

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Lukas Venčkauskas

**GELŽBETONINIŲ TILTŲ IR VIADUKŲ ANALIZĖ TAIKANT
BAIGTINIŲ ELEMENTŲ METODĄ**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Mindaugas Augonis

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS

**GELŽBETONINIŲ TILTŲ IR VIADUKŲ ANALIZĖ TAIKANT
BAIGTINIŲ ELEMENTŲ METODĄ**

Baigiamasis magistro projektas
Statybos inžinerija (621H20001)

Vadovas

(parašas) Doc. dr. Mindaugas Augonis
(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. dr. Audrius Grinys
(data)

Projektą atliko

(parašas) Lukas Venčkauskas
(data)

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS

(Fakultetas)

Lukas Venčkauskas

(Studento vardas, pavardė)

Statybos inžinerija, 621H20001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Gelžbetoninių tiltų ir viadukų analizė taikant baigtinių elementų metodą“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 16 m. Gegužės 23 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Luko Venčkausko**, baigiamasis projektas tema „Gelžbetoninių tiltų ir viadukų analizė taikant baigtinių elementų metodą“ 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)

TURINYS

Anotacija	6
1 Darbo idėja.....	8
1.1 Įvadas	8
1.2 Darbo tikslas.....	8
1.3 Darbo uždaviniai.....	8
1.4 Darbo sudėtis	9
2 Teorinė dalis	10
2.1 Baigtinių elementų metodas	10
2.2 Tiltų apkrovos ir apkrovų derinių sudarymas.....	12
2.3 Valkšnumo ir traukumo deformacijos	14
2.4 Literatūros analizė baigtinių elementų modelio sudarymo tema.....	16
3 Skaičiavimo modelis	19
3.1 Bendri duomenys apie viaduką	19
3.2 Viaduko statybos eiga	19
3.3 Skaičiavimas stadijomis	20
3.4 Įtemptoji armatūra.....	21
3.5 Baigtinių elementų modelio sudarymas	22
3.5.1 Sijų baigtinių elementų modelis	22
3.5.2 Plokščių baigtinių elementų modelis.....	24
3.6 Apkrovimo modelis AK11	26
3.7 Apkrovimo modelis LM1	27
4 Sijų baigtinių elementų modelio skaičiavimo rezultatai	29
4.1 Įtempiai rygelyje.....	29
4.2 Deformacijos statybos metu	30
4.3 Apkrovimo modelių AK11 ir LM1 poveikiai viadukui.....	32
5 Plokščių baigtinių elementų modelio skaičiavimo rezultatai	39
5.1 Įtempiai rygelyje.....	39
5.2 Deformacijos statybos metu	40
5.3 Apkrovimo modelių AK11 ir LM1 poveikiai viadukui.....	42
6 Netiesinė analizė	47
6.1 Netiesinės analizės metodas	47
6.2 Rygelio poslinkiai įvertinus netiesiškumą	47
6.3 Viaduko įlinkio kitimas dėl armatūros korozijos	48

7	Rezultāti.....	52
7.1	Darbo rezultātu aptarīms	52
7.2	Išvados	54
8	Literatūras saraksts.....	55

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Magistro baigiamasis darbas

**GELŽBETONINIŲ TILTŲ IR VIADUKŲ ANALIZĖ TAIKANT BAIGTINIŲ ELEMENTŲ
METODĄ**

Lukas Venčkauskas

Taikant baigtinių elementų metodą, atlikta A1 kelyje Vėžaičių sankryžoje 1972 m. pastatyto įtemptojo gelžbetonio trijų angų rėminės konstrukcijos viaduko su dėžinio skerspjuvio sijomis standumo ir stiprumo analizė. Nagrinėti du baigtinių elementų modeliai: sijinis ir plokštelinis. Skaičiavimai atlikti įvertinant statybos ir eksploatacijos stadijas, taikyta tiesinė ir netiesinė analizė, įvertintos betono valkšnumo ir traukumo deformacijos. Sijinio ir plokštelinio modelio tiesinės analizės būdu gautas rygelio įtempių būvis, deformacijų kitimas statybos eigoje. Abiem atvejais nustatyta vienoda viaduko įlinkio kitimo tendencija statybos eigoje, tačiau gautas mažesnis absoliutus įlinkis nei nurodytas statybos projekte. Netiesinės analizės būdu gauti rezultatai skiriasi tik deformacijų kitimu eksploatacijos metu. Remiantis literatūroje pateiktais tyrimų duomenimis sumodeliuotas armatūros skerspjuvio mažėjimas dėl korozijos, bet rygelio pleišėjimas nenustatytas. Atskirai patikrintas transporto apkrovų AK11 ir LM1 poveikis

Reikšminiai žodžiai: baigtinių elementų metodas, dėžinio skerspjuvio sija, skaičiavimas stadijomis, netiesinė analizė.

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

Master final work

**ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BRIDGES AND VIADUCTS USING FINITE
ELEMENT METHOD**

Lukas Venčkauskas

Finite element method was used to analyze strength and rigidity of prestressed concrete frame box-girder viaduct built in 1972 over the road A1 at Vėžaičiai junction. Two finite element models were used for analysis: beam and shell. Calculations involved construction and exploitation stages, linear and nonlinear analysis methods, creep and shrinkage deformations of concrete. Using linear analysis for beam and shell models stress state of girder and deformation change in each construction stage was calculated. Both models showed same change in deflection of girder during construction stages, but calculated absolute deflection was smaller than stated in the viaduct design. Results achieved during nonlinear analysis differ only in exploitation stages. According to the viaduct inspection results from literature the decrease of reinforcement cross section was modeled, but this didn't produced cracking of girder. Impact of load models AK11 and LM1 was checked separately.

Keywords: finite element method, box girder, staged calculations, nonlinear analysis.

1 DARBO IDĖJA

1.1 Įvadas

Statant automagistralę A1 buvo suprojektuota ir pastatyta keletas automobilių viadukų pagal tipinį projektą, parengtą 1972 m. Šių viadukų pagrindinė laikančioji konstrukcija – trijų angų įtemptojo gelžbetonio rėmas, kurį sudaro dėžinio kintamo aukščio skerspjūvio rygelis su dviem liaunomis kolonomis. Po 30-40 metų eksploatacijos pastebėtas padidėjęs viadukų įlinkis, kurį nulemia nutrūkstanti apatinė įtemptoji armatūra. Pastaruoju metu blogos būklės viadukams atliekamas kapitalinis remontas, įrengiant papildomas armatūros gniūžtes.

Šiame darbe analizei pasirinktas Vėžaičių sankryžoje esantis viadukas, kurį sudaro du tarpusavyje išilgai perstumti rygeliai. Analizė atlikta taikant baigtinių elementų metodą su kompiuterine programa Sofistik. Palyginimui skaičiavimai buvo atlikti taikant du skirtingų tipų modelius: sijos ir plokštės baigtinių elementų.

Įtemptą armatūra armuotos konstrukcijos ypatingos tuo, kad dėl didelių apgnūždymo įtempių pasireiškia betono valkšnumo deformacijos, kurios sukelia nepageidaujamus konstrukcijos įlinkius ir trumpėjimus. Įlinkiai svarbūs tinkamumo ribiniams būviams, o konstrukcijos elemento sutrumpėjimas rėminėse konstrukcijose gali sukelti papildomas įrąžas.

Šio tipo viadukai statomi gembinės pusiausvyros būdu iš surenkamų blokų. Montuojant blokus keičiasi viso statinio skaičiuojamoji schema ir, natūralu, įrąžos elementuose. Šiame darbe, pasitelkiant skaičiavimą stadijomis, buvo sumodeliuota visa statybos eiga ir gautas besikeičiantis įtempių būvis konstrukcijose.

1.2 Darbo tikslas

Su kompiuterine programa Sofistik sudaryti du skirtingus viaduko baigtinių elementų modelius ir taikant baigtinių elementų metodą apskaičiuoti įtempius, deformacijas ir įrąžas viaduko konstrukcijose, bei palyginti dviem modeliais gautus rezultatus.

1.3 Darbo uždaviniai

Remiantis literatūroje pateikiama informacija apie baigtinių elementų modelio kūrimą, sudaryti kiek įmanoma tikslesnį viaduko skaičiavimo modelį.

Palyginti sijos ir plokštės baigtinių elementų modelio skaičiavimo rezultatus įtempių ir deformacijų aspektu.

Palyginti apkrovų tipus ir jų poveikį viadukui pagal skirtingas metodikas: SNIp ir Eurokodą.

Atlikti netiesinę skaičiavimo modelio analizę.

Patikrinti galimą armatūros skerspjūvio sumažėjimo dėl korozijos poveikį viaduko stiprumui ir standumui.

1.4 Darbo sudėtis

Darbą sudaro 7 skyriai. Antrajame skyriuje pateikiama informacija apie baigtinių elementų metodo pagrindinius principus, baigtinių elementų tipus, aprašomos tiltus veikiančios apkrovos ir apkrovų deriniai taikomi tiltų projektavime, pateikiama valkšnumo ir traukumo deformacijų skaičiavimo metodika pagal Eurokodą. Paskutiniame poskyryje pateikiama literatūros analizė baigtinių elementų modelio sudarymo tema.

Trečiame skyriuje pateikiama bendra informacija apie analizei pasirinktą viaduką. Aprašomas viaduko sijų ir plokštės baigtinių elementų modelių sudarymas nuo konstrukcijų idealizavimo iki apkrovų išdėstymo.

Ketvirtasis ir penktasis skyriai skirti abiejų modelių tiesinės analizės rezultatams. Aptariami per visas statybos stadijas susidarantys įtempiai rygelyje, jų atvaizdavimas skirtinguose modeliuose, lyginami rygelio poslinkiai statybos eigoje keičiantis statinio skaičiuojamajai schemai. Atitinkamai prie kiekvieno modelio pateikiami įlinkiai ir įtempiai, susidarantys dėl skirtingų laikinų transporto apkrovų veikimo.

Šeštasis skyrius skirtas netiesinės plokščių baigtinių elementų modelio analizės rezultatams pateikti ir aptarti. Analizuojami ne tik viaduko poslinkiai statybos ir eksploatacijos metu, bet ir modeliuojamas armatūros gniūžčių skerspjūvio mažėjimas.

Septintajame skyriuje aptariami bendri pastebėjimai atliekant darbą ir formuluojamos išvados.

2 TEORINĖ DALIS

2.1 Baigtinių elementų metodas

Pastaruoju metu labai išpopuliarėjo baigtinių elementų metodo (BEM) taikymas konstrukcijų apskaičiavimui ir analizei. Šį šuolį labiausiai nulėmė atpigusios kompiuterinės technologijos, kurios tapo prieinamos kiekvienam. Beveik visos šiuo metu naudojamos kompiuterinės programos skirtos statiniams, dinaminiam procesams modeliuoti taiko BEM. Šis metodas yra universalus – tinka ir paprastoms konstrukcijoms apskaičiuoti, ir sudėtingiems uždaviniams spręsti [1][2].

Taikant šį metodą konstrukcija yra suskaidoma į baigtinių kieki elementų, kurie tarpusavyje yra sujungiami tik mazguose. Baigtiniais elementais (BE) gali būti strypai, plokštės, ar net tūriniai elementai. Kokio tipo naudojami BE priklauso nuo sprendžiamo uždavinio. Baigtiniais elementais sudalinti sistemai rašomos deformacijų lygčių sistemos, kurias išsprendus randami mazgų poslinkiai ir posūkiai. To pakanka apskaičiuoti elementų įrašoms pagal žinomas statybinės mechanikos lygtis [3].

Deformacijų lygčių sistema dažniausiai užrašoma matricine forma ir atrodo taip [1][3]:

$$[K] \cdot \{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{F}\}, \quad (2.1)$$

čia $[K]$ – sistemos standumo matrica; $\{\mathbf{u}\}$ – mazgų poslinkių vektorius; $\{\mathbf{F}\}$ – apkrovų vektorius.

Sprendžiant uždavinius BEM pagrindinė užduotis tampa kiekvieną elementą aprašyti standumo matrica ir sudaryti bendrą visos uždavinio sistemos standumų matricą $[K]$. Priklausomai nuo elemento tipo (laisvės laipsnių skaičiaus), matricos forma yra skirtinga. Paprasčiausiam strypo BE, veikiamam ašinės, skersinės jėgos ir momento, dvimatėje plokštumoje standumo matrica $[K]$ ir deformacijų lygčių sistema užrašoma:

$$\begin{bmatrix} \frac{EA}{L_1} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L_1^3} & \frac{6EI}{L_1^2} & 0 & -\frac{12EI}{L_1^3} & \frac{6EI}{L_1^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L_1^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L_1^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L_1} & 0 & 0 & \frac{EA}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L_1^3} & -\frac{6EI}{L_1^2} & 0 & \frac{12EI}{L_1^3} & -\frac{6EI}{L_1^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L_1^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L_1^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{Bmatrix}, \quad (2.2)$$

čia u_i – elemento mazgo poslinkis arba posūkis, F_i – elemento mazge veikianti jėga arba momentas.

Skaičiuojant baigtinių elementų programomis, kuriose daugelis veiksmų yra automatizuota, svarbu inžineriškai sekėti tarpinius rezultatus, nes yra didelė tikimybė padaryti grubių klaidų. Pagrindinės klaidos išskiriamos autoriaus [1]: neatsižvelgiama į elementų mazgų tarpusavio padėtį ir baigtinių elementų dydžio parinkimą. Vietose, kur įvyksta staigūs deformacijų ar įtempių pokyčiai, BE dydis turi būti sumažintas. Taip pat vertėtų kritiškai pažiūrėti į vietas, kuriose veikia didelės taškinės apkrovos ar yra taškinės atramos, nes paprastai šiose vietose gaunamos neproporcingai didelės deformacijos ir įrąžos.

Baigtiniai elementai gali būti trijų pagrindinių tipų: dvimačiai linijiniai ir plokštuminiai, bei trimačiai tūriniai. Kiekvieną iš jų nagrinėjime trimatėje erdvėje. Paprasčiausias linijinis elementas yra strypas, turintis po 3 laisvės laipsnius mazguose. Toks elementas gali būti deformuojamas tik išilgai ašies, todėl perduoda tik ašinę jėgą. Po deformavimo visame elemento skerspjūvyje įtempiai yra vienodi. Sijos linijinis elementas turi po 6 laisvės laipsnius mazguose, todėl gali perduoti ašines, skersines jėgas ir momentus. Be to šio tipo elementai atsižvelgia į skerspjūvio orientaciją išilginės ašies atžvilgiu. Bendru atveju deformavus tokį elementą, įtempiai jo skerspjūvyje bus nevienodi [2][4].

Kitą grupę sudaro plokštuminiai elementai, kurie turi po 3 ar 4 mazgus kampuose. Membraniniai plokštuminiai elementai yra palyginti labai ploni su jų plotu. Jėgas jie gali perduoti tik plokštumoje dviem kryptimis, bet ne statmena plokštumai kryptimi ir ne lenkimo momentus. Deformavus šio tipo elementą įtempiai per visą storį bus vienodi. Plokštės plokštuminiai elementai yra ploni lyginant su jų plotu, jie gali būti tik lenkiami dviem kryptimis iš plokštumos. Pagrindiniai plokštės elementai būna dviejų tipų. Plokštėse pagal Kirchhofo teoriją nevertinamos skersinės deformacijos lenkiant, pagal Mindlino teoriją – skersinės deformacijos įvertinamos. Kevalo plokštuminiai elementai sudaryti iš membraninių ir plokštės elementų savybių. Tokie elementai gali būti veikiami ašinės jėgos dviem kryptimis, šliejami plokštumoje ir iš plokštumos, lenkiami dviem kryptimis iš plokštumos. Plokštuminais elementais modeliuojami tentai, perdangos, sienos, net ir sijos [2][4][5].

Sudėtingiausi elementai yra tūriniai – tetraedrai ir oktaedrai. Šie elementai perduoda tik deformacijas visomis trimis kryptimis, todėl lenkimo momentus galime gauti tik papildomai integruojant pasirinktoje plokštumoje. Jie naudojami sudėtingiems uždaviniams spręsti, kur plokštuminiai elementai negali tinkamai idealizuoti konstrukcijos [2][4].

Programoje Sofistik naudojami universalūs plokštuminiai elementai, kurių veikimas pagrįstas Reissner-Mindlino teorija. Šiuos elementus galima naudoti kaip plokštės ir kevalus, kadangi naudojamos atskiros Kirchhofo teorijos sąlygos ir pasirinkimo galimybė dėl šlyties deformacijų vertinimo [6]. Toliau darbe, dėl paprastumo, visus plokštuminius elementus vadinsime plokštės BE.

2.2 Tiltų apkrovos ir apkrovų derinių sudarymas

Projektuojant reikia atsižvelgti į daugybę aplinkybių, kurios gali veikti statinį visą jo naudojimo laiką. Visos apkrovos susideda iš nuolatinių ir laikinų.

Nuolatinėmis apkrovos laikomos apkrovos ar jėgos, kurios yra pastovios arba tęsiasi ilgą laiko tarpą iki statybos pabaigos. Jos apima nuosavą konstrukcijų svorį (DC), nuosavą dėvimųjų paviršių ir įrengimų svorį (DW), žemės neigiamos trinties jėgas (DD), horizontalias žemės slėgio apkrovas (EH), užpilto grunto vertikalų nuosavą svorį (EV), papildomas apkrovas ant grunto (ES), jėgų poveikį dėl valksnumo (CR), jėgų poveikį dėl susitraukimo (SH), išankstinio įtempimo jėgas (PS) ir įvairius kitus jėgų poveikius kylančius iš statybų proceso (EL) [2][7][8].

Laikinos apkrovos apibrėžiamos kaip apkrovos ir jėgos, kurios kinta trumpame laiko intervale. Laikina apkrova, tai tokia, kuri išliks ant tilto ribotą laiką. Jos apima transporto judančias apkrovas (LL), stabdymo jėgas (BR), išcentrines jėgas (CE), ir žemės slėgio padidėjimą dėl papildomos judančios apkrovos ant grunto (LS), papildomas judančias apkrovas ant grunto (PL), jėgų poveikius dėl tolygios temperatūros (TU) ir netolygios temperatūros (TG), jėgų poveikius dėl sėdimo (SE), vandens apkrovas ir srovės slėgį (WA), vėjo apkrovą statiniui (WS), vėjo apkrovą judančiai apkrovai (WL), trinties jėgą (FR), ledo apkrovą (IC), transporto priemonių atsitrenkimo jėgas (CT), laivų atsitrenkimo jėgas (CV), ir žemės drebėjimo apkrovas (EQ) [2][7][8].

Lietuvoje šiuo metu tiltai projektuojami pagal Europos normas. Transporto apkrovų modeliai tiltams taikomi pagal standartą „Eurokodas 1. Tiltų eismo apkrovos“ [9]. Anksčiau tiltai projektuoti pagal Sovietų sąjungoje galiojusias normas SNiP, todėl daugelis Lietuvos tiltų projektuoti apkrovos modeliams pagal normas CH 200-62 ir CH 365-67 [10][11]. Šiose normose nurodomi galimi apkrovimo modeliai taikytini automobilių, geležinkelių ir pėsčiųjų tiltams. Plačiau apie darbe atliktuose skaičiavimuose taikytus apkrovimo modelius aprašyta 3.6 ir 3.7 skyriuose.

Kaip ir visos konstrukcijos tiltai projektuojami saugos ULS ir tinkamumo SLS ribiniams būviams [12].

Eurokode nacionaliniame priede nurodomi tokie pagrindiniai deriniai, taikomi konstrukcijų stiprumo ir stabilumo skaičiavimams [13]:

Derinys pagal EN 1990 (6.10) lygtį:

$$\gamma_{Gj,sup} G_{kj,sup} + \gamma_{Gj,inf} G_{kj,inf} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2.3)$$

Derinys pagal EN 1990 (6.10a) lygtį:

$$\gamma_{Gj,sup} G_{kj,sup} + \gamma_{Gj,inf} G_{kj,inf} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2.4)$$

Derinys pagal EN 1990 (6.10b) lygtį:

$$\xi \gamma_{Gj,sup} G_{kj,sup} + \gamma_{Gj,inf} G_{kj,inf} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2.5)$$

Šiose lygtyse $\gamma_{Gj,sup}$, $\gamma_{Gj,inf}$, γ_P , γ_{Q_i} – poveikio daliniai koeficientai, ψ – poveikio reprezentatyviosios reikšmės koeficientas, ξ – nepalankaus nuolatinio poveikio redukavimo koeficientas.

Charakteristinis derinys naudojamas armatūros įtempių tikrinimui, kai konstrukcija dirba tik tamprioje stadijoje [13][14]:

$$G_{kj,sup} + G_{kj,inf} + P + Q_{k,1} + \sum \psi_{0,i} Q_{k,i}. \quad (2.6)$$

Dažnis derinys naudojamas automobilių tiltų deformacijoms įvertinti, plyšio pločio įtemptose gelžbetonio konstrukcijose skaičiavimui [13][14]:

$$G_{kj,sup} + G_{kj,inf} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i}. \quad (2.7)$$

Tariamai nuolatinis derinys taikomas plyšio pločio skaičiavimui įprastai armuotose gelžbetonio konstrukcijose [13][14]:

$$G_{kj,sup} + G_{kj,inf} + P + \psi_{2,1} Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i}. \quad (2.8)$$

1 lentelė. Derinių koeficientų reikšmės taikomos automobilių tiltams [13]

Apkrova	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Tendeminė apkrova	0,75	0,75	0
Tolygiai išskirstyta apkrova	0,4	0,4	0
Vėjo apkrova nuolatinė	0,6	0,2	0
Vėjo apkrova statybos metu	0,8	-	0
Šiluminiai poveikiai	0,6	0,6	0,5
Sniego apkrovos statybos metu	0,8	-	-
Statybos apkrovos	1,0	-	1,0

Gembiniu pusiausvyruoju būdu statomi tiltai statybos stadijoje skaičiuojami pusiausvyros netekimo ribiniam būviui ir stiprumo ribiniam būviui, įvertinant galimą netolygų apkrovų išsidėstymą abiejose gembės pusėse [15].

Statybos metu turi būti įvertintos atsitiktinės statybos apkrovos, susijusios su įrangos ir medžiagų išdėstymu ant perdagos: išskirstytoji apkrova veikianti vienoje gembės pusėje $Q_{PRA1} = 0,2 \text{ kN/m}^2$ ir koncentruota apkrova sijos gembės gale $Q_{PRA2} = 100 \text{ kN}$. Taip pat turi būti vertinamos ir žinomos statybos apkrovos Q_{PRC1} , kurios nepalankioje padėtyje didinamos 6 % ($Q_{PRC1,max}$), o palankioje padėtyje mažinamos 4 % ($Q_{PRC1,min}$). Patariama ilgesnio kaip 120 m ilgio tarpatramio tiltams papildomai vertinti vertikalią ir horizontalią vėjo apkrovas Q_W .

Statybos situacijoms įvertinti naudojami deriniai [15]:

$$A1: 1,1(G_{max} + G_{min}) + 1,25(Q_{PRC1,max} + Q_{PRC1,min} + Q_{PRA1} + Q_{PRA2} + Q_W), \quad (2.9)$$

$$A2: 0,9(G_{max} + G_{min}) + 1,25(Q_{PRC1,max} + Q_{PRC1,min} + Q_{PRA1} + Q_{PRA2} + Q_W). \quad (2.10)$$

Atsitiktinėms statybos situacijoms įvertinti atsižvelgiama į vieno iš galinių segmentų nebuvimą (F_A), todėl taikomi deriniai:

$$B1: 1,1(G_{\max} + G_{\min}) + F_A + 1,25(Q_{\text{PRC1,max}} + Q_{\text{PRC1,min}} + Q_{\text{PRA1}} + Q_{\text{PRA2}}), \quad (2.11)$$

$$B2: 0,9(G_{\max} + G_{\min}) + F_A + 1,25(Q_{\text{PRC1,max}} + Q_{\text{PRC1,min}} + Q_{\text{PRA1}} + Q_{\text{PRA2}}). \quad (2.12)$$

2.3 Valkšnumo ir traukumo deformacijos

Betono valkšnumas – nuo laiko priklausantis procesas, pasireiškiantis didėjančiomis deformacijomis. Betono valkšnumo deformacijas aktualiausia nagrinėti gelžbetonio konstrukcijoms, kurias veikia dideli gniuždymo įtempiai, pavyzdžiui, įtemptąja armatūra armuotos sijos, plokštės.

