 1983 m. pagrindinėse Lietuvos magistralėse statytuose įtemptojo gelžbetonio rėminiuose dėžinio skerspjūvio viadukuose (žr. 1 pav.). Šie viadukai armuoti įtemptais vielapluoščiais, sudarytais iš didelio atsparumo vielų. Jų pastatyta septyniolika. Viadukai statyti pusiausvyros metodo principu, surenkamus blokus sujungiant epoksidiniais klijais. Šiuos viadukus pradėjus tirti 1995 metais nustatyta, jog kai kurie viadukai dėl esamų defektų yra priešavarinės būklės. [2]



1 pav. Rėminio tipo, dėžinio skerspjūvio, įtempto gelžbetonio perdangos viaduko schema [1]

Pagrindiniai viadukų defektai yra šie (žr. 2 pav.): kiauři deformaciniai pjūviai; nelygi, nusidėvėjusi važiuojamoji kelio danga; kiauři šalitilčių deformaciniai pjūviai; neįrengta arba netinkamai įrengta vandens surinkimo ir nutekėjimo nuo viaduko sistema; netinkamai įrengta (nesandari) hidroizoliacija ant perdangos sijų viršaus; montavimo metu nesandariai įrengtos blokų sandūros; pažeisti korozijos ir keliuose viadukuose nutrūkę sijų apatiniai vielapluoščiai; iš lauko ir iš vidaus pusės įstrižais plyšiais supleišėjusios sijų blokų sienutės, normaliniais plyšiais supleišėjusios sijų sienutės iš lauko pusės [2].

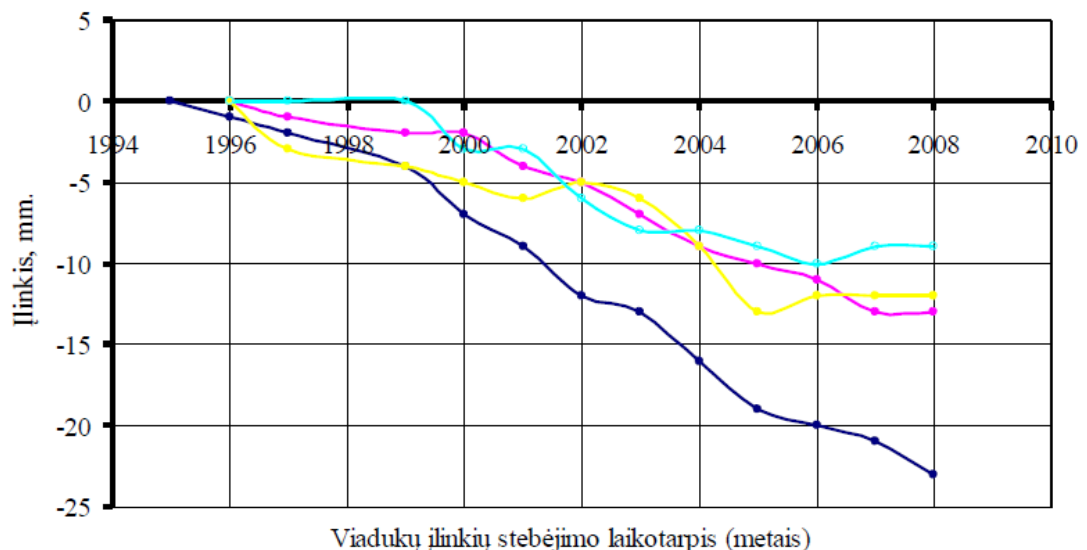
Atlikus detales vieno iš dėžinio skerspjūvio rėminio tipo viadukų (Pareizgupio viaduko) bandymus gautos dėžinio skerspjūvio sijose susidariusių plyšių pločio reikšmės svyruoja nuo 0,25 mm iki 0,5 mm [2]. Pagal šiuo metu taikomas projektavimo normas [3] plyšiai tokio tipo įtemptojo gelžbetonio sijose negali atsiverti. Atsivėrus tokio pločio plyšiams trumpėja numatomas statinio eksploataavimo laikas.



2 pav. Pagrindiniai defektai ir pažeidimai [2]: a – Nesandari blokų sandūra; b – Viduriniame tarpatramyje koroduoja vielapluoščiai, kurių dalis nutrūkę; c – Įstrižas plyšys bloko sienutėje, vidinėje pusėje; d – Įstrižas plyšys bloko sienutėje, išorinėje pusėje

Dėl įvairių pažeidimų, defektų ir atsiveriančių plyšių didėja tilto perdangos įlinkis. Iš tilto perdangos įlinkio galima spręsti apie jo eksploatavimo trukmę. Jei įtempto gelžbetonio rėminių, dėžinio skerspjūvio viadukų įlinkis nesistabilizuoja, o didėja, tuomet tilto eksploatacijos laikas trumpėja. Tiltas ilgainiui gali tapti avarinės būklės.

Lietuvoje įtemptojo gelžbetonio rėminių, dėžinio skerspjūvio viadukų plyšių pločių ir įlinkių stebėjimą kasmet atlieka VŠĮ „Kelių ir transporto tyrimo instituto“ tiltų tyrimų skyriaus darbuotojai. Diagramoje (žr. 1.6 pav.) pateiktos keturių viadukų įlinkių kitimo kreivės per 13 metų stebėjimo laikotarpį ir kiekvienu viaduku važiuojančių sunkiasvorių transporto priemonių srautai per parą. [2]



- Pareizgupio viadukas (statybos metai - 1981, transporto srauto intensyvumas - 713 aut/parą)
- Rumšiškų viadukas (statybos metai - 1970, transporto srauto intensyvumas - 290 aut/parą)
- Dauparų viadukas (statybos metai - 1976, transporto srauto intensyvumas - 285 auto/parą)
- Gargždų viadukas (statybos metai - 1973, transporto srauto intensyvumas - 332 aut/parą)

3 pav. Viadukų įlinkių kitimo kreivės per 13 metų stebėjimo laikotarpį [2]

Nors stebėjimo pradžioje viadukai jau buvo 13–25 metų amžiaus (jų įlinkis turėtų būti stabilizavęsis), iš diagramoje pateiktų duomenų pastebimas nuolatinis jų įlinkio didėjimas. Ypač Pareizgupio viaduko, kuris apkraunamas didžiausiu transporto srauto intensyvumu. Toks nuolatinis rėminių, dėžinio skerspjuvio viadukų įlinkio didėjimas lemia greitą šių statinių eksploatacijos trukmės mažėjimą.

Remiantis Kristeko ir Bažanto analize [12], ilgalaikis įtemptojo gelžbetonio, dėžinio skerspjuvio tiltų perdangos įlinkis, atliekant skaičiavimus pagal klasikinę sijų lenkimo teoriją, yra neįvertinamas apie 20 %. Be to, netikslus betono valkšnumo ir susitraukimo įvertinimas dar labiau apsunkina ilgalaikės tilto elgsenos nustatymą [13]. Kiti svarbūs faktoriai yra sudėtinga tokių tiltų statyba, kuri gali paveikti tolesnę tiltų elgseną. Taip pat chloridais prisotinta aplinka, dėl kurios prasideda įtemptosios ir neįtemptosios armatūros korozija.

Temos aktualumas ir mokslinė problematika

Pastebimi ryškūs rėminių, dėžinio skerspjuvio viadukų defektai ir pažaidos, lemiantys didėjančią perdangos įlinkį ir eksploatacijos trukmės mažėjimą. Šiuo metu už tiltų eksploatavimą atsakingų institucijų (VŠĮ „Kelių ir transporto tyrimo instituto“ bei miestų ir rajonų savivaldybių) dėmesys skiriamas šio tipo viadukų rekonstrukcijai ir remontui. Vykdomas šių viadukų perdangos stiprinimas, norint stabilizuoti perdangos įlinkį, taip pailginant statinio eksploatacijos laikotarpį.

Tiek Lietuvoje, tiek užsienyje yra taikytas ne vienas stiprinimo būdas (papildoma išorine įtemptąja armatūra, metalinėmis plokštėmis, fibromis armuotu polimeru ir kt.). Lietuvoje taikyti stiprinimo būdai praktikoje nėra efektyvūs, nes nestabilizuoja įlinkio. Projektuotojai naudoja skirtingus stiprinimo būdus, tačiau jie nėra pakankamai išanalizuoti. Nėra aišku, kokį stiprinimo būdą reikia taikyti, kad būtų pasiektas pats didžiausias efektas konstrukcijoje.

Magistro projekto tikslas ir uždaviniai

Tyrimo objektu pasirinktas įtempto gelžbetonio, dėžinio skerspjūvio tiltas (viadukas), esantis Lietuvoje. Magistro baigiamo projektu metu bus modeliuojami trys šio tilto stiprinimo variantai, bandyti Lietuvoje. Darbo tikslas – rasti efektyviausią iš Lietuvoje naudotų įtempto gelžbetonio, dėžinio skerspjūvio tiltų (viadukų) stiprinimo būdų.

Magistro baigiamojo projekto uždaviniai:

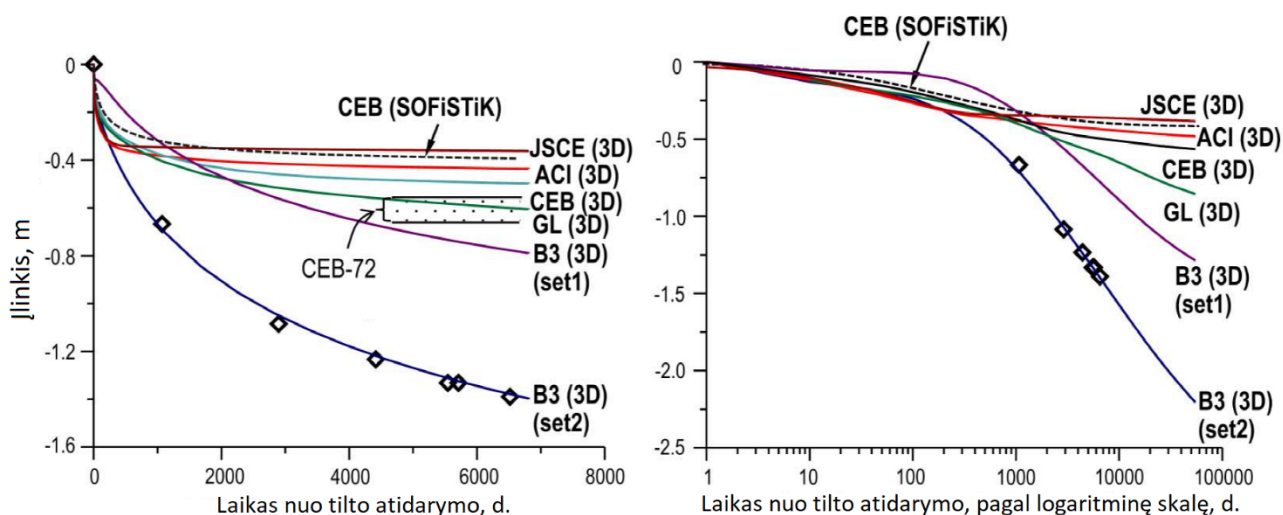
- 1) išanalizuoti užsienyje ir Lietuvoje naudojamus tiltų (viadukų) stiprinimo būdus;
- 2) sudaryti tiriamo tilto (viaduko) skaitinį modelį, atitinkantį realius tilto stebėjimo duomenis;
- 3) sumodeliuoti tris Lietuvoje naudojamus įtemptojo gelžbetonio, dėžinio skerspjūvio tiltų ir viadukų stiprinimo būdus ir atlikti jų skaitinę analizę;
- 4) išanalizuoti Lietuvoje naudojamų įtemptojo gelžbetonio, dėžinio skerspjūvio tiltų (viadukų) stiprinimo metodų privalumus ir trūkumus, pateikti išvadas ir rekomendacijas tiltų (viadukų) stiprinimo būdų taikymui praktikoje bei tolimesnei jų analizei.

1. Praktinė patirtis užsienio ir Lietuvos literatūroje

1.1. Ilgalaikės betono elgsenos vertinimas

Z.P. Bažantas ir kiti mokslininkai [18] tyrė Koror-Babeldaob tilto, buvusio Palau šalyje, griūties priežastis. Tiltas buvo dėžinio skerspjūvio, įtemptojo gelžbetonio perdangos plokštės. Jis statytas pusiausvyros metodu. Tiltro pagrindinis tarpatramis buvo 241 m. ilgio. Projekto metu buvo apskaičiuota, kad tilto perdangos įlinkis pasiekę 0,3 m. turėjo stabilizuotis. Tačiau teoriniai skaičiavimai neatitiko realybės. 4 pav. vaizduojamas Z.P. Bažanto tirto tilto įlinkių kitimo grafikas per pirmus 19 eksploatavimo metų. Rombai pažymi realius tilto stebėjimų duomenis. Skirtingų spalvų kreivės žymi tilto įlinkius gautus skaičiuojant pagal skirtingus skaičiavimo modelius:

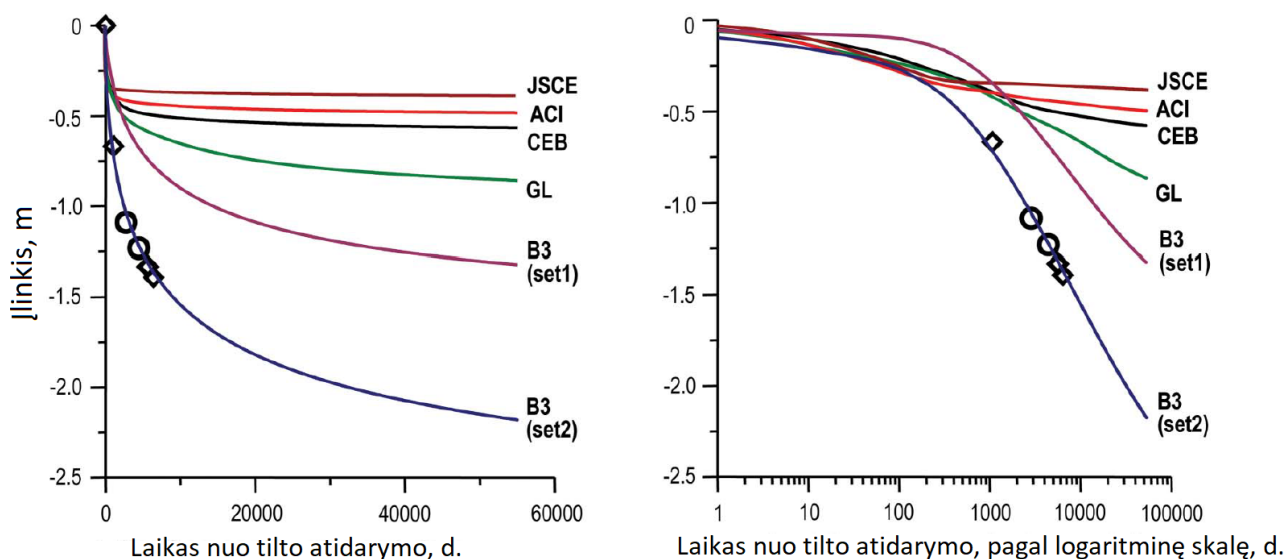
- JSCE (ang. Japan Society of Civil Engineers) – Japonijos statybos inžinierių asociacija;
- ACI (ang. American Concrete Institute) – JAV gelžbetonio projektavimo institutas;
- CEB (ang. Comité Euro-International du Béton) – tarptautinis gelžbetonio projektavimo institutas, kurio pagrindinis biuras yra Prancūzijoje;
- GL – mokslininkų Gardner ir Lockman siūlomas betono ilgalaikės elgsenos skaičiavimo modelis;
- B3 (set1) – Bažanto siūlomas betono ilgalaikės elgsenos skaičiavimo modelis (I var.);
- B3 (set2) – Bažanto siūlomas betono ilgalaikės elgsenos skaičiavimo modelis (II var.).



4 pav. Tilto Palau įlinkio kitimo grafikas (0–19m.), apskaičiuotas skirtingais skaičiavimo modeliais (rombai žymi realius tilto stebėjimo duomenis) [18]

4 pav. matomas ryškus realaus įlinkio ir teoriškai paskaičiuoto įlinkio neatitikimas (išskyrus B3(set1) modelį). 18-ais eksploatavimo metais viadukas realus viaduko įlinkis buvo 2-5 kartus didesnis nei teoriškai paskaičiuotas skirtingais skaičiavimo modeliais. Tik mokslininko Bažanto siūlomu betono

ilgalaikės elgsenos skaičiavimo modeliu B3(set2) paskaičiuotas įlinkis atitinka realią tilto konstrukcijos elgseną.

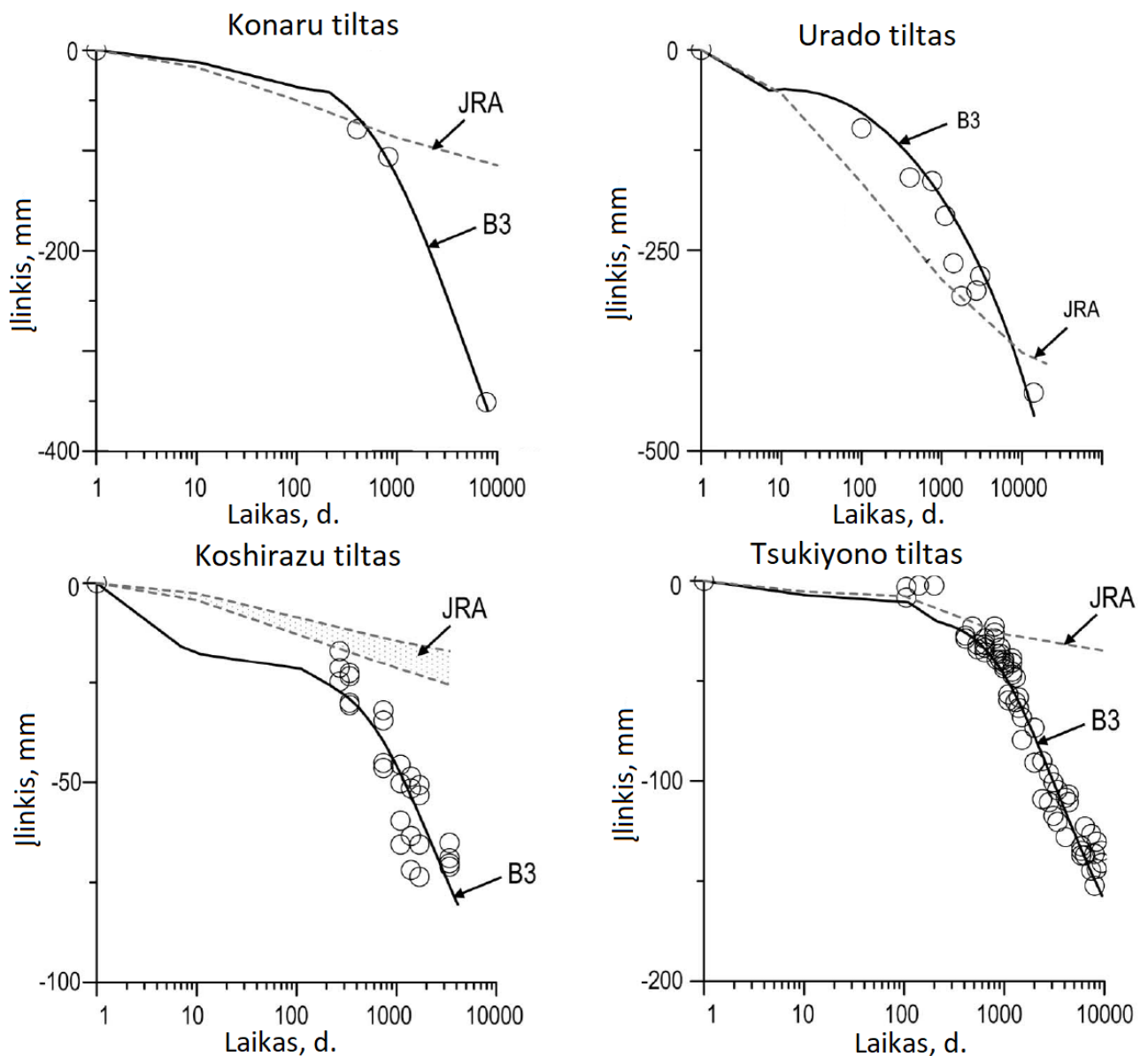


5 pav. Tilto Palau įlinkio kitimo grafikas (0–150m.), apskaičiuotas skirtingais skaičiavimo modeliais (rombai ir apskritimai žymi realius tilto stebėjimo duomenis) [18]

Nors tiltas sugriuvo 19-aisias eksploatacijos metais, dėl teorinių įlinkio skaičiavimo modelių palyginimo, tilto viaduko įlinkis modeliuojamas iki 150 metų eksploatacijos. Tilto teorinis įlinkis 0–150 eksploatacijos metais pavaizduotas 5 pav. Įlinkių kitimo tendencija panaši kaip pavaizduotą 4 pav. Tik didėja skirtumas tarp skirtingais skaičiavimo modeliais skaičiuotų įlinkio reikšmių.

Tiltų stebėjimo duomenys dažnai nėra viešai prieinami, ypač jei tiltų įlinkis didėja daugiau nei numatyta projekte. Tačiau japonų įmonės „Shimizu Corporation“ vyriausiasis inžinierius Y. Watanabe viešai patalpino kelių didelio tarpatramio, įtemptojo gelžbetonio, dėžinio skerspjuvio tiltų įlinkio stebėjimų duomenis. 6 pav. pavaizduoti realūs įlinkio stebėjimo duomenys (pažymėti apskritimais). Diagramoje taip pat pavaizduotas tilto įlinkio kitimas, apskaičiuotas pagal Japonijos kelių asociacijos reikalavimus JRA (ang. Japan Road Association) bei mokslininko Bažanto siūlomą B3 betono ilgalaikės elgsenos skaičiavimo modeliu.

Projektavimo darbų metu tiltų įlinkis buvo skaičiuotas JRA skaičiavimo modeliu. Pagal 6 pav. diagramas matoma, kad tiltų įlinkis skaičiuojamas pagal JRA skaičiavimo modelį neatitinka realios tiltų konstrukcijų elgsenos. Tuo tarpu mokslininko Bažanto siūlomą B3 betono ilgalaikės elgsenos skaičiavimo modeliu gauti rezultatai atitinka realius tiltų įlinkio stebėjimo rezultatus.



6 pav. Japonijoje statytų tiltų įlinkio kitimo grafikai, apskaičiuoti pagal skirtingus skaičiavimo modelius (apskritimai žymi realius tilto stebėjimo duomenis) [18]

1.2. Užsienyje taikomi viadukų stiprinimo būdai

1.2.1. Tiltų stiprinimas iš anksto įtemptos armatūros lynais, įtemptais dėžinio skerspjūvio sijos vidinėje dalyje

Tiltų stiprinimo būdas, pridedant papildomos, iš anksto įtemptos armatūros lynų skerspjūvio vidinėje dalyje, taikytas Grand-Mere tiltui (žr. 2.1 pav.) esančiam Kanadoje. Jis pastatytas 1977 metais. Tiltas yra trijų tarpatramių (39,6+181,4+39,6) m, bendras ilgis – 285 m. Tiltas yra kintamo aukščio, dėžinio skerspjūvio, su iš ankstu įtemptos Ø32 mm armatūros strypais ($f_{yd} = 1030 \text{ MPa}$). Kraštiniai tarpatramiai yra monolitinio gelžbetonio, o vidurinis, sudarytas iš atskirų dėžinių segmentų, kurių aukštis kinta nuo 2,90 m iki 9,75 m. Kiekviena kraštinio tarpatramio perdangos plokštės konstrukcija atsveria pusę viduriniojo tarpatramio perdangos plokštės konstrukcijos. [4]

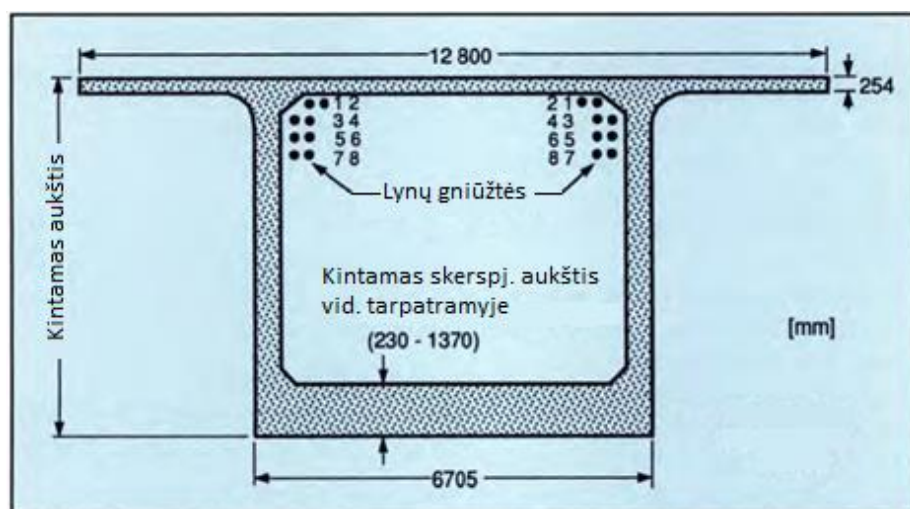


7 pav. Grand-Mere tilto konstrukcijos schema [4]

Tilto eksploatacijos metu pastebėti atsirandantys defektai ir pažeidos viduriniame tarpatramyje: atsiveriantys įstrižieji ir normaliniai plyšiai, didėjantis perdangos įlinkis. Šie defektai atsirado dėl nepakankamo pirminio iš anksto įtemptos armatūros įtempimo, kurį nulėmė statybos procesas, optimistinės projektavimo prielaidos ir tuo metu buvęs žinių trūkumas apie temperatūrinius poveikius konstrukcijai (šie poveikiai tinkamai neįvertinti). Dėl šių priežasčių nuspręsta tiltą sustiprinti, prie esamos iš anksto įtemptos armatūros papildomai pridėjus 30 % vielapluoščių įtempiamų dėžinio skerspjūvio vidinėje dalyje. Tiltą stiprinimas darytas norint pailginti jo eksploataavimo laikotarpį. [4]

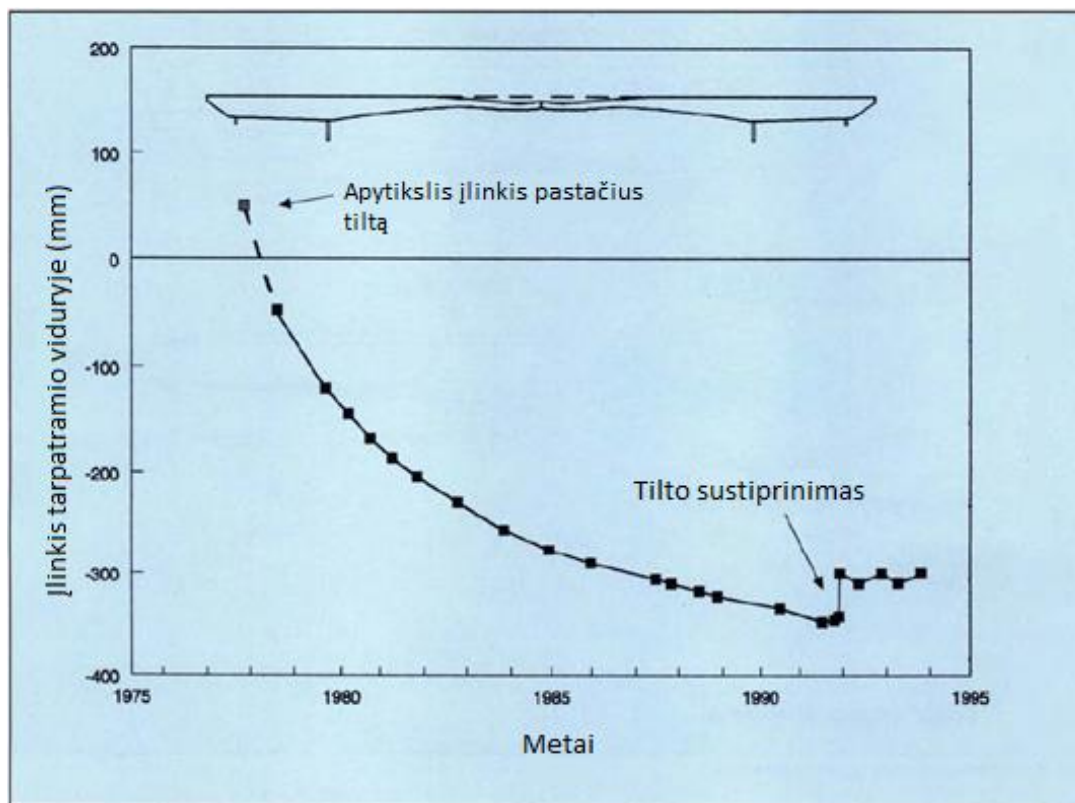
Tuo metu Kanadoje tilto konstrukcijų stiprinimui nebuvo atitinkamų normatyvinių dokumentų. Projektuojant buvo remtasi Kanados, Ontario regiono tiltų projektavimo normomis bei Prancūzijos transporto departamento (SETRA) patirtimi segmentinių iš anksto įtempto gelžbetonio tiltų statyboje.

Įtempimui buvo panaudotos 32 lynų gniūžtės (po 16 kiekviename gale). Jos išdėstytos po dėžinio skerspjūvio viršutine juosta (žr. 8 pav.). Gniūžtės Nr. 3-8 sudarytos iš 12xØ15 mm vielų, o Nr. 1-2 iš 15xØ15 mm vielų. Vielos įtempiamos atitinkamai pirmuoju atveju 70 % ir antruoju 82 % skaičiuotinio tempiamojo stiprio (1860 MPa). Bendra vienoje perdangos pusėje esančių 16 gniūžčių įtempimo jėga yra 39100 kN, kuri atitinka 31 % ir 33 % pirminės suprojektuotos įtempimo jėgos.



