

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Būvniecības fakultāte
Būvniecības un rekonstrukcijas institūts

Vadims GOREMIKINS

RACIONĀLA LIELLAIDUMA IEPRIEKŠ SASPRIEGTA TROŠU KONSTRUKCIJA

**Rīgas Tehniskās universitātes Būvzinātnes, Transporta un satiksmes
zinātņu nozaru Promocijas padome „RTU P-06”
Promocijas darbs inženierzinātņu doktora zinātniskā grāda iegūšanai
būvkonstrukciju apakšnozarē**

Zinātniskie vadītāji

Dr. sc. ing., profesors
D. SERDJUKS

Dr. habil. sc. ing., profesors
K. ROCĒNS

Rīga 2013

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».



SATURS

Darba vispārējs raksturojums	6
1. Liellaiduma iekārtās konstrukcijas; darba mērķis un uzdevumi	13
1.1. Liellaiduma konstrukciju klasifikācija	13
1.2. Iekārto konstrukciju deformativitātes samazināšana	15
1.2.1. Elastīgo pārvietojumu samazināšana	15
1.2.2. Kinemātisko pārvietojumu samazināšana	16
1.2.3. Kinemātisko pārvietojumu samazināšana, izmantojot trošu kopnes	19
1.3. Trošu negatīvo īpašību novēršana	22
1.3.1. Trošu aizsardzība pret temperatūras svārstībām	22
1.3.2. Trošu iepriekšējā izstiepšana	24
1.3.3. Pasākumi svārstību slāpēšanai	25
1.4. Iekārto konstrukciju izmantošana tiltiem	26
1.4.1. Iekārto tiltu vispārējs raksturojums	26
1.4.2. Iekārto tiltu veidi	28
1.4.3. Iekārto tiltu konstruktīvās komponentes	29
1.4.4. Iepriekš saspriegto iekārto konstrukciju izmantošana	32
1.5. Iepriekš saspriegto iekārto konstrukciju statiskā aprēķina metodes	35
1.6. Iekārto konstrukciju pašsvārstību frekvenču noteikšana	40
1.7. Ģenētiskais algoritms konstrukciju racionālu raksturlielumu noteikšana	41
1.8. Darba mērķis un uzdevumi	44
2. Racionāla iepriekš saspriegta iekārtā konstrukcija	45
2.1. Trošu kopnes racionāla risinājuma izvēle	45
2.1.1. Trošu kopnes struktūras izvēle	45
2.1.2. Izejas parametri trošu kopnei ar divām ieliektām joslām	47
2.2. Iepriekš saspriegtai iekārtajai konstrukcijai izmantojamas trošu kopnes optimizācija	50
2.2.1. Optimizācijas objekta apraksts	50
2.2.2. Iepriekš saspriegtas iekārtās konstrukcijas aprēķina algoritms GEM programmatūrā ANSYS	53
2.2.3. Optimizācijas vispārējā nostādne	59
2.2.4. Iepriekš saspriegtai iekārtajai konstrukcijai izmantojamas trošu kopnes optimizācijas algoritms	60
2.2.5. Trošu kopnes optimizācijas procesā iegūtie racionālie parametri	61