Valkšnumo deformacijos labiausiai priklauso nuo ilgalaikės apkrovos didumo, tiksliau nuo veikiančių įtempių σ_c ir betono tamprumo modulio E_c santykio [14]:

$$\varepsilon_{cc} = \varphi \cdot \sigma_c / E_c, \quad (2.13)$$

čia φ – nuo laiko ir kitų faktorių priklausantis valkšnumo koeficientas.

Valkšnumo procesas priklauso nuo betono stiprio, mineralinės sudėties, aplinkos drėgmės ir temperatūros eksploatacijos metu, betono mišinio vandens ir cemento santykio, betono amžiaus apkrovimo metu. Stipresnis ir tankesnės struktūros betonas pasižymės mažesniu valkšnumo koeficientu, kaip ir drėgnomis sąlygomis eksploatuojamas betonas. Taip pat kuo vėliau bus apkrauta konstrukcija, tuo mažesnės valkšnumo deformacijos išsivystys [14][16].

Valkšnumo koeficientas apskaičiuojamas pagal EN 1992-1-1:2005 priedą B [14]:

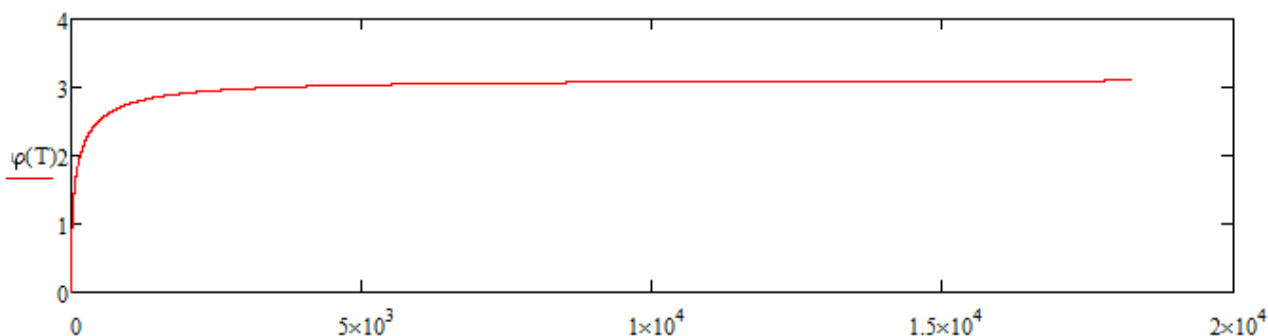
$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t, t_0), \quad (2.14)$$

čia $\beta_c(t, t_0)$ – koeficientas, apibūdinantis valkšnumo plėtrą per laiką po apkrovimo, φ_0 tariamasis valkšnumo koeficientas, kuris apskaičiuojamas:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0), \quad (2.15)$$

kur φ_{RH} – koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į drėgnio įtaką tariamajam valkšnumo koeficientui; $\beta(f_{cm})$ – koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į betono stiprio įtaką tariamajam valkšnumo koeficientui; $\beta(t_0)$ – koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į apkrovos veikiamo betono amžiaus įtaką tariamajam valkšnumo koeficientui.

Valkšnumo koeficiento kitimo per laiką grafiko pavyzdys pateiktas 1 pav.



1 pav. Valkšnumo koeficiento kitimas per laiką (dienomis)

Betono traukumo deformacijos atsiranda dėl džiūvimo ir kietėjimo procesų. Atvirkščiai, labai drėgnoje aplinkoje, pavyzdžiui vandenyje, esantis betonas ima plėstis. Šių deformacijų, skaičiuojant masyvias, ilgas ar didelio ploto betono konstrukcijas, nevertinti negalime, nes jos sukelia elementų pleišėjimą. Traukumo deformacijos priklauso nuo betono stiprio, mineralinės sudėties, aplinkos drėgmės ir temperatūros, betono mišinio vandens ir cemento santykio [14] [16].

Bendroji traukumo deformacija susideda iš betono džiūvimo deformacijos ε_{cd} ir savaiminio traukumo deformacijos ε_{ca} [14]:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}. \quad (2.16)$$

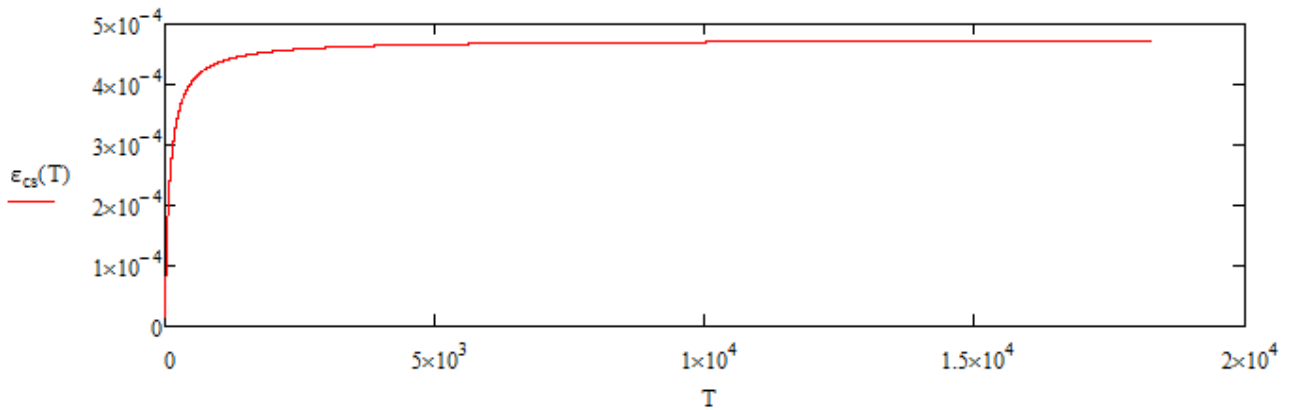
Betono džiūvimo deformacijos daugiausia priklauso nuo elemento tūrio ir paviršiaus ploto santykio, džiūvimo pradžios, bei išorės aplinkos drėgmės, todėl pirmiausiai apskaičiuojama pagrindinė traukioji santykinė deformacija, kuri vėliau dauginama iš koreguojančių koeficientų. Pagrindinė traukioji santykinė deformacija dėl džiūvimo apskaičiuojama pagal EN 1992-1-1:2005 priedą B [14]:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 \alpha_{ds1}) e^{-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}} \right] \cdot 10^{-6} \beta_{RH}, \quad (2.17)$$

čia $\alpha_{ds1}, \alpha_{ds2}$ – koeficientai įvertinantys cemento rūšį, β_{RH} – aplinkos drėgmę įvertinantis koeficientas, f_{cm} – betono vidutinis stipris, $f_{cm0} = 10$ MPa.

Savaiminio traukumo deformaciją lemia kietėjimo procesas, todėl ji daugiausiai priklauso nuo betono stiprio ir kietėjimo trukmės (betono amžiaus).

Traukiosios santykinės deformacijos kitimo per laiką grafiko pavyzdys pateiktas 2 pav.



2 pav. Traukiosios santykinės deformacijos dėl džiūvimo kitimas per laiką (dienomis)

2.4 Literatūros analizė baigtinių elementų modelio sudarymo tema

Autoriai [17] tūriniais baigtiniais elementais modeliavo dvitęję gelžbetonio siją, armuotą įtemptą ir paprastą armatūra. Skaičiavimų tikslumo patikrinimui atliko bandymus su realaus dydžio sija. Kadangi sija simetriška, siekiant pagreitinti skaičiavimus, buvo modeliuota tik pusė sijos. Sijos armatūra modeliuota iš ekvivalentinių kubo formos elementų, o siekiant tinkamai įvertinti jėgos perdavimą atramose ir apkrovimo vietose, papildomai naudotos siauros plieno juostos, paskirstančios koncentruotas apkrovas į didesnę plotą. Modeliavimas atliktas stadijomis: lynų įtempimas, išbetonavimas, lynų atleidimas, apkrovimas išorine apkrova. Betonas modeliuotas iš elementų su netiesinėmis savybėmis ir su dviem irimo ribomis – plyšių atsivėrimas ir betono gniuždomoje zonoje suirimas. Armatūrai naudoti elementai su tampriai plastinėmis savybėmis. Norint tinkamai aprašyti betono ir armatūros sukibimo sąlygas, mazgai, jungiantys plieną ir betoną, buvo modeliuojami kaip spyruoklės su parametrais, aprašančiais sukibimą ir praslydimą. Atlikus tikros sijos bandymus, buvo nustatytas tikslus atitikimas skaičiavimo modeliui (plyšių formavimosi vietos, įlinkis, laikomoji galia) visose sijos darbo stadijose. Šiame modelyje nebuvo įvertinti tik ilgalaikiai efektai – valkšnumas ir traukumas.

Kiti autoriai [18] atliko tilto prototipo iš surenkamo plienbetonio su skirtingu viršutiniu sluoksniu modeliavimą baigtiniais elementais ir rezultatus patikrino realaus dydžio bandymais. Bandymų metu siekta išsiaiškinti sukibimo sąlygas tarp surenkamų plokščių ir viršutinio monolitinio sluoksnio. Baigtinių elementų modelį sudarė tūriniai elementai, kuriais modeliuotas betonas ir plieno sijos, bei sijos BE, kuriais modeliuotos galvelinės jungės ir armatūra. Kad sutrumpėtų skaičiavimo laikas, modeliuota tik pusė perdangos, nes tiltas simetriškas. Skaičiavimai atlikti taikant netiesinę analizę, įvertinant valkšnumą, traukumą ir betono pleišėjimą. Skaičiavimai parodė labai gerą sutapimą su bandymo rezultatais, todėl autoriai daro išvadą, kad tinkamai sudarytas baigtinių elementų modelis gali padėti sutaupyti daug lėšų atliekant tikrus eksperimentus.

Qapo et.al. [19] tūriniais baigtiniais elementais modeliavo įtemptojo gelžbetonio siją, papildomai stiprintą iš išorės polimerinės anglies pluoštu stiprintos armatūros juostomis, kurios

atlieka skersinės armatūros vaidmenį. Rezultatai lyginti su eksperimentiniais duomenimis, kuriuos gavo Kang ir Ary [20]. Skaičiavimai atlikti netiesinės analizės metodu. Betono gniuždymas modeliuotas vienašiu įtempių-deformacijų būviu įvertinant gniuždymo stiprio mažėjimą, dėl skersinių tempimo įtempių. Betono tempimo stipris modeliuotas tiesine priklausomybe iki tempimo stiprio ribos, o paskui priimta labai maža artima 0 įtempio reikšmė. Apkrovimo perdavimas sijai ir atramos modeliuotos tūriniais elementais, o įprasta ir įtemptoji armatūra modeliuotos iš sijų BE su absoliučiomis sukibties sąlygomis. Plieniniams elementams taikomas tampriai plastinis deformavimo būvis su Von-Mises takumo kriterijumi. Anglies pluošto polimero juotos modeliuotos izotropinės ir su tiesine įtempių-deformacijų priklausomybe iki stiprumo ribos. Sukibimas tarp polimero juostos ir betono modeliuotas iš specialių tūrinių elementų su dviliniškie įtempių-deformacijų diagrama ir parametrais, aprašančiais sukibimo netekties pradžią ir visišką sukibties netekimą.

Autoriai [21] atliko kabamojo tilto su dėžiniu skerspjūviu modeliavimą šešiais skirtingais baigtinių elementų modeliais ir keliomis kompiuterinėmis programomis. Gauti rezultatai buvo lyginami su duomenimis, gautais tilto bandymo metu ir skirtingais modeliais. Pirmame modelyje lynai buvo modeliuoti iš strypų baigtinių elementų su vientisu skerspjūviu, pilonas – su plonasieniu skerspjūviu, o perdanga iš plokštės baigtinių elementų. Antras modelis lygiai toks kaip ir pirmas, tik pilonas modeliuotas su vientiso skerspjūvio sijų BE. Trečią modelį sudarė vien tik strypų ir sijų BE su atitinkamu vientisu skerspjūviu. Statinė analizė parodė neblogą antro ir trečio modelių rezultatų (poslinkių, deformacijų) atitikimą su realiais matavimais, tačiau pirmasis modelis dėl pasirinktų plonasienių sijų BE lėmė gerokai per didelius poslinkius. Dinaminės analizės rezultatai visais atvejais puikiai sutapo su eksperimentiniais duomenimis. Šių autorių darbe taip pat buvo detaliau nagrinėjama tilto perdangos konstrukcija. Vėl sudaryti trys modeliai. Pirmajame perdanga modeliuota iš sijų BE dvimatėje erdvėje. Antrąjį modelį sudarė plokščių BE gelžbetoniui ir sijų BE plienui modeliuoti. Trečiasis modelis su labiau detalizuotais skerspjūvio storiais, nei antrasis. Iš šių trijų modelių tik antrasis labiausiai neatitiko tiek statinės, tiek ir dinaminės analizės eksperimentinių duomenų. Autoriai pabrėžia, kad skaitiniai metodai yra tikslūs tik tada, kai naudojamas tinkamas baigtinių elementų modelis.

Mokslininkai Baofeng ir Gang [22] nagrinėjo gembiniu pusiausvyruoju būdu statomų tiltų statybos ypatumus projektinės altitudės išlaikymo atžvilgiu. Buvo analizuotas dėžinio skerspjūvio trijų angų simetriškas tiltas, lyginami skaitiniai metodai su praktiniais rezultatais. Tam tikslui panaudoti įbetonuoti jutikliai įtempiams per visą tilto statybos eigą įvairiose konstrukcijų vietose matuoti. Statant šiuo būdu ypatingą dėmesį reikia atkreipti į kiekvieno segmento statybinę pakylą, kad galutiniame rezultate po sijos prijungimo prie kraštinių atramų ir sijos vidurio sumonolitavimo būtų išlaikyta projektinė padėtis. Statybinė pakyla labai priklauso nuo kiekvieną bloką veikiančios nuolatinės apkrovos, apgniuždymo poveikio, susitraukimo ir

valkšnumo poveikio, temperatūros ir laikinų apkrovų poveikio. Įvertinant visus išvardintus dalykus apskaičiuojama kito montuojamo segmento statybinė pakyla. Statybinės pakylas skaičiavimai buvo atlikti su sijų BE modeliu. Įrengus tilto siją gauta, kad projektinio aukščio neatitikimas pateko į leistinas $-5 \div 10$ mm ribas, o galutiniai apskaičiuoti ir išmatuoti įtempiai betone pakankamai gerai sutampa.

Gembiniu pusiausvyruoju būdu statomų tiltų skaičiavimo stadijomis svarbą tyrė Ates [23]. Nagrinėtas trijų angų 350 m bendro ilgio dėžinio skerspjuvio tiltas. Tiltas skaičiavimo modelis buvo sudarytas iš tūrinių baigtinių elementų. Įvertintas betono stiprio kitimas laike, valkšnumo ir traukimo deformacijos. Netiesiškumas buvo įvertintas taikant P-delta metodą ir didelių poslinkių kriterijų. Rezultatai lyginti su tokio pat modelio skaičiavimais kai nevertinamos stadijos. Nustatyta, kad lenkimo momentai sijoje ir tauruose susidaro gerokai didesni taikant skaičiavimą stadijomis. Tačiau sijos skersinės ir ašinės jėgos gaunamos beveik identiškose abiem atvejais. Sijos vertikalus poslinkis, įvertinus stadijas, gaunamas beveik dvigubai didesnis. Tai rodo, kad norint tinkamai suprojektuoti statinį, būtina įvertinti ne tik skaičiavimą stadijomis, bet ir netiesinius efektus.

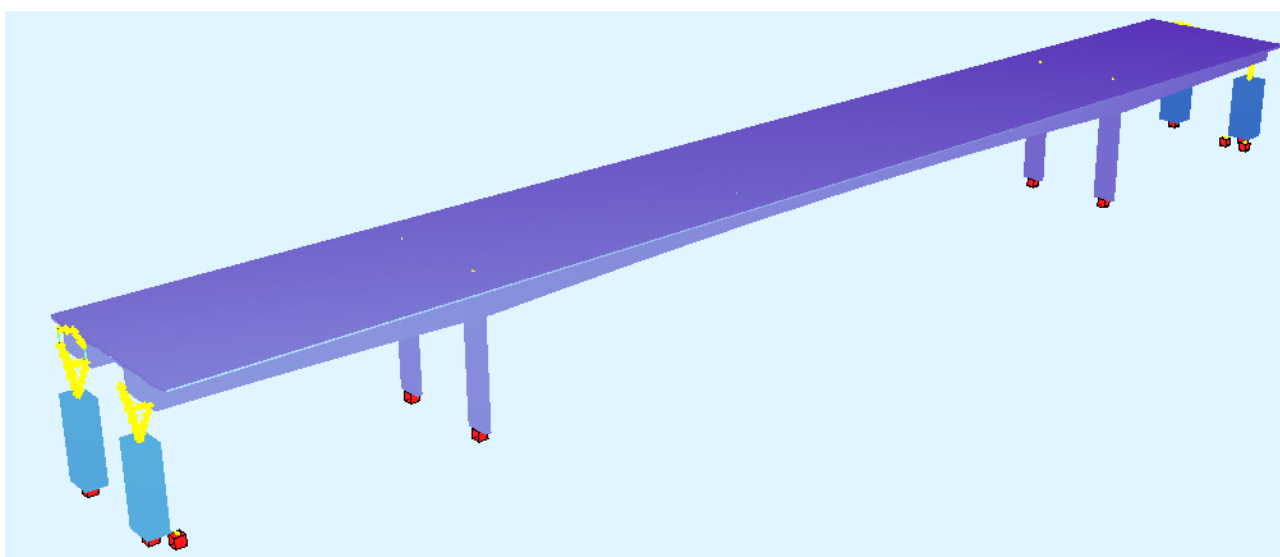
Baigtinių elementų modelio sudarymo būdų yra keletas variantų. Pasirinkus tam tikrą būdą, priklausys ne tik skaičiavimo rezultatų tikslumas, bet ir skaičiavimų trukmė. Tiriamojame veikloje labiausiai paplitę modeliai iš tūrinių BE. Jais galima labai tiksliai sumodeliuoti konstrukcijas, aprašyti įvairius medžiagų tarpusavio ryšius. Paties modelio kūrimas sudėtingas procesas, reikalaujantis nemažai laiko, bei gilių žinių. Tokių modelių skaičiavimas su šiuolaikine kompiuterine technika trunka net keletą valandų, tačiau rezultate gauname net ir plyšių padėtis, bei jų vystymosi eigą. Mažiau sudėtingi modeliai sudaryti iš sijų ir plokščių BE taikomi ir praktiniais tikslais. Šių modelių tikslumas, kaip matome iš literatūros šaltinių, yra taip pat geras, svarbu tinkamai idealizuoti konstrukcijas.

Skaičiavimas stadijomis yra būtinas, kai statybos eigoje kinta statinio skaičiuojamoji schema. Statybos proceso metu susidaranti įrašos elementuose gali ne tik didėti, bet ir keisti ženklą, todėl nebūtinai galutinė skaičiuojamoji schema bus pavojingiausia visiems elementams. Gembiniu pusiausvyruoju būdu statomiems tiltams skaičiavimas stadijomis būtinas dėl statybinės pakylas nustatymo montuojant kiekvieną bloką, kad po galutinių deformacijų tilto padėtis atitiktų projektinę.

3 SKAIČIAVIMO MODELIS

3.1 Bendri duomenys apie viaduką

Analizei pasirinktas dėžinio skerspjūvio sijų trijų angų viadukas statytas pagal tipinį projektą, parengtą 1972 m. Viaduko tarpatramiai 16+48+16 m. Važiuojamosios dalies plotis – 9 m. Aukščio gabaritas – 5,3 m. Viaduką sudaro dvi įtempto gelžbetonio surenkamos sijos, kurios dėl viaduko įstrižumo yra perslinktos 3,7 m. Sijos prie tarpinių atramų ir viduryje apjungtos skersinėmis diafragmomis. Viaduko tarpinės atramos liaunos, kad dėl temperatūrinių bei plastinių deformacijų rygelyje ir kolonose nesusidarytų dideli lenkimo momentai. Įtemptai armatūrai naudojamas vielos pluoštas iš 24 vnt. vielų ($d=5$ mm), kurių plieno stipris $f_t=1670$ MPa. Rygelio ir tarpinių atramų betonas C30/37, o krantinių atramų – C25/30 [24].

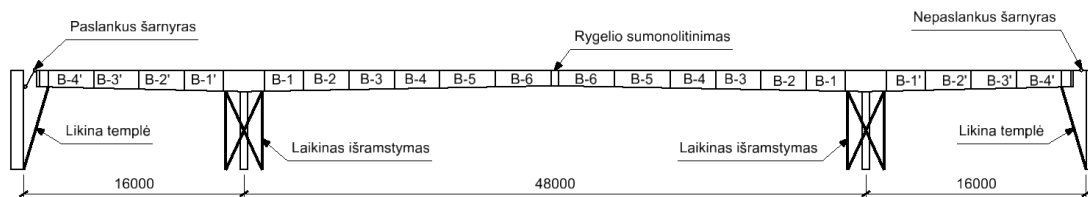


3 pav. Viaduko modelis programoje Sofistik

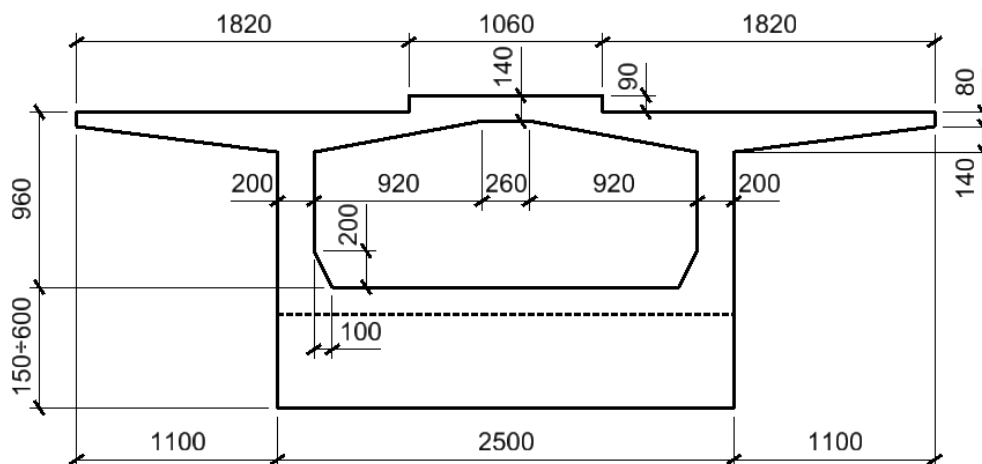
3.2 Viaduko statybos eiga

Viaduko statyba prasideda nuo tarpinių ir krantinių atramų įrengimo. Ant vidurinių atramų įrengiama monolitinė angos statinio dalis – atramos galva. Prie jos bus tvirtinami surenkami blokai. Praėjus 60 parų po atramos galvos įrengimo, įtempiamos dvi armatūros gniūžtės ir įrengiamas laikinas išramstymas iš valcuoto plieno. Pradedami montuoti blokai iš karto keliant du simetriškus blokus. Priklijavus blokus įtempiamos kelios viršutinės montažinės armatūros gniūžtės. Taip montuojami likę simetriški blokai, kol pasiekama krantinė atrama. Prieš montuojant likusius nesimetriškus blokus laikinai inkaruojamas konsolės galas prie kraštinės atramos, panaudojant templeles ir suvirinant iš bloko išleistą armatūrą su krantinėje atramoje išleista armatūra. Sumontavus visus blokus, rėmo koja, esanti arčiau paslankaus šarnyro, domkratų pagalba pastumiama link kraštinės atramos 2 cm, prieš tai nupjovus suvirintą armatūrą kraštinės atramos pusėje. Įrengiami šarnyriniai blokai su šarnyrais. Pašalinamos laikinos templelės konsoliniuose galuose. Atliekamas rygelio vidurio sumonolitnimas. Įtempinama pusė apatinės

armatūros. Dabar reikalinga įtempti laikinas montažines gniūžtes rygelio viršuje ir išardyti laikiną kolonų išramstymą. Baigiama įtempti likusi armatūra. Įrengiamos konsolinės šaltilčio plokštės ir monolitinė rygelio dalis. Įrengiami pakloto elementai.