8 pav. Stiprinimo gniūžčių išdėstymo schema [4]

Tilto stiprinimo darbai buvo atliekami 1991–1992 metais. Diagramoje (žr. 9 pav.) pavaizduotas vidurinio tarpatramio įlinkis tilto eksploatavimo metu prieš sustiprinimą (iki 1991 m.) ir po sustiprinimo. Matome, kad prieš sustiprinimą perdangos įlinkis kasmet pastebimai didėjo ir jau viršijo pavojingą 300 mm ribą. Sustiprinus konstrukciją, įlinkis sumažėjo iki 300 mm ir stabilizavosi šiame lygyje. Pagal tuometines Kanados projektavimo normas, toks įlinkis leistinas. Tilto stiprinimo būdas pasiteisino. Įlinkis sumažėjo iki norimos ribos ir stabilizavosi.



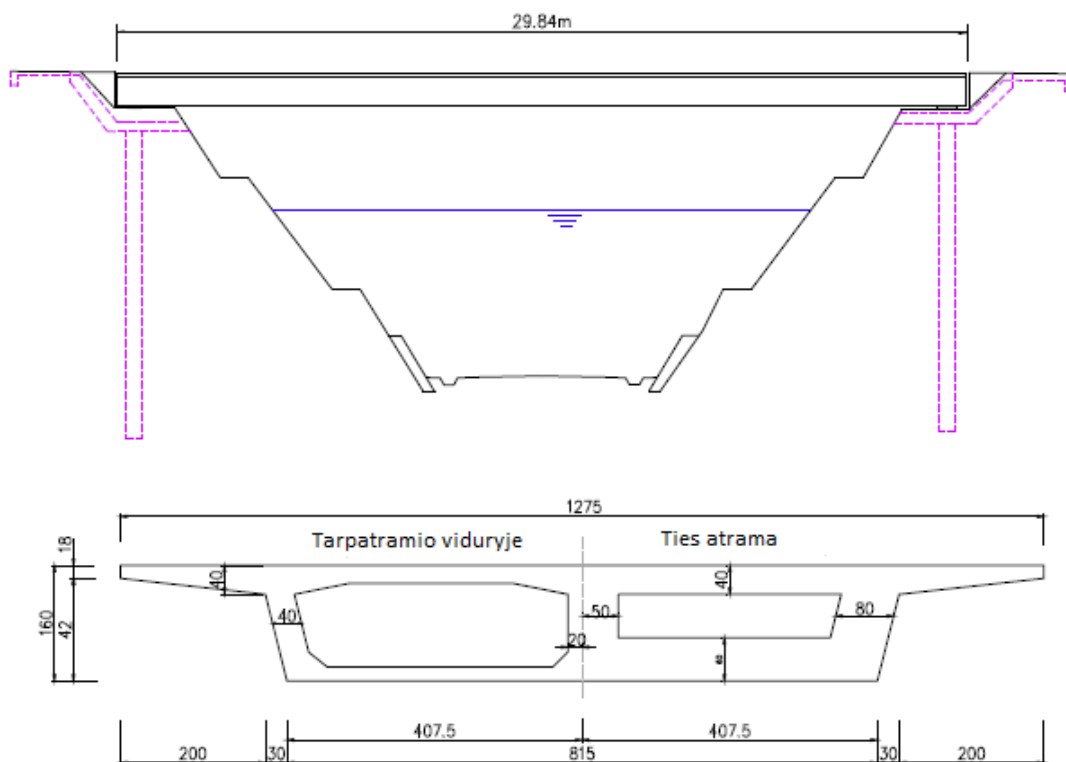
9 pav. Vidurinio tarpatramio įlinkio dydis [mm] [4]

1.2.2. Stiprinimas plieninėmis plokštėmis ir fibromis armuotu polimeru

Dėžinio skerspjuvio, įtempto gelžbetonio sijų tiltai gali būti stiprinami fibromis armuoto polimero (toliau FRP) sluoksniu ar plieninėmis plokštėmis. Stiprinama apatinė dėžinio skerspjuvio dalis. Stiprinimo būdas taikomas sustiprinti konstrukciją saugos ribiniam būviui tenkinti t.y. tiltą veikiančioms apkrovoms laukti. Taip pat gali padėti sumažinti įlinkį ir pleišėjimą.

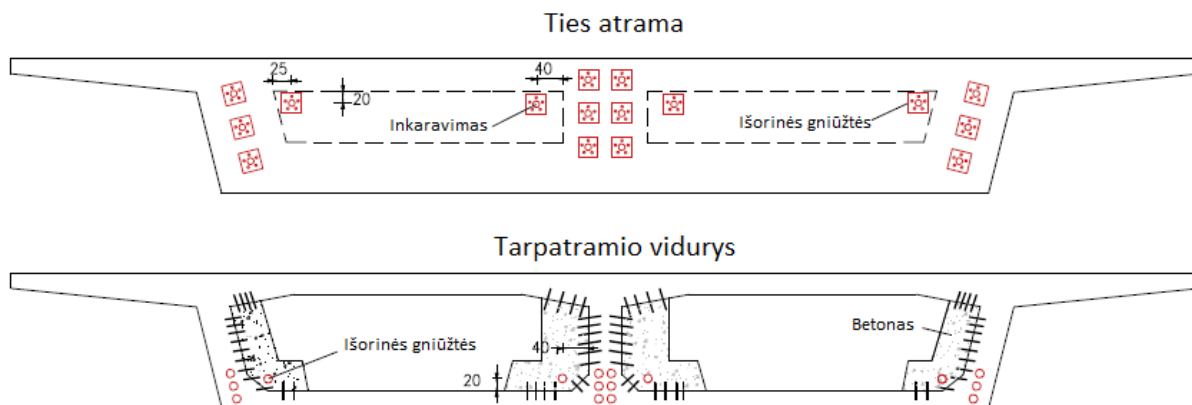
Stiprinimo plieninėmis plokštelėmis, FRP ir papildoma, išorine, iš anksto įtempta armatūra būdai palyginti, atlikus teorinį modeliavimą baigtinių elementų metodu [8]. Tyrimo objektas 29,84 m ilgio, 28,82 m tarpatramio segmentinis, dėžinio skerspjuvio, įtempto gelžbetonio tiltas Kinijoje (žr. 10 pav.). Automobilių transportui skirtas tiltas, laisvai atremtas galuose. Jis armuotas dvylika gniūžčių, sudarytų iš trylikos 15,24 mm skersmens lynų ($A_s = 140 \text{ mm}^2$, $f_{yd} = 1860 \text{ MPa}$). Lynai įtempti

75 % maksimalios įtempimo jėgos 1395 MPa. Tiltas stiprinamas praėjus dešimt metų nuo jo eksploataavimo pradžios.

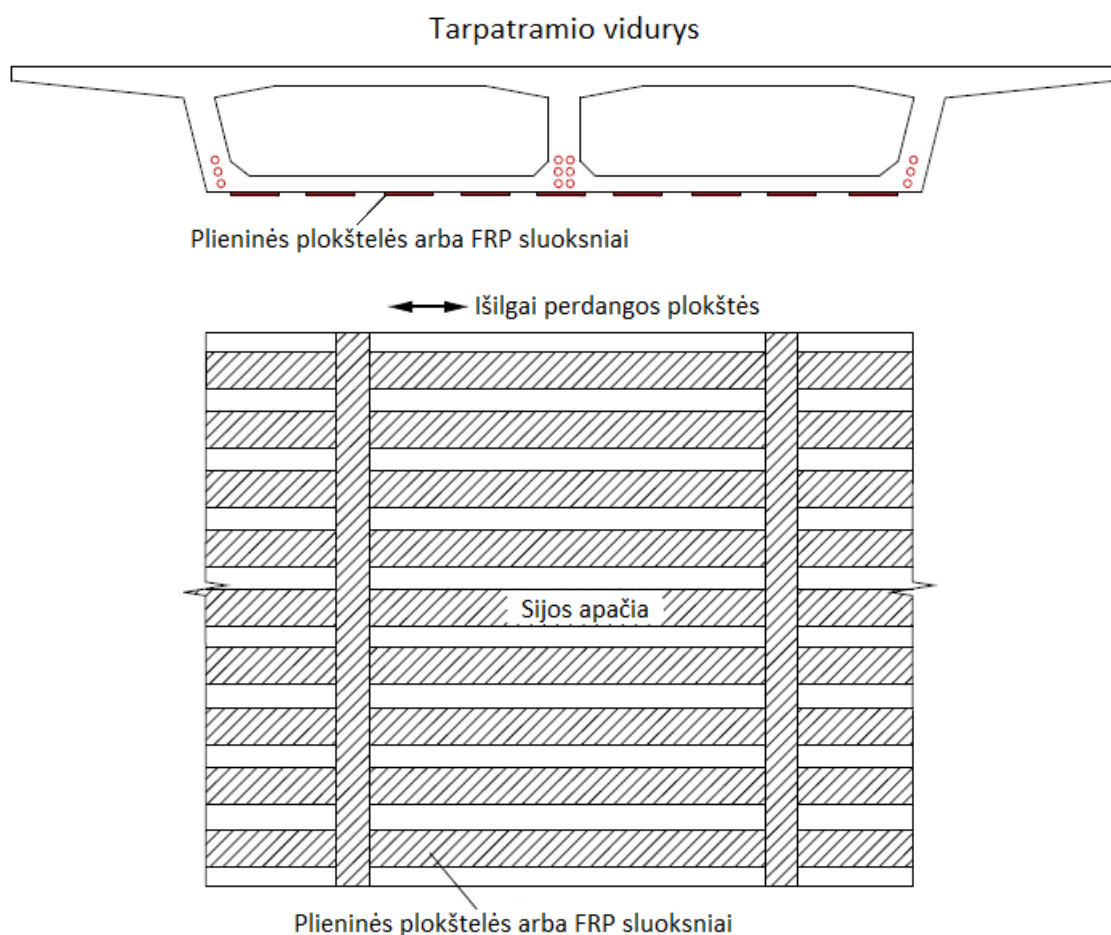


10 pav. Tilto ir perdangos skerspjūvio schema [8]

Tiltą stiprinant fibromis armuotu polimeru, apatinė dėžinio skerspjūvio perdangos dalis padengiama trimis 0,167 mm storio FRP sluoksniais. Sluoksniai yra 400 mm pločio, tarp kurių yra 200 mm pločio tarpai (žr. 12 pav.). Tilto stiprinimui plieno plokštėmis naudojamos 120 mm pločio, 6 mm storio plokštės. Tarpai tarp jų – 300 mm (žr. 12 pav.). Trečiu variantu tiltas stiprinamas keturiomis gniūžtėmis, sudarytomis iš trylikos 15,24 mm skersmens lynų. Lynų gniūžtės išdėstomos dėžinio skerspjūvio viduje (žr. 11 pav.).



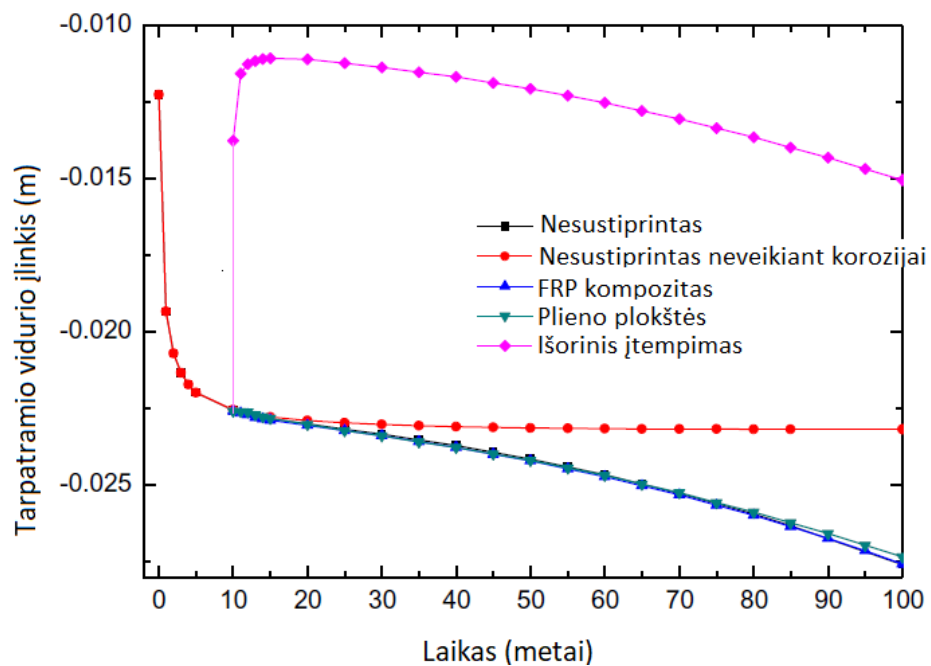
11 pav. Perdangos stiprinimas išorine, iš anksto įtempta armatūra [8]



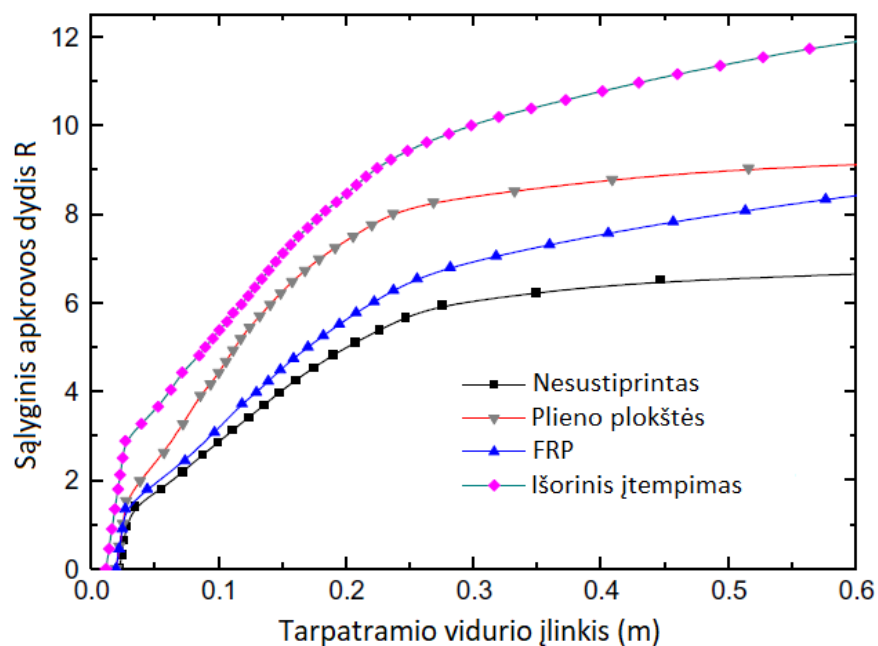
12 pav. Perdangos stiprinimas FRP ir plieninėmis plokštelėmis [8]

Dėžinio skerspjuvio, įtempto gelžbetonio tilto perdangos stiprinimas plokštėmis ir FRP perdangos įlinkiui turi labai mažą reikšmę ir jo beveik nesumažina (žr. 13 pav.). Stiprinimas papildomais, išoriniais, iš anksto įtemptais lynais stabilizuoja įlinkį. Įtempus papildomus lynus, perdangos įlinkis sumažėja ~ 12 cm. Pirmieji du stiprinimo būdai padidina konstrukcijos atsparumą apkrovai, sumažėja perdangos įlinkis apkrovimo metu (žr. 14 pav.). Konstrukcijos atsparumas apkrovai labiausiai padidėja trečiuoju stiprinimo būdu (naudojant papildomus, įtempiamus lynus).

Stiprinimas papildomais, išoriniais, iš anksto įtemptais lynais labiausiai sustiprina dėžinio skerspjuvio, iš anksto įtempto gelžbetonio tiltą. Norint gauti tokį šio būdo efektyvumą, labai svarbu tinkamai įrengti iš anksto įtemptus lynus. Negalima viršyti lynų tempimo stiprio (patartina įtempti iki 70-80 % maksimalios vertės), reikia tinkamai inkaruoti lynų gniūžtes ties atramomis ir padengti lynus betono sluoksniu, siekiant išvengti armatūros korozijos.



13 pav. Nuo eksploatacijos laikotarpio priklausantis perdangos plokštės įlinkis [8]



14 pav. Nuo tilto apkrovos priklausantis perdangos plokštės įlinkis [8]

1.3. Lietuvoje taikomi viadukų stiprinimo būdai

Lietuvoje dažniausiai taikomas įtemptojo gelžbetonio, dėžinio skerspjūvio viadukų stiprinimas papildoma, iš anksto įtempta armatūra. Naudojami lynai arba vielos, iš kurių sudaromos gniūžtės. Gniūžtės gali būti įtempiamos dėžinio skerspjūvio viduje arba išorėje. Dažnai gniūžtės yra užbetonuojamos tam, kad jų nepasiektų vanduo ir nevyktų korozijos procesas. Gniūžtės gali būti išdėstomos keliais būdais: tik apatinėje skerspjūvio dalyje, tik viršutinėje skerspjūvio dalyje, tiek apatinėje, tiek viršutinėje skerspjūvio dalyse bei kintamame aukštyje. Kintamas gniūžčių aukštis,

skerspjūvio atžvilgiu, išilgai sijos išdėstomas, pagal konstrukciją veikiančio lenkimo momento gaubtinę. Taip išdėstyta įtemptoji armatūra veikia efektyviau.

Priklausomai nuo tilto tarpatramių skaičiaus, įtemptoji armatūra gali būti įrengiama atskira kiekvienam tarpatramiui arba gali tęstis per visa konstrukcijos ilgį. Tinkamai išdėstyta nenutrūkstama, įtemptoji armatūra dirba efektyviau, tačiau jos įrengimas yra sudėtingesnis. Ji taip pat gali būti išdėstoma ne per visa tarpatramio ilgį, o tik vietose, kurias norima sustiprinti.

Lietuvoje taikomi stiprinimo būdai nestabilizuoja tilto ar viaduko įlinkio [2]. Stiprinimas padidina konstrukcijos laikomąją galią, tenkančioms apkrovoms atlaikyti, tačiau nestabilizuoja jau esamo tiltų (viadukų) įlinkio. Taigi stiprinimas neatlieka pagrindinės savo funkcijos, todėl nėra efektyvus.

Lietuvoje taikyti stiprinimo būdai:

1) Stiprinimas, įrengiant papildomą atramą

Viadukas stiprinamas, įrengiant papildomą tarpinę atramą perdangos plokštės viduryje. Tarpinė atrama įrengiama identiška esančioms tarpinėms atramomis (tik ši atrama su perdangos plokšte standžiai nesujungiama). Perdangos plokštė remiasi į atraminį guolį, esantį tarpinės atramos viršuje.



15 pav. Viadukas, sustiprintas įrengus tarpinės atramas (A2 ir E272 kelių sankirta) [15]

2) Stiprinama, viena iš dviejų greta esančių dėžinio skerspjūvio sijų

Šis stiprinimo būdas taikytas vieną kartą, stiprinant viaduką, esantį ties Sitkūnais. Taupant lėšas, įtemptąją armatūrą stiprinta tik viena iš dviejų, labiau įlinkusi sija.



16 pav. Viadukas, kurio tik viena sija sustiprinta (pažymėta rodyklėmis) [16]

3) *Stiprinimas, išdėstant papildomą įtemptąją armatūrą skerspjūvio viršuje ir apačioje*

Papildoma, įtemptoji armatūra įtempiama stiprinamo viaduko vietose, kur jau yra iš anksto įtempta armatūra. Taip padidinamas pradinis įtemptos armatūros kiekis. Konstrukcinė viaduko schema išlieka nepakitusi.



17 pav. Įtemptosios armatūros išdėstymas



18 pav. Įtemptosios armatūros išdėstymas (Babtu viadukas)

4) *Stiprinimas, išdėstant papildomą įtemptąją armatūrą pagal lenkimo momentų gaubtinę*

Stiprinimo būdas yra paremtas lenkimo momentų diagrama. Vielų gniūžtės išdėstomos pagal lenkimo momentų diagramą – virš atramų įtemptoji armatūra yra skerspjūvio viršutinėje dalyje, tarpatramio viduryje – apatinėje dalyje.



19 pav. Įtemptosios armatūros išdėstymas (Nemenčinės viadukas)

1.4. Literatūros apžvalgos išvados

- Apžvelgus Lietuvoje esančių įtemptojo gelžbetonio, dėžinio skerspjuvio tiltų (viadukų) būklę, pastebėta, kad šio tipo tiltų (viadukų) perdangoms būdingos pažaidos yra pleišėjimas įstrižame ir normaliniame pjūviuose.
- Gavus viadukų stebėjimo rezultatus, pastebėta, kad viadukų įlinkis nesistabilizuoja, todėl trumpėja jų eksploatacijos laikotarpis.
- Iš užsienyje taikomų tiltų (viadukų) stiprinimo būdų efektyviausiu galima laikyti stiprinimą papildoma įtemptąja armatūra dėžinio skerspjuvio išorėje.
- Lietuvoje dažniausiai taikomas stiprinimas yra stiprinimas papildoma įtemptąja armatūra.

2. Tiriamo viaduko skaitinis modelis

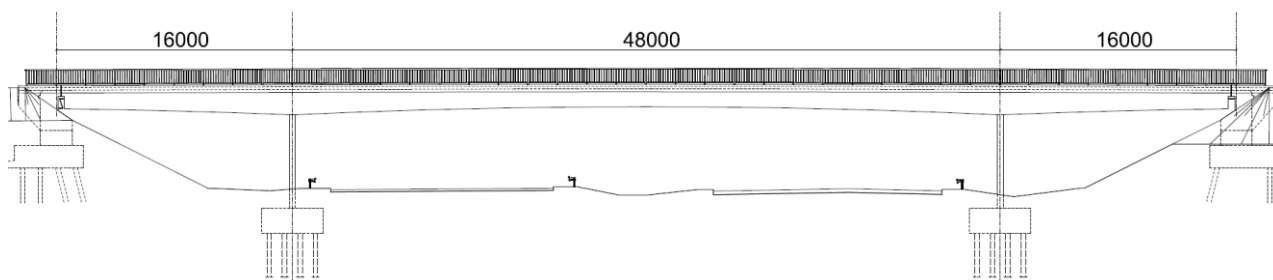
2.1. Tyrimo objektas

2.1.1. Bendri duomenys

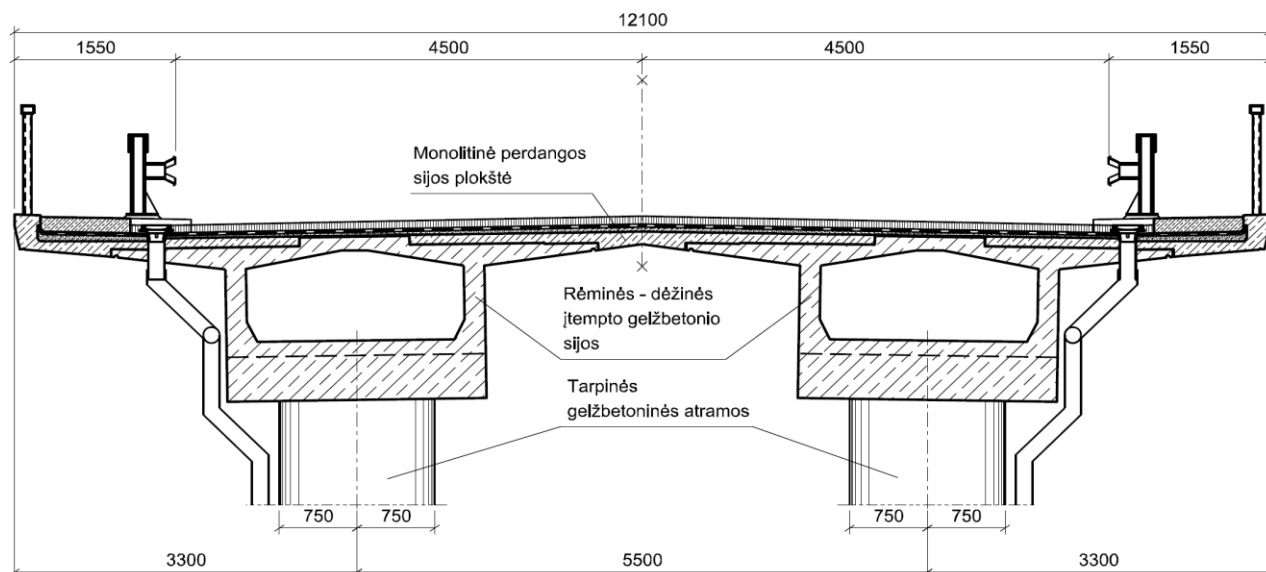
Viadukas yra kelyje Babtai – Kėdainiai. Jis kerta A1 magistralę Vilnius – Kaunas – Klaipėda Babtų sankryžoje (ties Babtais). Viaduko aukščio gabaritas (nuo A1 kelio dangos aukščiausio taško) yra 5,3 m. Statinys yra trijų tarpatramių: 16,0 m, 48,0 m ir 16,0 m. Viaduko plotis yra 12,1 m, važiuojamosios dalies plotis yra 9,0 m.



20 pav. Viaduko bendras vaizdas



21 pav. Viaduko fasado schema



22 pav. Viaduko skersinis pjūvis

2.1.2. Viaduko konstrukcija

Statinė viaduko schema – trijų angų, statiškai neišsprendžiamas rėmas su šarnyrais kraštinėse atramose. Dėžinės sijos apačios aukštis kinta pagal kvadratinę parabolę. Ties tarpine atrama sijos aukštis yra 1,70 m, o angos viduryje – 1,20 m. Visas horizontalias jėgas perima viena kraštinė atrama, kurioje įrengtas nepaslankus šarnyras. Kitoje kraštinėje atramoje įrengtas paslankus šarnyras, todėl atrama perima tik vertikalias apkrovas. Vienoje pusėje įrengtas paslankus šarnyras. Suvaržius jos judėjimą išilgine kryptimi, dėl temperatūros poveikių konstrukcijoje atsirastų papildomi įtempiai. Viadukas kerta pagrindinį kelią 68° kampu, todėl perdangos plokštės sijos (kartu ir tarpinės atramos) perstumiamos 2,22 m.



23 pav. Nepaslankus šarnyras

Tarpinių atramų skerspjūvis – ovalinės kolonos 0,38 m storio ir 1,5 m pločio. Atramos projektuojamos liaunos tam, kad nuo angos statinio temperatūrinių bei plastinių deformacijų jose gautųsi mažesni lenkimo momentai. Tarpinės ir krantinės atramos įrengtos ant 8,0 m ilgio, 0,3x0,35 m skerspjūvio spraustinių polinių pamatų.

Skersiniame viaduko pjūvyje yra dvi dėžinio skerspjūvio sijos, tarpusavyje sujungtos monolitine gelžbetonine plokšte ir skersinėmis sijomis ties atramomis bei angos viduryje. Sijos surenkamos iš atskirų blokų. Blokai yra skirtingo ilgio, aukščio bei svorio (16-19 tonų). Jie montuojami pakabinamuoju būdu. Įtemptosios armatūros gniūžtės klojamos atvirai ant blokų lentynų. Vėliau jos padengiamos monolitinio betono sluoksniu. Dėžinio skerspjūvio sijų blokai vieni su kitais jungiami epoksidiniais klijais.

Visos įtemptosios armatūros gniūžtės, išdėstomos horizontalioje plokštumoje. Visos apatinės gniūžtės ir didžioji dalis viršutinių (išskyrus montažines gniūžtes, skirtas sujungti sijas viaduko viduryje) inkaruojamos plokštėje. Įtemptosios armatūros gniūžtę sudaro 24 vienetai $\varnothing 5$ mm vielų. Gniūžtės įtemptos tam skirtais domkratais.



24 pav. Skersinės sijos, jungiančios dėžines sijas tarpusavyje

2.2. Duomenys skaičiavimams

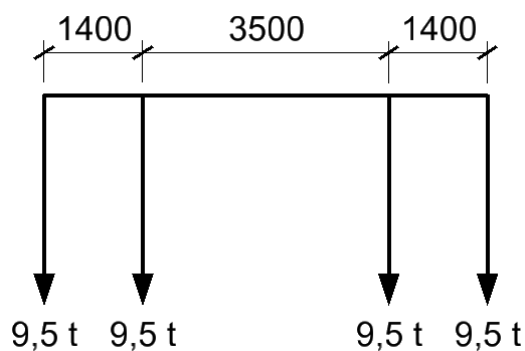
2.2.1. Charakteristinės nuolatinių apkrovų reikšmės

1 lentelė. Charakteristinės nuolatinių apkrovų reikšmės

Eil. Nr.	Apkrovos pavadinimas	q_k		
		[kN/m]	[kN/m ²]	[kN/m ³]
1.	Asfaltbetonio danga	-	2,5	-
2.	Išlyginamasis sluoksnis	-	0,75	-
3.	Pakloto savasis svoris (šaltilčių)	-	4,5	-
4.	Apsauginiai atitvarai	0,5	-	-
5.	Turėklai	0,5	-	-
6.	Turėkliniai blokai	3,0	-	-
7.	Gelžbetoniniai elementai: sijos, sijų sumonolitinimas, monolitinės diafragmos	-	-	25,0

2.2.2. Charakteristinės kintamų apkrovų reikšmės

Skaičiavimuose naudojama kintama apkrova yra didžiausio Lietuvoje leidžiamo svorio sunkiasvariai automobiliai. Bendras visų sunkiasvario automobilio ašių svoris yra 38,0 t, vienos ašies svoris yra 9,5 t. Sunkiasvario automobilio schema pateikta 25 pav. Skaičiavimuose įvertinamas atvejis, kai dvi sunkiasvorės transporto priemonės turi prasilenkti vienoje kelio pusėj t.y. vienoje eismo juostoje.