2.2.6. Trošu kopnes apveida un topoloģijas optimizācija ar ģenētisko algoritmu pēc 47 mainīgiem faktoriem.....	62
2.3. Hibrīdās kompozītās troses izmantošana iepriekš saspriegtai iekārtajai konstrukcijai...	64
2.3.1. Izvēlētās konstrukcijas raksturojums	64
2.3.2. Materiālu izvēle	66
2.3.3. Tērauda joslu racionālu šķērsriezuma laukumu noteikšana	67
2.4. Ārkārtējas situācijas analīze konstrukcijai ar hibrīdo kompozīto trosi	69
2.4.1. Konstrukcijas darbība CFRP slāņa sagraušanas gadījumā	69
2.4.2. Tērauda joslu minimālo šķērsriezuma laukumu noteikšana	70
2.4.3. Vidējā sagraudā slāņa ietekme uz ārējo slāņu darbu	72
2.4.4. Vidējā pārtrauktā slāņa ietekmes uz ārējo slāņu darbu eksperimentālā noteikšana ..	73
3. Iepriekš saspriegto iekārto trošu konstrukciju darbības analīze	76
3.1. Atsevišķas nesošās troses un trošu kopnes darbības salīdzinoša analīze iepriekš saspriegtai iekārtajai konstrukcijai	76
3.2. Trošu kopnes un atsevišķas nesošās troses deformativitātes salīdzinājums dažādiem laidumiem.....	79
3.3. Iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas deformativitātes samazināšana, veicot joslu savietošanu	80
3.4. Nesaspriegtās un saspriegtās iekārtās konstrukcijas deformativitātes salīdzinājums	82
3.5. Trošu kopnes režģa darbība	82
3.6. Trošu kopnes krustveida režģa vienkāršošanas iespēja	84
3.7. Iepriekš saspriegtās trošu konstrukcijas izmantošanas piemērs uz iekārtā tilta bāzes	85
3.7.1. Konstrukcijas aprēķins uz horizontālās vēja slodzes iedarbību	87
3.7.2. Konstrukcijas aprēķins uz horizontālo bremzēšanas slodžu iedarbību.....	89
3.7.3. Temperatūras ietekmes ievērtēšana	89
3.7.4. Racionāls nesošo un stabilizējošo trošu izvietojums šķērsvirzienā	90
3.7.5. Konstrukcijas darbības analīze balstu pārvietojumu gadījumā.....	94
3.7.6. Stinguma sijas konstrukcijas analīze	96
4. Iepriekš saspriegtās iekārtās trošu konstrukcijas eksperimentālā pārbaude un tās rezultāti	105
4.1. Temperatūras ietekme uz trosi un tās elementiem	105
4.1.1. Eksperimenta apraksts	105
4.1.2. Eksperimenta rezultāti	106
4.2. Troses elastības moduļa palielināšana	107

4.2.1. Eksperimenta apraksts	107
4.2.2. Eksperimenta mainīgo faktoru līmeņu definēšana.....	108
4.2.3. Eksperimenta gaita.....	108
4.2.4. Rezultātu apkopojums.....	110
4.3. Iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas modeļu eksperimentālā pārbaude.....	113
4.3.1. Modeļu ģeometrija.....	114
4.3.2. Modeļu elementi	115
4.3.3. Mērinstrumenti.....	117
4.3.4. Modeļu pārbaudes process.....	118
4.3.5. Modeļu pārbaudes rezultāti.....	120
4.4. Temperatūras ietekme uz iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas modeli	123
4.4.1. Eksperimenta apraksts	123
4.4.2. Eksperimentu rezultāti	124
4.5. Iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas modeļa elementu elastības moduļa stabilizācija.....	126
4.6. Iepriekšējā sasprieguma līmeņa zudums laikā	128
5. Iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas dinamika	130
5.1. Pašsvārstību frekvenču noteikšanas metodikas izstrāde iepriekš saspriegtai iekārtai konstrukcijai.....	130
5.2. Iepriekš saspriegtās iekārtā tilta laiduma konstrukcijas pašsvārstību frekvenču analītisks aprēķins	132
5.2.1. Tilta konstrukcijas šķērsriezuma ģeometrisko raksturlielumu noteikšana	132
5.2.2. Pašsvārstību frekvenču noteikšana	134
5.2.3. Iegūto dinamisko raksturlielumu novērtēšana	136
5.3. Pašsvārstību frekvenču un formu eksperimentāla noteikšana iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas modelim	137
5.3.1. Eksperimenta apraksts	137
5.3.2. Eksperimenta datu apstrāde	138
5.3.3. Eksperimentu rezultāti	139
5.3.4. Modeļa pašsvārstību frekvenču noteikšana analītiskā veidā	141
Secinājumi	144
Literatūras saraksts	146

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Aktuāla tautsaimniecības problēma ir ierobežotie izejvielu un enerģētiskie resursi. Šīs problēmas risināšanā nozīmīgu vietu ieņem slodzi nesošo konstrukciju svāra samazināšana, to laiduma un ilgmūžības palielināšana, ko iespējams sasniegt, izmantojot augstas stiprības materiālus kompleksi ar tradicionālajiem konstrukciju materiāliem, veidojot iepriekš saspriegtās stieptās konstrukcijas, kam spriegumu sadalījums pa šķērsriezumu ir vienmērīgs. Izmantojot augstas stiprības konstrukciju materiālus ar daudz lielāku īpatnējo stiprību (atbilstošās stiprības attiecība pret masas vienību) nekā tradicionālajiem materiāliem iepriekš saspriegtām un stieptām konstrukcijām, iespējams būtiski samazināt lietderīgās slodzes un konstrukciju pašsvāra attiecību (pie fiksēta laiduma), kas savukārt nodrošina izejvielu un enerģētisko resursu ekonomiju, veidojot šīs konstrukcijas.