4 pav. Viaduko elementai



5 pav. Rygelio skerspjūvis

3.3 Skaičiavimas stadijomis

Įtempto gelžbetonio konstrukcijų deformacijos labai priklauso nuo betono amžiaus apgniūždymo metu, dėl nuo laiko priklausančių valkšnumo ir traukumo deformacijų. Norint tinkamai įvertinti įvairių poveikių sukeltus efektus konstrukcijai, reikia įvertinti statybos ir eksploatacijos eigą. Skaičiavimai buvo atlikti stadijomis, aprašytomis 2 lentelėje. Trečiame stulpelyje nurodytas per stadiją įrengtų naujų elementų betono amžius apkrovimo metu.

2 lentelė. Stadijų apibrėžimas programoje Sofistik

Nr.	Pavadinimas	Betono amžius, d
1	2	3
1	Pradinės konstrukcijos	28
2	Monolitinė atramos galva	60
3	Laikinas kolonų išramstymas	
4	Monolitinės galvos lynų įtempimas	
5	Monolito valkšnumas ir traukumas 3 dienos	
6	Bloko B1 įrengimas	60
7	Bloko B1 lynų įtempimas	
8	Bloko B1 valkšnumas ir traukumas 3 dienos	

2 lentelės tęsinys

1	2	3
9	Bloko B2 įrengimas	60
10	Bloko B2 lynų įtempimas	
11	Bloko B2 valkšnumas ir traukumas 3 dienos	
12	Bloko B3 įrengimas	60
13	Bloko B3 lynų įtempimas	
14	Bloko B3 valkšnumas ir traukumas 3 dienos	
15	Bloko B4 įrengimas	60
16	Bloko B4 lynų įtempimas	
17	Bloko B4 valkšnumas ir traukumas 3 dienos	
18	Kraštinių tempių įrengimas	
19	Bloko B5 įrengimas	60
20	Bloko B5 lynų įtempimas	
21	Bloko B5 valkšnumas ir traukumas 3 dienos	
22	Bloko B6 įrengimas	60
23	Bloko B6 lynų įtempimas	
24	Bloko B6 valkšnumas ir traukumas 3 dienos	
25	Atramos pastūmimas 2cm	
26	Šarnyro blokų su šarnyrais įrengimas	28
27	Kraštinės tempinės pašalinimas	
28	Rygelio vidurio sumonolitinimas	28
29	Lynų Nr17-25 įtempimas	
30	Montažinių lynų įtempimas	
31	Laikino kolonų išramstymo pašalinimas	
32	Lynų Nr26-39 įtempimas	
33	Monolitinės plokštės įrengimas	
34	Montažinių lynų nupjovimas	
35	Pakloto elementų įrengimas	
36	Valkšnumas ir traukumas 4 metai	
37	Valkšnumas ir traukumas +21 metai	
38	Valkšnumas ir traukumas +25 metai	

3.4 Įtemptoji armatūra

Armatūros gniūžtės išdėstytos horizontaliojoje plokštumoje rygelio viršutinėje dalyje ir rygelio viduje apatinėje dalyje. Blokų montažinės, kartu ir laikinėsios rygelio viršatramio gniūžtės, bei gniūžtės, esančios tarpatramio dalyje, inkaruojamos blokų galuose įrengtuose

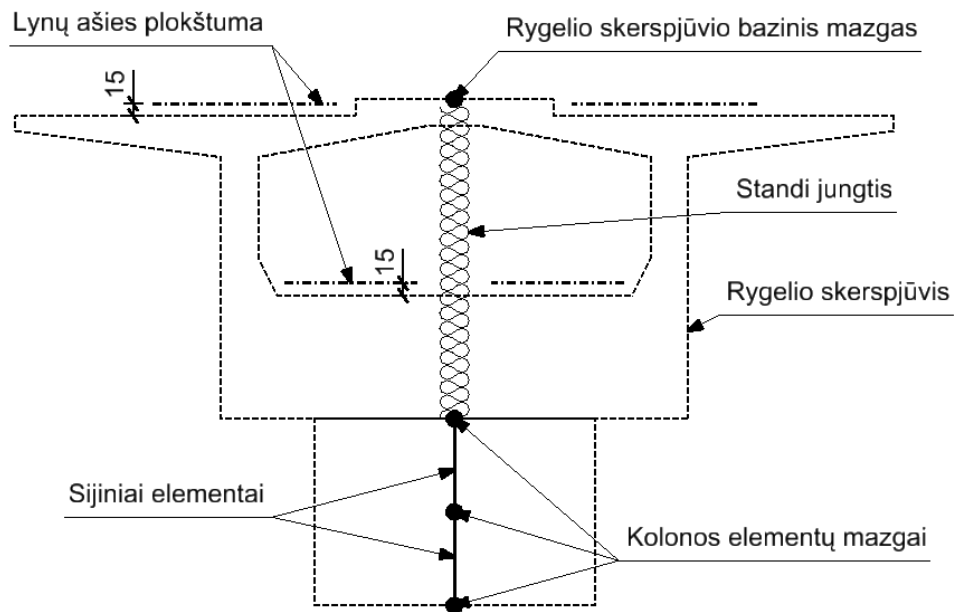
inkaruose, gniūžtes užlenkiant į bloko vidų. Likusios gniūžtės, esančios rygelio viršatramio dalyje, inkaruojamos sijos paviršiuje įrengtose atsparose. Užlenktų gniūžčių galuose susidaro gniūžtės trinties į kanalo sienutes nuostoliai. Šie nuostoliai, sudarant skaičiavimo modelį, atskirai neskaičiuoti, o naudoti iš viaduko projekto. Įtempimo nuostoliai dėl gniūžtės vielų praslydimu inkare užpresavimo metu apskaičiuojami programoje Sofistik, priimant $\Delta l=3,6$ mm, kaip numatyta projekte. Gniūžčių relaksacijos nuostoliai apskaičiuojami programoje pagal įtemptos armatūros II relaksacijos klasę [26]. Skaičiuojant stadijomis programa įvertina anksčiau įtemptų gniūžčių sutrumpėjimą dėl vėliau įteptų gniūžčių poveikio, todėl keičiasi gniūžčių įtempiai kiekvienoje stadijoje.

3.5 Baigtinių elementų modelio sudarymas

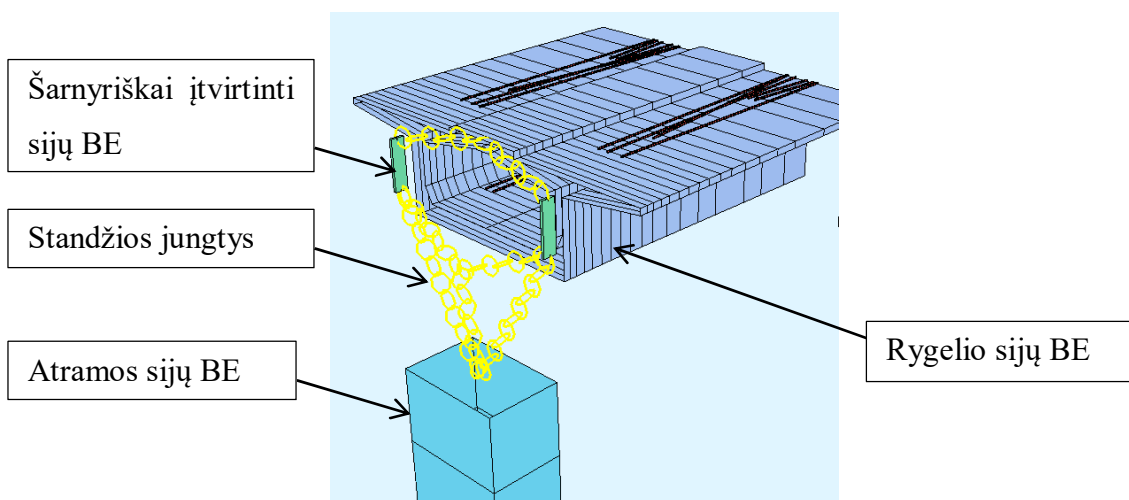
Sijų BE modelis dažniau taikomas bendrajai konstrukcijos elgsenai tirti, tuo tarpu plokščių BE modelis tinka ir vietiniams efektams įvertinti. Palyginimui buvo sudaryti abu modeliai.

3.5.1 Sijų baigtinių elementų modelis

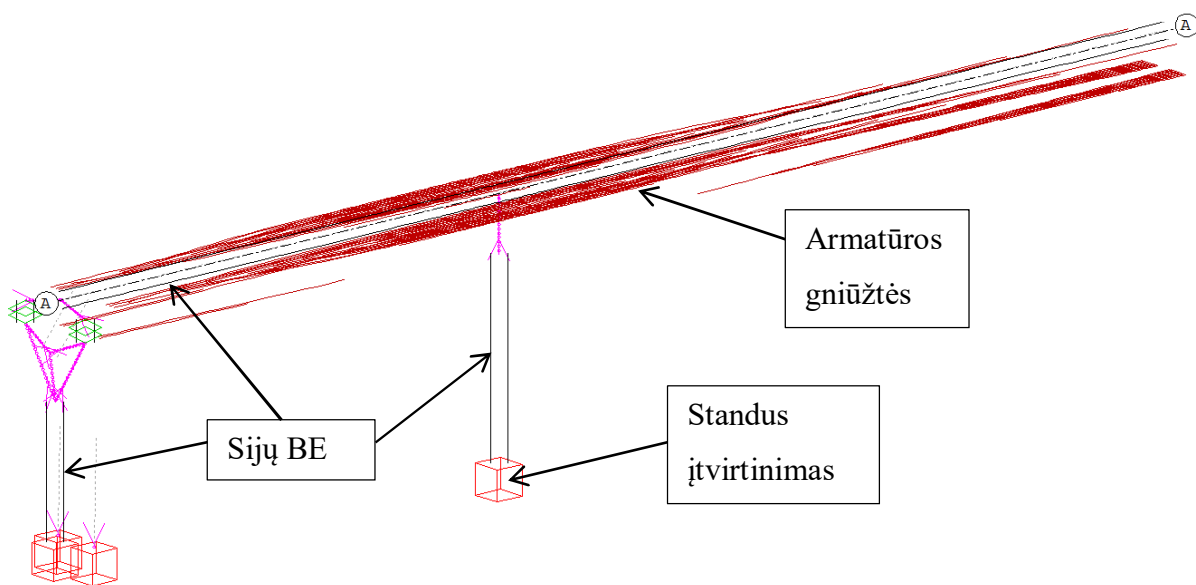
Viaduko sijų BE modelį sudaro strypai su priskirtomis skerspjūvio geometrinėmis charakteristikomis. Baziniu skerspjūvio mazgu pasirinktas rygelio viršus (6 pav.). Kadangi rygelis yra kintamo skerspjūvio, todėl kiekviename mazge automatiškai, pagal priskirtą kitimo kreivę (rygelio apatinės dalies storį), sugeneruojami reikiamo aukščio skerspjūviai. Strypų mazguose prijungiami kiti tilto elementai bei pridedamos apkrovos. Tarpinės atramos modeliuojamos iš sijų BE. Atramos kolonos ilgis atitinka realų ilgį iki rygelio apačios, o kolonos viršutinis mazgas prie rygelio strypo mazgo jungiamas absoliučiai standžia, bet neturinčia matmenų, jungtimi. Kraštinės atramos taip pat modeliuojamos iš sijų BE. Rygelio galai prie kraštinių atramų jungiami šarnyrais, kurių padėtis erdvėje atitinka realią projektinę padėtį. Patys šarnyrai sumodeliuojami iš šarnyriškai įtvirtintų sijų BE (7 pav.). Viaduko kraštinės ir tarpinės atramos standžiai įtvirtintos polius apjungiančiame rostverke, todėl sijų BE modelyje įtvirtinamos standžiai (8 pav).



6 pav. Sijų BE modelio skersinis pjūvis prie tarpinės atramos



7 pav. Šarnyrų tvirtinimas rygelio gale

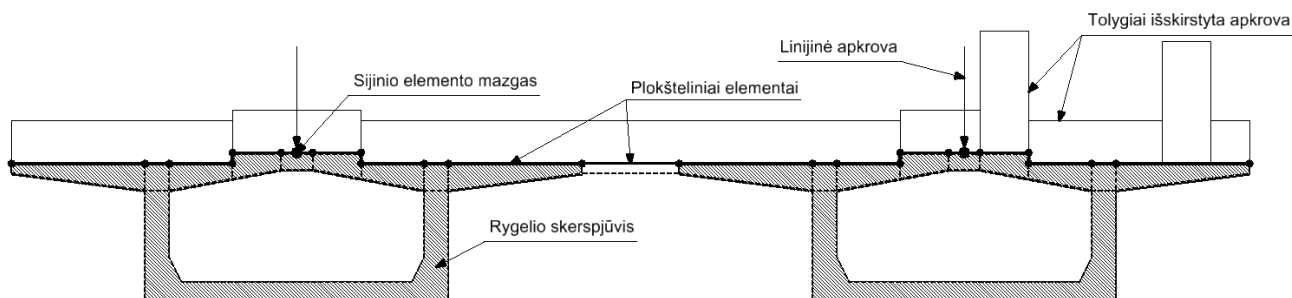


8 pav. Vieno rygelio sijų BE modelis (vaiduojama pusė rygelio)

Įtemptos armatūros gniūžtės išdėstomos ant viršutinės ir apatinės skerspjūvio juostų, gniūžčių centrą orientuojant 15 mm aukščiau plokštumos. Programa gniūžčių sukeliama apgniuždymo jėgą automatiškai priskiria rygelio strypams, atsižvelgdama į gniūžtės centro padėtį (įvertina petį). 8 paveiksle armatūros gniūžtės pavaizduotos rudomis linijomis. Perdangos monolitinės dalies ir pakloto elementų apkrovos padalijamos po lygiai kiekvienam rygeliui ir apkraunamos kaip linijinė apkrova, veikianti į rygelio strypus.

Šis vieno rygelio modelis taikomas apskaičiuoti rygelio poslinkiams, įtempiams, įrašoms taip pat valkšnumo ir traukumo deformacijoms statybos ir eksploatacijos metu.

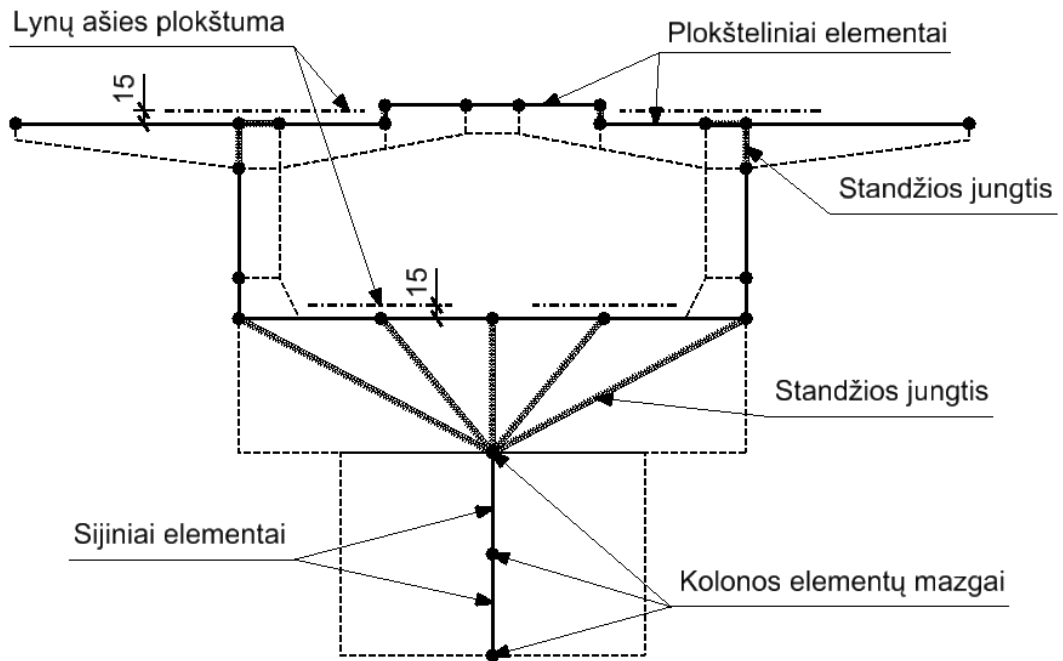
Kintamų eismo apkrovų poveikis rygeliui priklauso nuo apkrovų padėties, todėl siekiant įvertinti šį poveikį skersine viadukui kryptimi, modeliuojami du rygeliai apjungti plokšte, kurios standumas išilgine kryptimi lygus 0. Apkrovos ant plokštės išdėstomos kaip tolygiai išskirstytos į ploto vienetą. Gautos įrašos nuo šio modelio prisumuojamos prie vieno rygelio modelio. Toks kintamų apkrovų modeliavimas galimas tik tiesinėje tamprioje analizėje, kai galioja superpozicijos principas.



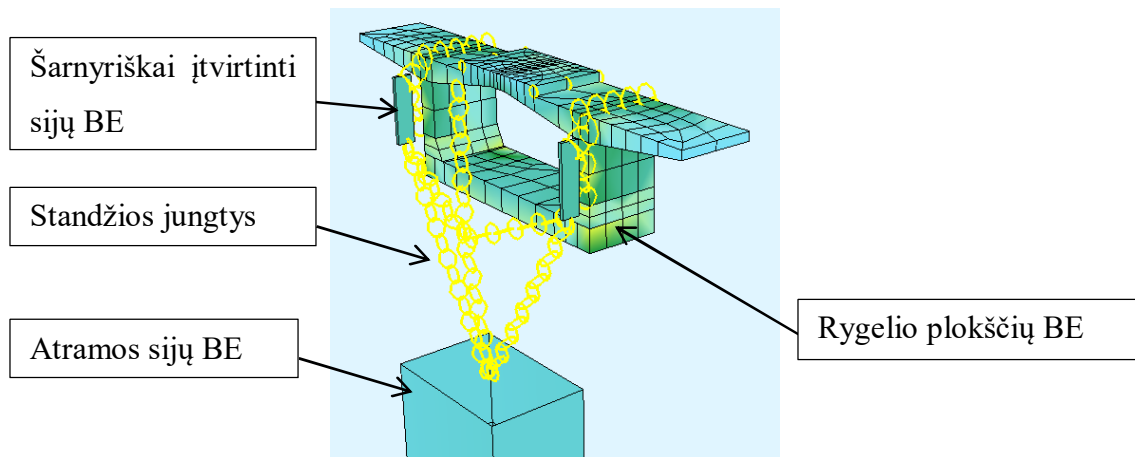
9 pav. Apkrovos perdavimas skersine kryptimi

3.5.2 Plokščių baigtinių elementų modelis

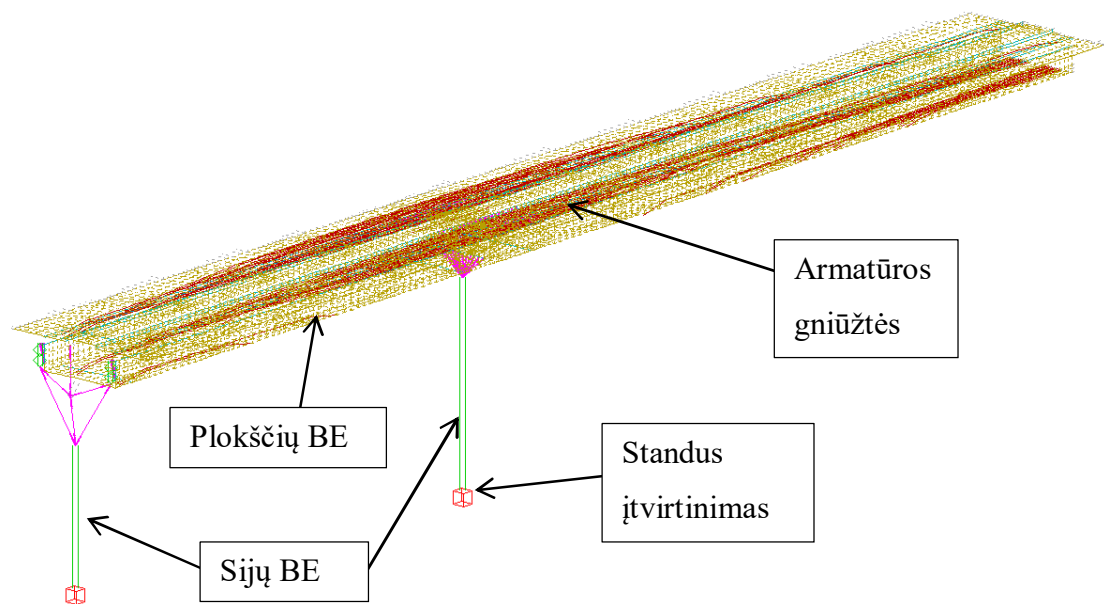
Plokščių BE modelis yra gerokai sudėtingesnis lyginant su sijų BE. Šiuo atveju visas rygelio skerspjūvis modeliuojamas iš plokščių BE, kurių storis atitinka realaus skerspjūvio storius. Plokščių BE ašis, kuri naudojama elementų tarpusavio jungimui, lygiuojama į vieną plokštės kraštą. Plokščių BE T formos skerspjūvio jungtyse apjungiami absoliučiai standžiais ryšiais, kad jungtyse išvengtų papildomų lenkimo momentų dėl padidėjusio tarpatramio. Kiti tilto elementai (kolonos, kraštinės atramos, šarnyrai) modeliuojami iš sijų BE. Šiame modelyje kolona per standžias jungtis jungiama rygelio apačioje. Rygelio šarnyrai šiuo atveju prijungiami prie skerspjūvio sienelių kaip ir tikrojoje konstrukcijoje. Patys šarnyrai sumodeliuojami iš šarnyriškai įtvirtintų sijų BE (11 pav.). Viaduko kraštinės ir tarpinės atramos plokščių BE modelyje įtvirtinamos standžiai. Lynų padėtis išlieka tokia pati kaip ir sijų BE modelyje.



10 pav. Plokščių BE modelio skersinis pjūvis prie tarpinės atramos



11 pav. Šarnyrų tvirtinimas rygelio gale



12 pav. Vieno rygelio plokščių BE modelis (vaizduojama pusė rygelio)

Modeliuojant iš plokščių BE visos apkrovos laikoms tolygiai išskirstytomis ir veikia rygelio virštutinėje juostoje. Taip pat kaip ir sijų BE modelyje, įvertinant apkrovos skersinį pasiskirstymą, modeliuojami du rygeliai. Šį kartą standumas nei viena kryptimi nemažinamas.

Plokščių BE modelyje rezultatai atvaizduojami įtempių ar deformacijų diagramomis, taip pat pateikiamos kiekvieno elemento įrašos. Tokiame modelyje norint gauti rygelio, kaip sijos įrašas, reikalinga papildomai atlikti integravimą pasirinktuose pjūviuose. Programoje šiuos veiksmus reikia atlikti papildomai. Dažniausiai sugeneruojami pjūviai išilgai rygelio modelio tam tikru žingsniu. Pjūvio ir plokštės BE sankirtos vietoje gaunami įtempiai, o pagal juos galima apskaičiuoti tame pjūvyje veikiančias įrašas. Pagal rezultatus pjūviuose brėžiamos įrašų diagramos išilgai sijos.