25 pav. Skaičiavimuose naudojamo sunkiasvorio automobilio schema

2.2.3. Betono susitraukimas ir valkšnumas

Duomenys betono susitraukimui ir valkšnumui skaičiuoti:

- oro temperatūra 20°C.
- santykinė oro drėgmė 70%.
- cementas N klasės.

2.2.4. Konstrukcijoms naudojamas betonas

Skaičiavimuose priimamos betono klasės, pakeistos iš tuo metu naudotų pagal GOST 5802-86 standartą, į atitinkančias šiuo metu naudojamas betono klases pagal LST EN 206-1:2002.

2 lentelė. Naudojamos betono klasės

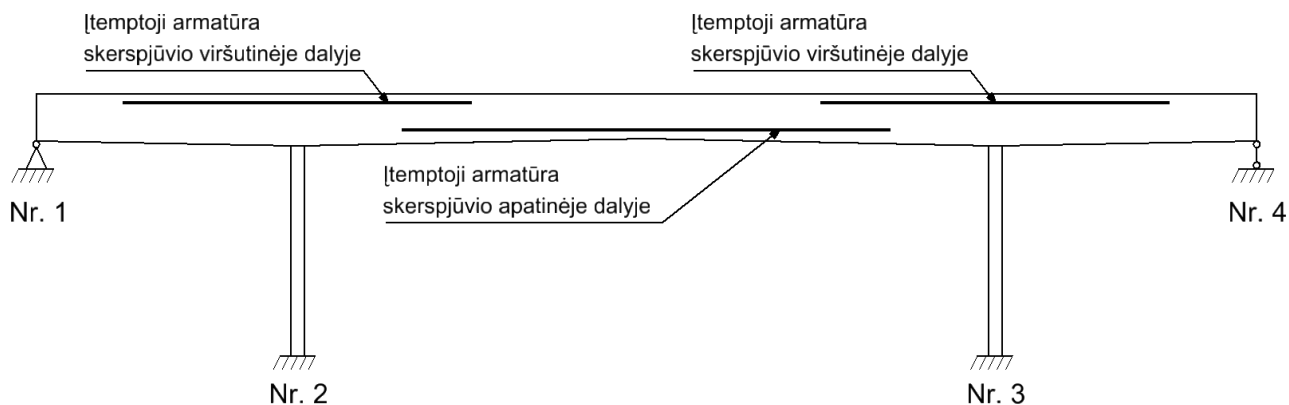
Konstrukcija	LST EN 206-1:2002	GOST 5802-86
Tarpinių atramų polis	C 12/15	M 200
Tarpinių atramų rostverkas	C 12/15	M 200
Tarpinių atramų kolona	C 30/37	M 400
Monolitinės diafragmos	C 30/37	M 400
Perdangos sijos	C 30/37	M 400

3 lentelė. 1970-1980 metais naudotų ir šiuo metu naudojamų betono klasių atitikmenys

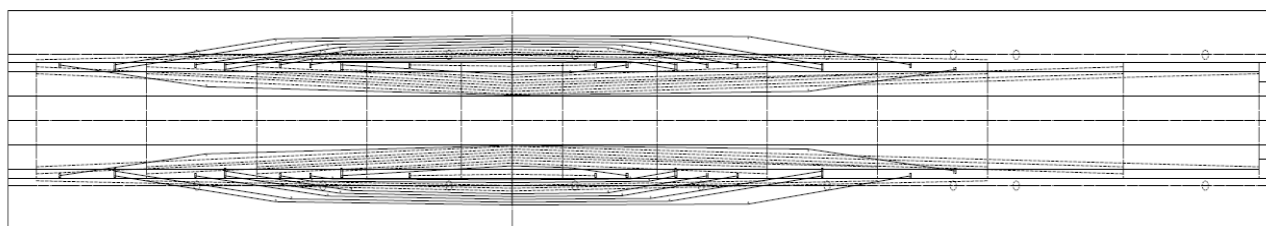
Betono žymuo pagal LST EN 206-1:2002	Betono žymuo pagal GOST 5802-86
C 6/7,5	M 100
C 8/10	M 150
C 12/15	M 200
C 16/20	M 250
C 20/25	M 300
C 25/30	M 350
C 30/37	M 400

C 35/45	M 450
C 40/50	M 500
C 45/55	M 550
C 50/60	M 600

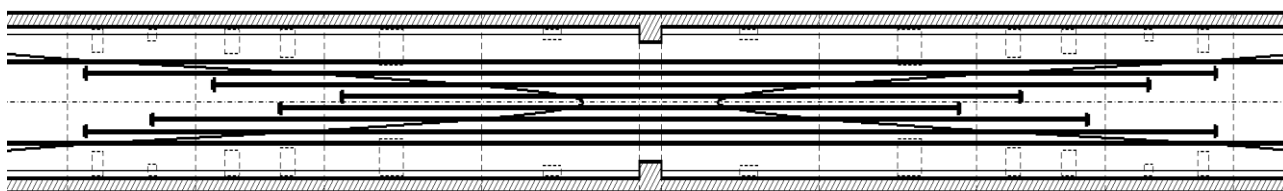
2.2.5. Naudojamos įtemptosios armatūros gniūžtės



26 pav. Įtemptosios armatūros gniūžčių išdėstymo schema



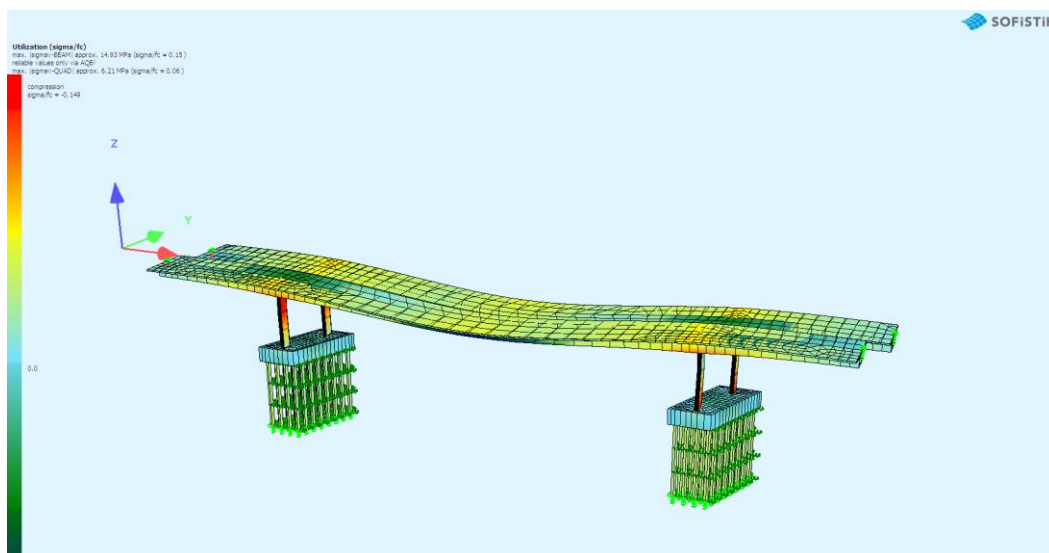
27 pav. Skerspjūvio viršuje esančių gniūžčių išdėstymo schema (ties atramomis Nr. 2 ir Nr.3)



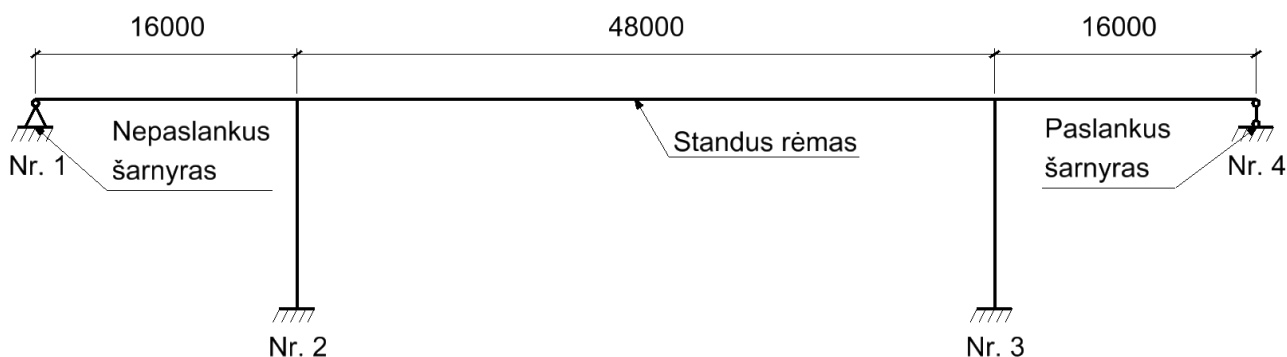
28 pav. Skerspjūvio apačioje esančių gniūžčių išdėstymo schema (ties 48,0 m tarpatramio viduriu)

2.3. Visuminis viaduko modelis

Tilto konstrukcijų bendrajai (globaliai) analizei naudojama baigtinių elementų programa „SOFISTIK“. Konstrukcijų analizei sudarytas bendras perdangos ir tarpinių atramų modelis. Skaičiuojamuosiuose modeliuose vertinama betono ilgalaikė elgsena bei kitos ilgalaikės apkrovos (nuosavas svoris, betono susitraukimas, valkšnumas). Baigtinių elementų programa naudojama įrąžų gaubtinėms, įtempiams konstrukcijos elementuose ir perdangos plokštės įlinkiui gauti.



29 pav. Visuminio modelio schema baigtinių elementų programoje „SOFISTIK“



30 pav. Nagrinėjamo viaduko skaičiuojamoji schema

2.3.1. Statybos etapai

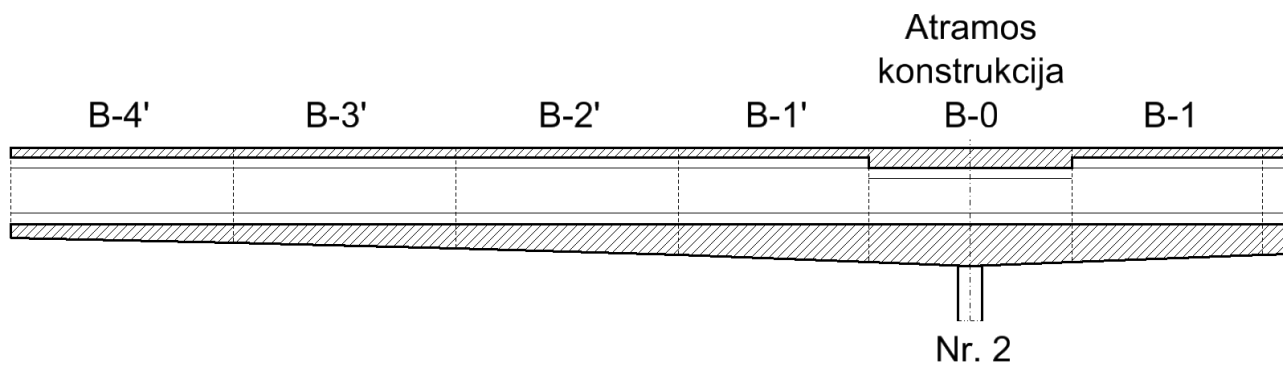
Konstrukcijų analizės metu skaičiavimo modelyje įvertinami statybos etapai. Statybos etapų seka:

- Pamatų polių įrengimas;
- Atramų rostverkų įrengimas;
- Tarpinių ir kraštinių atramų įrengimas;
- Surenkamų, dėžinio skerspjūvio perdangos sijų blokų montavimas pakabinamuoju būdu;
- Įtemptosios armatūros gniūžčių išdėstymas ir įtempimas;
- Sijų sujungimas su kraštinėmis atramomis;
- Sijų sujungimas skersine kryptimi (monolitiniiais g/b plokštė ir skersinės sijos);
- Pakloto įrengimas.

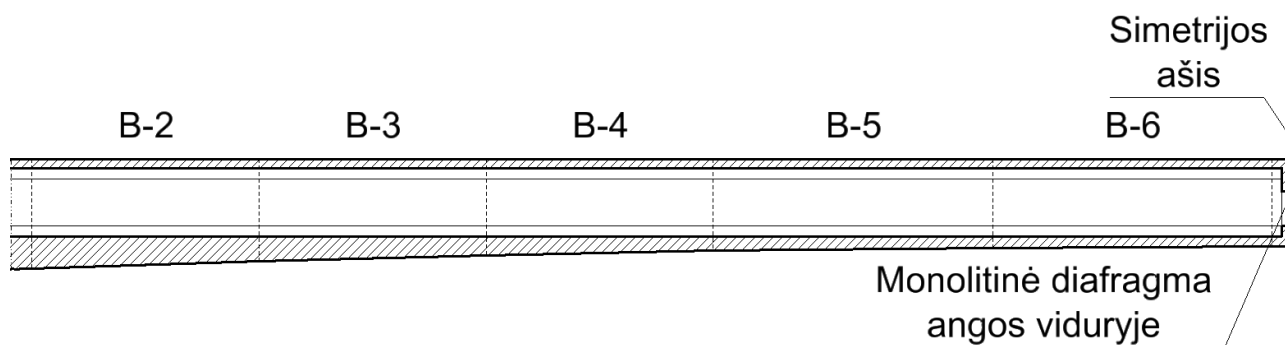
Visos skaitiniame modelyje įvertintos statybos stadijos (iki viaduko stiprinimo) yra pateiktos 4 lentelėje. Surenkamų dėžinio skerspjūvio sijų išdėstymo schema yra pateikta 31 pav. ir 32 pav. Surenkami sijų blokai yra montuojami, praėjus 60 dienų nuo jų pagaminimo dienos. Įtemptosios armatūros gniūžčių duomenys yra pateikti 5 lentelėje 41 psl.

4 lentelė. Viaduko statybos stadijos įvertinamos skaitiniame modelyje

Stadijos Nr.	Stadijos pavadinimas
1	Polių įrengimas
2	Betono valkšnumo ir susitraukimo poveikiai per 28 d.
3	Rostverkų įrengimas
4	Betono valkšnumo ir susitraukimo poveikiai per 28 d.
5	Kolonų įrengimas
6	Betono valkšnumo ir susitraukimo poveikiai per 28 d.
7	Monolitinės atramos konstrukcijos B-0 įrengimas
8	Betono valkšnumo ir susitraukimo poveikiai per 28 d.
9	Lynų gniūžtės Nr. 1 įtempimas
10	Sijų B-1 įrengimas
11	Lynų gniūžčių Nr. 2-5 įtempimas
12	Sijų B-2 įrengimas
13	Lynų gniūžčių Nr. 6-8 įtempimas
14	Betono valkšnumo ir susitraukimo poveikiai per 1 d.
15	Sijų B-3 įrengimas
16	Lynų gniūžčių Nr. 9-10 įtempimas
17	Sijų B-4 įrengimas
18	Lynų gniūžčių Nr. 11-12 įtempimas
19	Betono valkšnumo ir susitraukimo poveikiai per 1 d.
20	Sijų B-5 įrengimas
21	Lynų gniūžčių Nr. 13-14 įtempimas
22	Sijų B-6 įrengimas
23	Lynų gniūžčių Nr. 15-16 įtempimas
24	Betono valkšnumo ir susitraukimo poveikiai per 1 d.
25	Monolitinė diafragma tarpatramio viduryje
26	Betono valkšnumo ir susitraukimo poveikiai per 1 d.
27-35	Lynų gniūžčių Nr. 17-25 įtempimas (kiekviena gniūžtė įtempiama skirtingos stadijos metu)
36	Montažinės lynų gniūžtės (tarpatramio vidurio sijų sumonolitavimo skerspjuvio viršutinėje dalyje) įtempimas
37-50	Lynų gniūžčių Nr. 26-39 įtempimas (kiekviena gniūžtė įtempiama skirtingos stadijos metu)
51	Monolitinės g/b plokštės įrengimas
52	Betono valkšnumo ir susitraukimo poveikiai per 28 d.
53	Montažinių gniūžčių panaikinimas
54	Pakloto įrengimas
55	Betono valkšnumo ir susitraukimo poveikiai per pirmus 36 tilto eksploataavimo metus



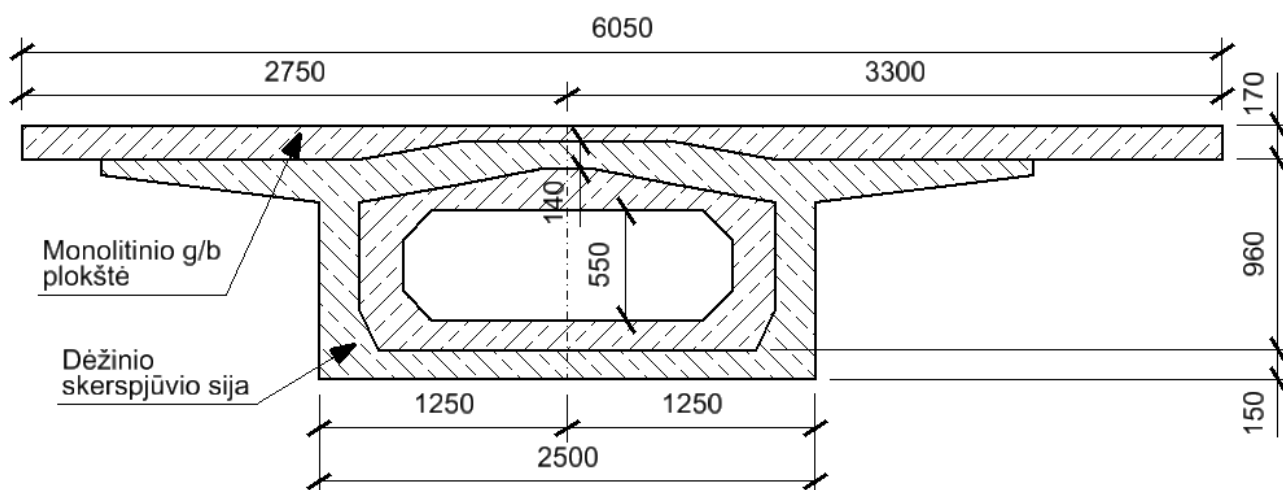
31 pav. Surenkamų, dėžinio skerspjuvio sijų išdėstymo schema (1/2 dalis)



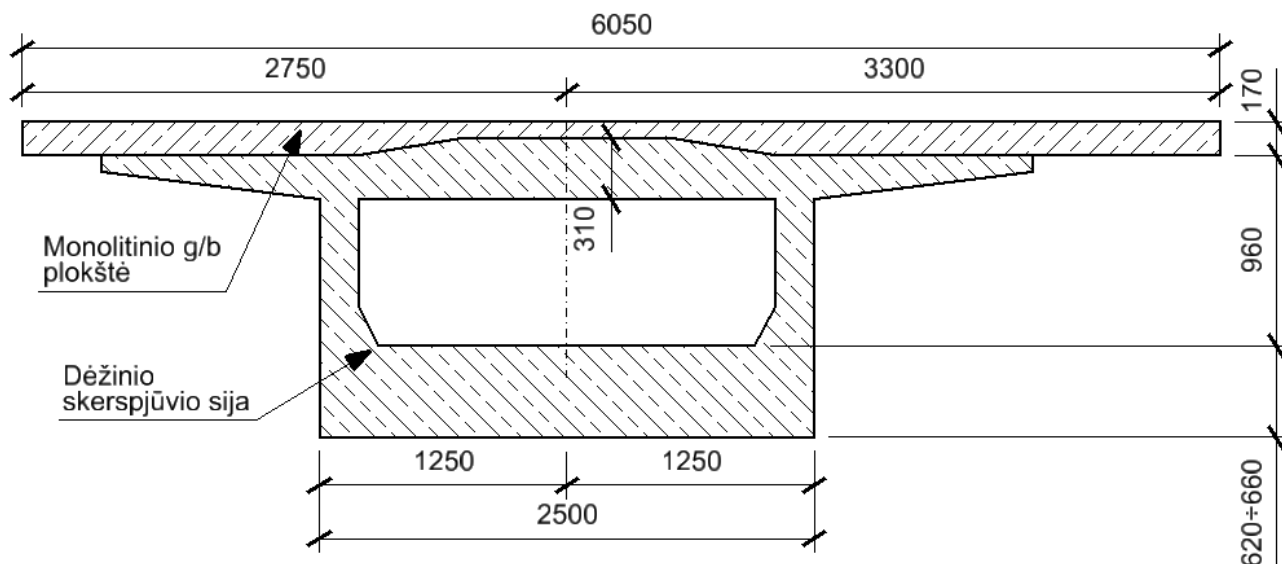
32 pav. Surenkamų, dėžinio skerspjuvio sijų išdėstymo schema (2/2 dalis)

2.3.2. Redukuotas perdangos sijos skerspjuvis

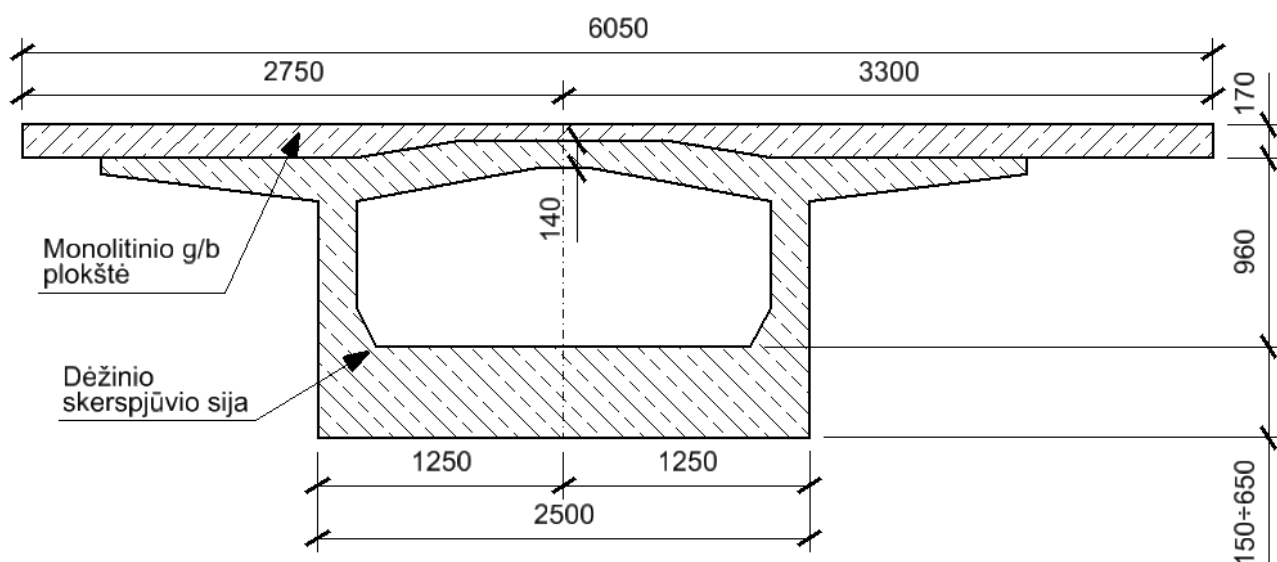
Modelyje naudojamas sijos skerspjuvis modifikuojamas, kad skaičiavimus atlikti būtų paprasčiau. 34 pav., 35 pav. ir 33 pav. pavaizduoti vienos sijos skerspjuviai. Kitos sijos skerspjuviai yra veidrodiniai šios sijos skerspjuvių atspindžiai.



33 pav. Redukuotas monolitinės g/b diafragmos skerspjuvis angos viduryje



34 pav. Monolitinės atramos konstrukcijos B-0 skerspjūvis



35 pav. Redukuotas sijų B-1, B-2, B-3, B-4, B-5, B-6 skerspjūvis

2.4. Rezultatai

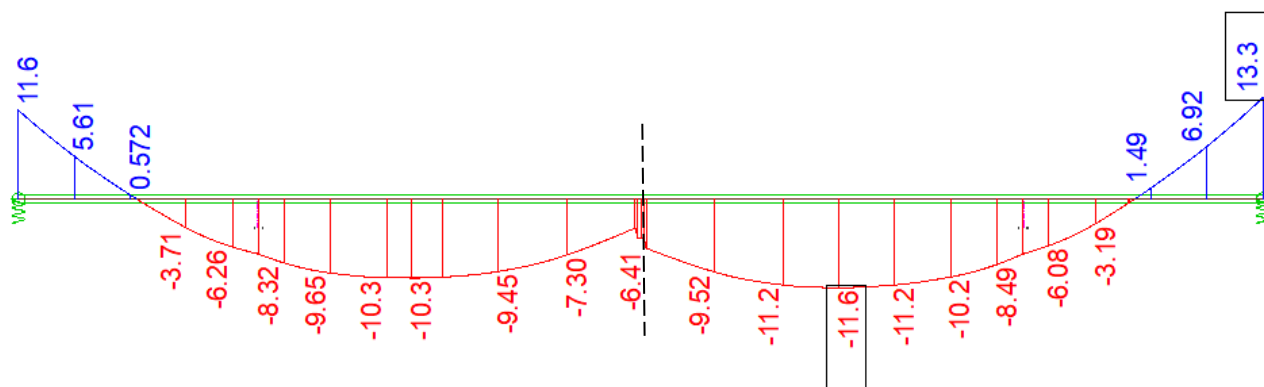
Šiame poskyryje pateikiami rezultatai, gauti sudarius tiriamo viaduko skaitinį modelį. Tiriama tilto elgsena iki sustiprinimo t.y. ~36 metų eksploataavimo laikotarpiu.

2.4.1. Viaduko įlinkis nuo statybų pradžios iki 19 eksploataavimo metų

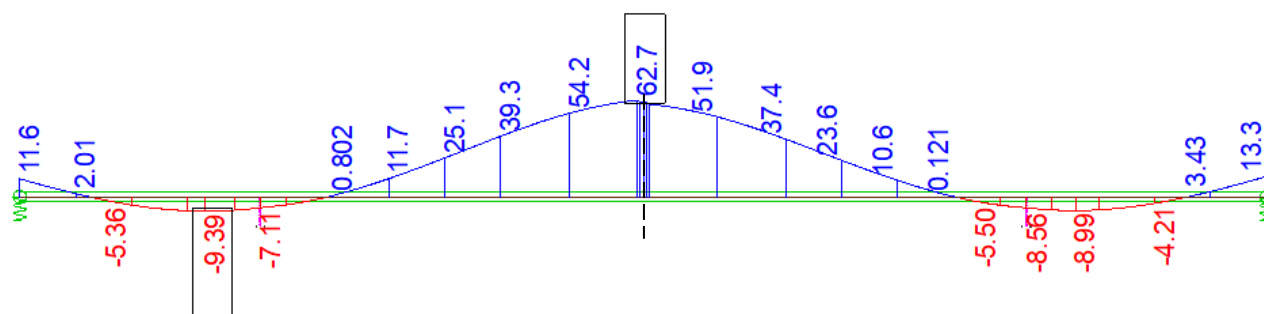
Projekte nurodyti suskaičiuoti tilto įlinkiai (išlinkiai):

- ~ +70 mm – dėl II-os stadijos įtemptosios armatūros gniūžčių įtempimo;
- ~ -15 mm – nuo monolitinės g/b plokštės svorio;
- ~ -25 mm – nuo pakloto svorio;
- ~ -30 mm – dėl betono valksnumo per pirmus 3-4 eksploataavimo metus.

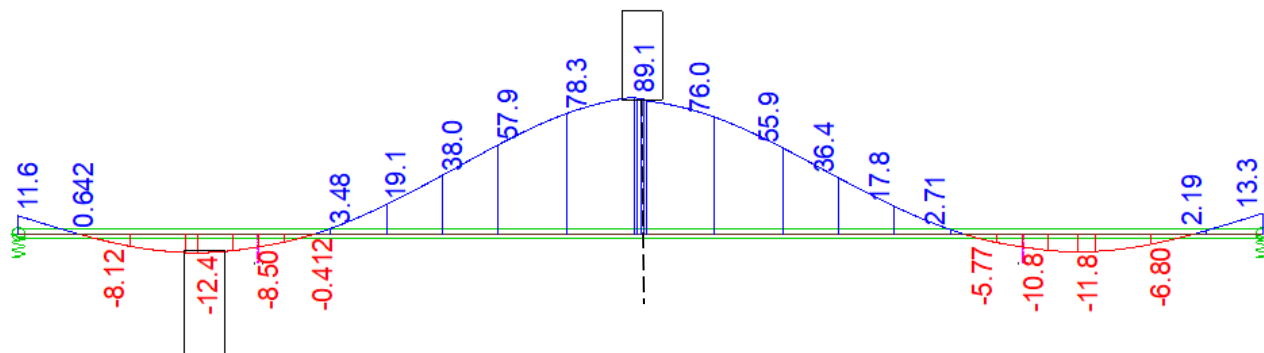
Viaduko projekte nurodyta, kad pastačius viaduką, jis turėjo turėti 70 mm išlinkį (į viršų) lyginant su tilto projektine padėtimi. Šis tilto išlinkis turėjo kompensuoti, aukščiau nurodytus, tilto įlinkius ir po 3-4 metų laikotarpio viaduko įlinkis turėjo stabilizuotis.