Vislielākais laidums (1991 m) ir sasniegts, izmantojot iekārtās konstrukcijas. Bet iekārto konstrukciju trūkums ir kinemātisko pārvietojumu izraisītā lielā deformējamība. Efektīvākā kinemātisko pārvietojumu samazināšanas iespēja ir iepriekš saspriegto trošu kopņu izmantošana. Iepriekš saspriegtās trošu kopnes bez spiestiem elementiem paver iespējas nodrošināt lielu īpatnējo nestspēju, palielināt konstrukcijas stingumu, kā arī pēc vajadzības mainīt konstrukcijas pašsvārstību frekvences. Tomēr vairākos gadījumos, lai būtu racionāls sasprieguma līmenis, ar tradicionālajiem trošu kopņu veidiem nav iespējams nodrošināt vajadzīgo stingumu. Nepieciešams izstrādāt trošu kopnes, kam nebūtu spiestu stieņu – tas dotu iespēju palielināt iekārtās iepriekš saspriegtās trošu konstrukcijas stingumu.

Iepriekš saspriegtās trošu kopnes plaši lieto liellaiduma pārsegumu konstrukcijās, bet tiltu būvniecībā trošu kopņu izmantošanas tehnoloģijas ir izstrādātas gājēju un cauruļvadu tiltiem, kam salīdzinājumā ar autoceļu tiltiem raksturīga maza lietderīgā slodze. Nav detalizētu pētījumu par iepriekš saspriegto trošu kopņu lietošanas priekšrocībām un trūkumiem autoceļu tiltu būvniecībā.

Dinamisko aprēķinu veikšana ir reglamentēta tiltu projektēšanas sastāvdaļa. Iepriekš saspriegto iekārto tiltu pašsvārstību frekvenču noteikšana pašlaik tiek veikta, izmantojot darbietilpīgas diskrētās metodes. Trūkst vienkāršotas iepriekš saspriegto iekārto konstrukciju pašsvārstību frekvenču noteikšanas metodes, kas pavērtu iespēju atvieglot aprēķinus konstrukciju variantu izstrādes procesā.

Tā, kā ar oglekļa šķiedrām stiegrotam plastikam (CFRP) salīdzinājumā ar tēraudu ir

daudzkārt lielāka īpatnējā stiprība, izmantojot šos materiālus, var vairākkārt palielināt iekārto konstrukciju laidumu. Minēto konstrukciju drošumu iespējams palielināt, izmantojot hibrīdo kompozīto trosi, kam CFRP slānis ir pastiprināts ar tērauda joslām, kuru šķēsgriezums dažādos troses posmos ir dažāds, tā nodrošinot tikai minimālas spriegumu atšķirības visā troses garumā.

Tātad aktuāli ir izstrādāt aprēķina metodiku un noskaidrot iepriekš saspriegtās trošu kopnes stinguma palielināšanas un kompozītmateriālu izmantošanas iespējas, kā arī izstrādāt vienkāršotu iepriekš saspriegto iekārto konstrukciju pašsvārstību frekvenču aprēķina metodi, kas kopumā pavērtu iespējas šo būvkonstrukciju plašākai projektēšanai, it īpaši liellaiduma nesošo konstrukciju variantu izstrādē.

Darba mērķis

Izstrādāt racionālu liellaiduma iepriekš saspriegtās trošu konstrukcijas risinājumu, kas nodrošinātu trošu kopnes mazākus pārvietojumus salīdzinājumā ar atsevišķo nesošo iekārto trosi, nepalielinot materiālu patēriņu, šādas kopnes aprēķina algoritmu, noskaidrot šādas kopnes priekšrocības, iekārtā tilta konstrukcijā galveno nesošo trosi aizstājot ar izstrādāto iepriekš saspriegto trošu konstrukciju, kā arī eksperimentāli pārbaudīt iegūtos rezultātus.

Zinātniskā novitāte

Izstrādāts jauns liellaiduma iepriekš saspriegtās trošu kopnes bez spiestiem stieņiem elementu izvietojums, kam salīdzinājumā ar eksistējošiem risinājumiem raksturīgi mazāki kinemātiskie pārvietojumi un samazināts materiālu patēriņš.

Izstrādāti iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas jaunās trošu kopnes aprēķina un optimizēšanas algoritmi ar GEM programmatūru ANSYS un programmēšanas vidi MatLAB, kas dod iespēju tos izmantot arī dažādu citu uzdevumu risināšanai.