3.6 Apkrovimo modelis AK11

Viadukas projektuotas apkrovimo modeliui AK11 pagal CH 200-62 ir CH 365-67 [10][11]. K1 reiškia koncentruotą 9,81 kN apkrovą, arba tolygiai išskirstytą 9,81 kN/m krūvį. K11 reiškia, kad minėtos apkrovos yra didinamos 11 kartų. Ši apkrovimo modelį sudaro 3 m pločio juostos, kuriose išdėstomos dvi 0,6 m pločio tolygiai išskirstytos apkrovos $v = 0,1 \cdot K$ 1/m' juostos ir vienas dviašis vežimėlis, kurio ašies apkrova $P = K$. Apkrovimo juostų turi būti tiek, kiek telpa važiuojamojoje dalyje, bet ne daugiau nei yra realių eismo juostų. Naudojami papildomi apkrovų juostų derinių koeficientai: pirmai 0,6 m pločio juostai $\eta_1=1,0$, kitoms $\eta_n=0,6$; visų juostų vežimėliams $\eta_1=1,0$ [3].

Nagrinėjama viadukui vienos 0,6 m pločio apkrovimo juostos apkrova:

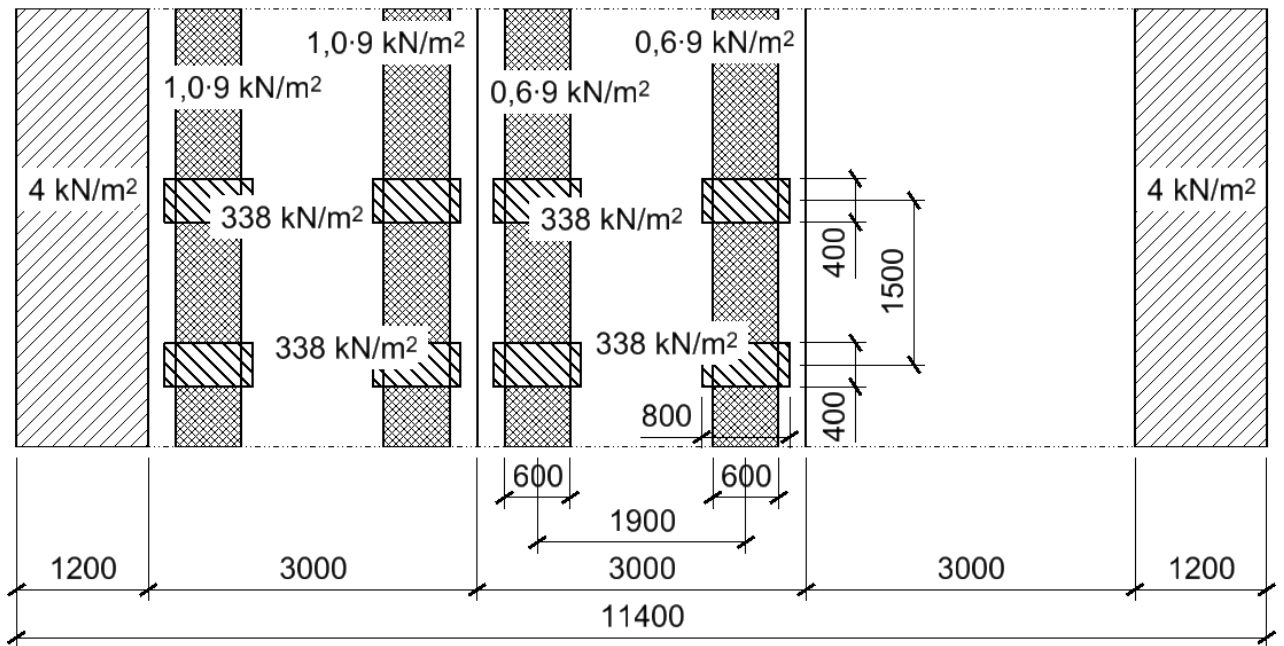
$$q_{UDL} = \frac{K1 \cdot v \cdot 11}{0,6 \cdot 2} = \frac{9,81 \cdot 0,1 \cdot 11}{0,6 \cdot 2} = 9 \text{ kN/m}^2. \quad (3.1)$$

Vežimėlio vieno rato apkrova išskirstoma į 0,8x0,4 m dydžio plotą, kuris apkraunamas apkrova lygia:

$$q_{TS} = \frac{K1 \cdot 11}{0,8 \cdot 0,4} = \frac{9,81 \cdot 11}{0,8 \cdot 0,4} = 338 \text{ kN/m}^2. \quad (3.2)$$

Šalutiniai apkraunami pėsčiųjų apkrova lygia $q_{PDL} = 4 \text{ kN/m}^2$.

Apkrovų išdėstymas nagrinėjama viadukui pavaizduotas 13 pav.



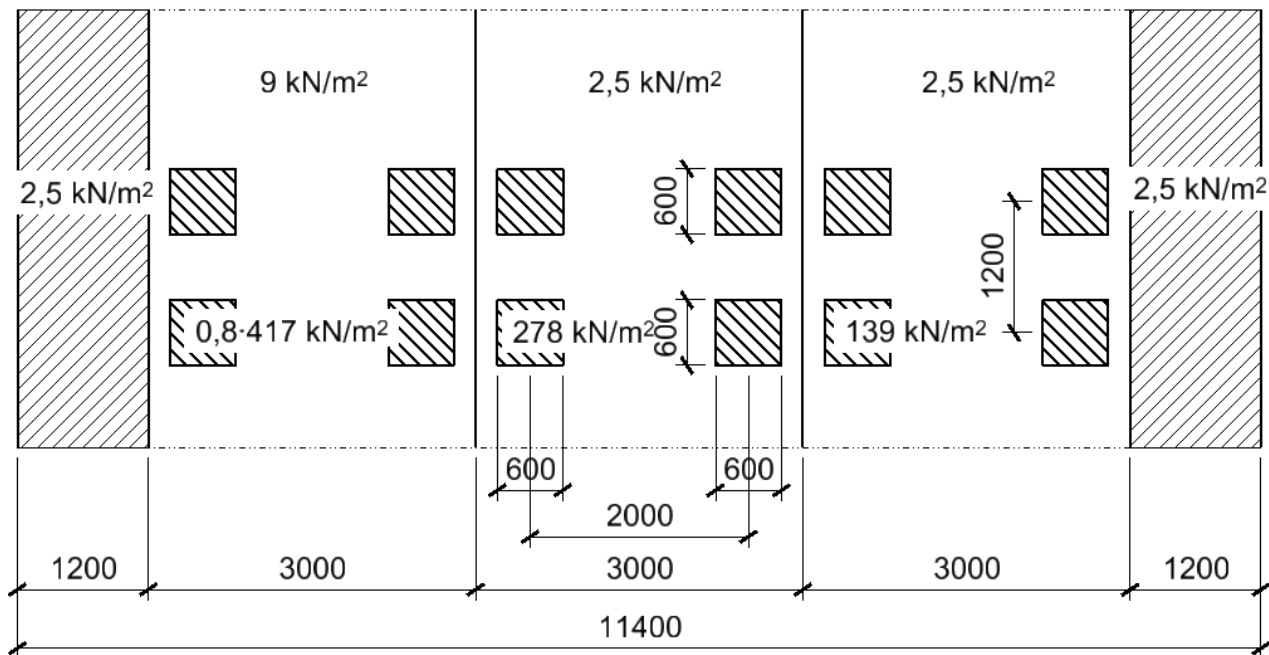
13 pav. Apkrovų išdėstymas pagal AK11 modelį

3.7 Apkrovimo modelis LM1

Šiuo metu Lietuvoje tiltai projektuojami pagal EC1 „Tiltų eismo apkrovos“. Pagal šį modelį viaduko važiuojamoji dalis suskaidoma į 3 m pločio juostas, kurių skaičius neturi sutapti su realiu eismo juostų skaičiumi, bet neturi viršyti 3. Apkrovimo juostą sudaro tolygiai išskirstyta apkrova UDL ir dviašio vežimėlio apkrova TS. Vienos ašies rato apkrova išskaidoma į 0,4x0,4 m plotą, tačiau dėl apkrovos plitimo per pakloto elementus šiuo atveju plotas yra 0,6x0,6 m. Dviašio vežimėlio vienos ašies apkrova Q_i nuo pirmos iki trečios juostos sudaro atitinkamai 300, 200, 100 kN, o tolygiai išskirstyta apkrova q_i atitinkamai – 9, 2,5, 2,5 kN/m². Juostomis neapkrauto likusio ploto apkrova q_r lygi 2,5 kN/m². Taikomi juostų apkrovų koreguojamieji koeficientai α_{Q_i} , α_{q_i} , α_{q_r} . Pirmosios juostos vežimėlio apkrovai $\alpha_{Q1}=0,8$, kiti – 1,0.

Šalutiniai apkraunami pėsčiųjų apkrova lygia $q_{PDL} = 2,5 \text{ kN/m}^2$.

Apkrovų išdėstymas nagrinėjamam viadukui pavaizduotas 14 pav.



14 pav. Apkrovų išdėstymas pagal LM1 modelį

Pagal apkrovų išdėstymą matome nemažus skirtumus tarp AK11 ir LM1 apkrovimo modelių. Suminė apkrova viduriniame tarpatramyje dėl AK11 transporto apkrovų sudaro:

$$48\text{m} \cdot \left((0,6\text{m} \cdot 2) \cdot 9\text{kN/m}^2 + (0,6\text{m} \cdot 2) \cdot 0,6 \cdot 9\text{kN/m}^2 \right) + 4 \cdot 11 \cdot 9,81\text{kN} + 2 \cdot 1,2\text{m} \cdot 4\text{kN/m}^2 \cdot 48\text{m} = 1721\text{kN}. \quad (3.3)$$

Suminė apkrova viduriniame tarpatramyje dėl LM1 transporto apkrovų sudaro:

$$48\text{m} \cdot \left(3\text{m} \cdot \frac{9\text{kN}}{\text{m}^2} + 3\text{m} \cdot 2 \cdot \frac{2,5\text{kN}}{\text{m}^2} \right) + 2 \cdot 0,6 \cdot 300\text{kN} + 2 \cdot 200\text{kN} + 2 \cdot 100\text{kN} + 2 \cdot 1,2\text{m} \cdot \frac{2,5\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 48\text{m} = 3264\text{kN}. \quad (3.4)$$

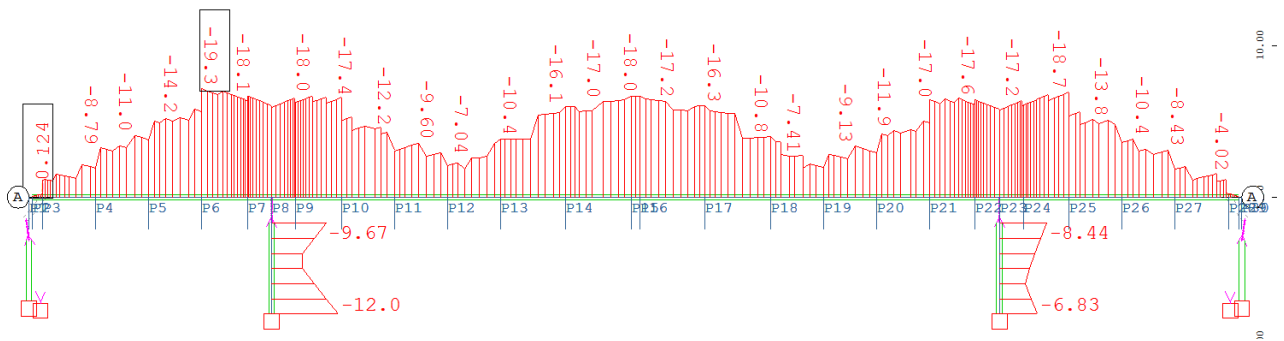
Palyginę matome, kad Eurokodas duoda 1,9 karto didesnes transporto apkrovas. Jeigu realus eismo intensyvumas siektų maksimalią apkrovą, pagal kurią skaičiuojami dabartiniai tiltai, pagal SNiP projektuotiems tiltams iškiltų realus pavojus.

4 SIJŲ BAIGTINIŲ ELEMENTŲ MODELIO SKAIČIAVIMO REZULTATAI

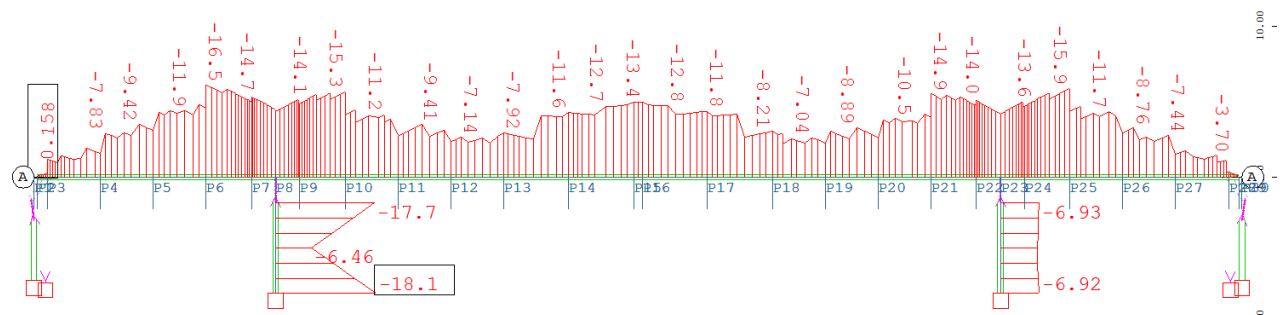
4.1 Įtempiai rygelyje

Eurokode [26] nurodoma, kad betono gniuždomieji įtempiai bet kuriuo laiko momentu nuo apspaudimo jėgos neturėtų būti didesni už $0,6f_{ck}(t)$. Betono klasei C30/37 tai sudaro $0,6 \cdot 30 = 18 \text{ MPa}$. Bet to nurodyta, kad gniuždomiesiems įtempiams, nuolat esant didesniems už $0,4f_{ck}(t)$ ($0,45 \cdot 30 = 13,5 \text{ MPa}$), reikia atsižvelgti į valkšnumo netiesiškumą.

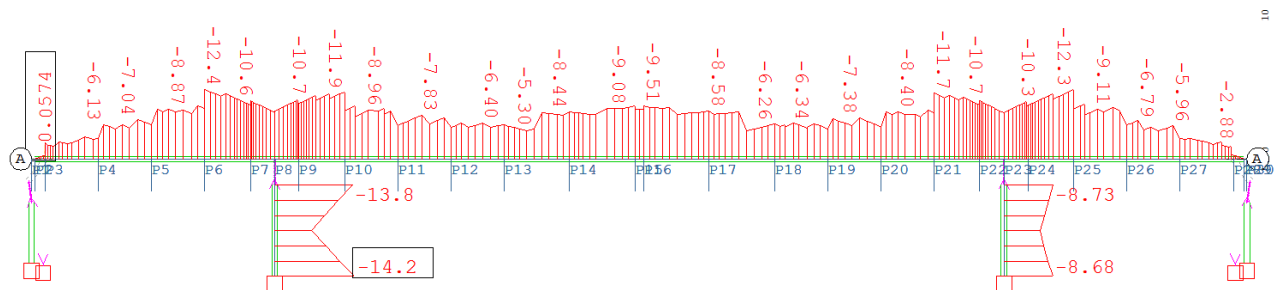
Atlikti skaičiavimai rodo (15 pav- 17 pav.), kad gniuždymo įtempiai iš karto po armatūros įtempimo siekia 19,3 MPa ir įrengus paklotą sumažėja iki 16,5 MPa, todėl galima daryti prielaidą, kad galioja tiesinė įtempių – deformacijų priklausomybė ir taikyti superpozicijos principą skaičiuojant poslinkius, įrašas.



15 pav. Gniuždymo įtempiai įtempus visą armatūrą, MPa



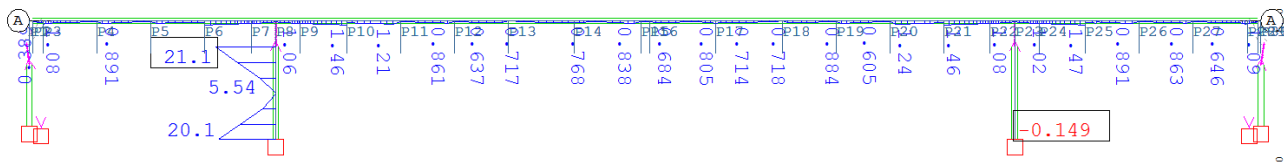
16 pav. Gniuždymo įtempiai įrengus paklotą, MPa



17 pav. Gniuždymo įtempiai po 50 metų, MPa

Iš tempimo įtempių gaubtinės per statybos laikotarpį (18 pav), matome, kad didžiausi įtempiai rygelyje siekia 1,46 MPa ir neviršija betono tempiamojo stiprio $f_{ctk,0,05} = 2 \text{ MPa}$.

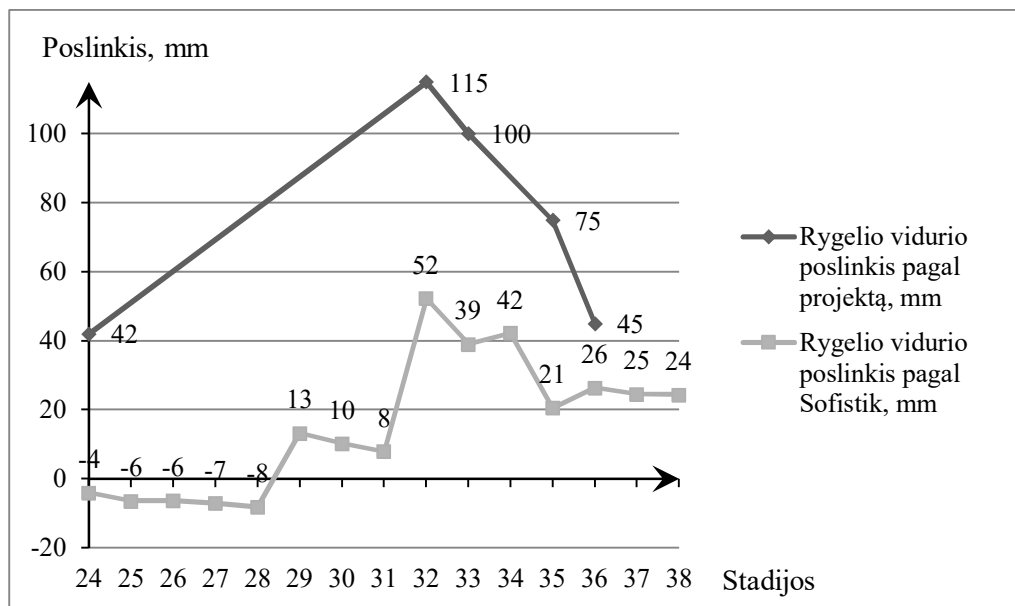
Tokie įtempiai nesukels betono pleišėjimo. Šie tempimo įtempiai daugiausiai susidaro rygelio skerspjūvio apatinėje dalyje, blokų montavimo metu, kai įtempinama viršutinė armatūra.



18 pav. Tempimo įtempiai per statybos laikotarpį, MPa

4.2 Deformacijos statybos metu

Statybos metu įvairiuose etapuose konstrukciją veikia ne tik skirtingos apkrovos, bet keičiasi ir konstrukcijos statinė schema. Projekte buvo pateiktas rygelio vidurio poslinkio kitimas keliose statybos etapuose. Rygelio vidurio poslinkio kitimas vaizduojamas 19 pav. juoda kreive. Poslinkio reikšmė nurodyta kaip skirtumas iki nulinės (projektinės) linijos. Įtempus I etapo (24 stadijos) blokų montažo armatūros gniūžtes, kurios randasi rygelio viršuje virš tarpinės atramos, gautas 30 mm rygelio galo prie kranštinės atramos poslinkis į viršų, o vidurio taško poslinkis gautas 42 mm į viršų. Įtempus visas I ir II etapo armatūros gniūžtes (32 stadija), projekte nurodytas rygelio vidurio poslinkis į viršų 115 mm. Rygelio vidurio įlinkis nuo monolitinės plokštės ir pakloto elementų projekte nurodytas 40 mm žemyn (35 stadija) ir dar papildomai dėl valkšnumo deformacijų rygelio viduryje turėtų pasislinkti 30 mm žemyn (36 stadija). Viaduko išilginis profilis turi būti išlaikytas, pagal projektinę liniją, todėl pirmi blokai montuojami su statybinėmis pakylomis, kad po visų gniūžčių įtempimo ir nuolatinių apkrovų veikimo rygelio padėtis atitiktų projektinę.

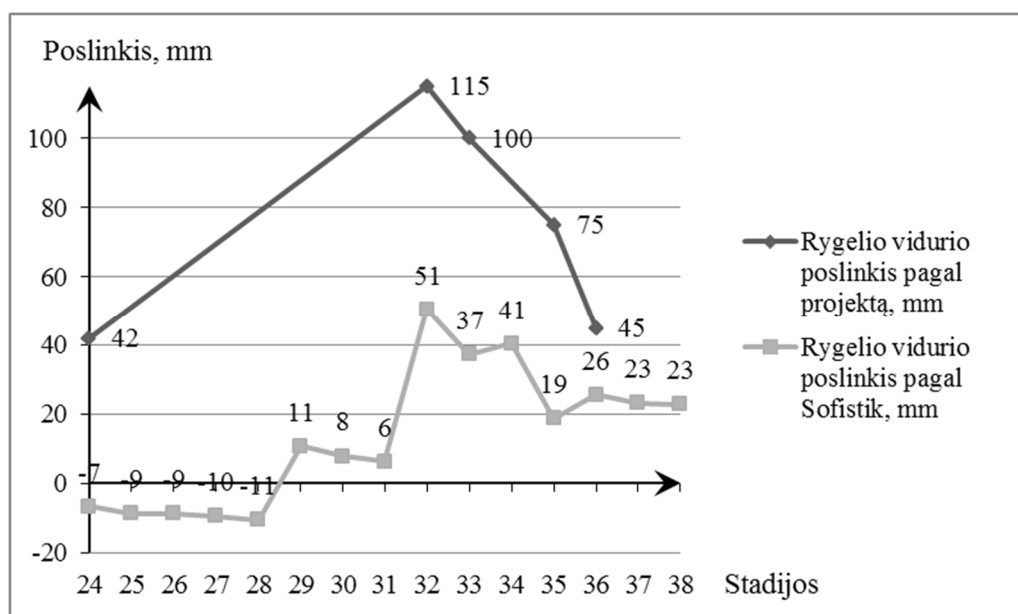


19 pav. Rygelio vidurio poslinkio kitimas

Sijų BE modelio skaičiavimo rezultatai skiriasi nuo projekte pateiktų reikšmių. Rygelio vidurio taško poslinkiai atvaizduoti 19 pav. pilka kreive. Įtempus visas blokų montažines gniūžtes, 24 stadijos pabaigoje, rygelio vidurio poslinkis gautas 4 mm žemyn, nors projekte

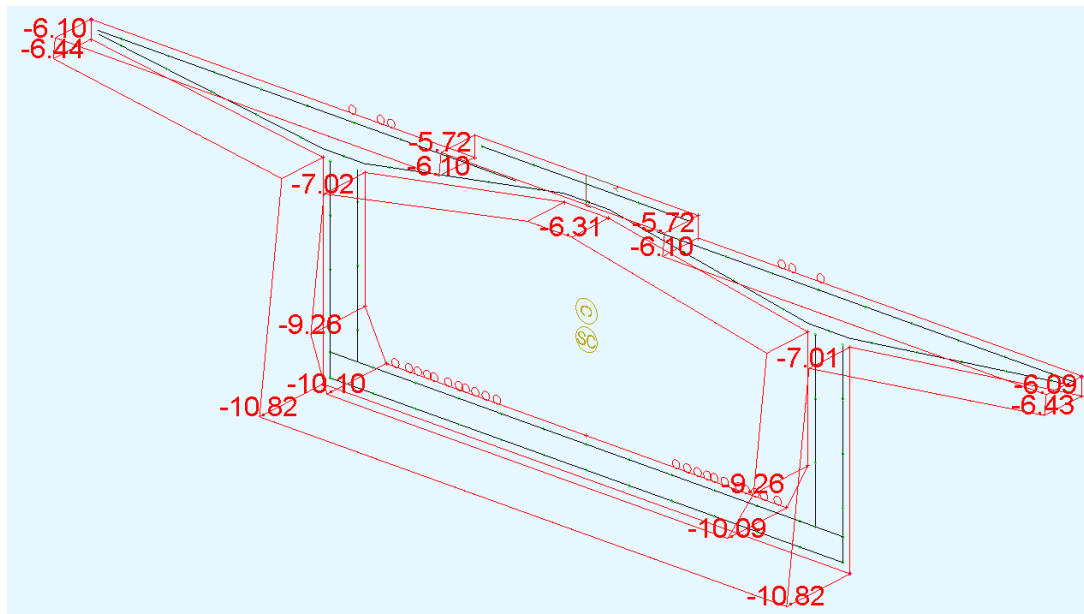
nurodytas 42 mm į viršų. Gaunamas 46 mm skirtumas. Rygelio konsolės galo prie kraštinės atramos apskaičiuotas poslinkis sudaro 17 mm į viršų, tuo tarpu projekte nurodytas 30 mm. Vėlesniuose etapuose šio galo poslinkis nekinta, nes jis laikinai, o vėliau ir liktinai inkaruojamas prie kraštinės atramos įrengus atraminius šarnyrus. Statybos procesuose iki dalies pagrindinės armatūros įtempimo, rygelio galo poslinkis svyruoja 10 mm ribose. Apie šiuos pokyčius projekte neužsimenama. Įtempus visą pagrindinę armatūrą gaunamas 52 mm poslinkis į viršų. Lyginant su projekte pateikta informacija, skirtumas sudaro 63 mm. Poslinkio pokytis dėl monolitinės dalies įrengimo gautas labai panašus kaip projekte: 13 mm (projekte 15 mm). Dėl pakloto elementų įrengimo programa gautas poslinkis 18 mm, o projekte nurodytas 25 mm. Bendrai palyginus programa apskaičiuota vidurio poslinkio kreivė gauta 46 – 63 mm žemiau.