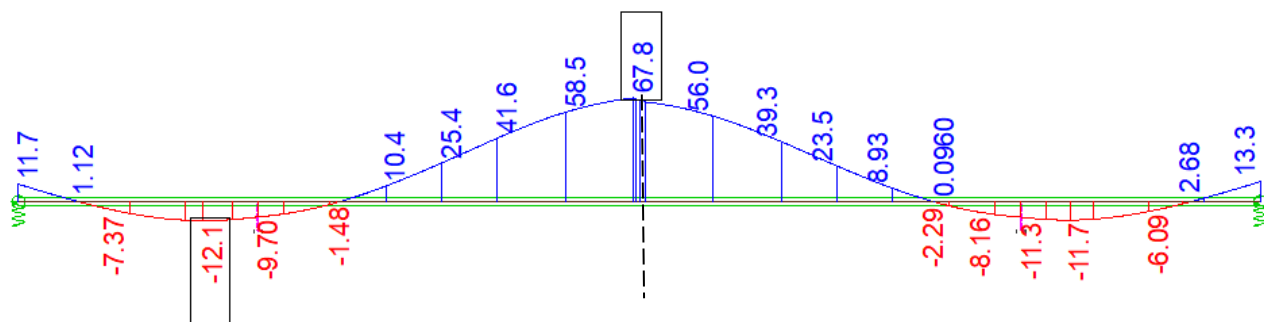
36 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio įlinkis prieš II lynų gniūžčių įtempimo stadiją (mm)



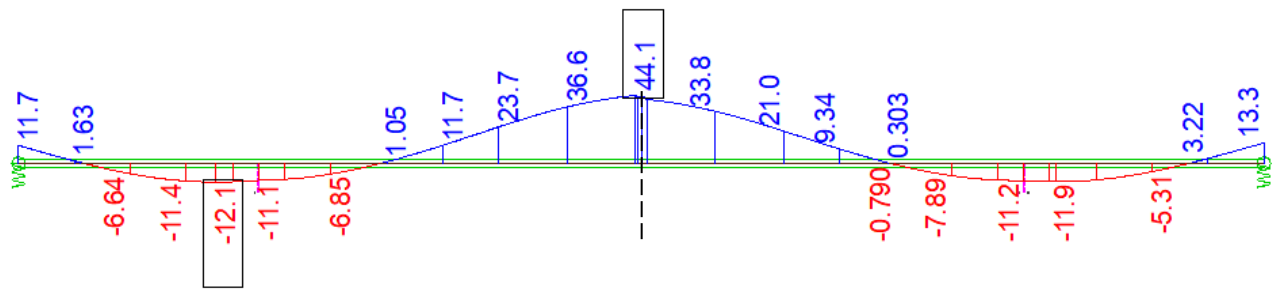
37 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio išlinkis po II lynų gniūžčių įtempimo stadijos (mm)



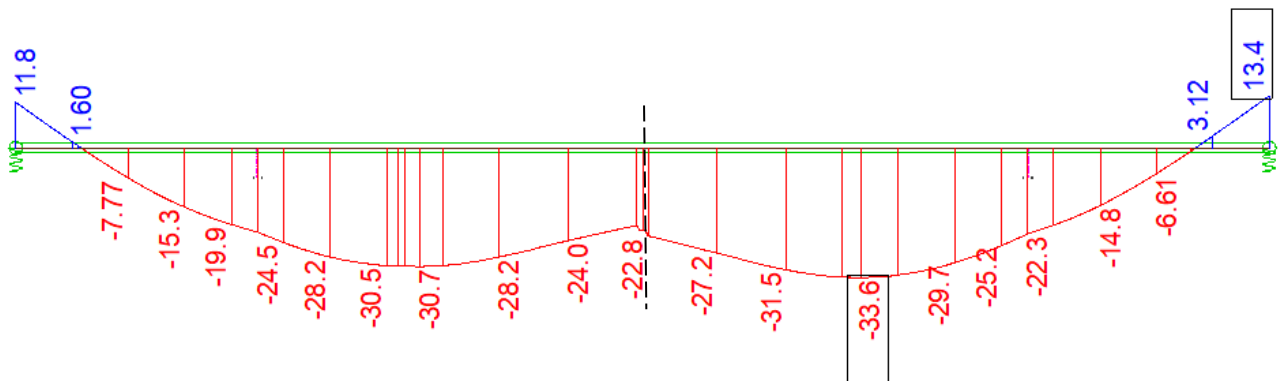
38 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio išlinkis, praėjus 28 d. po II lynų gniūžčių įtempimo stadijos (mm)



39 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio išlinkis, įrengus monolitinę g/b plokštę (mm)



40 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio išlinkis, įrengus paklotą (mm)



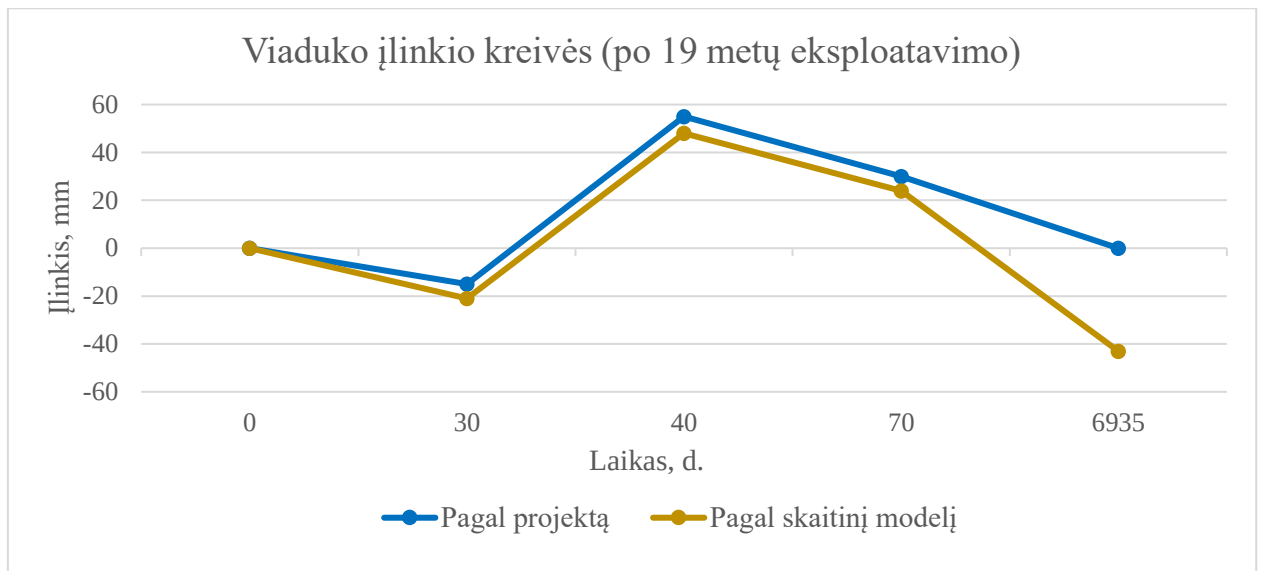
41 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio įlinkis po 19 metų eksploataavimo (mm)

Įlinkis, dėl monolitinės g/b plokštės savojo svorio, gaunamas ~21 mm (lyginant 38 pav. ir 39 pav. pateiktas įlinkių/išlinkių reikšmes); įlinkis, dėl pakloto apkrovos, gaunamas ~24 mm (lyginant 39 pav. ir 40 pav. pateiktas įlinkių/išlinkių reikšmes). Bendras projekte pateiktas įlinkis, dėl g/b plokštės ir pakloto apkrovų, yra $15+25=40$ mm, bendras skaičiavimo modelyje gautas įlinkis – $21+24=45$ mm. Taigi gautas įlinkio nesutapimas ~ -5mm.

Viaduko įlinkis, dėl valkšnumo po 19 metų eksploataavimo laikotarpio, gaunamas ~67 mm (lyginant 40 pav. ir 41 pav. pateiktas įlinkių/išlinkių reikšmes), o projekte buvo nurodyta ~30 mm. Taigi gaunamas skirtumas ~ -37 mm. Projekto metu nebuvo tinkamai įvertintas valkšnumo poveikis.

Kompensuoti sijų išlinkį, dėl aukščiau išvardintų apkrovų, numatytos įtemptosios armatūros gniūžtės. Iš projekte nurodytų skaičiavimų II įtempimo stadijos gniūžtės turėtų sijos vidurinę dalį pakelti ~70 mm. Atlikus skaičiavimus, sijos išlinkis gautas ~69 mm (lyginant 36 pav. ir 37 pav. pateiktas įlinkių/išlinkių reikšmes). Taigi gautas išlinkio nesutapimas yra tik ~ -1 mm.

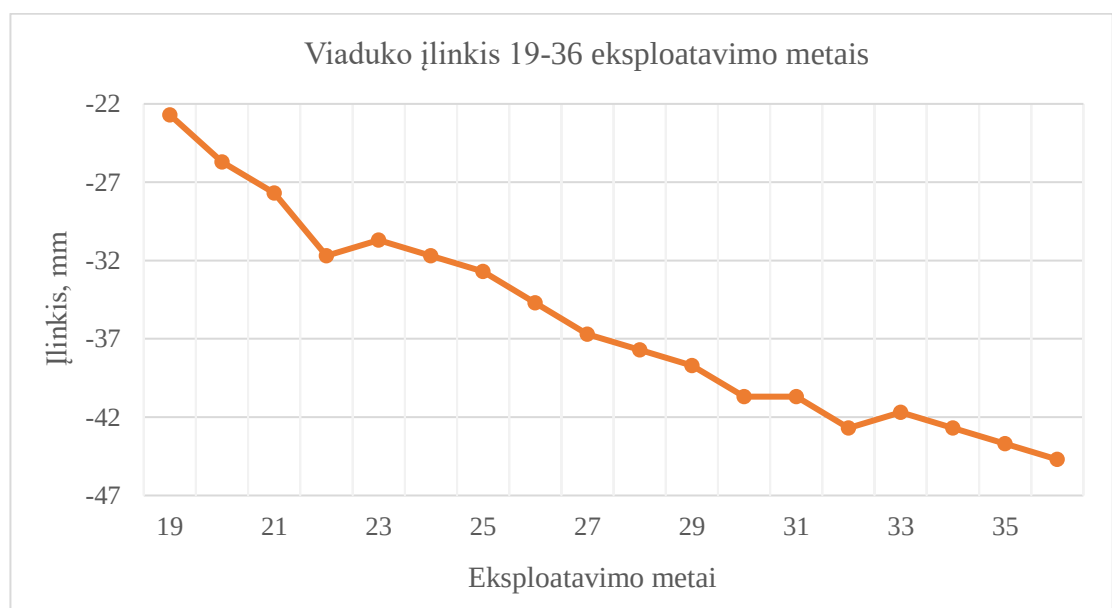
Visas gautas viaduko įlinkio po 19 metų eksploataavimo laikotarpio neatitikimas su projekto duomenimis yra ~43 mm. Pagrindinės galimos priežastys – tinkamai neįvertintas valkšnumas bei netinkamai parinktas įtemptosios armatūros kiekis [18, 19].



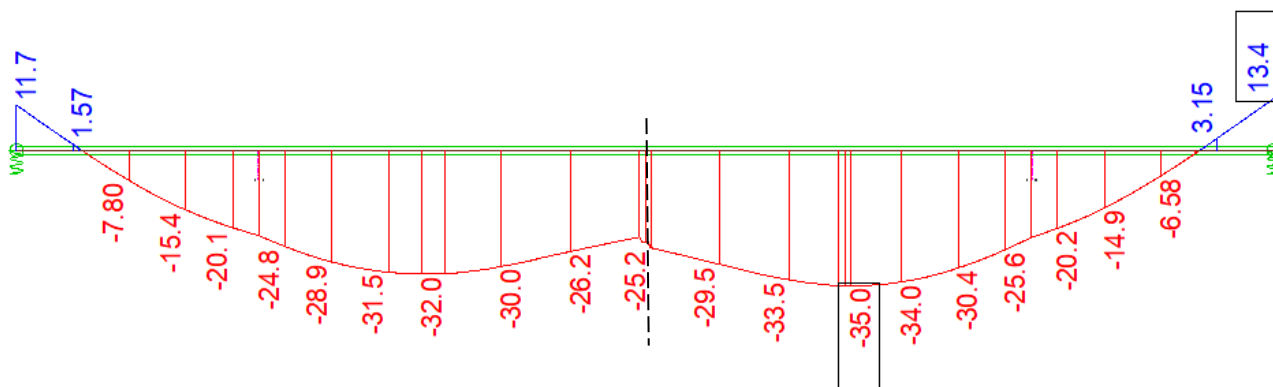
42 pav. Viaduko įlinkių rezultatai per pirmus 19 eksploatacijos metų

2.4.2. Viaduko įlinkio kitimas pagal tiriamo viaduko stebėjimo duomenis

Tyrimo objekto pradinis įlinkis nėra žinomas. Įlinkis buvo pradėtas fiksuoti 19-ais viaduko eksploatacijos metais. Viaduko įlinkio kitimo grafikas yra pavaizduotas 43 pav. Viaduko įlinkis 19-36 eksploataavimo metais padidėjo ~22 mm. Skaitiniame modelyje gautas viaduko įlinkio didėjimas 19-36 eksploataavimo metais yra ~2,4 mm. Skaitiniame modelyje gautas rezultatas neatitinka realaus viaduko įlinkio didėjimo. Baigtinių elementų programoje „Sofistik“ nėra vertinami įtemptosios armatūros nuostoliai dėl korozijos, todėl gauti rezultatai neatitinka realios viaduko elgsenos.



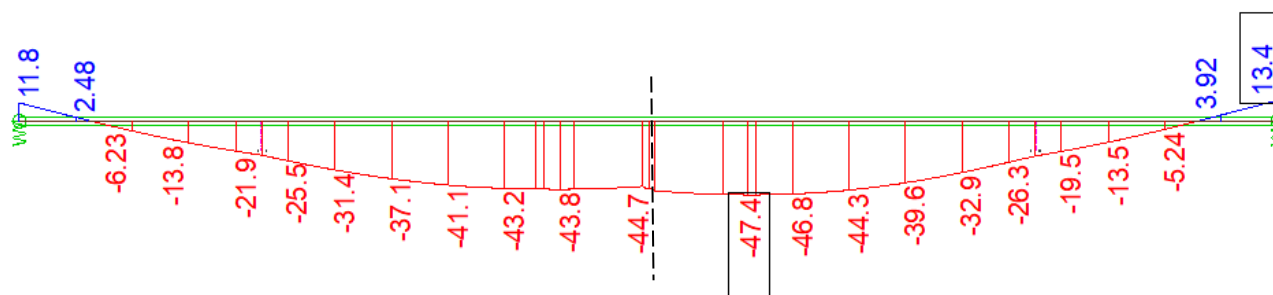
43 pav. Viaduko įlinkio 19-36 eksploataavimo metais grafikas (faktinės stebėjimų reikšmės)



44 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio įlinkis po 36 metų eksploatavimo, neįvertinus armatūros nuostolių dėl korozijos (mm)

Atlikus viaduko apžiūrą, pastebėta, kad įtemptuosius vielapluoščius vanduo pasiekia tiek viršutinėje, tiek apatinėje skerspjūvio dalyse. Turėdama sąlytį su vandeniu, įtemptoji armatūra koroduoja. Dalis vielapluoščių yra nutrūkę (2 pav.). Įtemptosios armatūros nuostoliai dėl korozijos sukelia įlinkio didėjimą 19-36 eksploatavimo metais.

Įtemptos armatūros nuostolių kiekis nustatomas „išjungiant“ vielapluoščių gniūžtes. „Išjungiamą“ tiek gniūžčių, kad viaduko įlinkis 19-36 eksploatavimo metais būtų ~22 mm (toks koks gautas stebint tyrimo objektą). Įtemptosios armatūros gniūžčių duomenys pateikti 5 lentelėje.



45 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio įlinkis po 36 metų eksploatavimo, įvertinus armatūros nuostolius dėl korozijos (mm)

5 lentelė. Viaduko įtemptosios armatūros gniūžčių duomenys

Eksploatavimo metai:				1-19 m.	19-36 m.	36-68 m.	68-100 m.
Įtempimo stadija	Gniūžtės pozicija	Gniūžtės Nr.	Gniūžtės ilgis, m	Įtempimo jėga, kN	Įtempimo jėga, kN	Įtempimo jėga, kN	Įtempimo jėga, kN
I stadija	Viršatraminė dalis	1	3,2	563	563	563	563
		2	9,2	563	563	563	563
		3	9,2	563	563	563	563
		4	9,2	563	563	563	563
		5	9,2	563	563	563	563
		6	16,2	515	515	515	515
		7	16,2	515	515	515	515
		8	13,7	515	515	515	515
		9	23,2	515	515	515	515
		10	23,2	510	510	510	510
		11	30,2	508	508	508	508
		12	30,2	508	508	508	508
		13	27,5	506	506	506	506
		14	31,0	506	506	506	506
		15	38,8	480	480	480	480
		16	6,2	545	545	545	545
II stadija	Vidurinis tarpatramis	17	5,0	531	531	531	531
	Viršatraminė dalis	18	9,4	543	543	543	543
	Vidurinis tarpatramis	19	13,5	528	528	0	0
		20	13,5	528	0	0	0
		21	13,5	528	0	0	0
	Viršatraminė dalis	22	13,1	539	0	0	0
		23	12,1	539	0	0	0
	Vidurinis tarpatramis	24	19,4	497	497	497	497
		25	19,4	497	497	497	497
	Viršatraminė dalis	26	15,9	539	539	539	539
		27	16,8	539	539	539	539
	Vidurinis tarpatramis	28	22,5	497	497	497	497
		29	22,5	497	0	0	0
	Viršatraminė dalis	30	20,3	535	0	0	0
	Vidurinis tarpatramis	31	29,9	465	465	465	465
	Viršatraminė dalis	32	22,8	535	535	535	535
		33	25,6	531	531	531	531
	Vidurinis tarpatramis	34	29,9	465	465	465	465
		35	29,9	465	465	465	0
	Viršatraminė dalis	36	28,8	531	531	531	0
Vidurinis tarpatramis	37	35,3	433	433	0	0	
Kraštiniai tarpatramiai	38	5,3	488	488	488	488	
	39	8,8	488	488	488	488	
				20176	17010	16049	15053

2.4.3. Viaduko įlinkių ir įtempių rezultatai iki sustiprinimo (36 metų eksploatacijos laikotarpiu)

6 lentelė. Viaduko įlinkių rezultatai iki sustiprinimo (36 metų eksploatacijos laikotarpiu)

	Pagal projektą, mm	Pagal skaičiavimus, mm
Monolitinė g/b plokštė	-15	-21
Įtemptoji armatūra (II stadija)	70	69
Paklotas	-25	-24
Valkšnumas per pirmus 19 eksploatacijos metų	-30	-67
Per 19-36 eksploatacijos metus*	-22	-22
	-22	-65

* Įlinkių rezultatų per 19-36 eksploatacijos metus reikšmės yra pateiktos ne pagal projektą, o pagal viaduko stebėjimo duomenis (žr. 43 pav.).

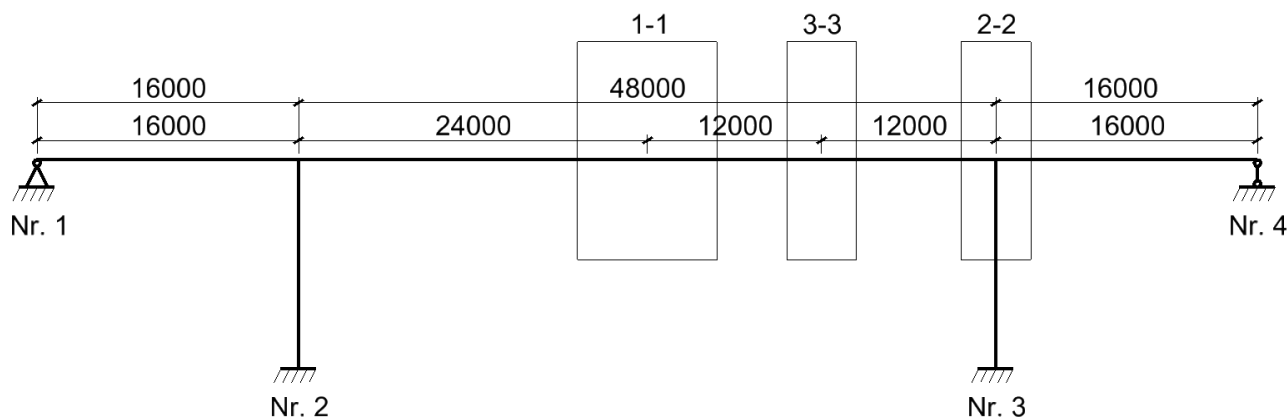
Apibendrinti viaduko įlinkio rezultatai iki viaduko stiprinimo yra pateikti 6 lentelėje. Bendras įlinkio neatitikimas, nurodytas projekte, yra ~43 mm. Pagrindinės galimos priežastys – tinkamai neįvertintas valkšnumas bei netinkamai parinktas įtemptosios armatūros kiekis (išvada pateikiama viaduko konstrukciją vertinant šių dienų eismo intensyvumui).

Betono įtempiai dėžinio skerspjūvio sijose išilgai viaduko yra pateikti 47 pav. Betono įtempiai pagrindiniuose pjūviuose yra pateikti 7 lentelėje. Pagrindinių pjūvių padėtis yra pavaizduota 46 pav.

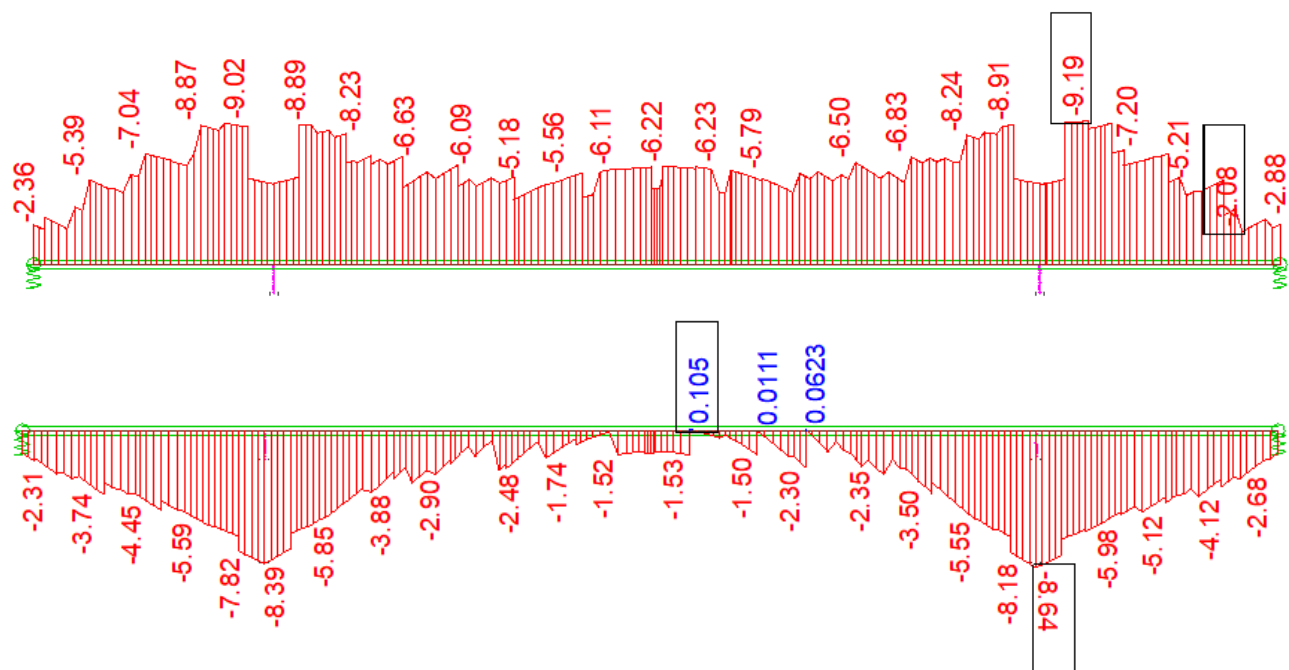
7 lentelė. Betono įtempiai sijų pagrindiniuose pjūviuose, nevertinant laikinos apkrovos

Įtempiai, MPa					
1-1		2-2		3-3	
Virš.	Ap.	Virš.	Ap.	Virš.	Ap.
-4.8	0.1	-5.2	-8.6	-4.8	0.1

Lentelėje pateikti betono įtempiai su „-“ ženklu reiškia gniuždymą.



46 pav. Pagrindiniai pjūviai, kuriuose rodomi betono įtempiai



47 pav. Betono įtempiai sijoje išilgai viaduko, nevertinant laikinos apkrovos (viršuje – įtempiai skerspjūvio viršuje, apačioje – įtempiai skerspjūvio apačioje) (MPa)

3. Modeliuojami viaduko stiprinimo būdai

Magistro baigiamojo projekto metu viadukui taikomi keli stiprinimo būdai. Viadukas yra stiprinamas, norint stabilizuoti viaduko įlinkį, kuris nuolat didėja. Tolimesniuose skyriuose nagrinėjami skirtingi viadukų stiprinimo būdai.

3.1. Stiprinimas, įrengiant papildomą tarpinę atramą

3.1.1. Teorinis aprašymas



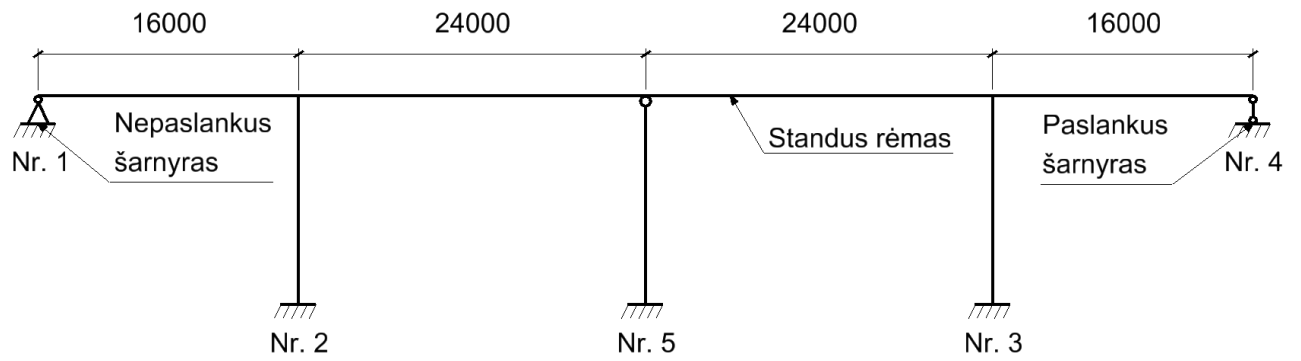
48 pav. Viadukas, sustiprintas įrengus tarpinės atramas (A2 ir E272 kelių sankirta) [14]

Viadukas yra stiprinamas, įrengiant papildomą tarpinę atramą Nr. 5 perdangos plokštės viduryje. Tarpinė atrama Nr. 5 su perdangos plokšte nesujungiama standžiai. Perdangos plokštė remiasi į atraminį guolį, esantį tarpinės atramos viršuje.



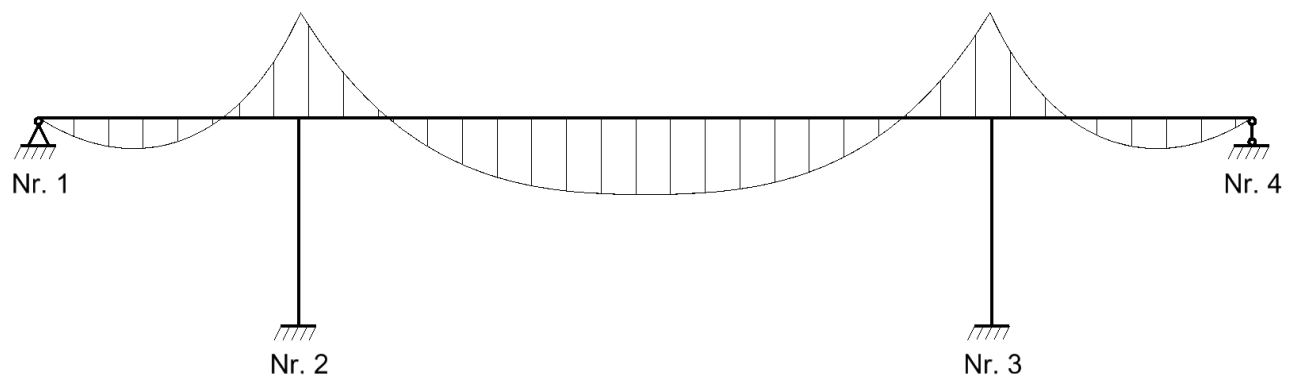
49 pav. Perdangos atrėmimas į tarpinės atramas [15]

Iš pirmo žvilgsnio toks būdas atrodo tinkamas. Tarpinė atrama varžo perdangos įlinkį, kadangi ji remiasi į atramą. Įlinkio ties perdangos viduriu problema atrodo išspręsta, bet įrengus tarpinę atramą, pasikeičia konstrukcijos skaičiuojamoji schema (30 pav. 33 psl.)