Noskaidrots, ka laiduma intervālā no 50 līdz 350 m izstrādātā trošu kopne ar racionāliem parametriem dod iespēju par 26–30% samazināt vertikālos pārvietojumus visneizdevīgākās tiltiem raksturīgās slodžu kombinācijas gadījumā iepriekš saspriegtai iekārtai konstrukcijai salīdzinājumā ar atsevišķo nesošo trosi. Iegūtie rezultāti pārbaudīti eksperimentāli.

Piedāvāta no materiālu patēriņa viedokļa racionāla hibrīdā kompozītā trosē iepriekš saspriegtai iekārtajai konstrukcijai ar palielinātu drošumu salīdzinājumā ar kompozītām trosēm un palielinātu īpatnējo stiprību salīdzinājumā ar tērauda trosēm.

Izstrādāta pašsvārstību frekvenču noteikšanas vienkāršota metode iepriekš saspriegtai iekārtajai konstrukcijai ar precizitāti 20%, un tā pārbaudīta eksperimentāli.

Darba praktiskais nozīmīgums

Izstrādātā liellaiduma iepriekš saspriegtā trošu kopnes konstrukcija, tās aprēķina un optimizācijas algoritmi paver iespēju projektētājiem veidot pārsegumu un tiltu konstrukcijas ar mazākiem pārvietojumiem un samazinātu materiālu patēriņu salīdzinājumā ar līdz šim zināmajām trošu konstrukcijām. Savukārt izstrādātā iepriekš saspriegtās konstrukcijas pašsvārstību frekvenču noteikšanas vienkāršotā metode dod iespēju to izmantot šādu konstrukciju darbības novērtēšanai.

Aizstāvēšanai tiek izvirzīts

- Liellaiduma iepriekš saspriegtā trošu kopne ar ieliektām joslām un krusta režģi ar racionāliem parametriem (no pārvietojumu viedokļa), kurai visi elementi ir stiepti, un tās izmantošanas iespējas iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas veidošanai. Šāda konstrukcija tika arī pārbaudīta arī eksperimentāli.
- Izstrādātie algoritmi trošu kopnes aprēķiniem un optimizācijai.
- Hibrīdās kompozītās troses racionāla no materiālu patēriņa un drošuma viedokļa uzbūve iepriekš saspriegtai iekārtai liellaiduma konstrukcijai.
- Izstrādātā iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas pašsvārstību frekvenču noteikšanas vienkāršotā metode, kura tika pārbaudīta arī eksperimentāli.

Pētīšanas metodika un izmantotie materiāli

Aptuvenie aprēķini trošu kopnes veida novērtēšanai veikti ar galīgo elementu metodes (GEM) programmu LIRA 9.6, izmantojot ģeometriski nelineāro aprēķinu, kā arī ģeometriski nelineāros trošu tipa elementus FE310. Iepriekšējais saspriegums modelēts ar domkrata tipa galīgiem elementiem FE308, kam var piešķirt sastiepuma spēku.

Trošu kopņu aprēķini ir veikti ar GEM datorprogrammas ANSYS palīdzību, kas dod iespēju ievērot konstrukcijas ģeometrisku nelinearitāti. Trošu kopne modelēta ar divpunktu galīgiem elementiem LINK10, kas darbojas tikai stiepē. Iepriekšējais trošu saspriegums uzdots, galīgajiem elementiem piešķirot relatīvo deformāciju.

Trošu kopņu optimizācijai uzrakstīta speciāla programma MatLAB programmēšanas vidē, kura izmanto ģenētiskā algoritma funkciju.

Aprēķinu rezultāti validēti, pārbaudot iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas samazinātu izmēru fiziskos modeļus statiskā un dinamiskā slūojumā. Modeļi veidoti no tērauda trosēm. Temperatūras maiņas ietekme uz troses elementiem un troses moduļa palielināšanas iespējas pārbaudītas, izmantojot tērauda trošu paraugus. Trosēm ir firmas SIA „Certex Latvia” sertifikāti. Trošu elastības modulis ir vienāds ar 60 GPa, stiepļu stiepes stiprība ir 1770 MPa.

Hibrīdās kompozītās troses slāņu kopdarbības pārbaudei izmantoti trīs slāņu paraugi, kas veidoti no tērauda slāņiem, savā starpā salīmētiem ar epoksīdlīmi.