Aukščiau aprašyti rezultatai gauti įvertinus 3 dienų valkšnumo deformacijas po kiekvieno bloko montažinių gniūžčių įtempimo. Nevertinant šių deformacijų rygelio vidurio poslinkis gaunamas 2 – 3 mm mažesnis visose stadijose (20 pav.). Tačiau konsolės galo poslinkis gautas mažesnis ir sudaro 13 mm, nes nevertinus valkšnumo deformacijų rygelio kreivis dėl apgniuždymo gaunamas mažesnis.



20 pav. Rygelio vidurio poslinkio kitimas nevertinant valkšnumo deformacijų

Didžiausi poslinkio nesutapimai gauti per 4 metų valkšnumo deformacijų laikotarpį. Projekte nurodytas sėdimas sudaro 30 mm, tačiau programa apskaičiuojamas 5 mm pakilimas į viršų. Valkšnumo deformacijos labai priklauso nuo betono apgniuždymo įtempių. Viaduko viduriniame tarpatramyje didžioji dalis įtemptos armatūros išdėstyta rygelio skerspjuvio apatinėje dalyje, todėl net ir dėl nuolatinės apkrovos poveikio didžiausi skerspjuvio gniūždymo įtempiai susidaro apatinėje dalyje (21 pav.). Didesnis apgniuždymas reiškia ir didesnę tos dalies susispaudimo deformaciją, todėl rygelis išlinksta į viršų.

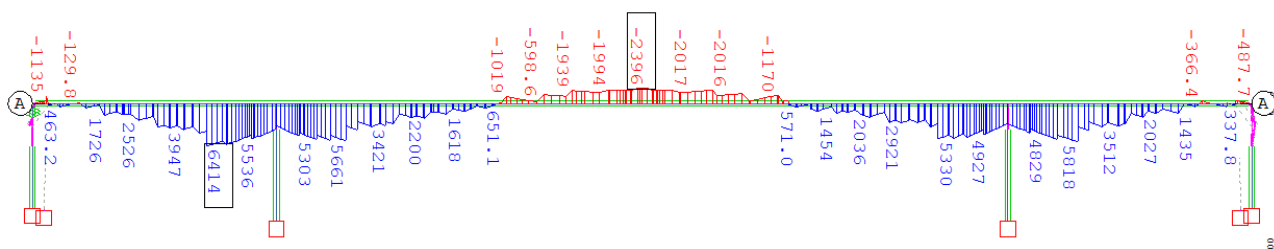


21 pav. Įtempiai rygelio viduriniame skerspjūvyje po pakloto įrengimo, MPa

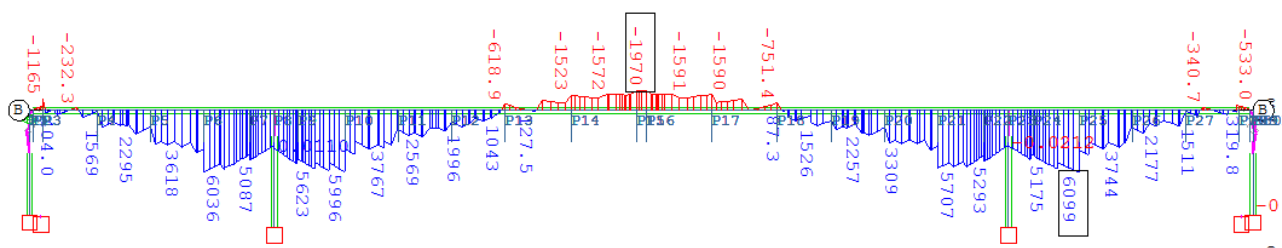
Vystantis deformacijoms per 4 metus įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje susivienodina, todėl toliau valkšnumo deformacijos vystosi tolygiai per visą skerspjūvį. Taip pat senesnio amžiaus betono valkšnumo deformacijos žymiai sulėtėja ir per vėlesnius 46 metus vidurio poslinkis dėl nuolatinių apkrovų veikimo tik nežymiai mažėja.

4.3 Apkrovimo modelių AK11 ir LM1 poveikiai viadukui

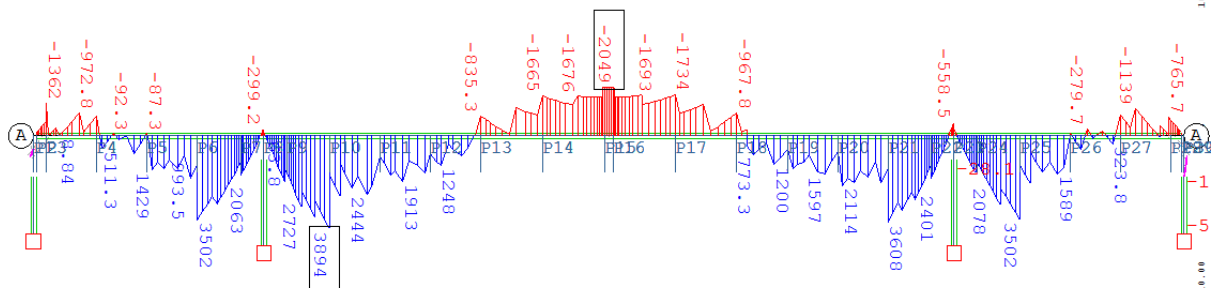
Įtemptoji armatūra dirba atlaikydama tempimo įtempimus, kuriuos skerspjūvio apačioje sukelia lenkimo momentas. Didžiausią lenkimo momentą sukelia transporto apkrovos, kurioms atlaikyti projektuojamas viadukas. Lenkimo momentai labiausiai pasikeičia per pirmus 4 metus vykstant valkšnumo deformacijoms (23 pav.). Vėlesnis pokytis nėra toks žymus, todėl kaip atskaitą lenkimo momentų pokyčiams nuo transporto apkrovų laikysime lenkimo momentus rygelyje po 50 metų valkšnumo deformacijų (24 pav.).



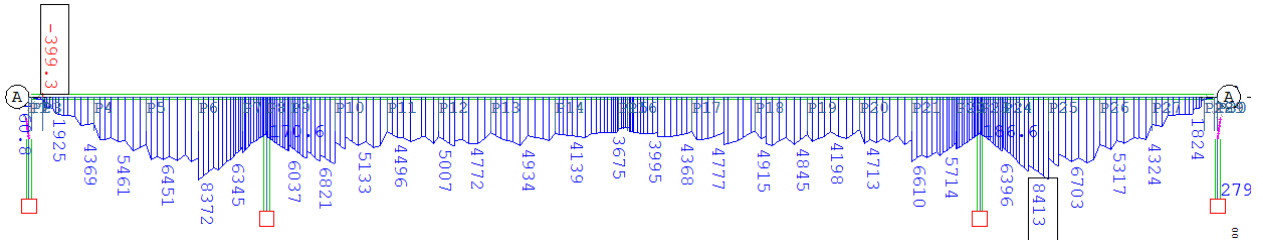
22 pav. Lenkimo momentai įrengus viaduką, kNm



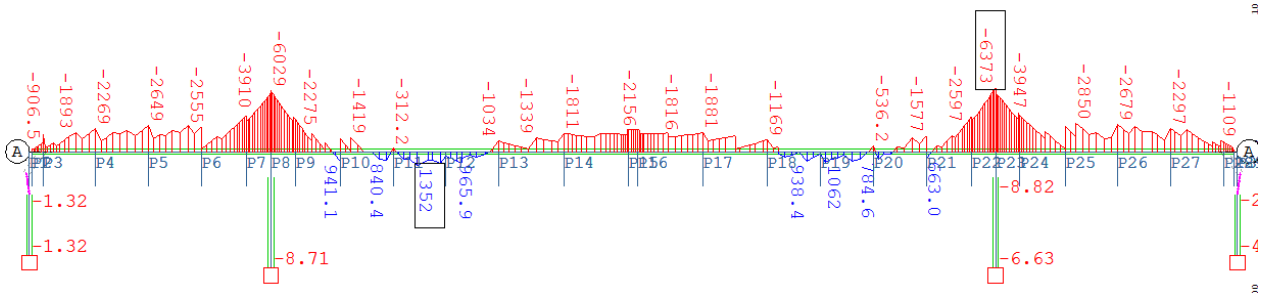
23 pav. Lenkimo momentai po 4 metų valkšnumo deformacijų, kNm



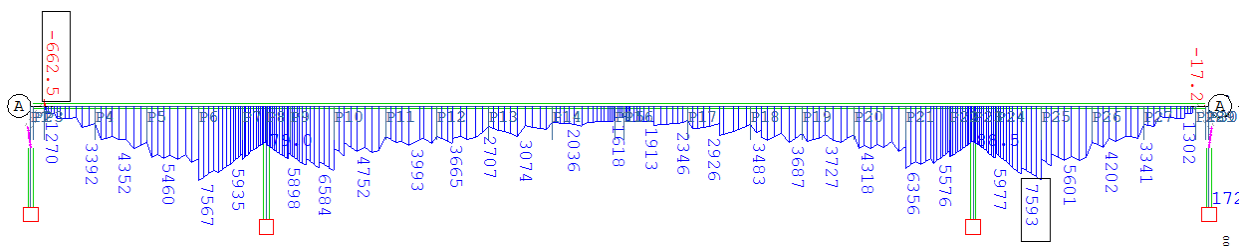
28 pav. Lenkimo momentų gaubtinė (minimumas). Dažninis derinys. AK11, kNm



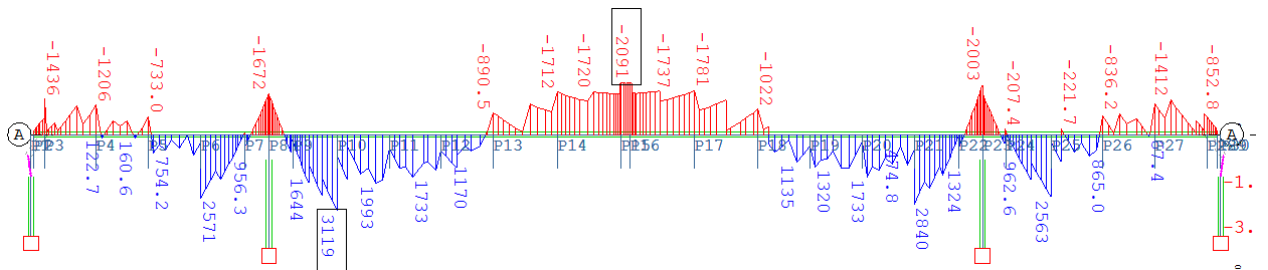
29 pav. Lenkimo momentų gaubtinė (maksimumas). Charakteristinis derinys. LM1, kNm



30 pav. Lenkimo momentų gaubtinė (minimumas). Charakteristinis derinys. LM1, kNm

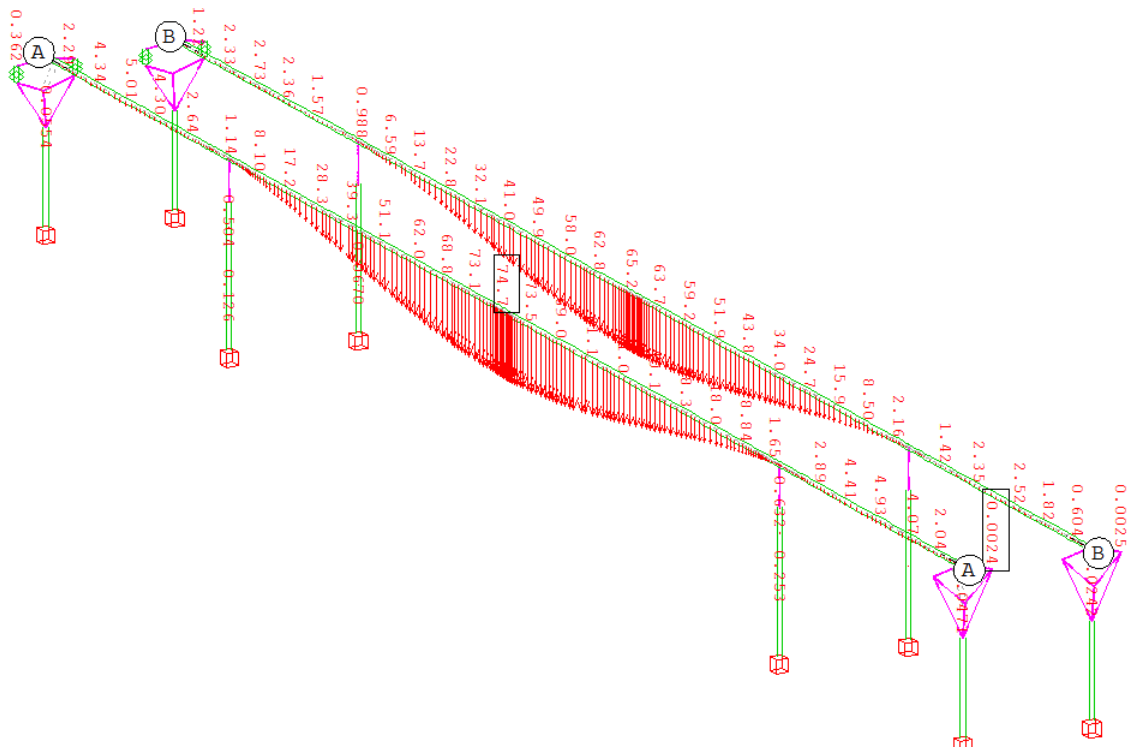


31 pav. Lenkimo momentų gaubtinė (maksimumas). Dažninis derinys. LM1, kNm

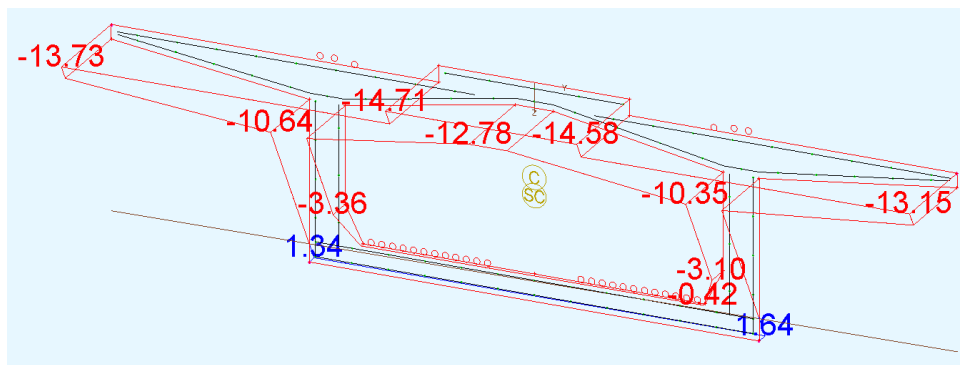


32 pav. Lenkimo momentų gaubtinė (minimumas). Dažninis derinys. LM1, kNm

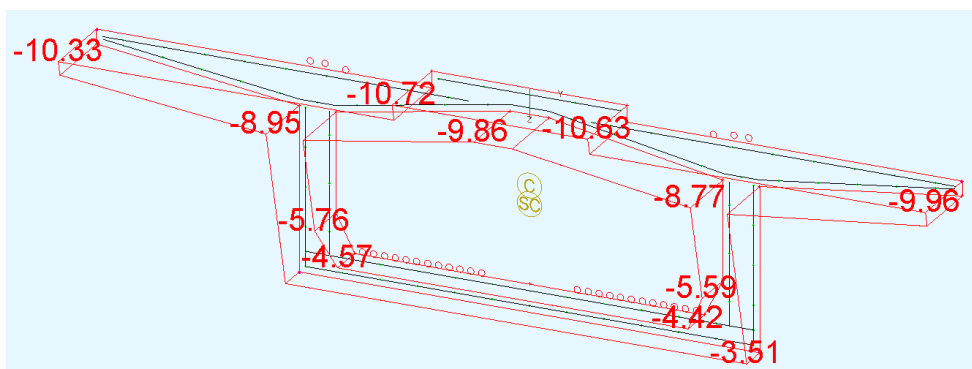
Sijų BE modelio rygelių įlinkis nuo transporto apkrovų pavaizduotas 33 pav ir 36 pav. Apkrovos išdėstytos taip, kad nepalankiausias poveikis sukeltų kairėje esančiam rygeliui. Esant AK11 apkrovimui gaunamas 51,0 mm įlinkis kairiajame rygelyje ir 8,5 mm mažesnis dešiniajame (42,5 mm). LM1 apkrovimo modelis sukelia 1,5 karto didesnius įlinkius atitinkamai



36 pav. Rygelių įlinkis veikiant LM1 charakterinėms apkrovoms, mm



37 pav. Charakterinio derinio su LM1 apkrovomis įtempiai rygelio viduryje, mm

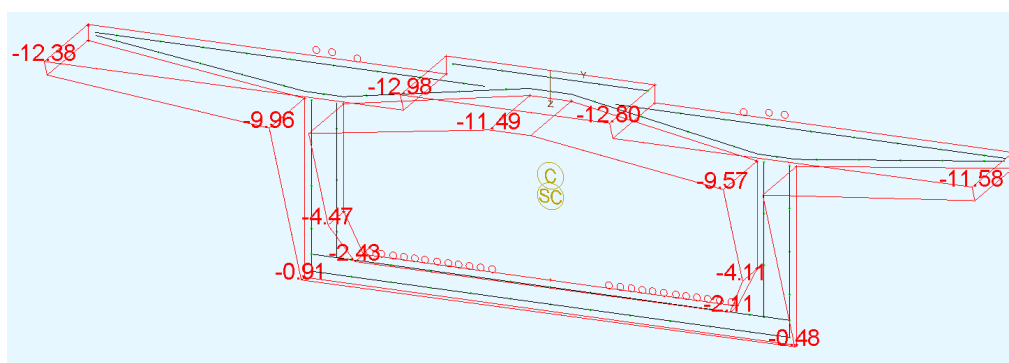


38 pav. Dažninio derinio su LM1 apkrovomis įtempiai rygelio viduryje, mm

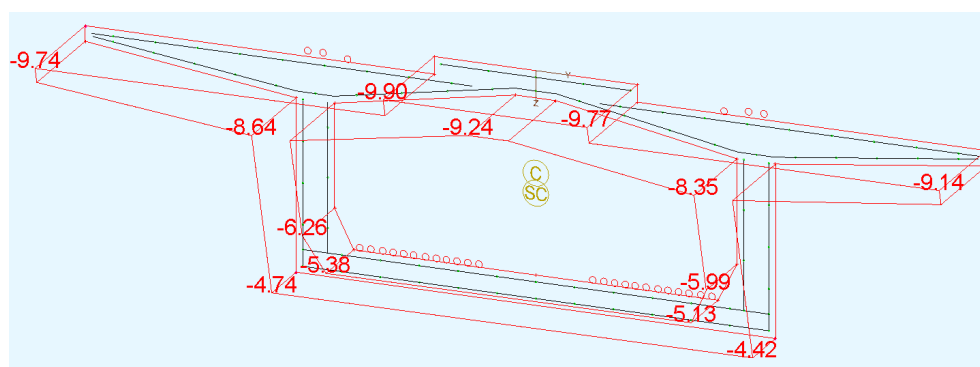
Laikant, kad skersinių diafragmų nėra, rygelių įlinkiai pateikti 3 lentelėje. Matome, kad įlinkių skirtumas tarp sijų padidėja apie 128 %. Tai rodo, kad diafragmų darbas turi didelę įtaką konstrukcijos deformacijoms. Konstrukcijai labiau įlinkstant gauname ir didesnius įtempius skerspjūvyje. Charakterinio derinio su LM1 apkrovomis tempimo įtempiai rygelio apačioje padidėja iki 3,2 MPa (41 pav.).