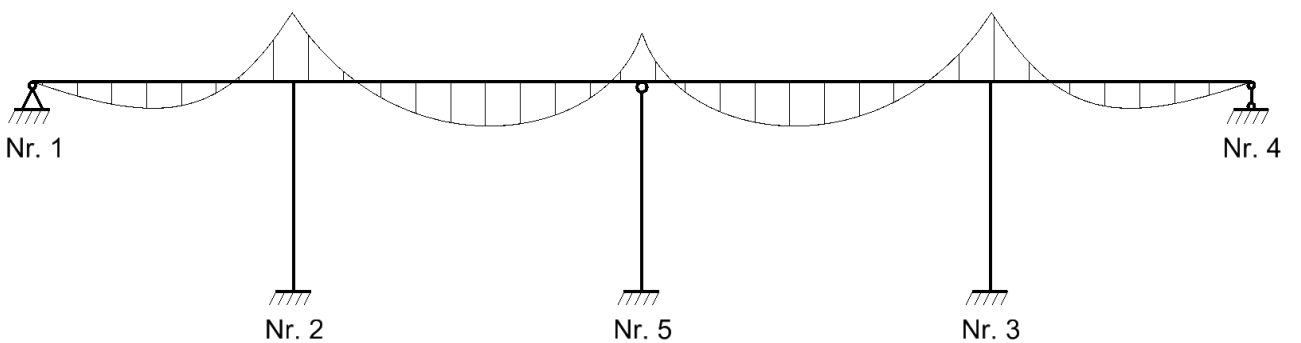


50 pav. Konstrukcijos skaičiuojamoji schema po sustiprinimo

Pasikeitus konstrukcijos skaičiuojamajai schemai, pasikeičia konstrukciją veikiančių lenkimo momentų diagrama. Prieš sustiprinimą tarpatriamio (tarp atramų Nr. 2 ir Nr. 3) viduryje lenkimo momentas veikė tik perdangos plokštės apačioje (žr. 51 pav.). Šiai lenkimo momentų diagramai buvo suarmuota perdangos plokštė. Joje nenumatyta armatūra viršutinėje skerspjūvio dalyje (armatūra viršutinėje dalyje numatyta tik konstrukciniams reikalavimams tenkinti). Todėl įrengus tarpinę atramą ir atsiradus lenkimo momentams viršutinėje skerspjūvio dalyje (žr. 52 pav.), skerspjūvio viršus ima pleišėti. Norint to išvengti, įrengiama papildoma armatūra skerspjūvio viršuje.



51 pav. Perdangos plokštės lenkimo momentų diagramos schema prieš sustiprinimą



52 pav. Perdangos plokštės lenkimo momentų diagramos schema po sustiprinimo

Kita problema yra lenkimo momentai, veikiantys skerspjūvio apatinėje dalyje, tarpatriamų (tarp atramų Nr.2 ir Nr. 5 bei Nr. 5 ir Nr.3) viduryje. Prieš pasikeičiant skaičiuojamajai schemai, šiose

vietose lenkimo momentų reikšmės buvo mažesnės. Dėl padidėjusių lenkimo momentų, šiose vietose dėžinio skerspjuvio sijos supleišėja.

Konstrukcija nėra pritaikyta 50 pav. pavaizduotai konstrukcinei, skaičiuojamajai schemai. Išdėstyta įtemptoji armatūra nebedirba taip kaip numatyta. Problemos atsiranda viršutinėje skerspjuvio dalyje, virš atramos Nr. 5 bei tarpatramio (tarp atramų Nr.2 ir Nr. 5 bei Nr. 5 ir Nr.3) viduryje, apatinėje skerspjuvio dalyje. Nėra išnaudojama perdangos plokštės tarpatramio viduryje esanti iš anksto įtempta armatūra (esanti skerspjuvio apačioje).

3.1.2. Gauti rezultatai

Viaduko įlinkio ir betono įtempių kitimo rezultatai po sustiprinimo yra pateikti 8 lentelėje. Betono įtempiai pateikti pagrindiniuose pjūviuose (pagrindiniai pjūviai pavaizduoti 46 pav. 42 psl.).

8 lentelė. I variantas. Viaduko įlinkis ir betono įtempiai pagrindiniuose pjūviuose

Viaduko eksploatacijos etapas	Įlinkis	Įtempiai, MPa					
		1-1		2-2		3-3	
		Virš.	Ap.	Virš.	Ap.	Virš.	Ap.
Sustiprinimas	44.7	-4.4	0.1	-5.2	-7.9	-4.6	0.1
Po 68 eksploatacijos metų	44.7	-3.6	1.2	-4.9	-7.3	-4.0	0.7
Po 100 eksploatacijos metų	44.7	-3.5	1.7	-4.5	-6.7	-3.3	1.4
Apkrovus kintama aut. apkrova	-	-2.5	3.3	-3.5	-8.0	-5.2	5.3

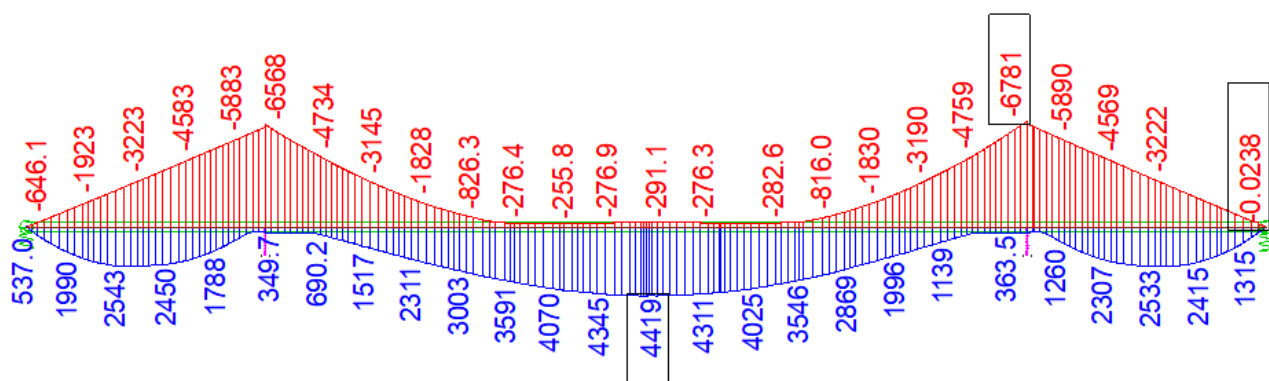
Lentelėje pateikti betono įtempiai su „-“ ženklu reiškia gniuždymą.



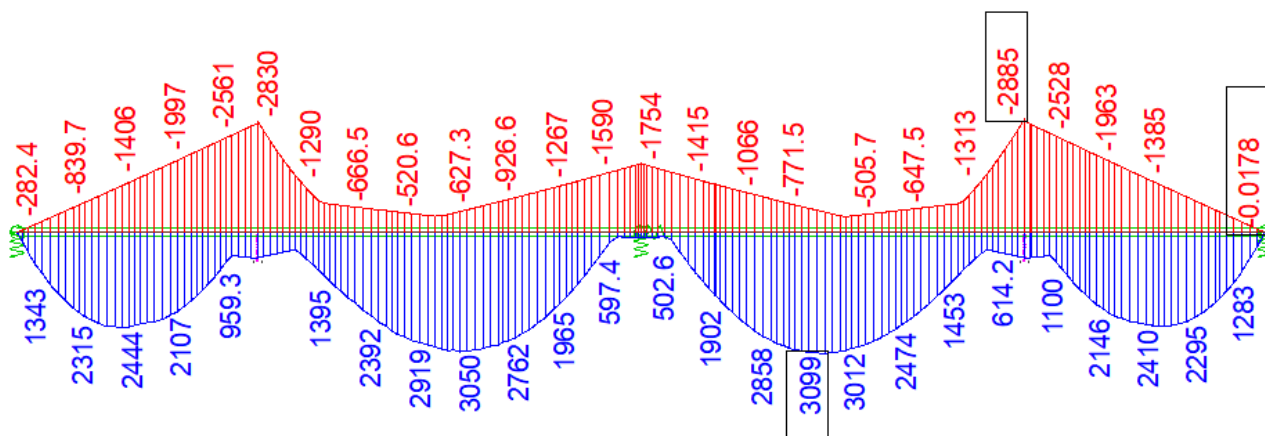
53 pav. Viaduko įlinkis 19-100 eksploataavimo metais, nevertinant laikinos apkrovos

Viaduko įlinkis tarpatramio viduryje nekinta (žr. 53 pav. ir 8 lentelėje). Tarpinė atrama Nr. 5 neleidžia tarpatramio viduriui leisti žemyn. Nuo nuolatinų apkrovų ir betono ilgalaikės elgsenos po 100 metų eksploatacijos 1,4 MPa betono įtempiai susidaro sijos pjūvio 3-3 (46 pav. 42 psl.), skerspjūvio apatinėje dalyje. Nuo suminės apkrovos (nuolatinės ir laikinos) neleistini betono įtempiai susidaro pjūvyje 3-3. Jie lygūs 5,3 MPa. Dėl to šioje vietoje esantys sijų blokai supleišėja apatinėje skerspjūvio dalyje.

Lenkimo momentų gaubtinių diagrama nuo kintamos automobilių apkrovos prieš viaduko sustiprinimą yra pateikta 54 pav. Lenkimo momentų gaubtinių diagrama nuo kintamos automobilių apkrovos po viaduko sustiprinimo yra pateikta 55 pav. Tiek prieš, tiek po sustiprinimo gautos lenkimo momentų gaubtinių diagramos atitinka teoriniame aprašyme nurodytas lenkimo momentų diagramas (51 pav. ir 52 pav.).



54 pav. Lenkimo momentų gaubtinių diagrama nuo kintamos apkrovos prieš sustiprinimą (skerspjūvio viršutinėje dalyje – raudona spalva, apatinėje dalyje – mėlyna spalva)

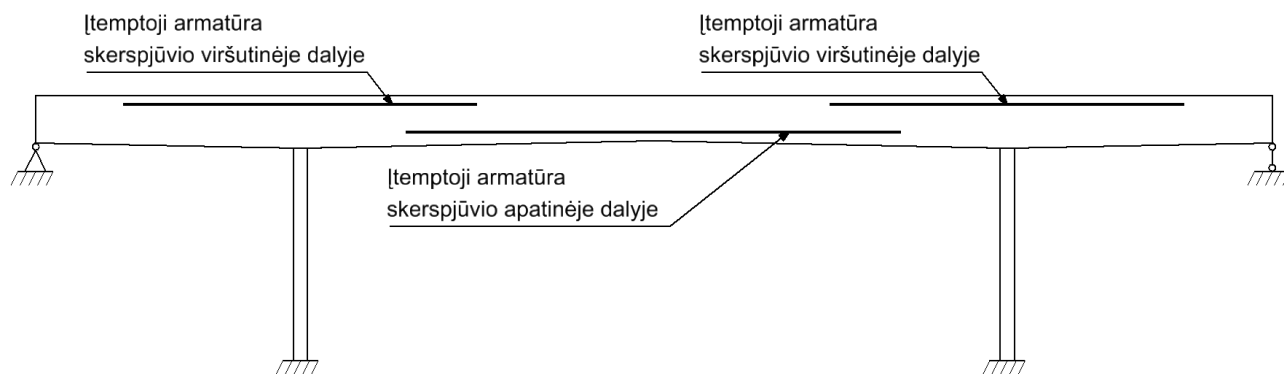


55 pav. Lenkimo momentų gaubtinių diagrama nuo kintamos apkrovos po sustiprinimo (skerspjūvio viršutinėje dalyje – raudona spalva, apatinėje dalyje – mėlyna spalva)

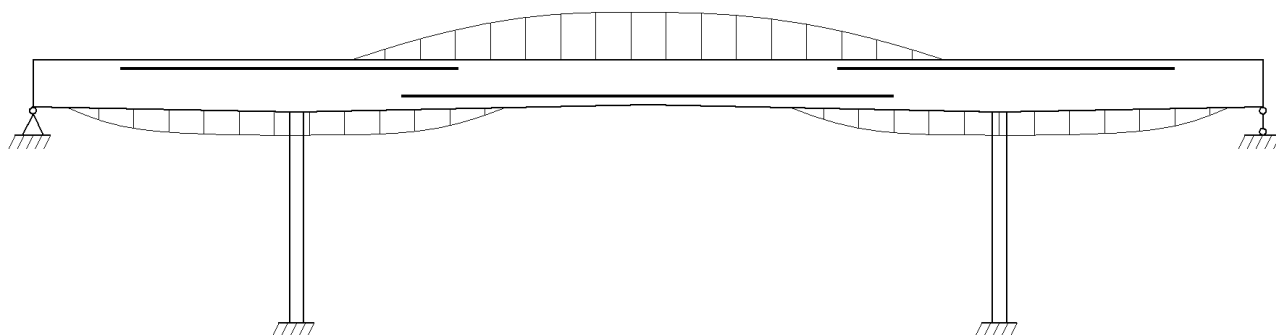
3.2. Stiprinimas, išdėstant papildomą įtemptąją armatūrą skerspjūvio viršuje ir apačioje

3.2.1. Teorinis aprašymas

Šis stiprinimo būdas plačiai naudojamas. Papildoma įtemptoji armatūra įtempiama vietose, kur jau yra iš anksto įtempta armatūra. Padidinamas pradinis įtemptos armatūros kiekis. Konstrukcinė viaduko schema išlieka nepakitusi. Tinkamai parinkus iš anksto įtemptos armatūros kiekį galima tikėtis stabilizuoti ar bent sumažinti įlinkio didėjimą.



56 pav. Įtemptosios armatūros gniūžčių išdėstymo schema



57 pav. Lenkimo momentai, atsirandantys nuo papildomos įtemptosios armatūros

Viaduko, stiprinamo II stiprinamo variantu, perdangos plokštėje papildomai įdedamos, įtemptosios armatūros bendras skerspjūvio plotas pjūvyje 1-1 (46 pav. 42 psl.) yra $450 \cdot 8 = 3600 \text{ mm}^2$. Stiprinimo metu papildomai įtempiamų vielapluoščių bendras skerspjūvio plotas 1-1 pjūvyje sudaro ~64 % pirminiame viaduko projekte numatyto įtemptosios armatūros skerspjūvio ploto 1-1 pjūvyje.

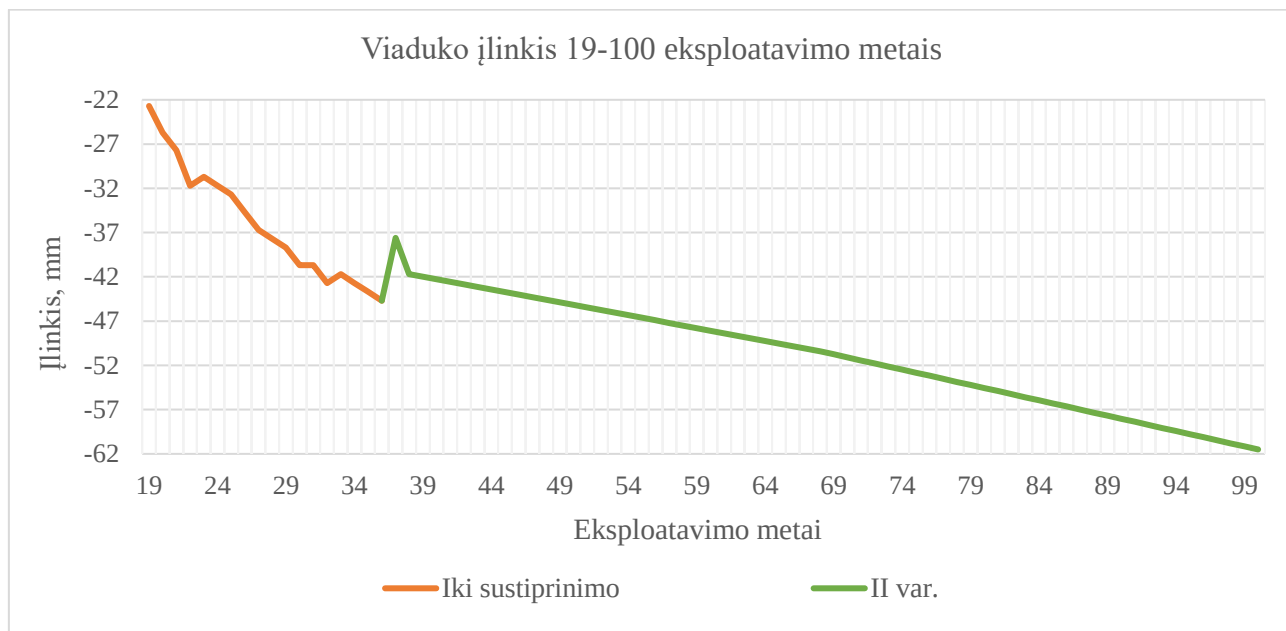
3.2.2. Gauti rezultatai

Viaduko įlinkio ir betono įtempių kitimo rezultatai po sustiprinimo yra pateikti 9 lentelėje. Betono įtempiai yra pateikti pagrindiniuose pjūviuose (pagrindiniai pjūviai pavaizduoti 46 pav. 42 psl.).

9 lentelė. II variantas. Viaduko įlinkis ir betono įtempiai pagrindiniuose pjūviuose

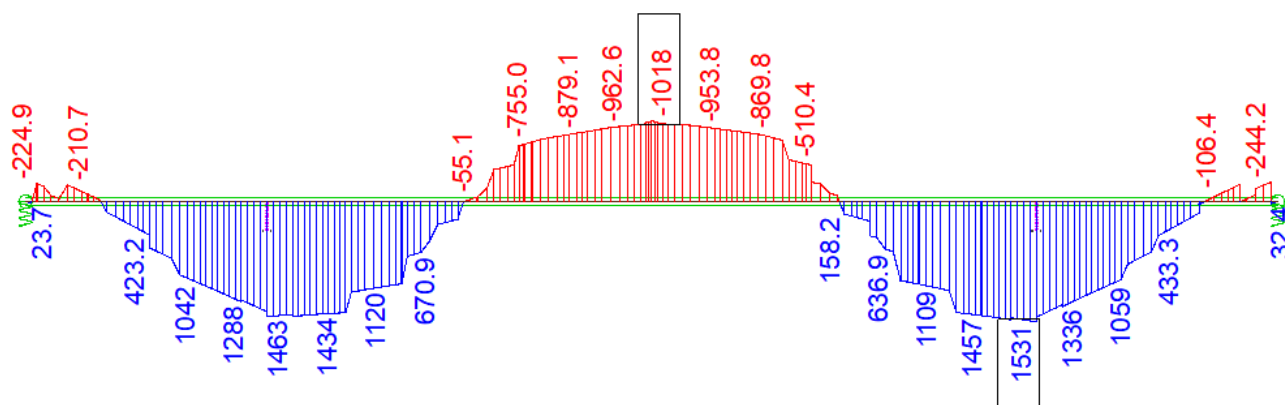
Viaduko eksploatacijos etapas	Įlinkis	Įtempiai, MPa					
		1-1		2-2		3-3	
		Virš.	Ap.	Virš.	Ap.	Virš.	Ap.
Sustiprinimas	37.6	-5.4	-3.3	-6.0	-7.5	-5.6	-1.3
Po 68 eksploatacijos metų	50.4	-5.3	1.1	-4.4	-7.7	-5.2	0.0
Po 100 eksploatacijos metų	61.5	-5.1	2.5	-4.2	-7.8	-4.3	0.8
Apkrovis kintama aut. apkrova	-	-7.2	10.6	-1.8	-11.7	-4.4	2.6

Lentelėje pateikti betono įtempiai su „-“ ženklu reiškia gniuždymą.



58 pav. Viaduko įlinkis 19-100 eksploataavimo metais, nevertinant laikinos apkrovos

Viaduko įlinkis tarpatramio viduryje laipsniškai kinta. Viaduko įlinkis prieš sustiprinimą buvo 44,7 mm. Po sustiprinimo viadukas pakilo 7,1 mm. Nuo nuolatinių apkrovų ir betono ilgalaikės elgsenos po 100 metų eksploatacijos viaduko įlinkis padidėjo nuo 37,6 mm iki 61,5 mm. 2,5 MPa betono įtempiai susidaro sijų pjūvio 1-1 (46 pav. 42 psl.), skerspjūvio apatinėje dalyje. Nuo suminės apkrovos (nuolatinės ir kintamos apkrovos) neleistini betono įtempiai susidaro pjūvyje 1-1. Jie lygūs 10,6 MPa. Dėl to šioje vietoje esantys sijų blokai supleišėja apatinėje skerspjūvio dalyje.

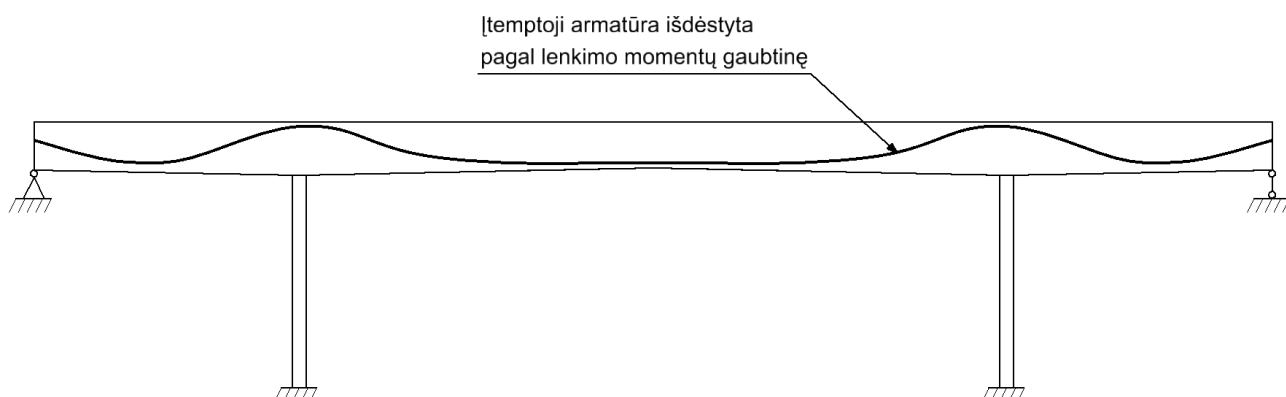


59 pav. Lenkimo momentai, atsirandantys nuo papildomos įtemptosios armatūros

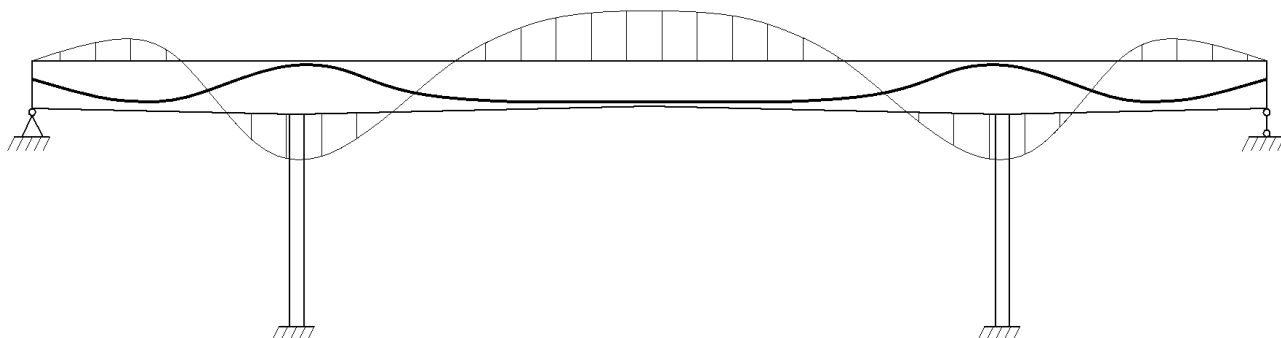
3.3. Stiprinimas, išdėstant papildomą įtemptąją armatūrą pagal lenkimo momentų gaubtinę

3.3.1. Teorinis aprašymas

Stiprinimo būdas yra paremtas lenkimo momentų diagrama. Vielų gniūžtės yra išdėstomos pagal lenkimo momentų diagramą – virš atramų įtemptoji armatūra skerspjuvio viršuje, tarpatramio viduryje įtemptoji armatūra skerspjuvio apačioje. Šį stiprinimo būdą iš kitų išskiria dvi pagrindinės ypatybės: gniūžčių padėtis kinta tiek horizontalioje, tiek vertikalioje plokštumoje; vielų gniūžtės įtempiamos nepertraukiamai per visą perdangos plokštės ilgį. Šios ypatybės lemia antrinių momentų atsiradimą. Tinkamai išdėsčius lynų gniūžtes antriniai momentai bus palankūs ir leis sumažinti įtemptosios armatūros kiekį.



60 pav. Įtemptosios armatūros gniūžčių išdėstymo pagal lenkimo momentų diagramą schema



61 pav. Lenkimo momentai, atsirandantys nuo papildomos įtemptosios armatūros

3.3.2. Gauti rezultatai

Stiprinimo būdas yra atliktas dviem variantais: a – viadukas sustiprinamas 6 papildomomis gniūžtėmis, b – 8 papildomomis gniūžtėmis.

Viaduko, stiprinamo III a stiprinamo variantu, perdangos plokštėje papildomai įdedamos, įtemptosios armatūros bendras skerspjūvio plotas pjūvyje 1-1 (46 pav. 42 psl.) yra $450 \cdot 6 = 2700 \text{ mm}^2$. Stiprinimo metu papildomai įtempiamų vielapluoščių bendras skerspjūvio plotas 1-1 pjūvyje sudaro ~48 % pirminiame viaduko projekte numatyto įtemptosios armatūros skerspjūvio ploto 1-1 pjūvyje.

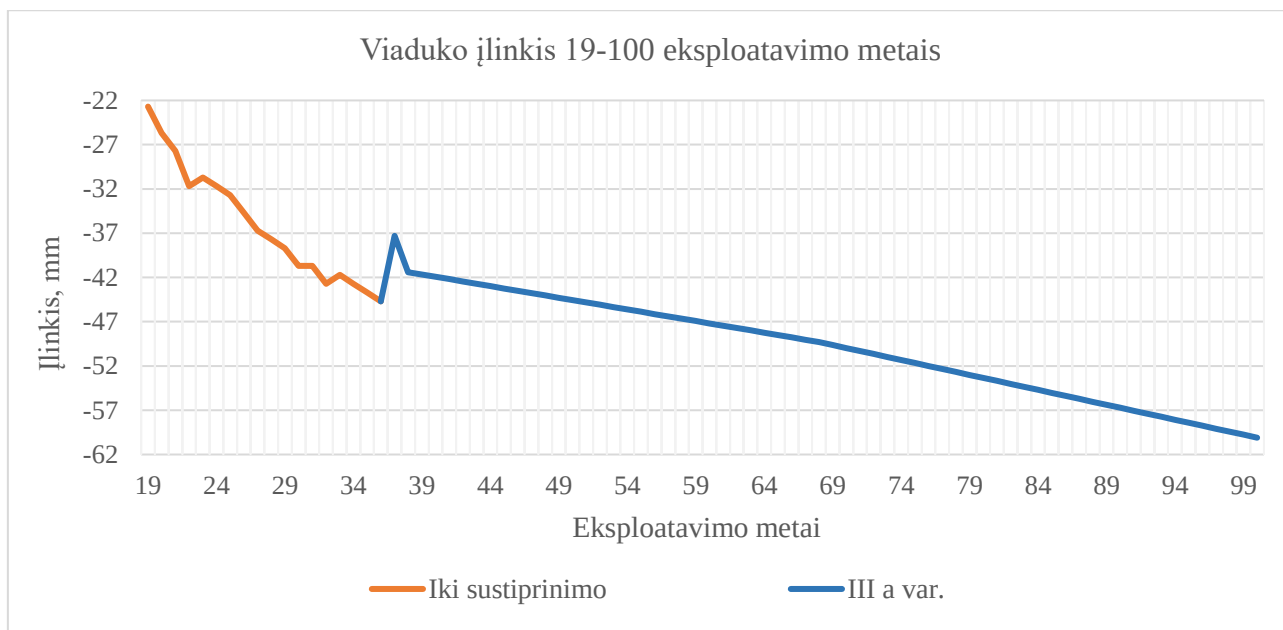
Viaduko, stiprinamo III b stiprinamo variantu, perdangos plokštėje papildomai įdedamos, įtemptosios armatūros bendras skerspjūvio plotas pjūvyje 1-1 (46 pav. 42 psl.) yra $450 \cdot 8 = 3600 \text{ mm}^2$. Stiprinimo metu papildomai įtempiamų vielapluoščių bendras skerspjūvio plotas 1-1 pjūvyje sudaro ~64 % pirminiame viaduko projekte numatyto įtemptosios armatūros skerspjūvio ploto 1-1 pjūvyje.

Viaduko įlinkio ir betono įtempių kitimo rezultatai po sustiprinimo variantų a ir b yra pateikti 10 lentelėje ir 11 lentelėje. Betono įtempiai pateikti pagrindiniuose pjūviuose (pagrindiniai pjūviai pavaizduoti 46 pav. 42 psl.).

10 lentelė. III variantas. a – 6 gniūžtės. Viaduko įlinkis ir betono įtempiai pagrindiniuose pjūviuose

Viaduko eksploatacijos etapas	Įlinkis	Įtempiai, MPa					
		1-1		2-2		3-3	
		Virš.	Ap.	Virš.	Ap.	Virš.	Ap.
Sustiprinimas	37.3	-5.0	-2.6	-6.8	-7.8	-5.6	-1.4
Po 68 eksploatacijos metų	49.3	-5.2	1.2	-5.4	-7.7	-5.2	-0.2
Po 100 eksploatacijos metų	60.1	-5.3	2.6	-4.7	-7.8	-4.6	0.9
Apkrovus kintama aut. apkrova	-	-7.0	10.7	-2.3	-11.8	-4.8	2.9

Lentelėje pateikti betono įtempiai su „-“ ženklu reiškia gniuždymą.