Pētījumu teorētiskais un metodoloģiskais pamats

Darbā izmantota teorētiskā metodoloģija, ko sniedz šādas inženierzinātnes:

- kompozīto materiālu mehānika;
- būvstatika;
- konstrukciju pašsvārstību teorija;
- pārsegumu un tiltu konstrukcijas;
- stiepto konstrukciju teorija;
- konstrukciju optimizācijas teorija.

Pētījumu ierobežojumi

Izstrādātās iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas ir racionālas tiltiem raksturīgajām slodžu kombinācijām un stingiem balstījuma veidiem laiduma intervālā no 50 līdz 350 m.

Darba sastāvs un apjoms

Promocijas darbs sastāv no ievada, piecām nodaļām, secinājumiem un bibliogrāfijas. Darba apjoms – 155 lappuses, 157 attēli, 29 tabulas un literatūras saraksts ar 152 avotiem.

Darba aprobācija un publikācijas

Promocijas darba rezultāti ir ziņoti un apspriesti šādās zinātniskajās konferencēs:

- Goremikins V., Rocens K., Serdjus D. Topology Optimization of Cable Truss Web for Prestressed Suspension Bridge. ICCSEE 2012: International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering. January 14-15, 2013, Zurich, Switzerland;

- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Behavior of Prestressed Suspension Bridge. Riga Technical University 53rd International Scientific Conference, October 11-12, 2012, Riga, Latvia;
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Analysis of Hybrid Composite Cable for Prestressed Suspension Bridge. 17th International Conference „Mechanics of Composite Materials”. May 28-June 1, 2012, Riga, Latvia;
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Cable Truss Analyses for Suspension Bridge. 10th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”. May 24-25, 2012, Jelgava, Latvia;
- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Cable Truss Analyses for Prestressed Suspension Bridge. 8th International DAAAM Baltic Conference Industrial Engineering. April 19-21, Tallinn, Estonia;
- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Decreasing of Displacements of Prestressed Cable Truss. ICCEE 2012: International Conference on Civil and Environmental Engineering. March 28-29, 2012, Madrid, Spain;
- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Daži racionāli konstrukciju risinājumi inženierbūvē. Apvienotais pasaules latviešu zinātnieku 3. kongress un letonikas 4. kongress “Zinātne, sabiedrība un nacionālā identitāte”. Sekcija Būvniecība: zinātne, teorija un prakse, 2011. gada 24-27. oktobrī, Rīga, Latvija;
- Rocens K., Goremikins V., Sliseris J. Some rational structures and macrostructures of composites. International Scientific Conference “The Aleksandrs Malmeisters memorial Symposium: “Actual problems in mechanics of heterogeneous materials””, October 20-23, 2011, Riga, Latvia;
- V. Goremikins, K. Rocēns, D. Serdjuks. Rational Structure of Cable Truss for Unsymmetrically Loaded Suspension Bridge. RTU 52st International Scientific Conference. Section “Construction Science”, October 13, 2011, Riga, Latvia;
- V. Goremikins, K. Rocēns, D. Serdjuks. Experimental Testing of Cable Truss. RTU 52st International Scientific Conference. Section “Construction Science”, October 13, 2011, Riga, Latvia;
- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Rational Geometrical Parameters of Cable Truss for Suspension Bridge. OAS 2011: International Conference on Optimization and Analysis of Structures. August 25-27, 2011, Tartu, Estonia.
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Cable Truss Analyses for Suspension Bridge. International Scientific Conference Civil Engineering ‘11. May 12-13, 2011, Latvia, Jelgava;
- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Rational Structure of Cable Truss. ICBSE 2011: "International Conference on Building Science and Engineering", April 27-29, 2011, Venice, Italy;
- Goremikins V., Rocēns K., Serdjuks D. Režģojuma veida ietekme uz vanšu kopņu darbu. RTU 51. starptautiskā zinātniskā konference. Rīga, 2010.gada 11.-15. oktobris;
- Goremikins V., Rocēns K., Serdjuks D. Šprengesijas no pultrūzijas kompozītiem racionāla liellaiduma konstrukcija. RTU 51. starptautiskā zinātniskā konference. Rīga, 2010.gada 11.-15. oktobris;
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Rational Structure of Composite trussed beam. 16th international conference „Mechanics of Composite Materials”. May 24-28, 2010, Latvia;

- Goremikins V. and Serdjuks D. Rational Structure of Trussed Beam. 10th international conference “Modern building materials, structures and techniques”. May 19-21, 2010, Lithuania;
- Goremikins V., Grabis J. un Serdjuks D. Telpisko tērauda kopņu izmantošana pārsegumā. Rīgas Tehniskās universitātes 50. starptautiskā zinātniskā konference. 12.-16. oktobris, 2009, Latvija;
- Goremikins V. un Serdjuks D. Špreņģesijas racionāla konstrukcija. Rīgas Tehniskās universitātes 50. starptautiskā zinātniskā konference. 12.-16. oktobris, 2009, Latvija.