3 lentelė. Rygelių įlinkiai nevertinant diafragmų darbo sijų BE modelyje

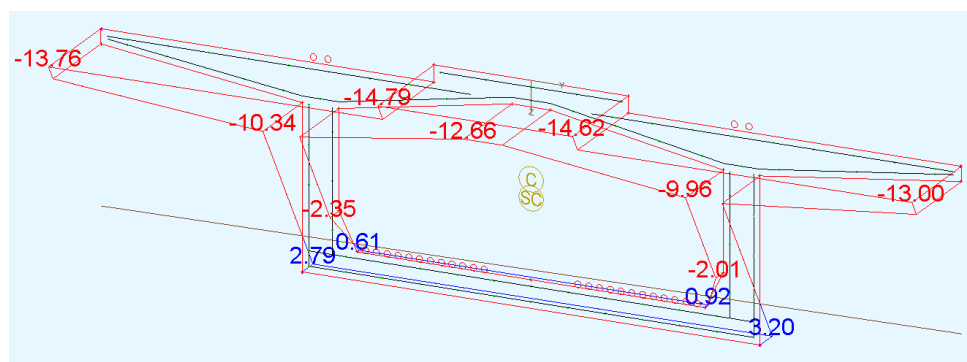
Modelis	Aprovimas	Įlinkis kairėje, mm	Įlinkis dešinėje, mm	Skirtumas, mm
Sijų BE su diafragmomis	AK11	51	42,5	8,5
Sijų BE be diafragmų	AK11	56,5	37,1	19,4
Sijų BE su diafragmomis	LM 1	74,7	65,2	9,5
Sijų BE be diafragmų	LM 1	80,8	59,2	21,6



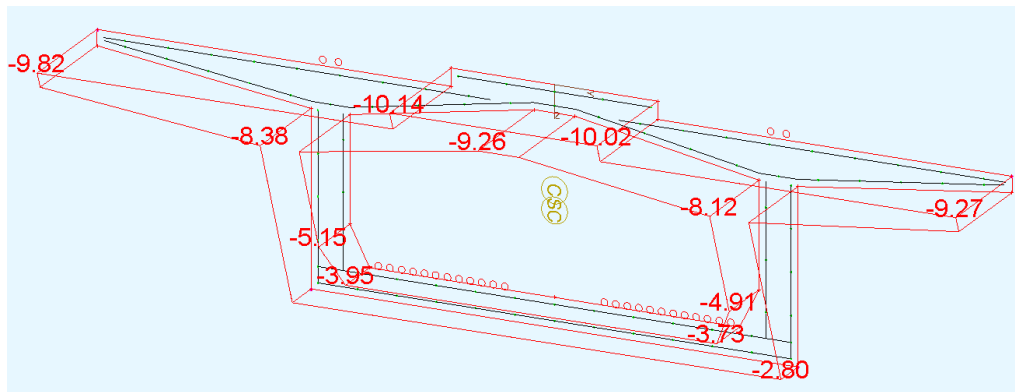
39 pav. Charakteristinio derinio su AK11 apkrovomis įtempiai rygelio viduryje, mm



40 pav. Dažninio derinio su AK11 apkrovomis įtempiai rygelio viduryje, mm



41 pav. Charakteristinio derinio su LM1 apkrovomis įtempiai rygelio viduryje, mm

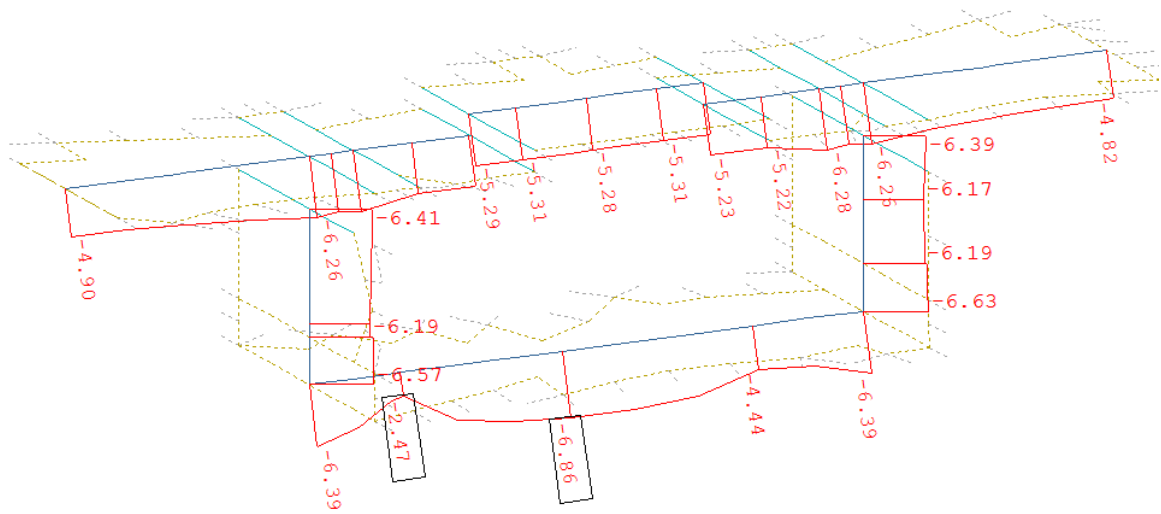


42 pav. Dažninio derinio su LM1 apkrovomis įtempiai rygelio viduryje, mm

5 PLOKŠČIŲ BAIGTINIŲ ELEMENTŲ MODELIO SKAIČIAVIMO REZULTATAI

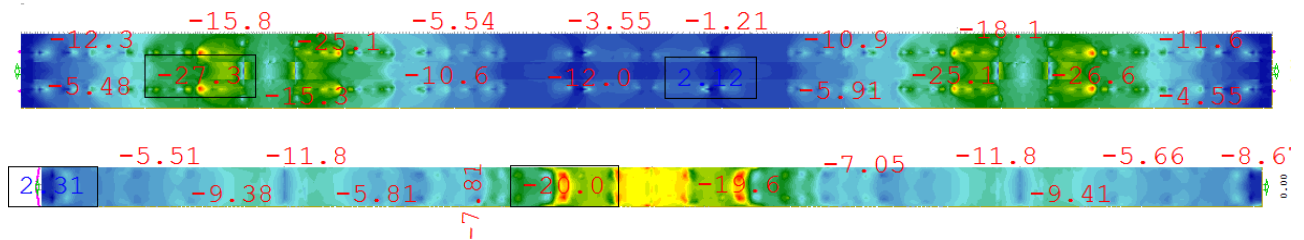
5.1 Įtempiai rygelyje

Plokščių BE įtempių atvaizdavimas yra daug detalesnis nei sijų BE. Sijų BE elementuose įtempiai gaunami iš sijos skerspjūvio deformacijų, kurios apskaičiuojamos pagal elemento kreivį. Tokiu atveju nėra galimybės įvertinti lokalių įtempių dėl koncentruotų apkrovų, išankstinio įtempimo jėgos. Iš plokščių BE sumodeliuotame skerspjūvyje gaunamos lokalsios deformacijos ir įtempiai. Čia atsispindi įtemptos armatūros inkaravimo vietos, įtempių pasiskirstymas vertikalųjų juostų prijungimo vietose (43 pav.).

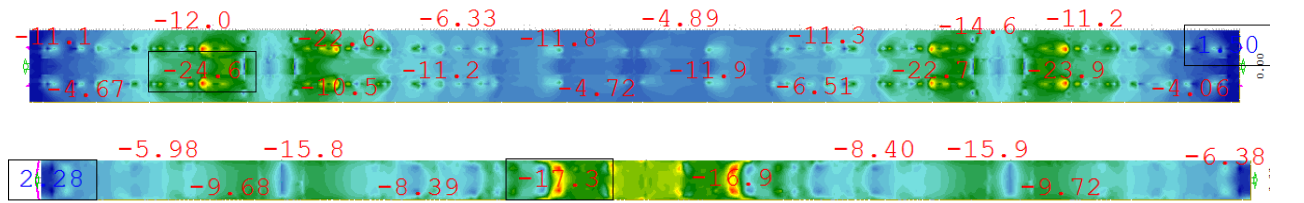


43 pav. Įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje

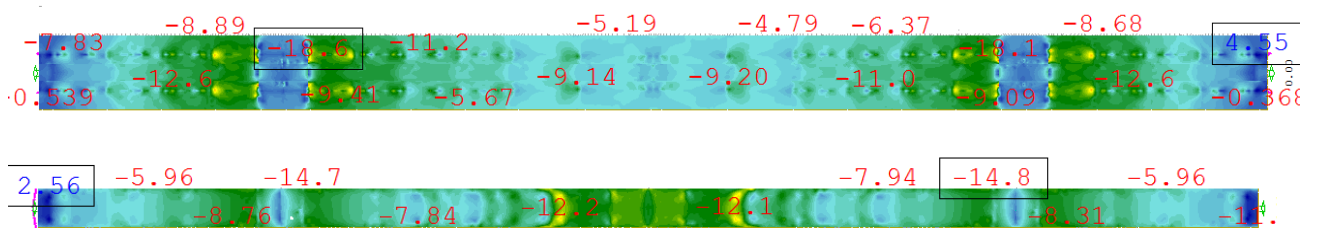
Plokščių BE modeliu apskaičiuotų gniuždymo įtempių kitimas įvairiose stadijose pavaizduotas įtempių diagramomis 44 pav– 46 pav. Paveiklo viršutinė dalis vaizduoja įtempius skerspjūvio viršutinėje dalyje, o apatinė dalis – apatinėje dalyje. Mėlyna spalva žyminiai mažiausi įtempiai, o raudona – didžiausi. Šiose diagramose matome įtempių koncentracijas gniūžčių inkaravimo vietose, kurios siekia 27,3 MPa. Žinoma, tai nereiškia, kad tikroje konstrukcijoje susidaro tokio dydžio įtempiai. Gniūžtė tvirtinama į inkarus ar atsparas, kurie gniuždymo jėgą išskirsto į didesnę plotą. Iš pateiktų diagramų matome, kad tarpatrio apačioje didžiausi gniuždymo įtempiai susidaro įtempus visą armatūrą, o vėliau dėl papildomų nuolatinių apkrovų ir valkšnumo deformacijų sumažėja. Rygelio viršuje stebimas atvirkščias reiškinys – įtempiai didėja.



44 pav. Gniuždymo įtempiai įtempus visą armatūrą, MPa



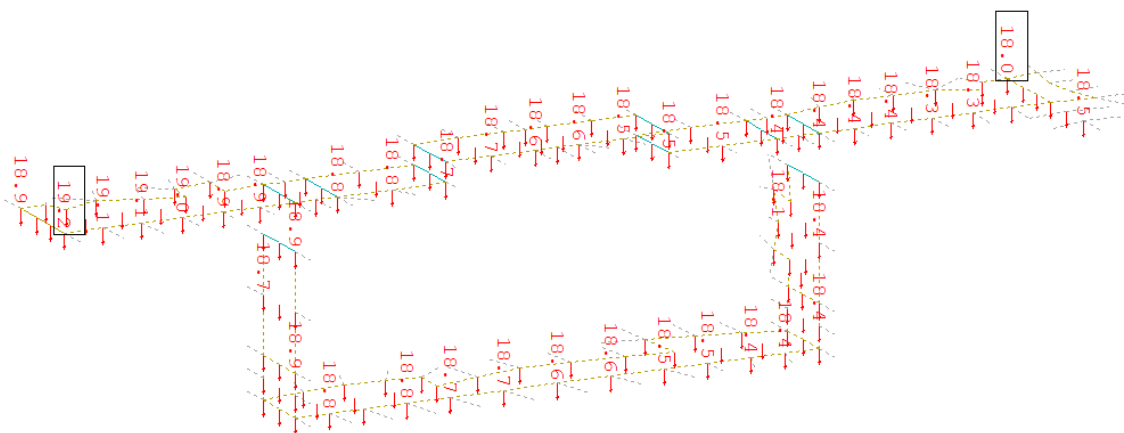
45 pav. Gniuždymo įtempiai įrengus paklotą, MPa



46 pav. Gniuždymo įtempiai po 50 metų, MPa

5.2 Deformacijos statybos metu

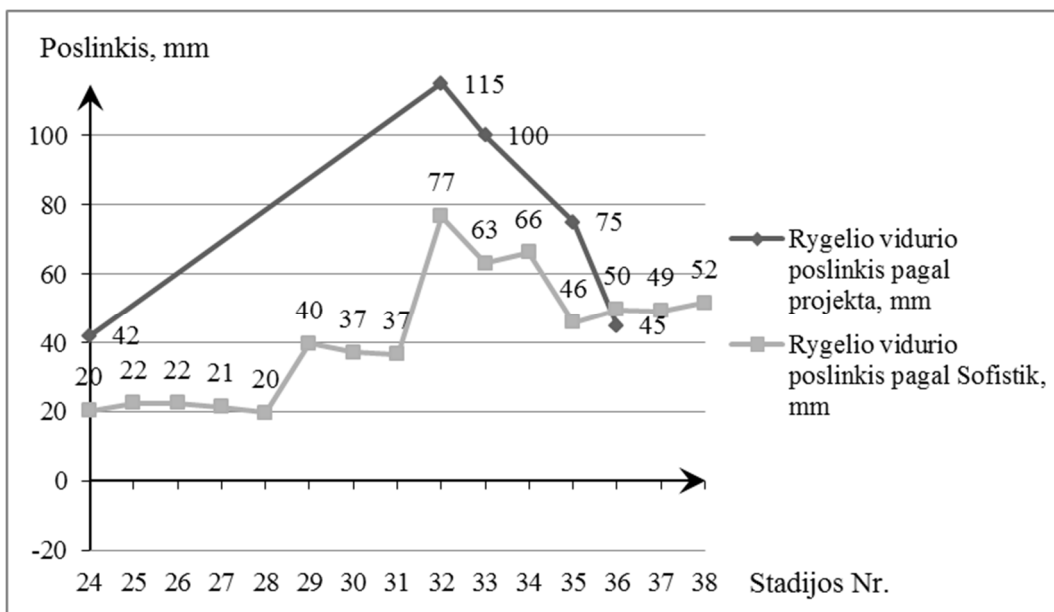
Sijų BE modelyje baigtiniu elementu laikomas strypas su tam tikromis skerspjūvio savybėmis, todėl rezultate galime gauti tik to strypo mazgo poslinkį ir posūkį erdvėje. Plokščių BE modelyje pats skerspjūvis sudarytas iš daug elementų, todėl gaunami visų baigtinių elementų mazgų poslinkiai, kurie skiriasi per skerspjūvį (47 pav.). Šiuo modeliu galima įvertinti vietines skerspjūvio deformacijas, jų netolygumą dėl apkrovos veikimo. Nagrinėjant rygelio vidurio poslinkio kitimą statybų metu vertinsime rygelio skerspjūvio viršutinės dalies vidurio poslinkius.



47 pav. Bloko B5 galo vietiniai poslinkiai dėl pakloto įrengimo apkrovų, mm

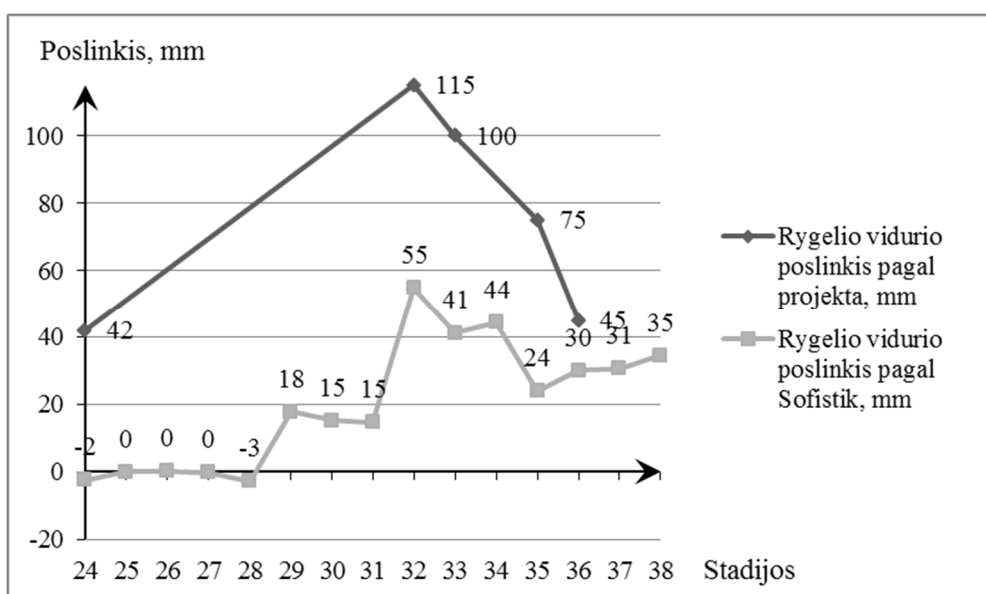
Rygelio vidurio poslinkiai atvaizduoti 48 pav. pilka kreive. Įtempus visas blokų montažines gniūžtes, 24 stadijos pabaigoje, rygelio vidurio poslinkis gautas 22 mm mažesnis nei

projektinis ir sudaro 20 mm. Rygelio konsolės galo prie kraštinės atramos apskaičiuotas poslinkis 24 mm į viršų, ir nuo projekcinio skiriasi tik 6 mm. Statybos procesuose iki dalies pagrindinės armatūros įtempimo, rygelio galo poslinkis svyruoja 20 mm ribose. Įtempus visą pagrindinę armatūrą gaunamas 77 mm poslinkis į viršų. Lyginant su projekte pateikta informacija, skirtumas sudaro 38 mm. Poslinkio pokytis dėl monolitinės dalies įrengimo gautas 14 mm, dėl pakloto elementų įrengimo – 17 mm. Projekte atitinkamai nurodyta 15 ir 25 mm. Bendrai palyginus, programa apskaičiuota vidurio poslinkio kreivė gauta 22 – 37 mm žemiau nei nurodyta projekte. Lyginant su šijų BE modeliu rezultatai skiriasi apie 2 kartus.



48 pav. Rygelio vidurio poslinkis statybos metu

Plokščių BE modelio skaičiavimo rezultatai, kai nevertinamos valkšnumo deformacijos blokų montavimo metu, žymiai skiriasi nuo tų, kai valkšnumo deformacijos vertinamos. Skirtumas sudaro apie 20 mm į žemesnę pusę (49 pav.). Šiuo atveju rygelio konsolės galo poslinkis gautas 11 mm ir tai yra 2 kartus mažesnis, lyginant su pirmu variantu.

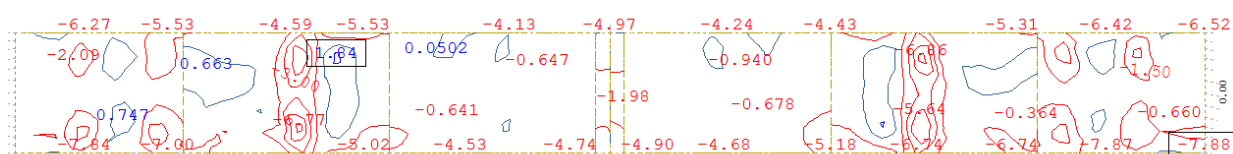


49 pav. Rygelio vidurio poslinkis nevertinant valkšnumo deformacijų

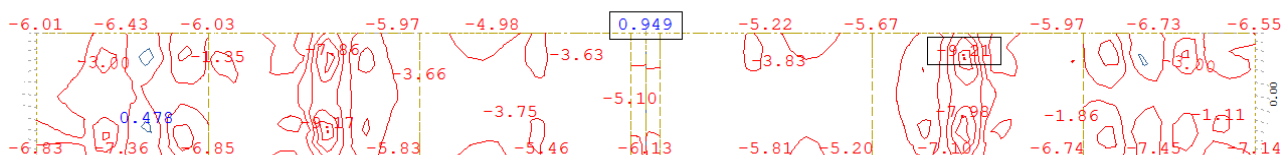
5.3 Apkrovimo modelių AK11 ir LM1 poveikiai viadukui

Nuo 50 paviki 55 pav. pateikiamos ryglio 6 vidurinių bloką (B-4 iki B-6) apatinės juostos svarbiausiųjų įtempių diagramos esant AK11 ir LM1 apkrovų modeliui prie charakteristinio, dažninio ir skaičiuotinio derinio. Diagramose įtempių koncentracijos puikiai atspindi armatūros gniūžčių inkaravimo vietas.

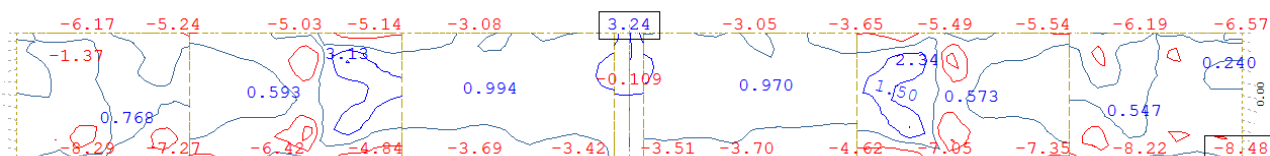
Veikiant apkrovimo modeliui AK11 ryglio apatinė juosta yra apgniuždyta 0,6 – 4 MPa gniūždymo įtempiais pagal charakteristinį derinį. Pagal dažninį derinį, nuo kurio tikrinamas konstrukcijos pleišėjimas, gaunami 1 – 6 MPa gniūždymo įtempiai, rodantys, kad konstrukcijos pleišėjimo bus išvengta. Charakteristinio derinio 1,9 karto didesnės transporto apkrovos, pagal LM1 modelį, ryglio apatinėje dalyje sukelia nedidelius tempimo įtempius, siekiančius iki 1 MPa. Pagal dažninį derinį tempimo įtempiai nesusidaro.



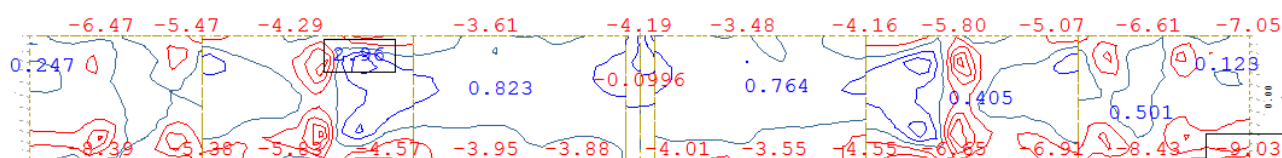
50 pav. Įtempiai skerspjūvio apatinėje juostoje. Charakteristinis derinys. AK11, MPa



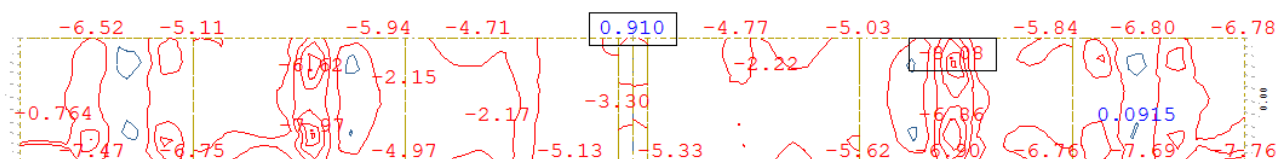
51 pav. Įtempiai skerspjūvio apatinėje juostoje. Dažninis derinys. AK11, MPa



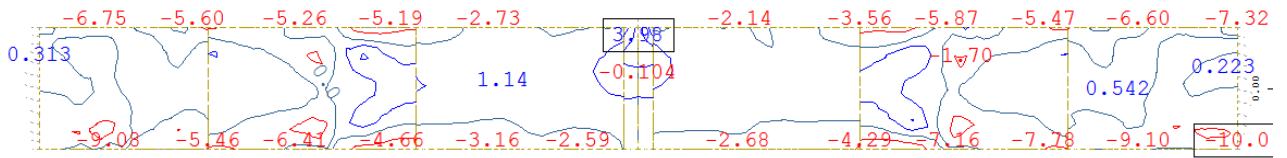
52 pav. Įtempiai skerspjūvio apatinėje juostoje. Skaičiuotinis derinys. AK11, MPa



53 pav. Įtempiai skerspjūvio apatinėje juostoje. Charakteristinis derinys. LM1, MPa



54 pav. Įtempiai skerspjūvio apatinėje juostoje. Dažninis derinys. LM1, MPa

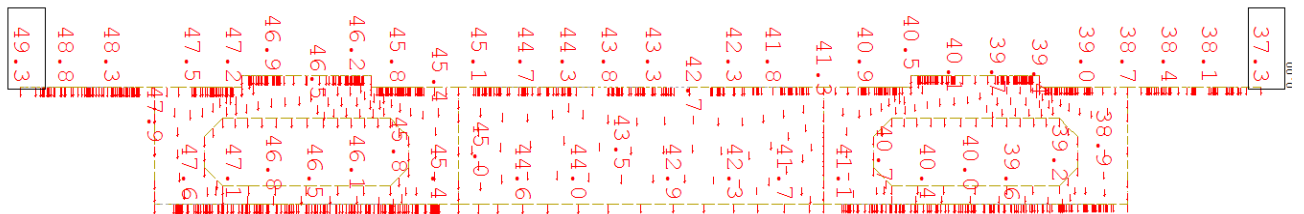


55 pav. Įtempiai skerspjūvio apatinėje juostoje. Skaičiuotinis derinys. LM1, MPa

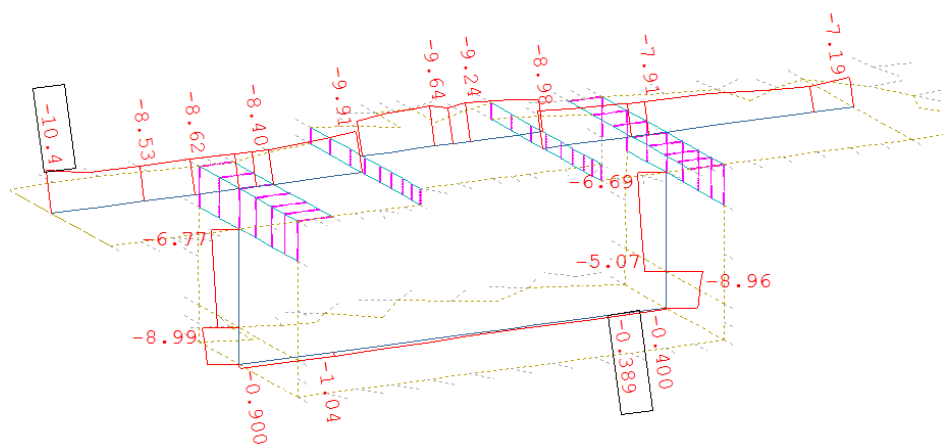
Didžiausias įlinkis, kurį sukelia transporto apkrovos, nustatytas sudarius dviejų rygelių modelį. Šiame modelyje įvertinta ir skersinių diafragmų įtaka, kurios turėtų užtikrinti bendrą abiejų rygelių darbą.