62 pav. Viaduko įlinkis 19-100 eksploatavimo metais, nevertinant laikinos apkrovos

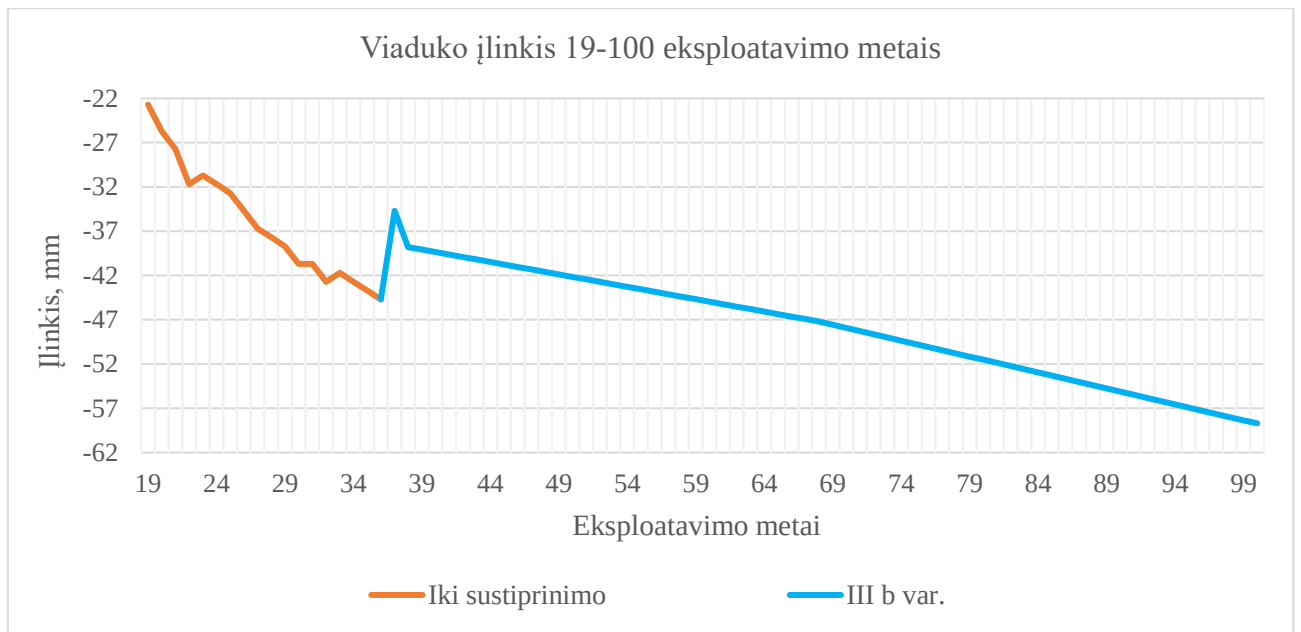
Viaduko įlinkis tarpatramio viduryje laipsniškai kinta. Viaduko įlinkis prieš sustiprinimą buvo 44,7 mm. Po sustiprinimo viadukas pakilo 7,4 mm. Nuo nuolatinių apkrovų ir betono ilgalaikės elgsenos po 100 metų eksploatacijos viaduko įlinkis padidėjo nuo 37,3 mm iki 60,1 mm; 2,6 MPa betono įtempiai susidaro sijų pjūvio 1-1 (46 pav. 42 psl.), skerspjūvio apatinėje dalyje. Nuo suminės apkrovos (nuolatinės ir kintamos apkrovos) neleistini betono įtempiai susidaro pjūvyje 1-1. Jie lygūs 10,7 MPa. Dėl to šioje vietoje esantys sijų blokai supleišėja apatinėje skerspjūvio dalyje.

11 lentelė. III variantas. b – 8 gniūžtės. Viaduko įlinkis ir betono įtempiai pagrindiniuose pjūviuose

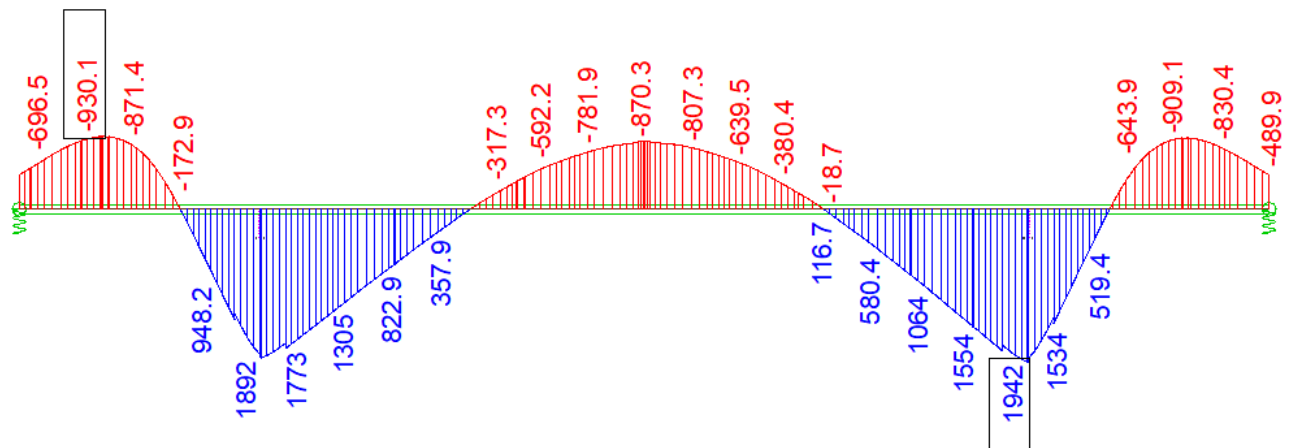
Viaduko eksploatacijos etapas	Įlinkis	Įtempiai, MPa					
		1-1		2-2		3-3	
		Virš.	Ap.	Virš.	Ap.	Virš.	Ap.
Sustiprinimas	34.7	-5.3	-5.6	-7.4	-6.9	-5.9	-0.9
Po 68 eksploatacijos metų	47.2	-5.5	0.3	-5.8	-7.6	-5.6	-0.6
Po 100 eksploatacijos metų	58.7	-5.6	1.9	-5.2	-7.8	-5.0	0.6
Apkrovus kintama aut. apkrova	-	-7.4	10.0	-2.7	-11.6	-5.2	2.0

Lentelėje pateikti betono įtempiai su „-“ ženklu reiškia gniuždymą.

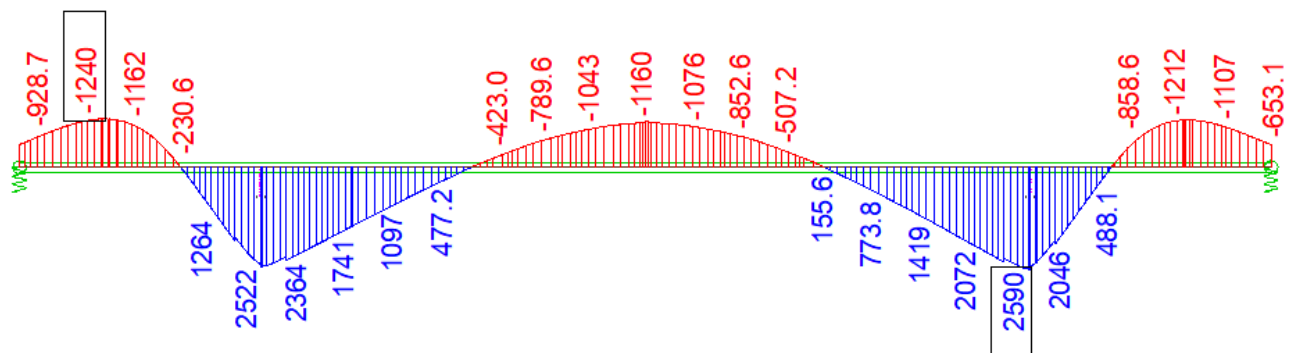
Viaduko įlinkis tarpatramio viduryje laipsniškai kinta. Viaduko įlinkis prieš sustiprinimą buvo 44,7 mm. Po sustiprinimo viadukas pakilo 10,0 mm. Nuo nuolatinių apkrovų ir betono ilgalaikės elgsenos po 100 metų eksploatacijos viaduko įlinkis padidėjo nuo 34,7 mm iki 58,7 mm; 1,9 MPa betono įtempiai susidaro sijų pjūvio 1-1 (46 pav. 42 psl.), skerspjūvio apatinėje dalyje. Nuo suminės apkrovos (nuolatinės ir kintamos apkrovos) neleistini betono įtempiai susidaro pjūvyje 1-1. Jie lygūs 10,0 MPa. Dėl to šioje vietoje esantys sijų blokai supleišėja apatinėje skerspjūvio dalyje.



63 pav. Viaduko įlinkis 19-100 eksploatavimo metais, nevertinant laikinos apkrovos



64 pav. III a variantas. Lenkimo momentai, atsirandantys nuo papildomos įtemptosios armatūros



65 pav. III b variantas. Lenkimo momentai, atsirandantys nuo papildomos įtemptosios armatūros

3.4. Viaduko stiprinimo būdų palyginimas

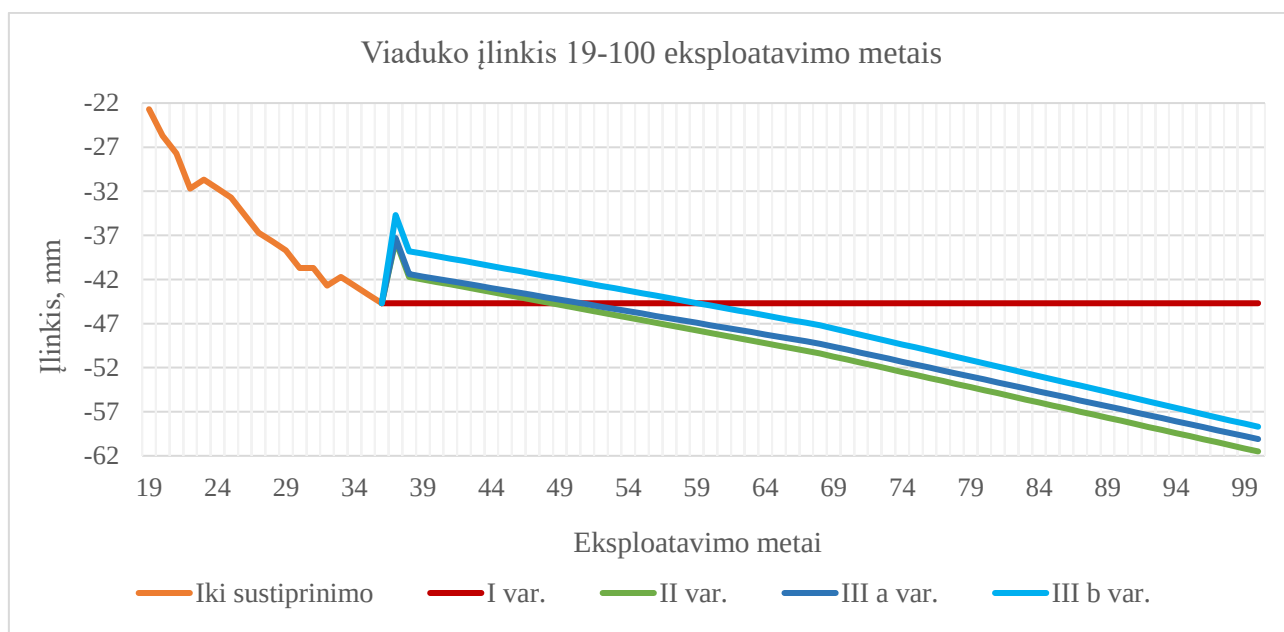
Sustiprinus viaduką I stiprinimo būdu, 48,0 m tarpatramio įlinkis nekinta, dėl tarpinės atramos toje vietoje (žr. 12 lentelė). II ir III stiprinimo būdais viaduko įlinkis kinta panašia tendencija. Sustiprinus konstrukciją tarpatramio vidurys pakyla 7–10 mm, o po 100 metų eksploatacijos laikotarpio nusileidžia 14–24 mm. Vertinant vien viaduko 48,0 m tarpatramio vidurio įlinkio kitimą I stiprinimo variantas atrodytų tinkamiausias. Tačiau įrengus šį stiprinimo variantą, dėl lenkimo momentų persiskirstymo, supleišėja tarpatramių tarp atramų Nr. 2 ir Nr. 5 bei Nr. 5 ir Nr. 3 tarpatramio vidurio (blokai B-3 ir B-4) sijos apatinė dalis. Taigi I viaduko stiprinimo variantas problemos neišsprendžia tik problemą perkelia į kitas viaduko perdangos vietas.

12 lentelė. Rezultatų palyginimas. Viaduko įlinkis ir betono įtempiai pagrindiniuose pjūviuose

Iki sustiprinimo							
Viaduko eksploatacijos etapas	Įlinkis	Įtempiai, MPa					
		1-1		2-2		3-3	
		Virš.	Ap.	Virš.	Ap.	Virš.	Ap.
Iki sustiprinimo	-4.8	0.1	-5.2	-8.6	-4.8	0.1	-4.8
I variantas							
Sustiprinimas	44.7	-4.4	0.1	-5.2	-7.9	-4.6	0.1
Po 68 eksploatacijos metų	44.7	-3.6	1.2	-4.9	-7.3	-4.0	0.7
Po 100 eksploatacijos metų	44.7	-3.5	1.7	-4.5	-6.7	-3.3	1.4
Apkrovus kintama aut. apkrova	-	-2.5	3.3	-3.5	-8.0	-5.2	5.3
II variantas							
Sustiprinimas	37.6	-5.4	-3.3	-6.0	-7.5	-5.6	-1.3
Po 68 eksploatacijos metų	50.4	-5.3	1.1	-4.4	-7.7	-5.2	0.0
Po 100 eksploatacijos metų	61.5	-5.1	2.5	-4.2	-7.8	-4.3	0.8
Apkrovus kintama aut. apkrova	-	-7.2	10.6	-1.8	-11.7	-4.4	2.6
III variantas. a - 6 gniūžtės							
Sustiprinimas	37.3	-5.0	-2.6	-6.8	-7.8	-5.6	-1.4
Po 68 eksploatacijos metų	49.3	-5.2	1.2	-5.4	-7.7	-5.2	-0.2
Po 100 eksploatacijos metų	60.1	-5.3	2.6	-4.7	-7.8	-4.6	0.9
Apkrovus kintama aut. apkrova	-	-7.0	10.7	-2.3	-11.8	-4.8	2.9
III variantas. b - 8 gniūžtės							
Sustiprinimas	34.7	-5.3	-5.6	-7.4	-6.9	-5.9	-0.9
Po 68 eksploatacijos metų	47.2	-5.5	0.3	-5.8	-7.6	-5.6	-0.6
Po 100 eksploatacijos metų	58.7	-5.6	1.9	-5.2	-7.8	-5.0	0.6
Apkrovus kintama aut. apkrova	-	-7.4	10.0	-2.7	-11.6	-5.2	2.0

Sustiprinus viaduką II ir III stiprinimo variantais, įlinkio didėjimas yra pristabdomas. Dėl ilgalaikės betono elgsenos, betono įtempiai neviršija leistinos normos ($f_{ctk0,05} = 2,0 \text{ MPa}$). Tiek vienu, tiek kitu stiprinimo būdu viaduko įlinkio ir betono įtempių reikšmių skirtumas nėra didelis (žr. 12 lentelė). Iš skaitiniame modelyje gautų rezultatų būtų galima teigti, kad II ir III stiprinimo būdai yra beveik lygiaverčiai. III stiprinimo būdu sustiprinus viaduką, gaunami ~3 mm mažesni įlinkiai.

Stiprinimo būdus lyginant pagal tai po kiek laiko viaduko perdangos įlinkis pasiekia įlinkį, buvusį iki sustiprinimo, gaunami tokie rezultatai: II var. – po ~13 metų, III a var. – po ~15 metų, III b var. – po ~24 metų. Stiprinimo variantus lyginant šiuo aspektu III b stiprinimo būdas yra pranašiausias.



66 pav. Viaduko įlinkis 19-100 eksploatavimo metais, nevertinant laikinos apkrovos

Atliktų skaičiavimų paklaidos ir netikslumai galimi dėl šių priežasčių: skaičiavimas pagal tiesinį modelį (o ne pagal plastiškąjį modelį), netinkamas betono ilgalaikės elgsenos įvertinimas (valkšnumo poveikiai) [18, 19], netinkamas įtemptosios armatūros ilgalaikės elgsenos įvertinimas (vielapluoščių relaksacija ir betono deformacijos gniūžčių inkaravimo vietose).

Siekiant rasti efektyvesnį įtemptojo gelžbetonio, dėžinio skerspjuvio tiltų (viadukų) stiprinimo būdą nei nagrinėti magistro baigiamajame projekte, reikalinga tolimesnė analizė ir skaitinis modeliavimas. Stiprinimas gali būti atliekamas, naudojant kelis skirtingus stiprinimo būdus vienu metu, pavyzdžiui: kartu su papildomos iš anksto įtemptos armatūros lynais įrengiant stiprinimą anglies pluoštu, fibromis armuotu polimeru (FRP) ar plieninėmis plokštėmis.

Išvados

- 1) Atlikus užsienio šalyse naudojamų įtemptojo gelžbetonio, dėžinio skerspjūvio tiltų perdangų stiprinimo būdų analizę, nustatyta, kad šio tipo tiltus efektyviausia stiprinti papildoma įtemptąja armatūra. Atlikus Lietuvoje taikomų, minėtų tiltų stiprinimo būdų analizę nustatyta, kad mūsų šalyje vyrauja trys pagrindiniai tiltų stiprinimo būdai (1 – stiprinimas, įrengiant papildomą tarpinę atramą, 2 – stiprinimas, išdėstant papildomą įtemptąją armatūrą skerspjūvio viršuje ir apačioje, 3 – stiprinimas, išdėstant papildomą įtemptąją armatūrą pagal lenkimo momentų gaubtinę), tačiau nėra aišku, kuris metodas yra efektyviausias.
- 2) Atlikus tiriamo objekto skaitinį modeliavimą, nustatyta, kad jo viduriniojo tarpatramio perdangos įlinkis atitinka realaus viaduko įlinkį praėjus 19–36 metų eksploatacijos laikotarpiui, kai įtemptosios armatūros nuostoliai dėl korozijos yra ~16 %.
- 3) Išanalizavus 3 stiprinimo būdus (1 – stiprinimas, įrengiant papildomą tarpinę atramą, 2 – stiprinimas, išdėstant papildomą įtemptąją armatūrą skerspjūvio viršuje ir apačioje, 3 – stiprinimas, išdėstant papildomą įtemptąją armatūrą pagal lenkimo momentų gaubtinę), nustatyta, kad naudojant I stiprinimo būdą viaduko perdangos įlinkis stabilizuojasi, tačiau neįrengus papildomų įtemptosios armatūros gniūžčių, trūkinėja kitos viaduko vietos (blokai B–3 ir B–4). Naudojant II ir III stiprinimo būdus viaduko įlinkis nestabilizuojasi. Ilgainiui įlinkis vėl pradeda didėti dėl šių priežasčių: stiprinimo metu nėra sustabdoma esamų vielapluoščių korozija; dėl naujų gniūžčių įtempimo persiskirsto įtempiai betone ir konstrukcijoje.
- 4) Išanalizavus užsienyje ir Lietuvoje naudotus stiprinimo būdus, nustatyta, kad efektyviausias stiprinimo būdas yra stiprinimas papildoma įtemptąja armatūra. Toks stiprinimo būdas sumažina įlinkio didėjimą, bet visiškai jo nestabilizuoja. Išanalizuoti tiltų stiprinimo būdai nėra pakankamai efektyvūs, siekiant sustabdyti įlinkio didėjimą įtemptojo gelžbetonio, dėžinio skerspjūvio tiltų perdangose. Reikalinga tolimesnė analizė ir skaitinis modeliavimas siekiant rasti tokį stiprinimo būdą, kuris pristabdytų įlinkio didėjimą tiek, kad konstrukcija nebepleišėtų.

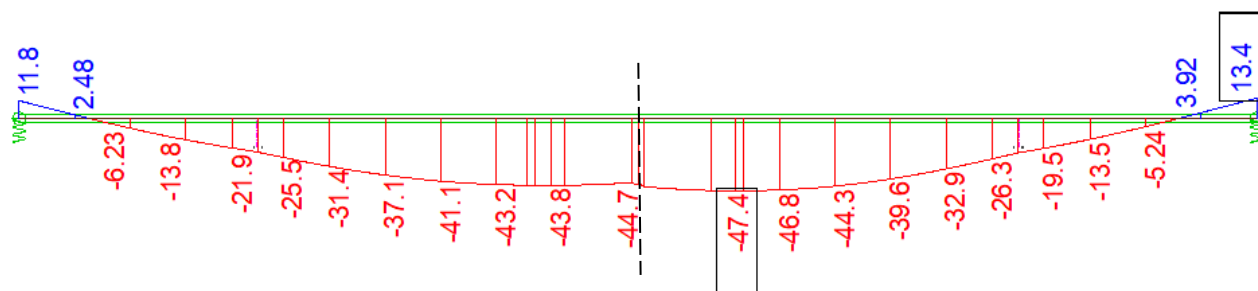
Literatūros sąrašas

1. NOTKUS Algirdas J. *Tiltų projektavimo pagrindai*. Vilnius: Technika, 2010, 23;
2. ZADLAUSKAS, Saulius. *Statinių ir dinaminių apkrovų sukeltas gelžbetoninių tiltų pleišėjimas ir deformacijos*. Daktaro disertacija. Kaunas, 2013;
3. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS [LST EN 1992-2:2006/NA:2011]. *Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 2 dalis. Gelžbetoniniai tiltai. Projektavimo ir konstravimo taisyklės*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2011;
4. MASSICOTTE, Bruno, Andre Picard, Yvon Gaumond ir Claude Quellet. Strengthening of a Long Span Prestressed Segmental Box Girder Bridge. *PCI Journal*, JAV, 1994 gegužė – birželis;
5. MASSICOTTE, Bruno, Andre Picard. Monitoring of a Prestressed Segmental Box Girder Bridge During Strengthening. *PCI JOURNAL*, JAV, gegužė – birželis 1994, pp. 66-80;
6. CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION [CSA-S6-74]. *Design of Highway Bridges*. Canadian Standards Association, Willowdale. Ontario, Canada, 1974;
7. POST-TENSIONING INSTITUTE. *PTI Post-Tensioning Manual. Fifth Edition*. Post-Tensioning Institute. Phoenix, AZ, 1990;
8. GUO, Tong, Zheheng Chen, Tie Liu ir Dazhang Han. Time-dependent reliability of strengthened PSC box-girder bridge using phased and incremental static analyses. *Engineering Structures* 117, Nanjing, PR China, 2016, pp. 358–371;
9. LUO Q.Z., Y.M. Wu. Experimental studies on shear lag of box girders. *Engineering Structures* 24, Hong Kong, China, 2002, pp. 469-477;
10. BAZANT, ZP., Q. Yu ir G.H. Li. Excessive deflections of record-span prestressed box girder. *ACI Concrete Int* 2010, pp. 44–52;
11. ROSENBOOM Owen, Catrina Walter. Strengthening of prestressed concrete girders with composites: Installation, design and inspection. *Construction and Building Materials* 23, Hong Kong, China, 2009, pp. 1495–1507;
12. KRISTEK V, Z. Bazant. Shear lag effect and uncertainty in concrete box girder creep. *Journal Struct*, Anglija, 1987, pp. 557–74;
13. YANG, I.H. Uncertainty and sensitivity analysis of time-dependent effects in concrete structures. *Journal Struct*, Anglija, 2007, pp. 1366–1374;
14. *Betonas, betono klasės* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2018-06-16]. Prieiga per: www.statybajums.lt/temos/konstrukcijos-fasadai-medziagos/betonas-betonu-klases;
15. *Google žemėlapiai* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2018-06-16]. Prieiga per: <https://www.google.com/maps/@54.9470154,24.9672266,3a,60y,341.88h,87.94t/data=!3m6!1e1!3m4!1sn3qhlgWPf8QM5Qucwrjxwg!2e0!7i13312!8i6656>;
16. *Google žemėlapiai* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2018-12-06]. Prieiga per:

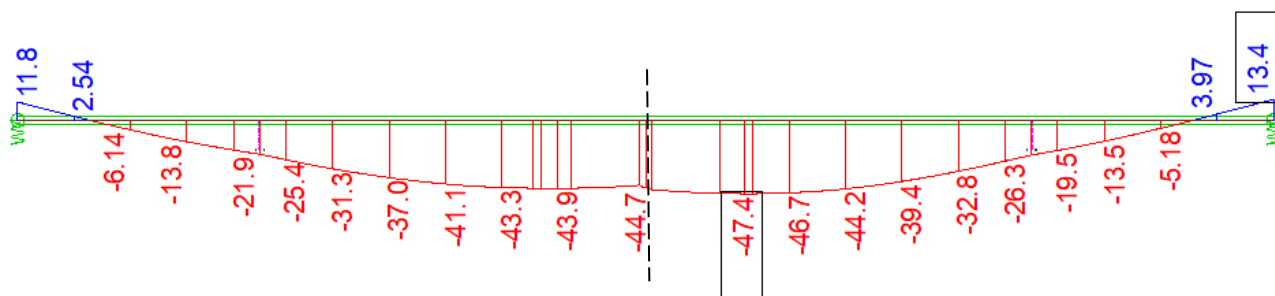
<https://www.google.com/maps/@55.0383615,23.8239045,3a,75y,73.12h,96.17t/data=!3m6!1e1!3m4!1s36-r5Wz3sRYuiLFLB-T29w!2e0!7i13312!8i6656;>

17. BAZANT, Z.P. and Baweja, S. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: ModelB3. *Materials and Structures* 28, 1995, pp. 357-367;
18. BAZANT, Z.P., Hon. M. Asce; Qiang Yu ir Guang-Hua Li. Excessive Long-Time Deflections of Prestressed Box Girders. I: Record-Span Bridge in Palau and Other Paradigms. *Journal of Structural Engineering*, 2012 birželis, pp. 676-686;
19. BAZANT, Z.P., Hon. M. Asce; Qiang Yu ir Guang-Hua Li. Excessive Long-Time Deflections of Prestressed Box Girders. II: Numerical Analysis and Lessons Learned. *Journal of Structural Engineering*, 2012 birželis, pp. 687-696;
20. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS [LST EN 1992-1-1]. *Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.

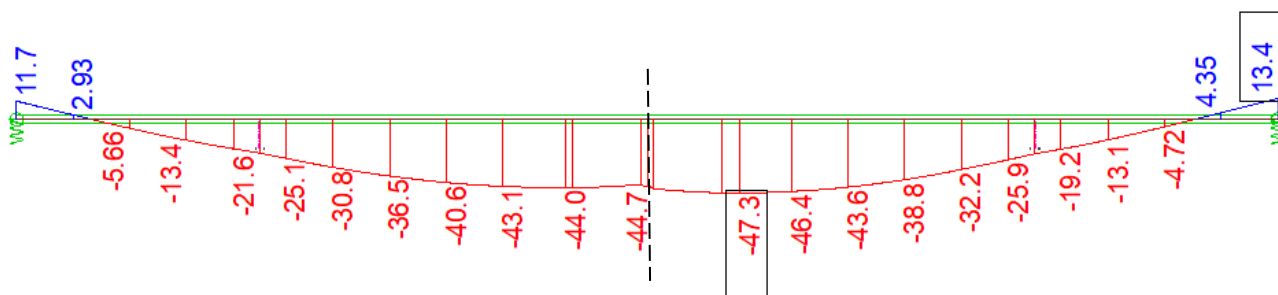
Įlinkiai ir betono įtempiai gauti, sustiprinus viaduką I stiprinimo būdu



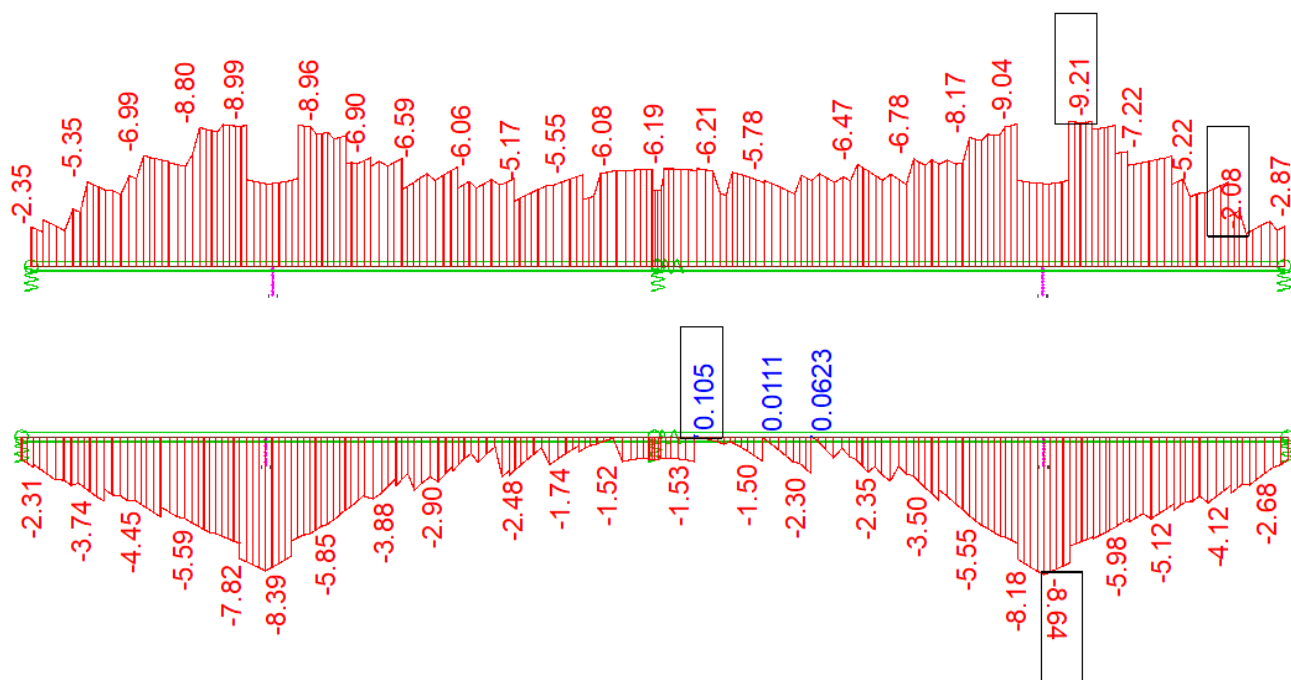
1.1 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio įlinkis po sustiprinimo, nevertinant laikinos apkrovos (mm)



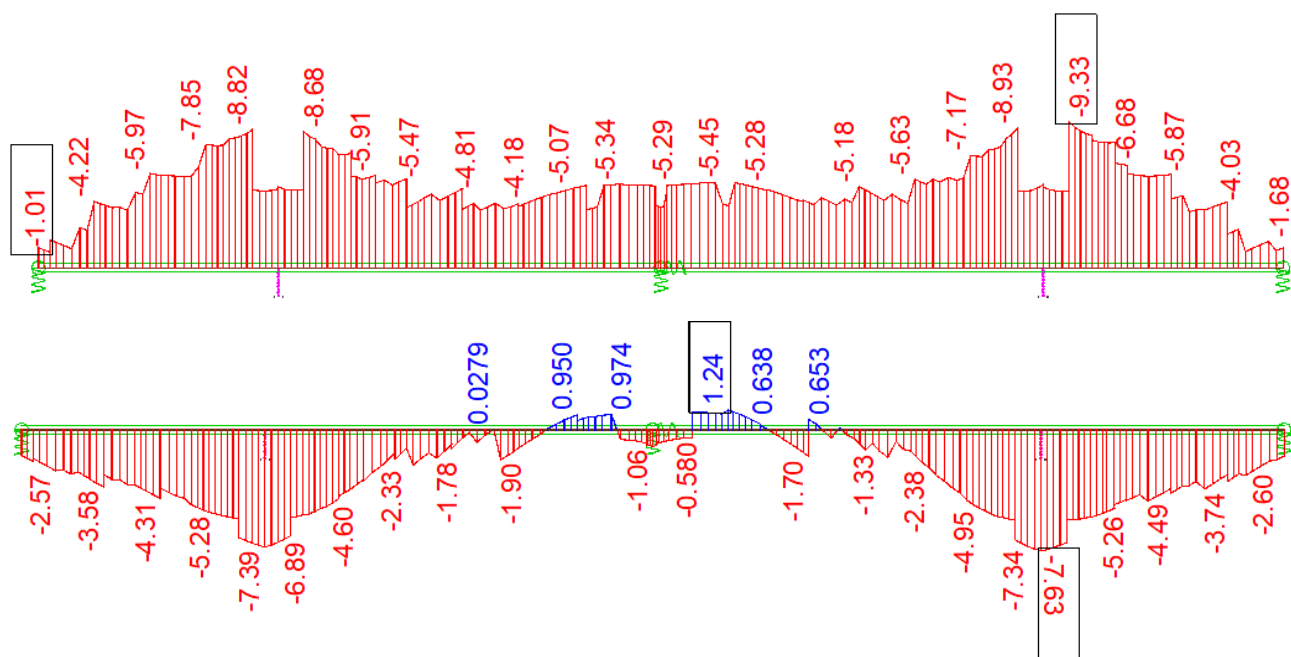
1.2 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio įlinkis po 68 metų eksploatavimo, nevertinant laikinos apkrovos (mm)



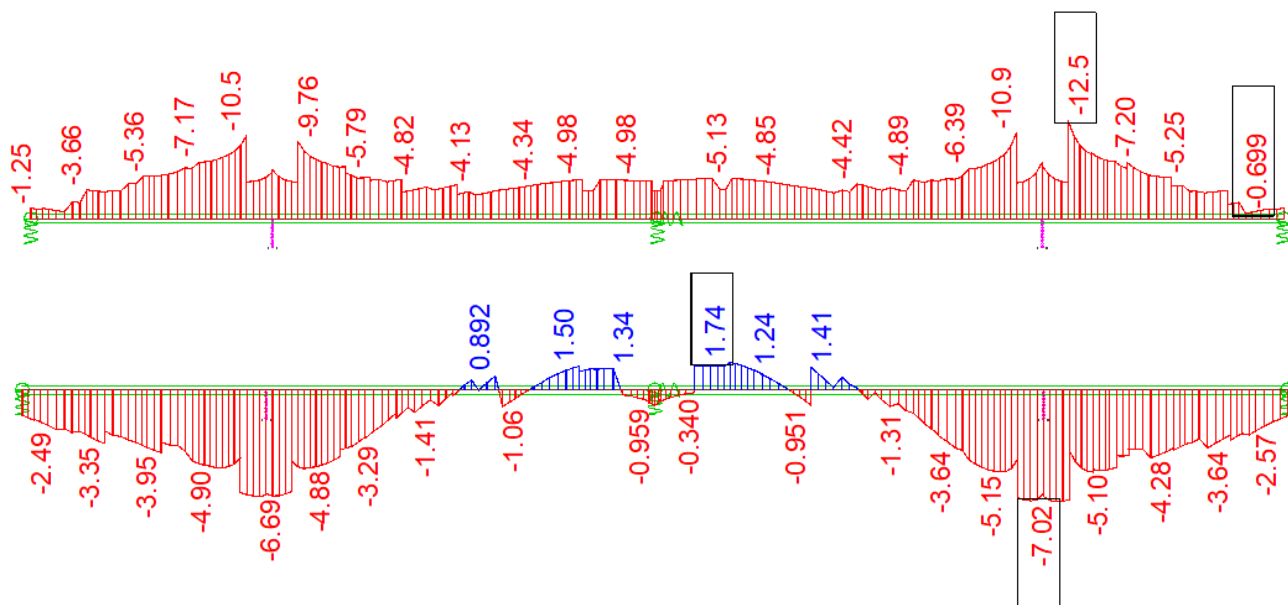
1.3 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio įlinkis po 100 metų eksploatavimo, nevertinant laikinos apkrovos (mm)



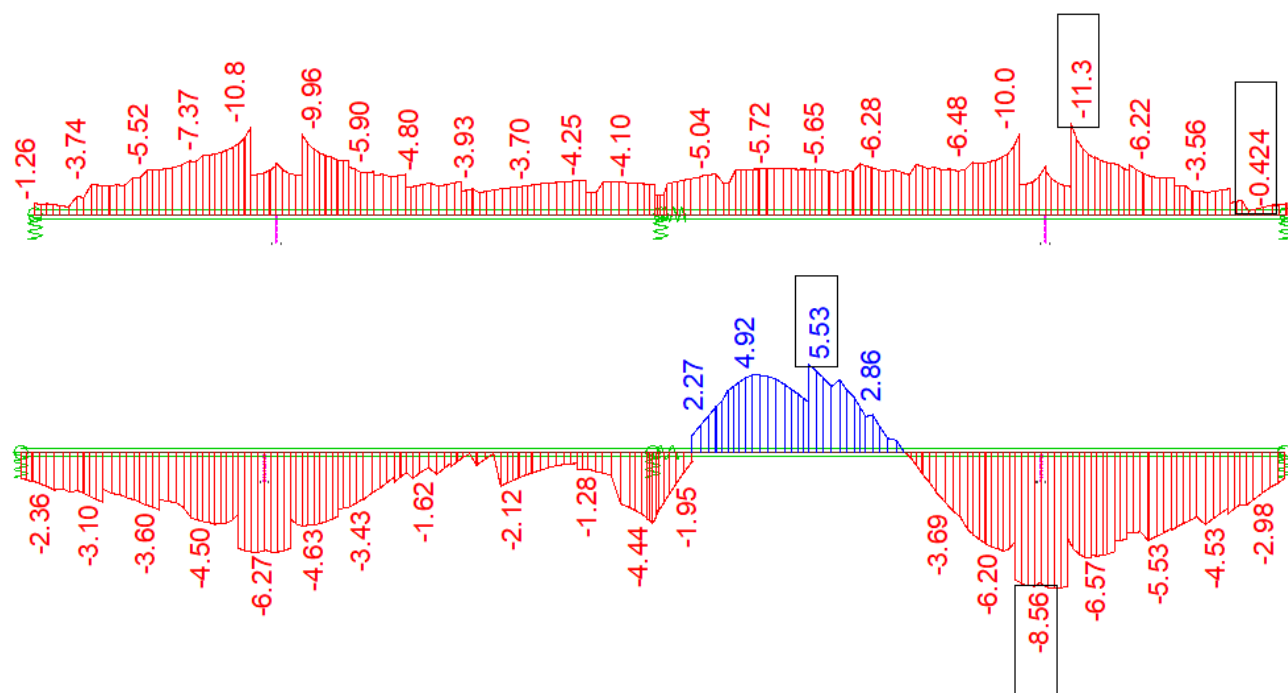
1.4 pav. Betono įtempiai sijoje išilgai viaduko po sustiprinimo, nevertinant laikinos apkrovos (MPa) (viršuje – įtempiai skerspjūvio viršuje, apačioje – įtempiai skerspjūvio apačioje)



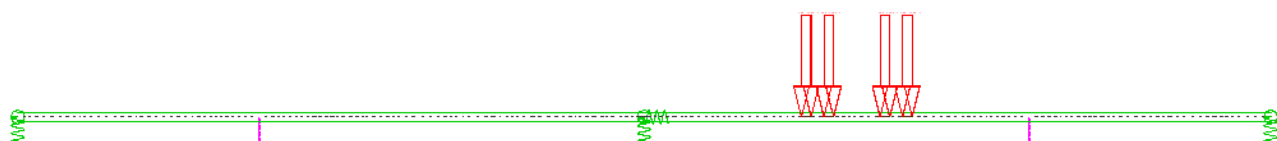
1.5 pav. Betono įtempiai sijoje išilgai viaduko po 68 metų eksploatavimo, nevertinant laikinos apkrovos (MPa) (viršuje – įtempiai skerspjūvio viršuje, apačioje – įtempiai skerspjūvio apačioje)



1.6 pav. Betono įtempiai sijoje išilgai viaduko po 100 metų eksploatavimo, nevertinant laikinos apkrovos (MPa) (viršuje – įtempiai skerspjūvio viršuje, apačioje – įtempiai skerspjūvio apačioje)

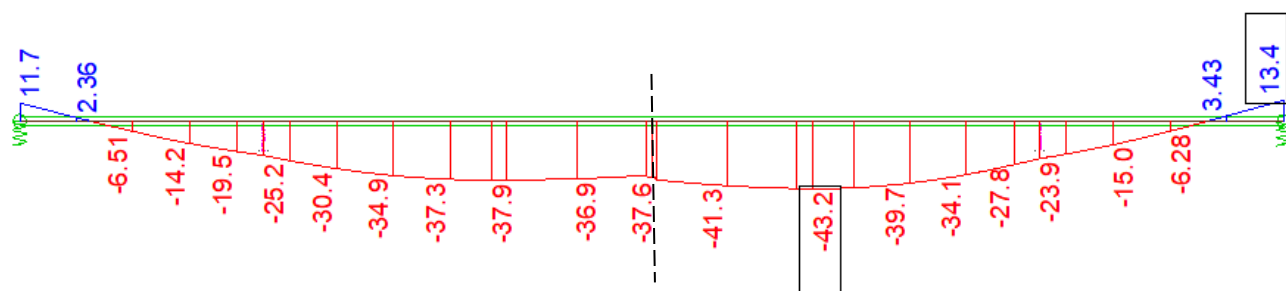


1.7 pav. Betono įtempiai sijoje išilgai viaduko po 100 metų eksploatavimo, pridėjus laikinę apkrovą (MPa) (viršuje – įtempiai skerspjūvio viršuje, apačioje – įtempiai skerspjūvio apačioje)

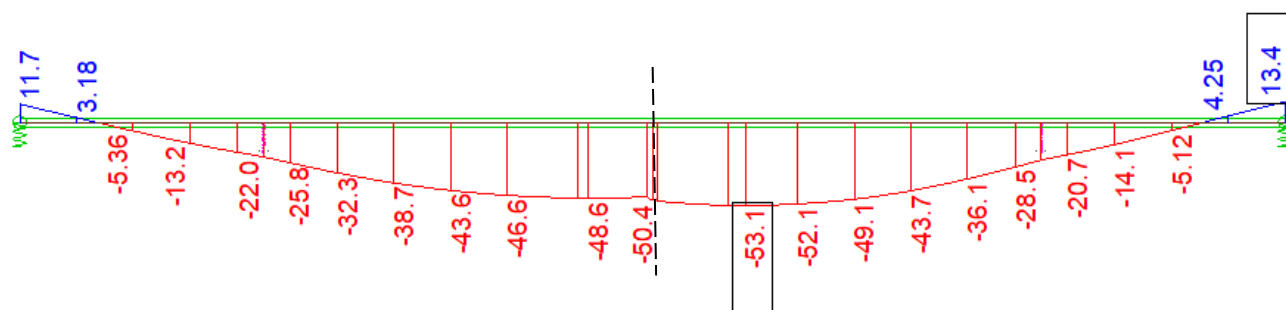


1.8 pav. Laikinos apkrovos vieta išilgai perdangos plokštės

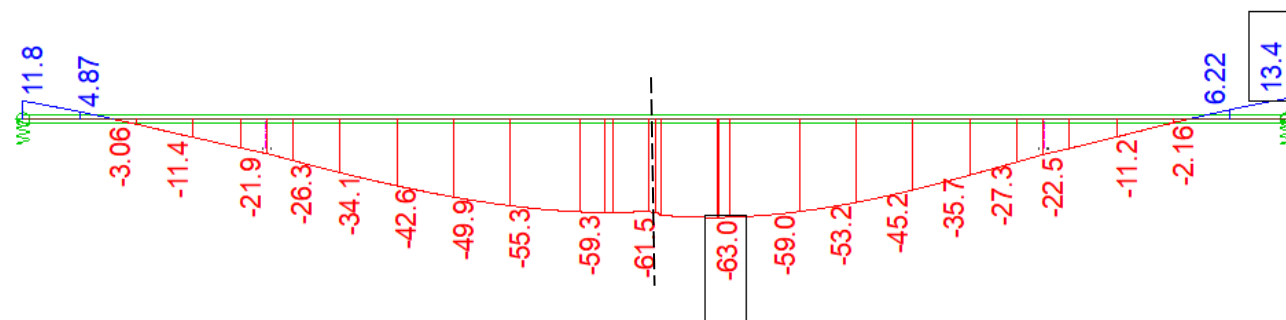
Įlinkiai ir betono įtempiai gauti, sustiprinus viaduką II stiprinimo būdu



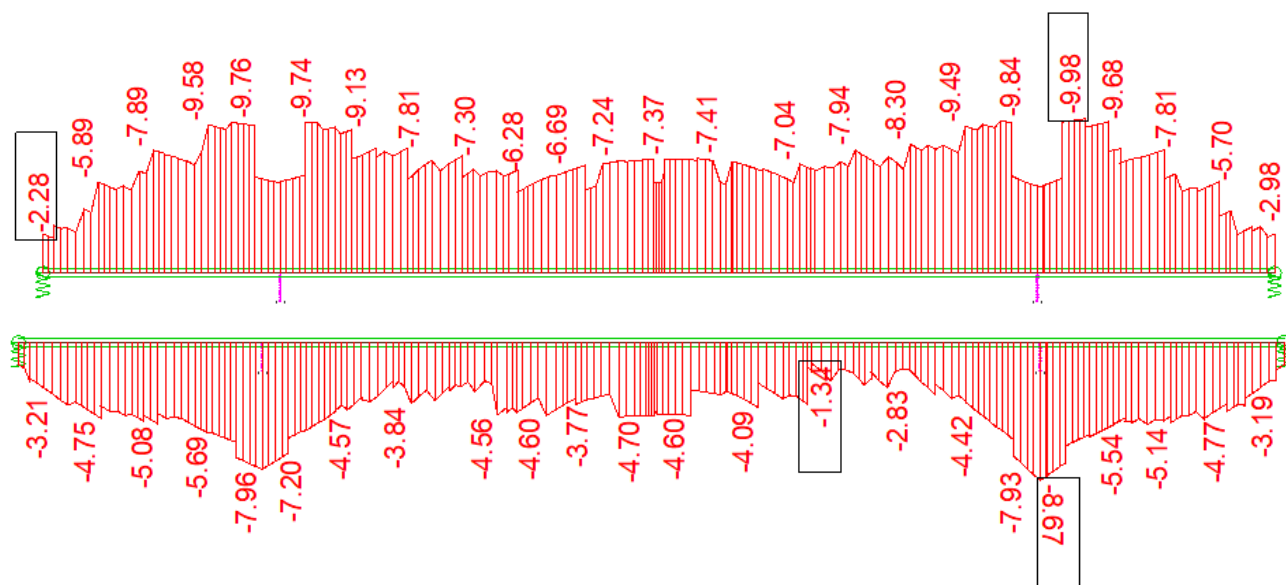
2.1 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio įlinkis po sustiprinimo, nevertinant laikinos apkrovos (mm)



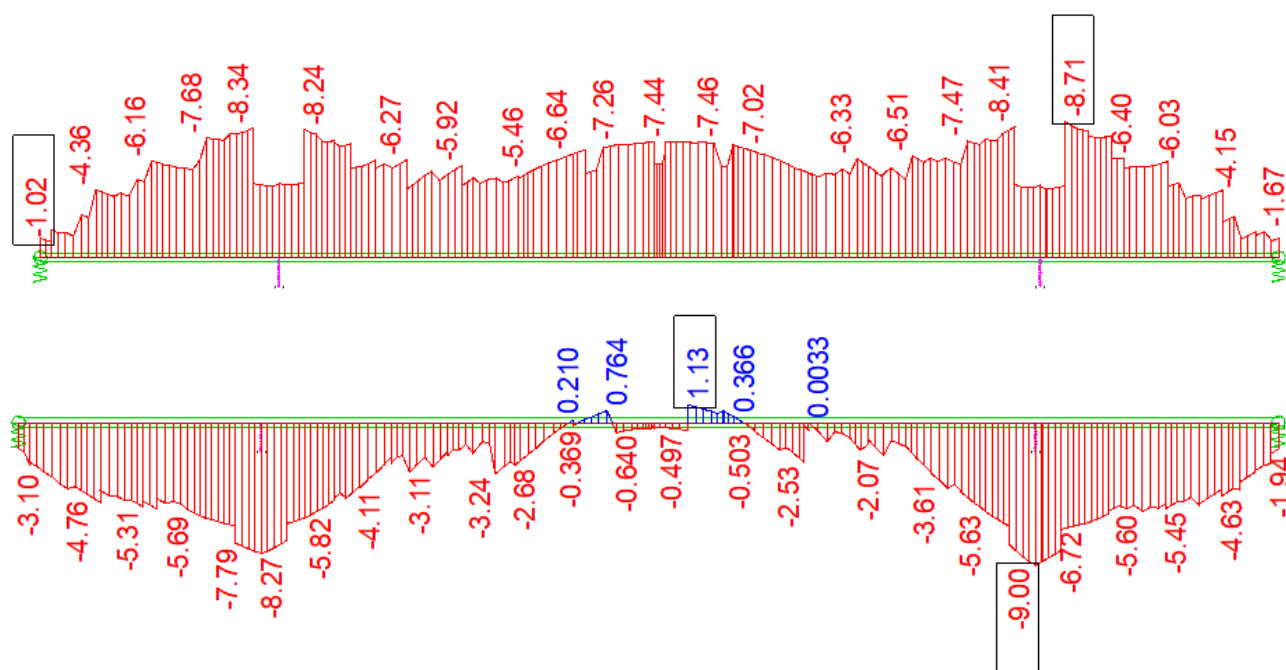
2.2 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio įlinkis po 68 metų eksploatavimo, nevertinant laikinos apkrovos (mm)



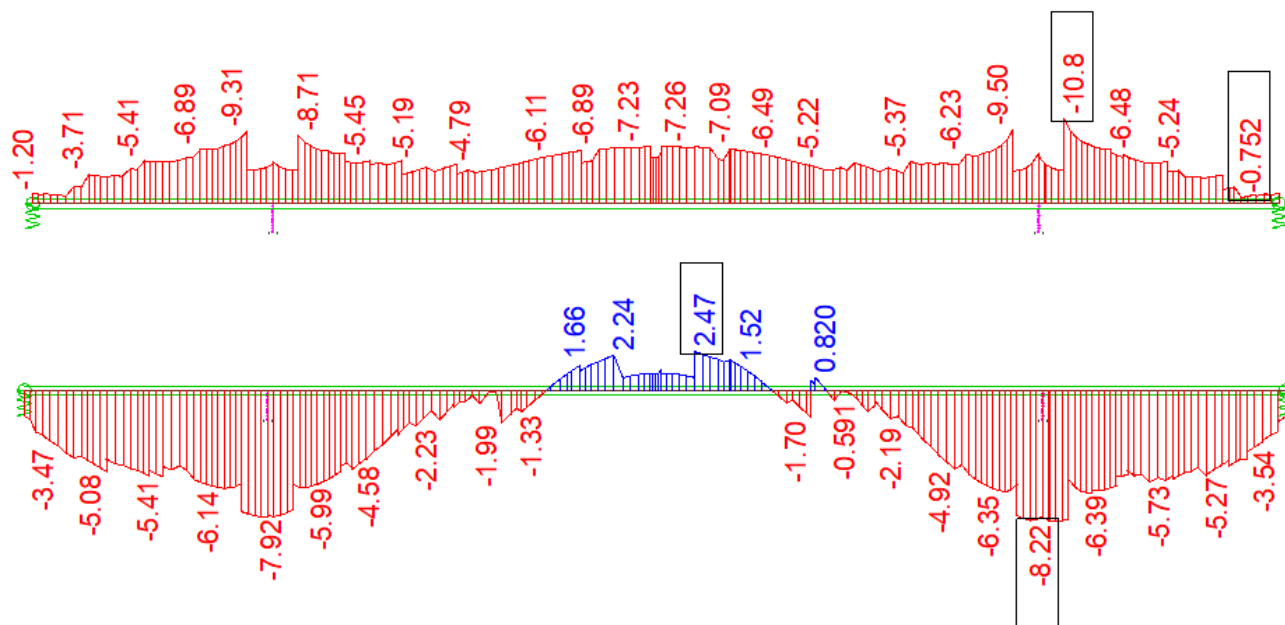
2.3 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio įlinkis po 100 metų eksploatavimo, nevertinant laikinos apkrovos (mm)



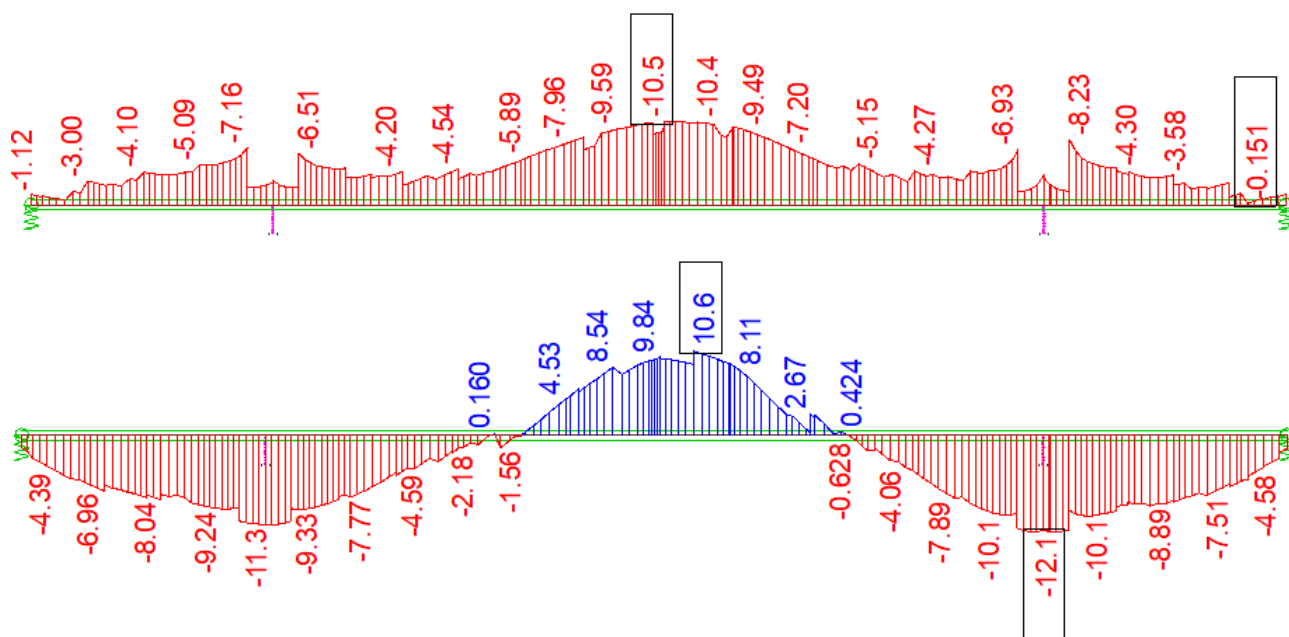
2.4 pav. Betono įtempiai sijoje išilgai viaduko po sustiprinimo, nevertinant laikinos apkrovos (MPa) (viršuje – įtempiai skerspjūvio viršuje, apačioje – įtempiai skerspjūvio apačioje)



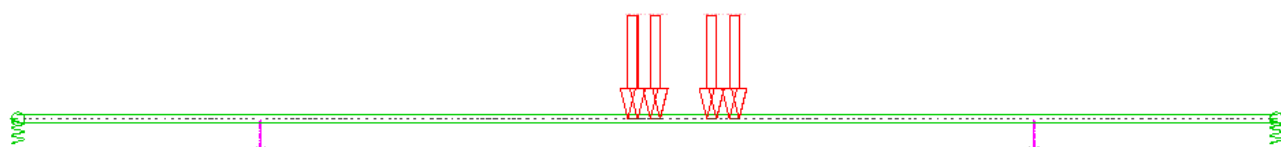
2.5 pav. Betono įtempiai sijoje išilgai viaduko po 68 metų eksploatavimo, nevertinant laikinos apkrovos (MPa) (viršuje – įtempiai skerspjūvio viršuje, apačioje – įtempiai skerspjūvio apačioje)



2.6 pav. Betono įtempiai sijoje išilgai viaduko po 100 metų eksploatavimo, nevertinant laikinos apkrovos (MPa) (viršuje – įtempiai skerspjūvio viršuje, apačioje – įtempiai skerspjūvio apačioje)

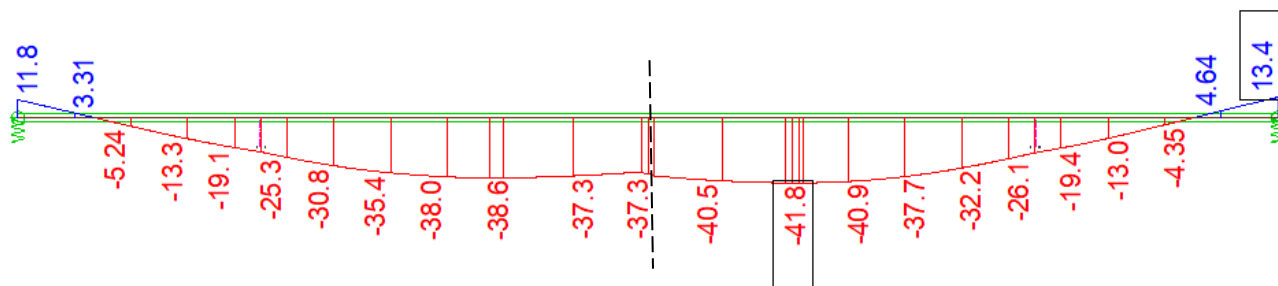


2.7 pav. Betono įtempiai sijoje išilgai viaduko po 100 metų eksploatavimo, pridėjus laikinę apkrovą (MPa) (viršuje – įtempiai skerspjūvio viršuje, apačioje – įtempiai skerspjūvio apačioje)

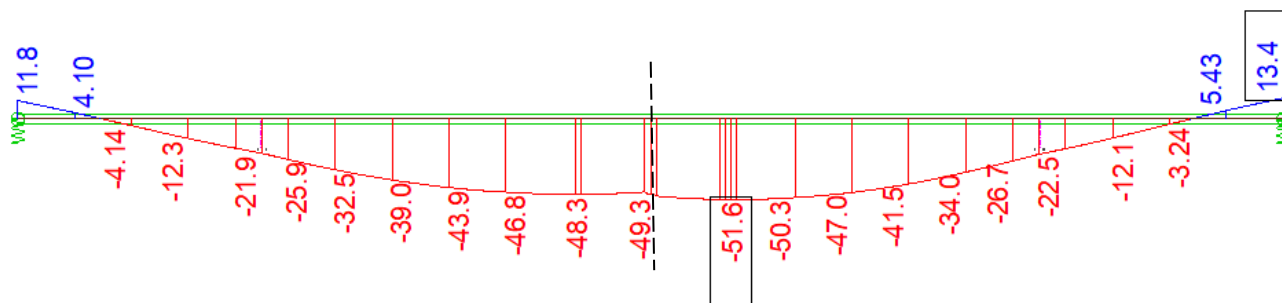


2.8 pav. Laikinos apkrovos vieta išilgai perdangos plokštės

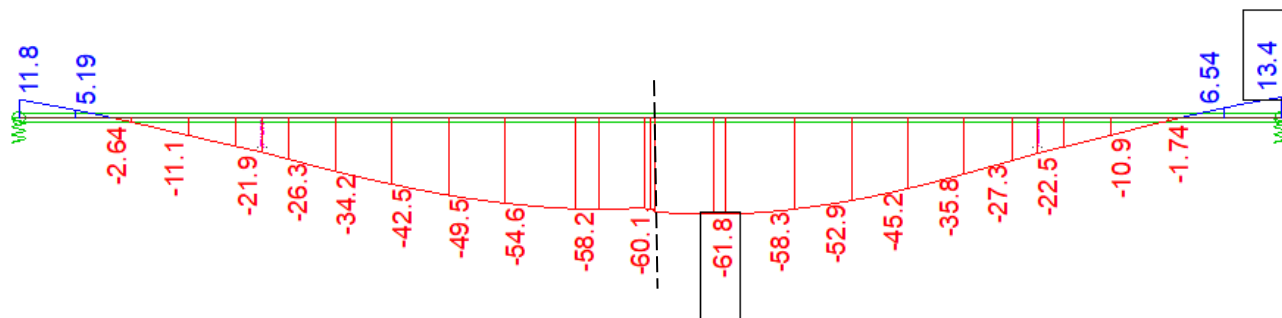
Įlinkiai ir betono įtempiai gauti, sustiprinus viaduką III a stiprinimo būdu