Viaduko rygelių įlinkis veikiant transporto apkrovoms parodytas 56 pavir 59 pav. Apkrovos išdėstytos taip, kad sukeltų nepalankiausią poveikį kairėje esančiam rygeliui. Paveiksluose pagal poslinkius matomas visos perdangos posūkis pagal išilginę ašį. Kairinė sija įlinksta 45,5 mm, o dešininė 40 mm esant apkrovimui AK11. Tuo tarpu didesnį įlinkiai susidaro esant LM1 apkrovimui, atitinkamai 67,7 ir 60,7 mm. Su 1,9 karto didesnėmis apkrovomis gaunamas apie 1,5 karto didesnis viaduko įlinkis.

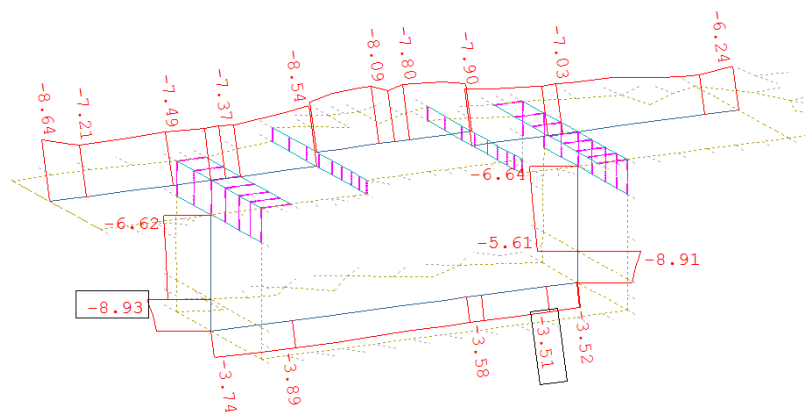
Charakteristinio ir dažninio derinio su transporto apkrovomis rygelio vidurio įtempiai pavaizduoti 57 pav58 pav60 pavir 61 paveiksluose. Čia atvaizduoti plokštės BE apatinio sluoksnio įtempiai, todėl rygelio viršutinėje juostoje matome ne didžiausius įtempius. Matome, kad tik charakteristiniame derinyje su LM1 apkrovomis skerspjūvio apačioje susidaro 1 MPa tempimo įtempiai, neviršijantys betono tempiamojo stiprio.



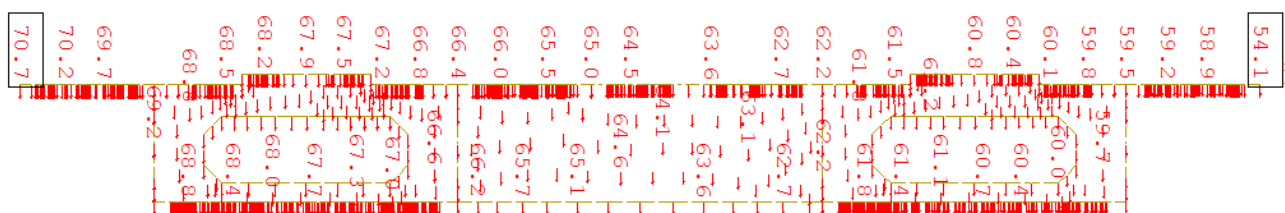
56 pav. Įlinkis nuo AK11 transporto apkrovų charakteristinio derinio, mm



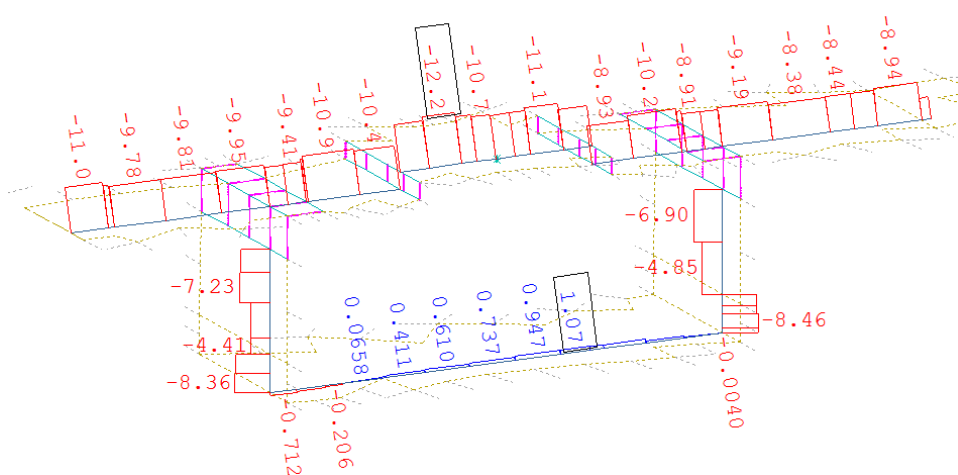
57 pav. Charakteristinio derinio su AK11 apkrovomis įtempiai rygelio viduryje, mm



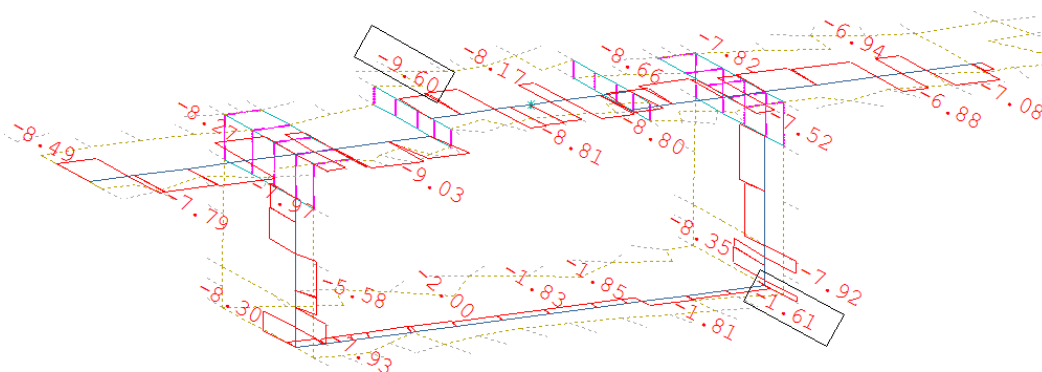
58 pav. Dažninio derinio su AK11 apkrovomis įtempiai rygelio viduryje, mm



59 pav. Įlinkis nuo LM1 transporto apkrovų charakteristinio derinio, mm



60 pav. Charakteristinio derinio su LM1 apkrovomis įtempiai rygelio viduryje, mm



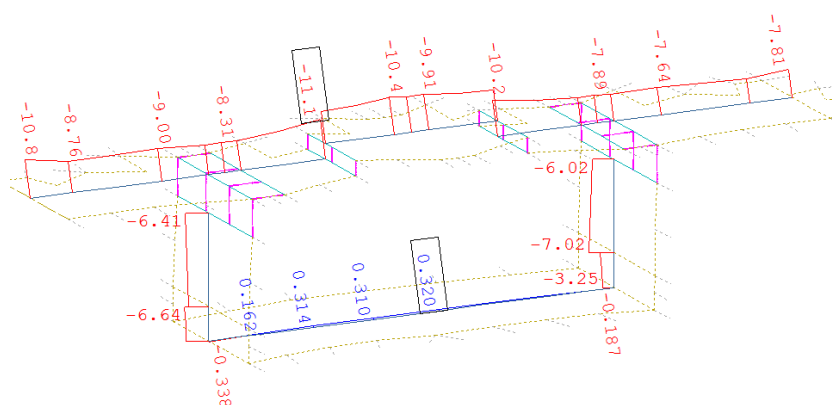
61 pav. Dažninio derinio su LM1 apkrovomis įtempiai rygelio viduryje, mm

Laikant, kad skersinių diafragmų nėra, rygelių įlinkiai pateikti 4 lentelėje. Matome, kad įlinkių skirtumas tarp sijų padidėja 44 – 57 %. Įlinkio padidėjimas nulemia truputį didesnius

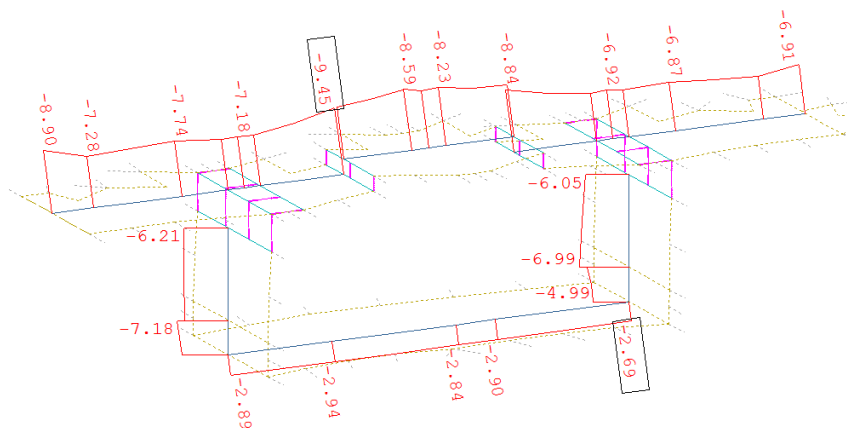
įtempius skerspjūvyje. Nevertinant diafragmų darbo, 62 paveiksle matome, kad ir AK11 apkrovos sukelia tempimo įtempius rygelio apačioje, tačiau jie nesiekia net 1 MPa.

4 lentelė. Rygelių įlinkiai nevertinant diafragmų darbo plokščių BE modelyje

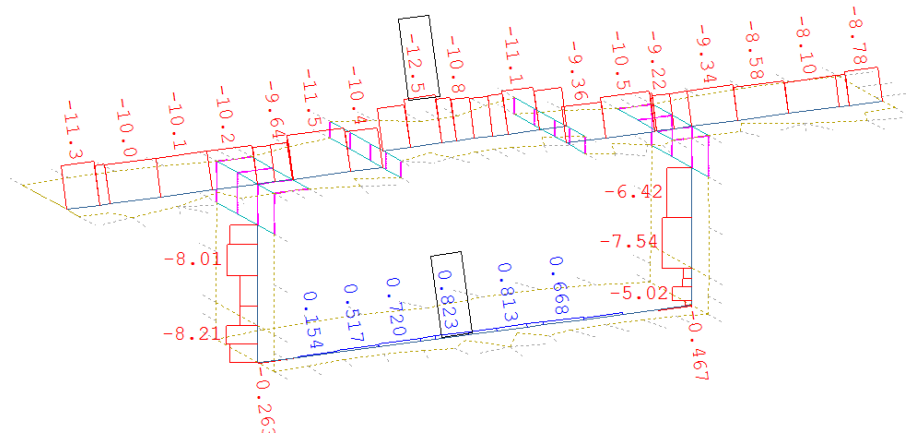
Modelis	Apkrovimas	Įlinkis kairėje, mm	Įlinkis dešinėje, mm	Skirtumas, mm
Plokščių BE su diafragmomis	AK11	46,5	39,7	6,8
Plokščių BE be diafragmų	AK11	48	38,2	9,8
Plokščių BE su diafragmomis	LM 1	67,9	60,8	7,1
Plokščių BE be diafragmų	LM 1	69,5	58,3	11,2



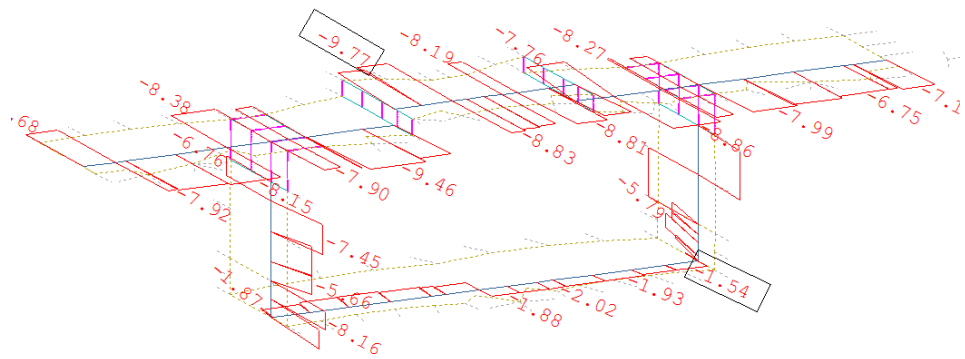
62 pav. Charakteristinio derinio su AK11 apkrovomis įtempiai rygelio viduryje, mm



63 pav. Dažninio derinio su AK11 apkrovomis įtempiai rygelio viduryje, mm



64 pav. Charakteristinio derinio su LM1 apkrovomis įtempiai rygelio viduryje, mm

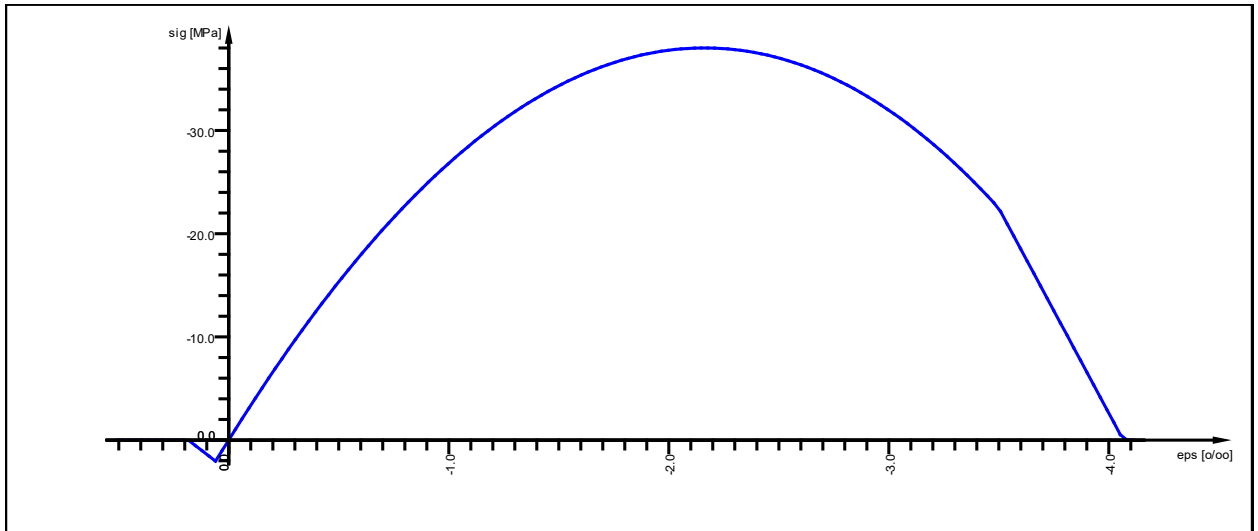


65 pav. Dažninio derinio su LM1 apkrovomis įtempiai rygelio viduryje, mm

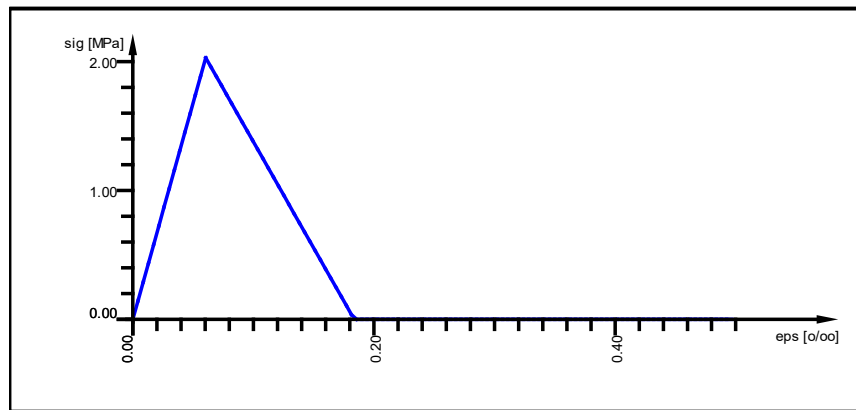
6 NETIESINĖ ANALIZĖ

6.1 Netiesinės analizės metodas

Netiesinės analizės skaičiavimo algoritmai aprašyti programos naudotojo vadove [27]. Programoje netiesinė analizė betonui taikoma atsižvelgiant į netiesinę įtempių-deformacijų kreivę tempimo ir gniuždymo zonoje. Tai reiškia, kad viršijus ribines deformacijas laikoma, kad betonas nebedirba. Įvertinamos ir paprastosios armatūros netiesinės įtempių-deformacijų kreivės. Taip pat atsižvelgiama į standėjimo efektą pleišėjimo atveju. Įtemptosios armatūros netiesinis darbas nevertinamas, t.y. deformacijoms viršijus takumo ribą įtempiai nedidėja ir nemažėja.



66 pav. Betono C30/37 įtempių-deformacijų kreivė taikoma netiesinėje analizėje



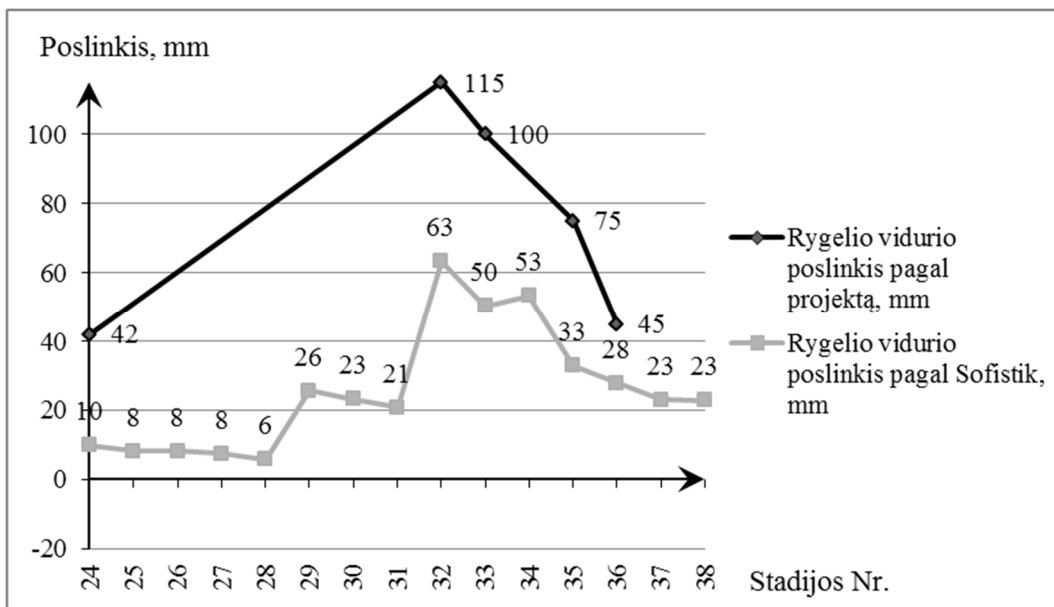
67 pav. Betono C30/37 įtempių deformacijų kreivė tempiamojoje zonoje

6.2 Rygelio poslinkiai įvertinus netiesiškumą

Tiesinės analizės skaičiavimai rodo, kad betono įtempiai artimi ir net šiek tiek viršija pagal Eurokodą leidžiamus $0,6f_{cK}(t)$ gniuždymo įtempius įtemptąja armatūra armuotose konstrukcijose. Tuo galima remtis, kad tikslinga patikrinti skaičiavimus netiesinėmis sąlygomis. Netiesinė analizė atliekama plokščių BE modelyje.

Rygelio vidurio poslinkio kitimas pateikiamas 68 pav. Gauta, kad poslinkis yra apie 10 mm mažesnis visose stadijose iki pakloto įrengimo (35 stadija), nei to paties modelio tiesinė

analizė. Dėl valkšnumo deformacijų per pirmus 4 metus gauname 5 mm poslinkį žemyn. Dar po 25 metų poslinkis padidėja 5 mm. Netiesinės ir tiesinės analizės skaičiavimo pagrindinis skirtumas: valkšnumo deformacijų sukulto poslinkio kryptis. Atliekant netiesinę analizę patikrintas ir galimas rygelio pleišėjimas, tačiau dėl nuolatinių apkrovų veikimo plyšiai nesusidarė.



68 pav. Rygelio poslinkio kitimas įvertinus netiesiškumą

6.3 Viaduko įlinkio kitimas dėl armatūros korozijos

Autoriai [28] atliko dėžinio skerspjūvio viaduko plyšių pločio kitimo matavimą veikiant dinaminėms apkrovoms. Šio tipo viadukai po 30 metų eksploatacijos jau pasižymi nusidėvėjimu. Rygeliuose atsivėrę normaliniai ir įstrižieji plyšiai, įtemptosios armatūros gniūžtės koroduoja, kai kur ir nutrūksta. Šiame straipsnyje nurodoma, kad prie esamų plyšio pločių (0,3-0,5 mm) turėtų nedirbti 7-8 armatūros gniūžtės.

Siekiant sumodeliuoti plyšio atsivėrimą, viaduko plokščių BE modelyje atlikti tokie pakeitimai: pasirinktose 8 apatinės armatūros gniūžtėse palaispniui mažintas skerspjūvio plotas ir apgniuždymo jėga (5 lentelė).

5 lentelė. Gniūžčių skerspjūvio mažėjimas

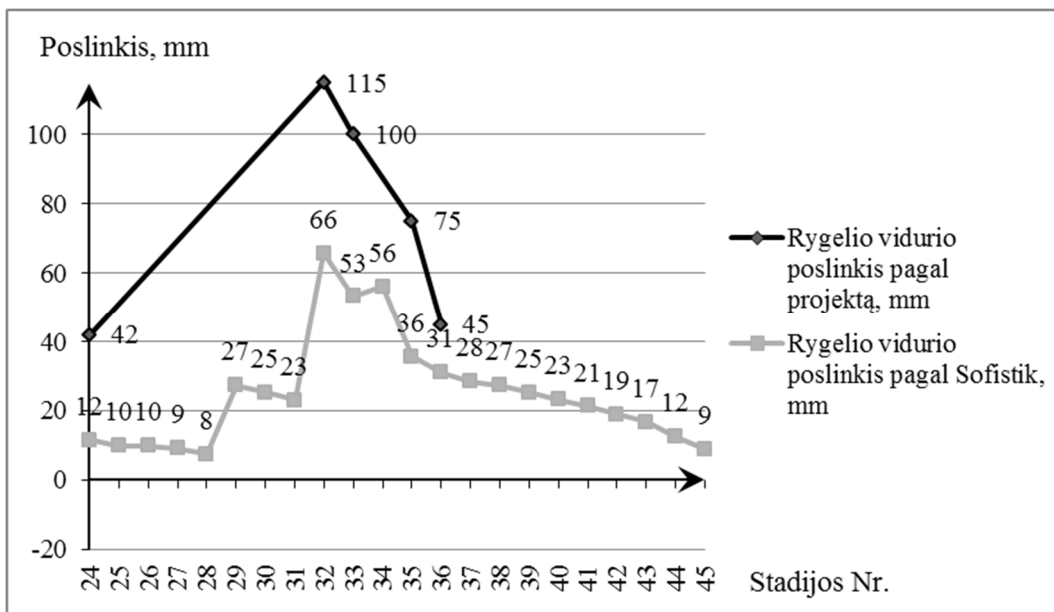
Armatūros procentinis kiekis	A_p, mm^2	P, kN
8 vnt. 100 %	471	450
8 vnt. 75 %	353	337
8 vnt. 50 %	235	225
8 vnt. 25 %	117	113
8 vnt. 0 %	0	0

Pirmas skerspjūvio sumažinimas atliktas po 10 metų valkšnumo deformacijų. Po kiekvieno skerspjūvio sumažinimo leista vystyti valkšnumo deformacijoms dar 7,5 metų. Skaičiavimams atlikti įvestos papildomos skaičiavimo stadijos, kurios pateiktos 6 lentelėje.