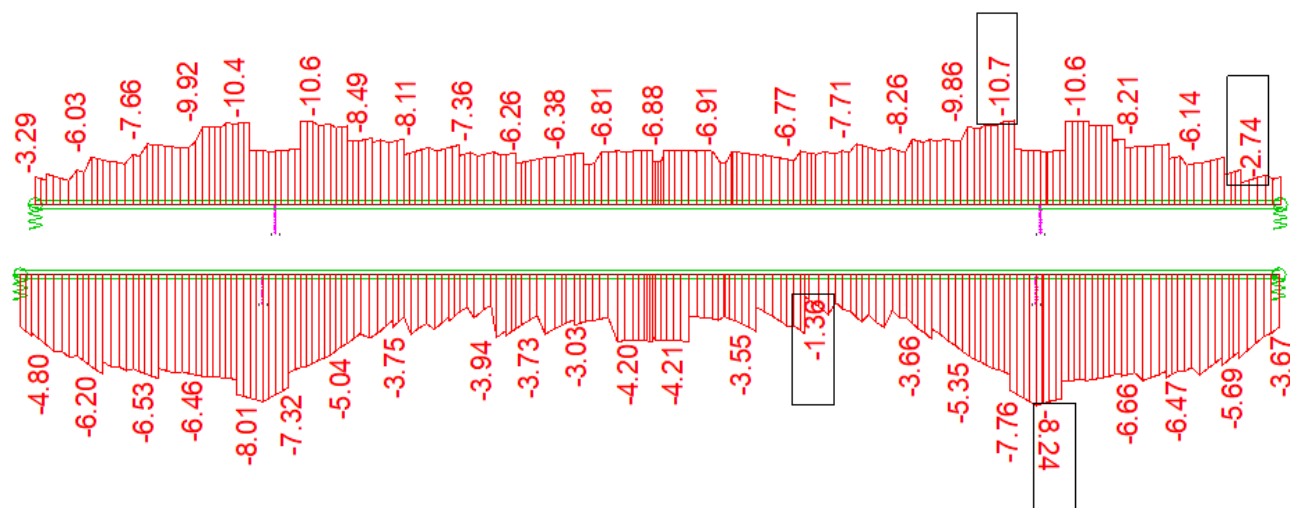
3.1 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio įlinkis po sustiprinimo, nevertinant laikinos apkrovos (mm)



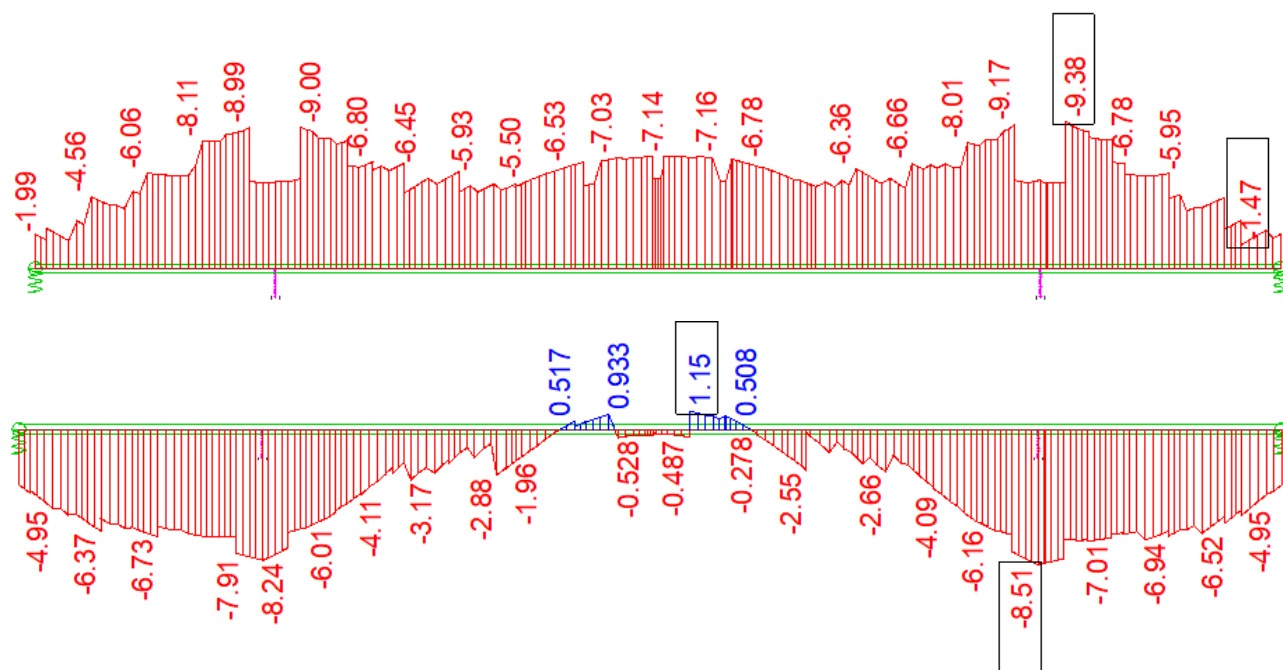
3.2 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio įlinkis po 68 metų eksploatavimo, nevertinant laikinos apkrovos (mm)



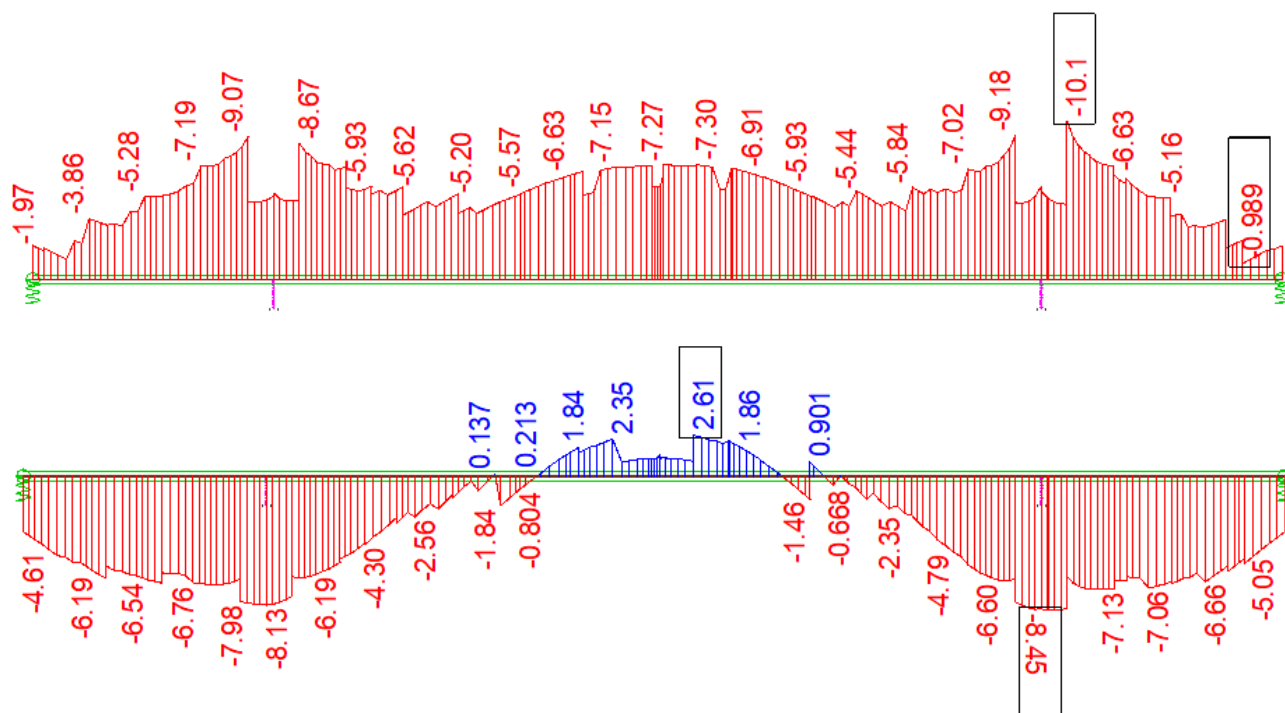
3.3 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio įlinkis po 100 metų eksploatavimo, nevertinant laikinos apkrovos (mm)



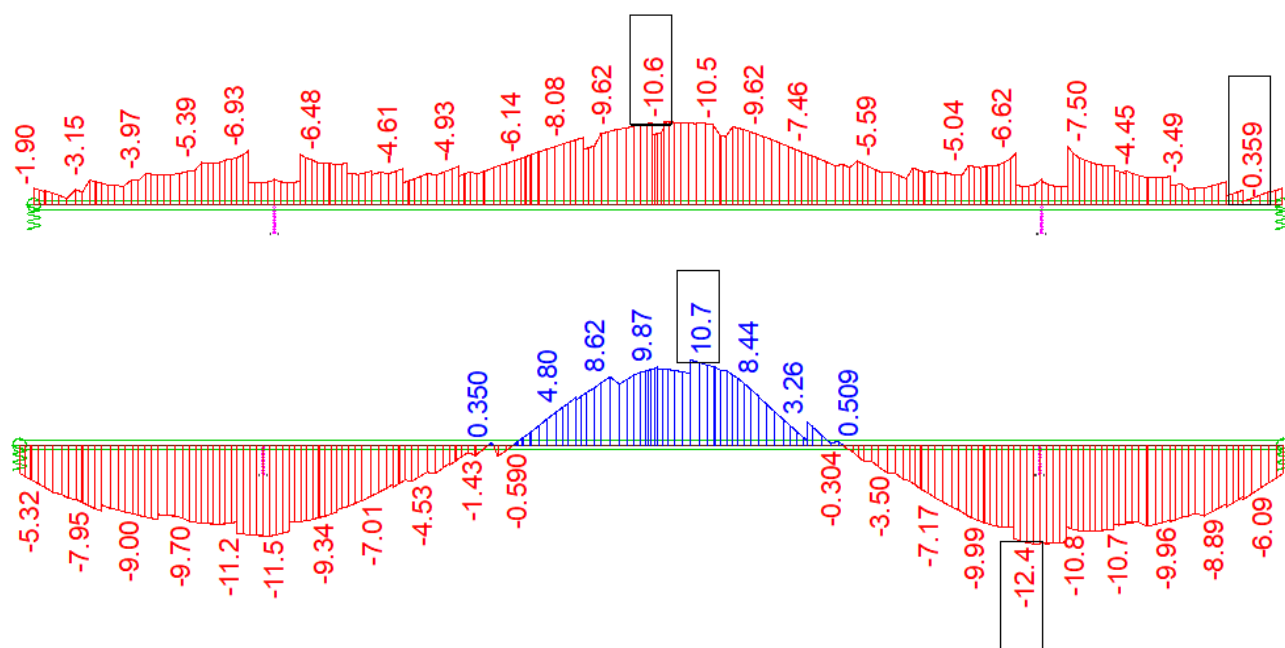
3.4 pav. Betono įtempiai sijoje išilgai viaduko po sustiprinimo, nevertinant laikinos apkrovos (MPa) (viršuje – įtempiai skerspjūvio viršuje, apačioje – įtempiai skerspjūvio apačioje)



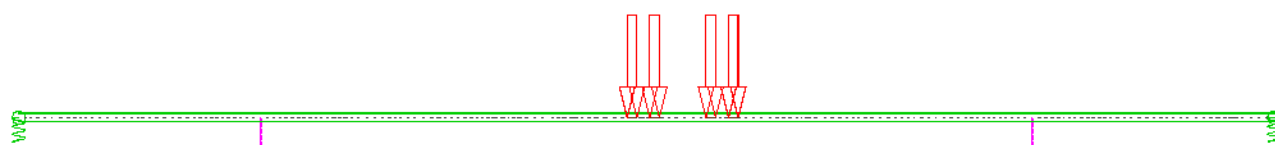
3.5 pav. Betono įtempiai sijoje išilgai viaduko po 68 metų eksploatavimo, nevertinant laikinos apkrovos (MPa) (viršuje – įtempiai skerspjūvio viršuje, apačioje – įtempiai skerspjūvio apačioje)



3.6 pav. Betono įtempiai sijoje išilgai viaduko po 100 metų eksploatavimo, nevertinant laikinos apkrovos (MPa) (viršuje – įtempiai skerspjūvio viršuje, apačioje – įtempiai skerspjūvio apačioje)

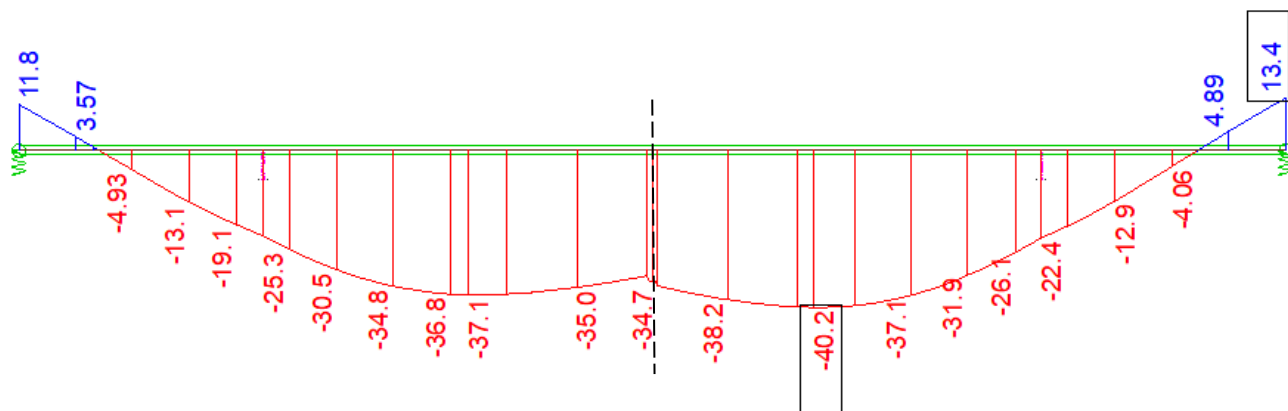


3.7 pav. Betono įtempiai sijoje išilgai viaduko po 100 metų eksploatavimo, pridėjus laikinę apkrovą (MPa) (viršuje – įtempiai skerspjūvio viršuje, apačioje – įtempiai skerspjūvio apačioje)

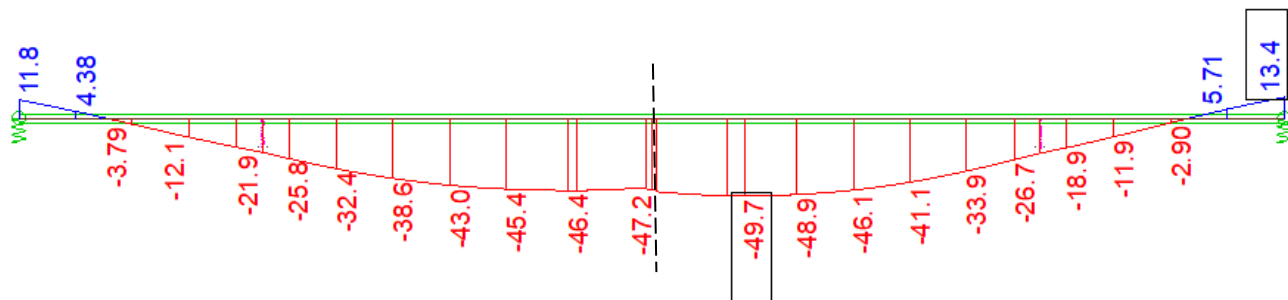


3.8 pav. Laikinos apkrovos vieta išilgai perdangos plokštės

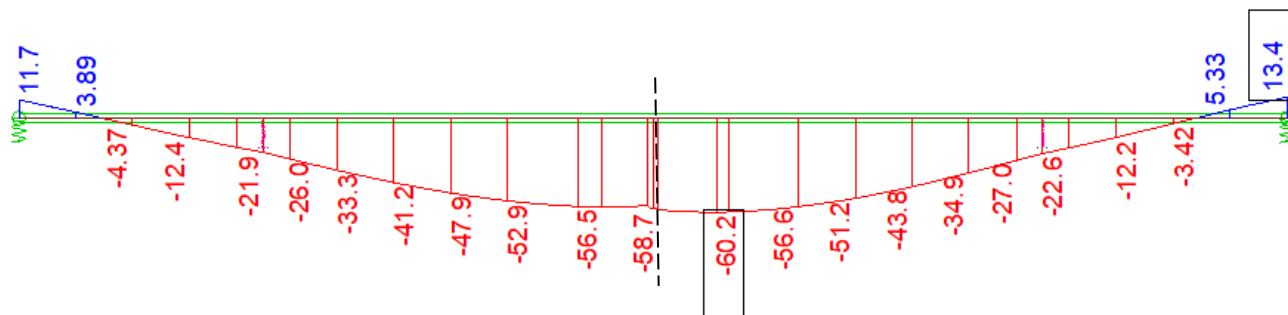
Įlinkiai ir betono įtempiai gauti, sustiprinus viaduką III b stiprinimo būdu



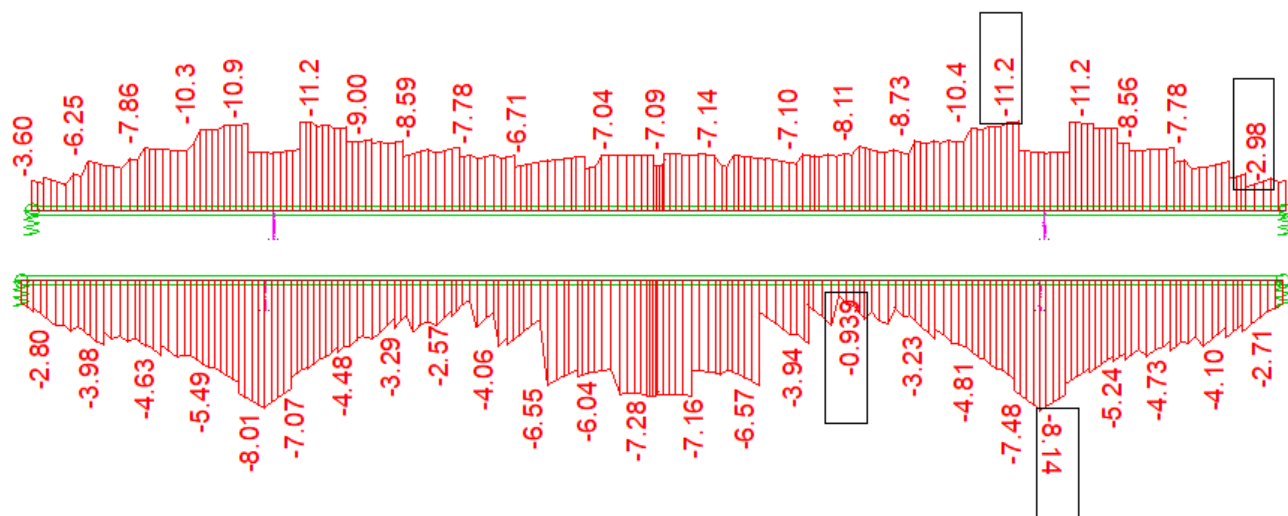
4.1 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio įlinkis po sustiprinimo, nevertinant laikinos apkrovos (mm)



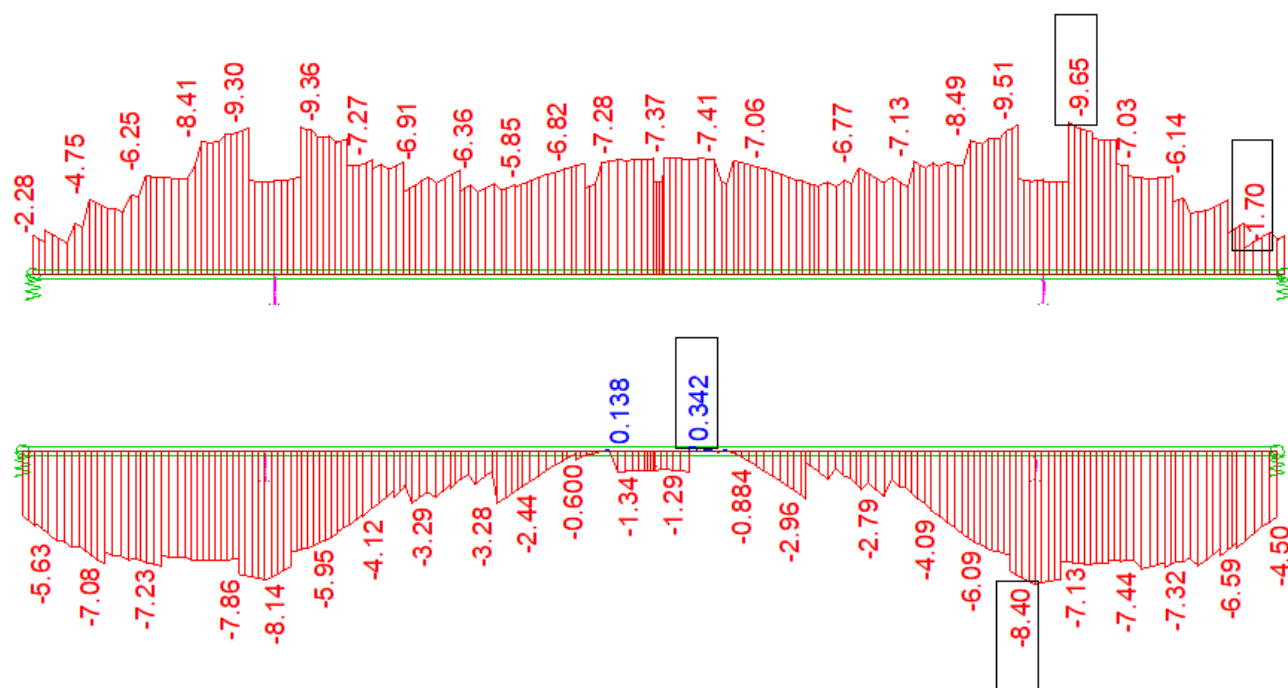
4.2 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio įlinkis po 68 metų eksploatavimo, nevertinant laikinos apkrovos (mm)



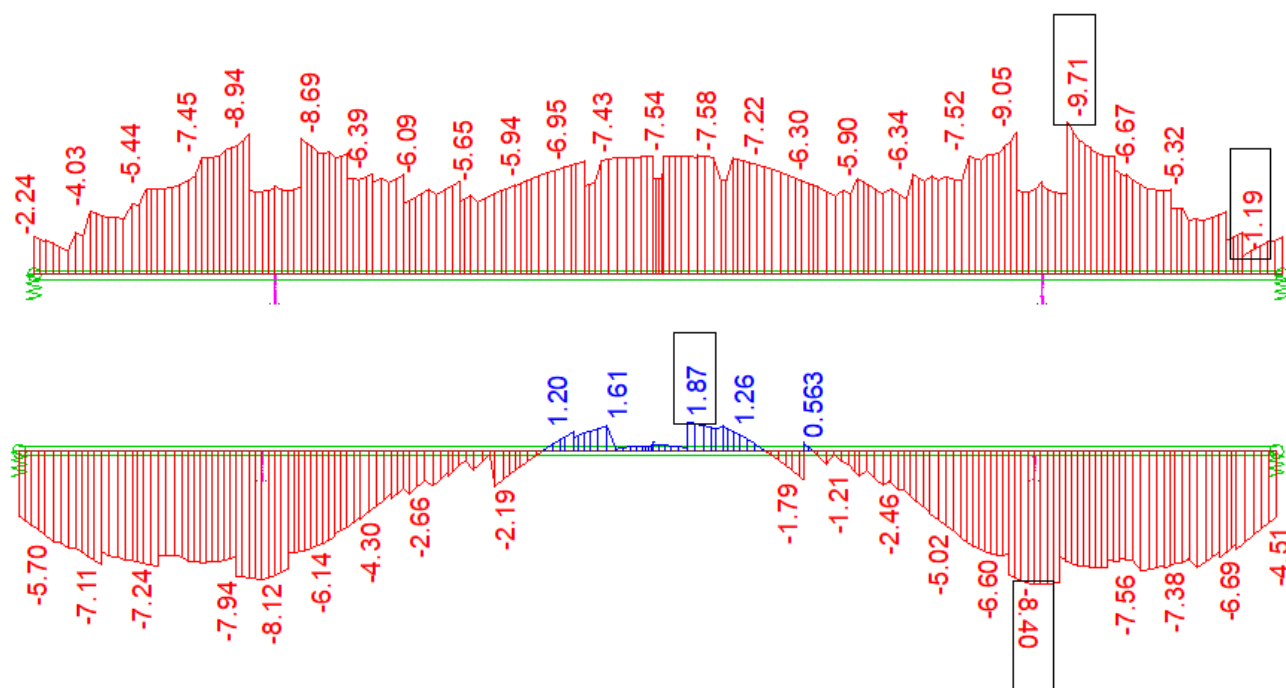
4.3 pav. Viaduko vidurinio tarpatramio įlinkis po 100 metų eksploatavimo, nevertinant laikinos apkrovos (mm)



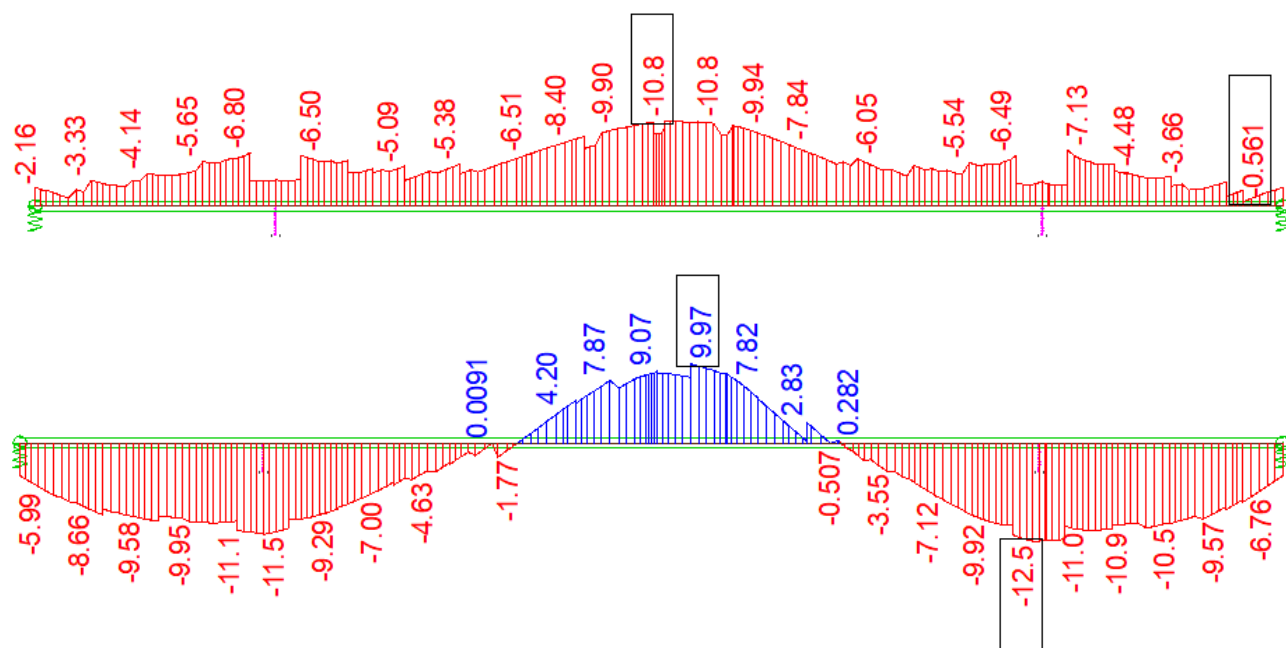
4.4 pav. Betono įtempiai sijoje išilgai viaduko po sustiprinimo, nevertinant laikinos apkrovos (MPa) (viršuje – įtempiai skerspjūvio viršuje, apačioje – įtempiai skerspjūvio apačioje)



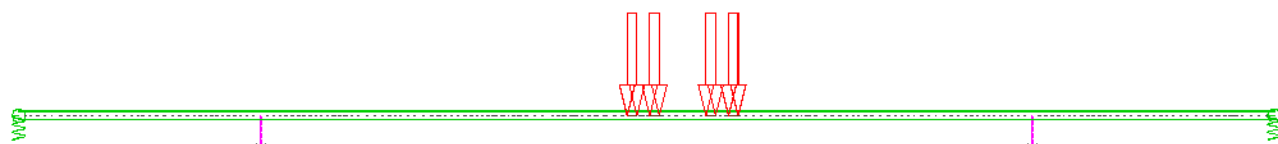
4.5 pav. Betono įtempiai sijoje išilgai viaduko po 68 metų eksploatavimo, nevertinant laikinos apkrovos (MPa) (viršuje – įtempiai skerspjūvio viršuje, apačioje – įtempiai skerspjūvio apačioje)



4.6 pav. Betono įtempiai sijoje išilgai viaduko po 100 metų eksploataavimo, nevertinant laikinos apkrovos (MPa) (viršuje – įtempiai skerspjūvio viršuje, apačioje – įtempiai skerspjūvio apačioje)



4.7 pav. Betono įtempiai sijoje išilgai viaduko po 100 metų eksploataavimo, pridėjus laikinę apkrovą (MPa) (viršuje – įtempiai skerspjūvio viršuje, apačioje – įtempiai skerspjūvio apačioje)



4.8 pav. Laikinos apkrovos vieta išilgai perdangos plokštės