6 lentelė. Skaičiavimo stadijos

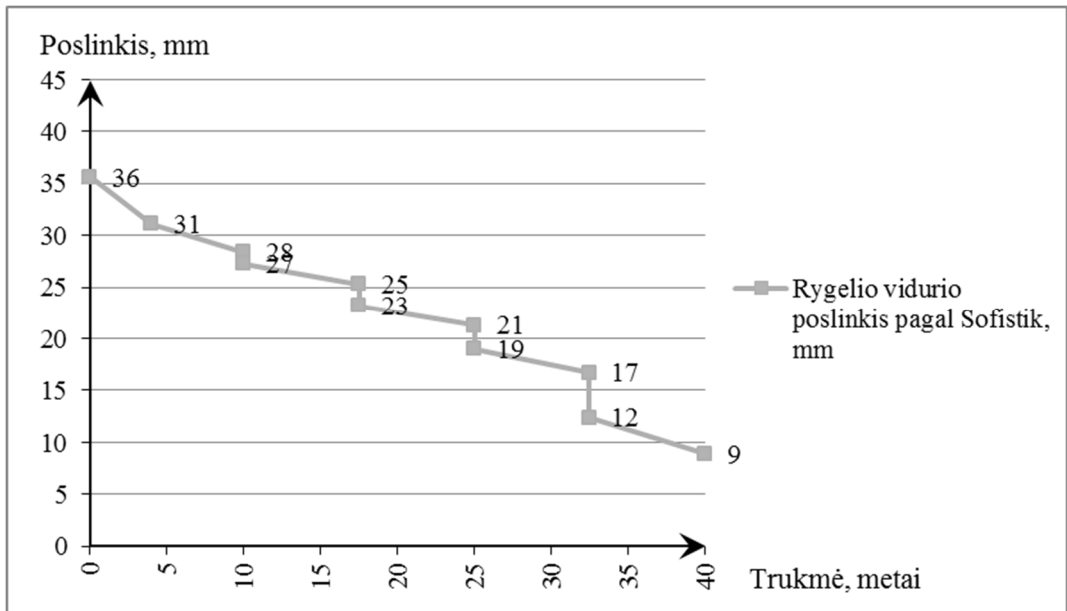
Stadijos nr.	Pavadinimas
24	Bloko B6 valkšnumas ir traukumas 3 dienos
25	Atramos pastūmimas 2cm
26	Šarnyro blokų su šarnyrais įrengimas
27	Kraštinės templės pašalinimas
28	Rygelio vidurio sumonolitinis
29	Lynų Nr17-25 įtempimas
30	Montažinių lynų įtempimas
31	Laikino kolonų išramstymo pašalinimas
32	Lynų Nr26-39 įtempimas
33	Monolitinės plokštės įrengimas
34	Montažinių lynų nupjovimas
35	Pakloto elementų įrengimas
36	Valkšnumas ir traukumas 4 metai
37	Valkšnumas ir traukumas +6 metai
38	Nutrūkimas 8 vnt. 75proc
39	Valkšnumas ir traukumas +7,5 metų
40	Nutrūkimas 8 vnt. 50proc
41	Valkšnumas ir traukumas +7,5 metų
42	Nutrūkimas 8 vnt. 25proc
43	Valkšnumas ir traukumas +7,5 metų
44	Nutrūkimas 8 vnt. 0proc
45	Valkšnumas ir traukumas +7,5 metų

Atlikti skaičiavimai rodo rygelio vidurio poslinkio mažėjimą su kiekvienu skerspjūvio sumažėjimu. Nuo valkšnumo deformacijų pradžios, įvertinus 8 gniūžčių galimą nutrūkimą per 40 metų laikotarpį (35 – 45 stadija), gautas viaduko rygelio vidurio poslinkis 27 mm žemyn (69 pav.). Rygelį su nutrūkusiomis 8 gniūžtėmis apkrovus 40 t apkrova gautas papildomas 38,5 mm įlinkis tarpatramio viduryje. Tokio tipo viadukų įlinkio stebėjimus atliko autoriai [29] ir nustatė, kad pirmiausia įlinkio didėjimas labai priklauso nuo transporto intensyvumo. Kuo didesnis sunkiasvorių transporto priemonių eismas, tuo labiau perdangą veikia dinaminės apkrovos ir pažeidžia konstrukcijas. Viaduko, kuriame dėl įvairių priežasčių galima laikyti nutrūkusias 8 armatūros gniūžtes, išmatuotas įlinkis per 13 metų padidėjo 23 mm [29].



69 pav. Rygelio vidurio poslinkio kitimas

70 pav. pavaizduotas įlinkio didėjimas laiko atskaitoje. Laužtės šuoliai atitinka gniūžčių skerspjūvio mažėjimą. Kaip matyti tarp kiekvieno šuolio per 7,5 metų laikotarpį dėl vakšnumo įlinkis dar padidėja 2-3 mm. Jeigu atskaita laikysime pirmą skerspjūvio sumažėjimą (po 10 metų eksploatacijos), per 30 metų laikotarpį gausime 19 mm įlinkį. Skaičiavimus atliekant su trumpesniu laikotarpiu tarp skerspjūvio mažėjimo, tikėtina įlinkis bus dar mažesnis. Norint gauti autorių [29] išmatuotą įlinkį reikėtų įvertinti ir kitus faktorius arba dar sumažinti armatūros skerspjūvį.



70 pav. Ryglis vidurio poslinkio kitimas nuo eksploatacijos pradžios

7 REZULTATAI

7.1 Darbo rezultatų aptarimas

Baigtinių elementų metodas taikomas tiriamojoje ir praktinėje projektavimo veikloje. Jo tikslumas priklauso nuo teisingo konstrukcijų idealizavimo, tinkamo baigtinių elementų tipo parinkimo ir jų tarpusavio jungimo į bendrą sistemą. Literatūros analizė rodo, kad sudėtingi daug laiko modeliuojant ir skaičiuojant reikalaujantys tūrinių baigtinių elementų modeliai dažniausiai naudojami tiriamojoje veikloje prognozuoti konstrukcijos irimo būdą. Tokiu būdu taupomos lėšos, nes nereikia atlikti keletu realaus dydžio bandymų, kurie kartais dėl finansinių klausimų tampa sunkiai įmanomi. Projektavime naudojami mažiau sudėtingi, labiau idealizuojantys konstrukcijas modeliai iš sijų ir plokščių BE. Jų tikslumo pakanka, nes projektuojama stiprumui, o ne konstrukcijos irimui.

Darbo objektu pasirinktas kelyje A1, Vėžaičių sankryžoje esantis rėminio tipo viadukas. Pagal jo techninį darbo projektą, išlaikant tikslus konstrukcijų matmenis, sudaryti du skaičiavimo modeliai. Pagrindinis tyrimų objektas buvo pagrindinė laikančioji konstrukcija – rygelis. Sijų BE modelyje rygelis sumodeliuotas naudojant ekscentrinę skerspjūvį, kaip modelio ašį pasirinkus skerspjūvio viršutinės dalies vidurio tašką. Rygelis prie kitų elementų (šarnyrų, atramų) turi būti prijungiamas pagal tikrą geometrinę padėtį erdvėje, todėl buvo panaudoti absoliučiai standūs ryšiai, jungiantys atitinkamus mazgus erdvėje. Plokščių BE modelyje visas rygelio skerspjūvis sudaromas iš kintamo storio plokščių BE. Šiame modelyje gauname visą skerspjūvį erdvėje, todėl kitų elementų prijungimas tampa paprastesnis, nes nereikia naudoti papildomų standžių jungčių. Sudaryti modeliai geometriškai atitinka realias konstrukcijas, bet gauti rezultatai skiriasi.

Sijų BE modelyje atliekamas idealizavimas – visas rygelis laikomas kaip strypas. Dėl šio idealizavimo išorines apkrovas galima pridėti, tik strypo ašyje ir tai apsunkina modeliuojant netolygų transporto apkrovų išsidėstymą skersine kryptimi. Tokiu atveju du rygelius tenka apjungti plokščių BE, kurių standumas išilgine kryptimi ir nuosavas svoris nevertinamas, o skersine kryptimi šie elementai modeliuojami realaus storio, kad išlaikytų standumą. Imantis tokių priemonių ir sijų BE modelį galima apkrauti tolygiai išskirstytomis apkrovomis.

Išankstinės įtempimo jėgos pridėjimas iš esmės skiriasi sijų ir plokščių BE modelyje. Sijų BE modelyje armatūros įtempimo jėga veikia visą skerspjūvį atsižvelgiant į jėgos padėtį skerspjūvio svorio centro atžvilgiu. Per visą skerspjūvio plotį jėgos poveikis perduodamas tolygiai ir sukeliama tolygūs gniuždymo įtempiai. Plokščių BE modelyje įtempimo jėga priskiriama armatūros gniūžtei gretimoms plokščių BE, todėl veikia tik tą elementą, o ne visame rygelio skerspjūvyje esančius elementus. Tai nulemia, įtempimų koncentracijas gniūžtės buvimo

vietoje, o ypač galuose, kur ji inkaruojama į betoną. Dažnai įtempių koncentracijos tampa lemiamu skaičiavimų nekonvergavimo veiksniumi.

Įtempių koncentracijos efektas gali nulemti pastebėtus skirtingus rygelio poslinkius abiejose modeliuose. Įrengus visus blokus ir jų montažines armatūros gniūžtes, sijų BE modelyje rygelio vidurio poslinkis gautas 4 mm žemiau, o plokščių BE modelyje 20 mm aukščiau projektinės linijos. Viršutinėje juostoje plokščių BE modelyje gauti didesni įtempiai armatūros gniūžčių pridėjimo vietoje, todėl atsiranda didesnės valkšnumo deformacijos, sukeliančios rygelio užlinkimą į viršų.

Skaičiavimas stadijomis labai gerai atspindi įtempių būvio kitimą visuose statybos ir eksploatacijos etapuose. Įrengimo metu, kol konstrukcija remiasi viena kolona, didžiausi gniūždymo įtempiai dėl įtemptosios armatūros susidaro rygelio viršuje, kai konstrukcija sujungiama į vieną rėmą ir įtempta likusi armatūra, didžiausi gniūždymo įtempiai susidaro tarpatramyje apačioje.

Skirtingi modeliai davė skirtingus rygelio poslinkius statybos metu nulinės atskaitos atžvilgiu. Plokščių BE modelio rygelio vidurio poslinkio kreivė gauta 22 – 37 mm žemiau nei projekte nurodyti poslinkiai, tuo tarpu sijų BE modelio poslinkiai gauti dar apie 20 mm žemiau. Tačiau palyginus poslinkių skirtumus tarp stadijų, pradedant paskutinio bloko įrengimu, gauname beveik idealų sutapimą tarp dviejų modelių, skirtumas sudaro tik 1 mm. Minėtas 20 mm skirtumas susidaro tik per blokų montavimo etapus.

Pagrindinių apkrovimo modelių pagal SNIp ir Eurokodą dydžiai šiam viadukui skiriasi 1,9 karto, todėl apie 1,5 karto skiriasi apkrovos sukeltas įlinkis ir 1,35 karto susidarantys lenkimo momentai rygelio viduryje. Plokščių BE modelyje nuo tų pačių apkrovų gaunamas apie 10 % mažesnis įlinkis nei sijų BE modelyje. Didesnis apkrovimas vis tik nesukelia didelių tempimo įtempių skerspjūvyje, dėl kurių galėtų atsirasti pleišėjimas. Dėl AK11 apkrovų veikimo mažiausi gniūždymo įtempiai susidaro rygelio viduryje skerspjūvio apačioje ir siekia apie 1 MPa. Didesnės LM1 apkrovos jau sukelia tam tikrus tempimo įtempius, bet neviršijančius betono C30/37 tempiamojo stiprio $f_{ctk,0,05} = 2 \text{ MPa}$. Teoriškai, viadukas projektuotas apkrovimui AK11 gali atlaikyti ir LM1 apkrovas.

Skersinių diafragmų, jungiančių rygelius, darbo svarbai nustatyti atlikti skaičiavimai pašalinus diafragmas iš modelio. Nustatyta, kad be diafragmų labiausiai apkrauto rygelio įlinkis padidėjo vidutiniškai 9 % sijų BE modelyje ir 3 % plokščių BE modelyje, tuo tarpu kito rygelio įlinkis sumažėja. Padidėjus įlinkiams keičiasi ir įtempių būvis rygelio skerspjūvyje. Nevertinant diafragmų, sijų BE modelyje rygelio apačios įtempiai padidėjo apie 2 kartus ir su LM1 apkrova siekia 3,2 MPa tempimą. Plokščių BE modelyje įtempiai padidėjo nežymiai.

Plokščių BE modelio netiesinė analizė atlikta atsižvelgiant į betono ir armatūros netiesinę įtempių-deformacijų diagramą ir valkšnumo netiesiškumą. Skaičiavimai rodo, kad rygelio

vidurio poslinkio kitimo pokytis labai artimas tiesinės analizės skaičiavimo atvejais, tačiau pats poslinkis gautas tarp sijų ir plokščių BE modelių poslinkio. Pagrindinis skirtumas kurį davė netiesinė analizė, tai valkšnumo deformacijos eksploatacijos metu per 50 metų laikotarpį. Tiesinėje analizėje gauname stabilų arba nežymiai didėjantį rygelio vidurio poslinkį į viršų, bet netiesinėje analizėje jau ir po pirmų 4 metų rygelio vidurys leidžiasi žemyn ir per 50 metų nusileidžia 10 mm.

Viaduko įtemptosios armatūros korozijos modeliavimas atliktas mažinant gniūžčių skerspjūvio plotą ir įtempimo jėgą, remiantis autorių [28] atliktai tyrimais. Programoje nėra galimybės tiesiogiai aprašyti skerspjūvio mažėjimą, todėl sumodeliuotos papildomos armatūros gniūžtės toje pačioje vietoje tik su skirtingomis skerspjūvio savybėmis. Skaičiuojant stadijomis gniūžtės įjungiamos ir išjungiamos atitinkamu metu. 8 vnt. gniūžčių skerspjūvio mažėjimas per 50 metų sukelia papildomą 13 mm įlinkio padidėjimą, lyginant su nesumažėjusiu armatūros skerspjūviu.

7.2 Išvados

1. Didžiausi gniūždymo įtempiai susidarantys po pakloto įrengimo siekia 16,5 ir 24,6 MPa atitinkamai sijų ir plokščių baigtinių elementų modeliuose. Po 50 metų betono valkšnumo ir traukumo deformacijų įtempiai sijų baigtinių elementų modelyje sumažėja 33 %, o plokščių – 24 %.

2. Atlikus tiesinę analizę matyti, kad rygelio vidurio poslinkis, blokų montažo pabaigoje iki sumonolitinant angos vidurį, sijų baigtinių elementų modelyje gautas 46 mm, o plokščių modelyje 22 mm žemiau nei nurodyta viaduko projekte. Per stadijas nuo rygelio vidurio sumonolitavimo susidarantis rygelio vidurio poslinkio pokytis tarp sijų ir plokščių baigtinių elementų modelio skiriasi tik 1 mm.

3. Nevertinant betono valkšnumo ir traukumo deformacijų blokų montažo metu, rygelio vidurio poslinkis sijų baigtinių elementų modelyje gaunamas 2 – 3 mm, o plokščių baigtinių elementų modelyje 22 mm mažesnis, lyginant su atvejais, kai šios deformacijos įvertinamos.

4. Transporto apkrovos šiam viadukui pagal Eurokodą yra 1,9 karto didesnės nei pagal SNIp, o dėl to gaunamas įlinkis yra 50 % didesnis. Įtempiai, susidarantys rygelio skerspjūvio apačioje, veikiant padidėjusiai apkrovai neviršija betono C30/37 tempiamojo stiprio $f_{ctk,0,05} = 2 \text{ MPa}$.

5. Netiesine analize gautas rygelio vidurio poslinkis per 4 metų valkšnumo deformacijų laikotarpį sudaro 5 mm žemyn, o tiesine analize – 4 mm aukštyn.

6. Nutrūkus 8 iš 24 vnt. apatinių rygelio tarpatramio armatūros gniūžčių, viaduko įlinkis per 30 metų laikotarpį padidėja 19 mm.

8 LITERATŪROS SĄRAŠAS

- [1] ROMBACH, G.A. *Finite-element Design of Concrete Structures: Practical problems and their solutions*. 2-oji laida. ICE, 2011. ISBN 9780727741899.
- [2] CHEN, Wai-Fah, and Lian Duan. *Bridge Engineering Handbook*. CRC Press, 2014. ISBN 0849374340
- [3] NOTKUS, A. J. *Tiltų projektavimo pagrindai: vadovėlis*. Vilnius: Technika, 2010. ISBN 9789955286028.
- [4] *FEA Element Types* [interaktyvus]. 2006 [žiūrėta 2016-04-24]. Prieiga per: http://fea-cae-engineering.com/fea-cae-engineering/element_types.htm
- [5] BEOERAEVE, Ir. P. *Introduction To The Finite Element Method (FEM)* [interaktyvus]. 2010 [žiūrėta 2016-04-24]. Prieiga per: <http://www.gramme.be/unite9/FEM/Finite%20Element%20Method.pdf>
- [6] SOFISTIK user manual. SOFiMSHA: Import and Export of Finite Elements and Beam Structures. 2016 [interaktyvus]. Prieiga per: teikiamas su programine įranga.
- [7] SANPAOLESI, Luca, and Pietro Croce. *Handbook 4: Design of Bridges* [interaktyvus]. 2005 [žiūrėta 2015-11-30]. Prieiga per: <http://www.eurocodes.fi/1991/paasivu1991/sahkoinen1991/handbook4%5B1%5D.pdf>
- [8] *Bridge Design Practice Manual*. 4-oji laida. Caltrans, 2014.
- [9] [LST EN 1991-2:2006]. Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms. D. 2, Tiltų eismo apkrovos = Eurocode 1: Actions on structures. Pt. 2, Traffic loads on bridges : Europos standartas EN 1991-2:2003 turi Lietuvos standarto statusą / Lietuvos standartizacijos departamentas. 2006.
- [10] [CH 200-62]. Технические условия проектирования железнододорожных автододорожных и городских мостов и труб. Moscow, 1962.
- [11] [CH 365-67]. Указания по проектированию железобетонных и бетонных конструкций мостов и труб. Moscow, 1967.
- [12] VAYAS, Ioannis, and Aristidis Iliopoulos. *Design of Steel-Concrete Composite Bridges to Eurocodes*. CRC Press, 2013. ISBN 9781466557451.
- [13] [LST EN 1990:2004]. Eurokodas. Konstrukcijų projektavimo pagrindai = Eurocode. Basis of structural design : Europos standartas EN 1990:2002 turi Lietuvos standarto statusą / Lietuvos standartizacijos departamentas. 2004.
- [14] [LST EN 1992-1-1:2005]. Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. D. 1-1, Bendrosios ir pastatų taisyklės = Eurocode 2. Design of concrete structures. Pt. 1-1, General rules and rules for buildings : Europos standartas EN 1992-1-1:2004 turi Lietuvos standarto LST EN 1992-1-1:2005 statusą / Lietuvos standartizacijos departamentas.2007.

- [15] BARRAS, P. et.al. *Presstressed concrete bridges built using the cantilever method: Design guide* [interaktyvus]. 2007 [žiūrėta 2015-02-12]. Prieiga per: http://www.infra-transport-materiaux.cerema.fr/IMG/pdf/US_F0308A_Prestressed_concrete_bridges.pdf
- [16] BROOKS, J.J. 30-year creep and shrinkage of concrete. *Magazine of Concrete Research*. 2005, **57**(9), 545–556.
- [17] YAPAR, O., P.K. Basu, and N. Nordendale. Accurate finite element modeling of pretensioned prestressed concrete beams. *Engineering Structures*. 2015, **101**, 163–178. Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.07.018>
- [18] AL-ROUSAN, R.Z., M. Alhassan, and M.A. Issa. The optimum overlay thickness of prefabricated full-depth precast concrete bridge deck panel system – 3D non-linear finite element modeling. *Engineering Structures*. 2015, **100**, 264–275. Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.06.018>
- [19] QAPO, Michael, Samir Dirar, Jian Yang, and Mohammed Z.E.B. Elshafie. Nonlinear finite element modelling and parametric study of CFRP shear-strengthened prestressed concrete girders. *Construction and Building Materials*. 2015, **76**, 245–255. Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.068>
- [20] KANG, T.H.K, and Ary M.I. Shear-strengthening of reinforced & prestressed concrete beams using FRP: Part II – experimental investigation. *International Journal of Concrete Structures and Materials* [interaktyvus]. 2012, **6**(1), 49–57 [žiūrėta 2016-04-29]. Prieiga per: <http://link.springer.com/article/10.1007/s40069-012-0005-0>
- [21] BIEN, J., M. Kuzawa, and T. Kaminski. Validation of numerical models of concrete box bridges based on load test results. *Archives of civil and mechanical engineering*. 2015, **15**, 1046 – 1060. Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2015.05.007>
- [22] PAN, Baofeng, and Gang Li. Finite element simulation of cantilever construction structure. *International Conference on Innovations in Electrical and Civil Engineering May 26-27, 2012 Phuket* [interaktyvus], [žiūrėta 2016-04-29]. Prieiga per: <http://psrcentre.org/images/extraimages/39%20512522.pdf>
- [23] ATES, Sevket. Numerical modelling of continuous concrete box girder bridges considering construction stages. *Applied Mathematical Modelling*. 2011, **35**, 3809–3820. Prieiga per: doi: [doi:10.1016/j.apm.2011.02.016](http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2011.02.016)
- [24] Vėžaičių viaduko techninis darbo projektas. VPI Lietkelprojektas.
- [25] KIVILŠA, J., Z. Kamaitis, ir A. STEPONAVIČIUS. *Miesto transporto statiniai: vadovėlis*. Vilnius: Mokslas, 1981.
- [26] [LST EN 1992-2:2006]. Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. D. 2, Gelžbetoniniai tiltai. Projektavimo ir konstravimo taisyklės = Eurocode 2. Design of concrete structures. Concrete bridges. Design and detailing rules : Europos standartas EN

1992-2:2005 turi Lietuvos standarto LST EN 1992-2:2006 statusą / Lietuvos standartizacijos departamentas. 2007.

- [27] SOFISTIK user manual. ASE: General static analysis of finite element structures. 2016 [interaktyvus]. Prieiga per: teikiamas su programine įranga.
- [28] ZADLAUSKAS, S., M. Augonis, ir L. Krašauskas. Investigation of with of vertical cracks in reinforced concrete box-girder viaducts. *Journal of sustainable architecture and civil engineering*. 2013, **3**, 59-63. Prieiga per: doi: [http://dx.doi.org/10.5755.j01.sace.3.4.3277](http://dx.doi.org/10.5755/j01.sace.3.4.3277)
- [29] AUGONIS, M., S.,Zadlauskas, Ž., Rudžionis, ir A., Pakalnis. The analysis of reinforced concrete box-girder viaduct defects and their estimation. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2012, **7**(1), 13-21. Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.3846/bjrbe.2012.02>.