Galvenie darba rezultāti izklāstīti šādās publikācijās.

Zinātniskajos žurnālos:

- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Topology Optimization of Cable Truss Web for Prestressed Suspension Bridge // Journal “World Academy of Science, Engineering and Technology”. Special Journal Issues (pieņemts publicēšanai);
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Decreasing Displacements of Prestressed Suspension Bridge // Journal of Civil Engineering and Management. – 2012. – Volume 18, Issue 6. – pp. 858-866 (žurnālu citē Scopus un Ebsco datu bāzes);
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Decreasing of Displacements of Prestressed Cable Truss // International Journal of Civil and Environmental Engineering. – 2012. – Issue 6. – pp. 291-299;
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Decreasing of Displacements of Prestressed Cable Truss // Journal “World Academy of Science, Engineering and Technology”. Special Journal Issues. – 2012. – Issue 63. – pp. 554-562;
- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Rational Structure of Cable Truss // Journal “World Academy of Science, Engineering and Technology”. Special Journal Issues. – 2011. – Issue 76. – pp. 571-578 (Citē Scopus un Ebsco datu bāzes).

RTU zinātnisko rakstu krājumos:

- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. and Gaile L. Experimental Determination of Natural Frequencies of Prestressed Suspension Bridge Model // Scientific Journal of RTU. Construction Science (pieņemts publicēšanai);
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Evaluation of Rational Parameters of Trussed Beam // Scientific Journal of RTU. Construction Science. – 2010. – Vol. 11. – pp. 21-25 (Citē Ebsco datu bāze);
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Rational Large Span Structure of Composite Pultrusion Trussed Beam // Scientific Journal of RTU. Construction Science. – 2010. – Vol. 11. – pp. 26-31 (Citē Ebsco datu bāze);
- Goremikins V., Grabis J. and Serdjuks D. Using of spatial steel trusses in the roof // Scientific Journal of RTU. Construction Science. – 2009. – Vol. 10. – pp. 50 – 56 (Citē Ebsco datu bāze).

Zinātnisko konferenču pilna teksta rakstu krājumos:

- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Topology Optimization of Cable Truss Web for Prestressed Suspension Bridge // Proceedings of the ICCSEE 2013: “International

Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering”, Zurich, Switzerland, January 14-15, 2013, pp. 180-186;

- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Cable Truss Analyses for Suspension Bridge // Proceedings of 10th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”, Latvia, Jelgava, May 24-25, 2012, – Vol. 11. – pp. 228-233 (Citē Scopus un Ebsco datu bāzes);
- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Cable Truss Analyses for Prestressed Suspension Bridge // Proceedings of the 8th International Conference of DAAAM Baltic Industrial Engineering, Tallinn, Estonia, April 19-21, 2012, pp. 45-50;
- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Decreasing of Displacements of Prestressed Cable Truss // Proceedings of the ICCEE 2012 : “International Conference on Civil and Environmental Engineering”, Madrid, Spain, March 28-29, 2012, pp. 554-562;
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Cable Truss Analyses for Suspension Bridge // Proceedings of the International Scientific Conference “Civil Engineering ‘11”, Jelgava, Latvia, May 12-13, 2011 (pieņemts publicēšanai);
- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Rational Structure of Cable Truss // Proceedings of the ICBSE 2011 : "International Conference on Building Science and Engineering", Venice, Italy, April 27-29, 2011, pp. 513-520;
- Goremikins V. and Serdjuks D. Rational Structure of Trussed Beam // Proceedings of the 10th international conference “Modern building materials, structures and techniques”, Lithuania, May 19-21, 2010, pp. 613-618.

Zinātnisko konferenču tēžu krājumos:

- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Behavior of Prestressed Suspension Bridge // Proceedings of Riga Technical University 53rd International Scientific Conference, Latvia, Riga, October 11-12, 2012, p. 384;
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Analysis of Hybrid Composite Cable for Prestressed Suspension Bridge // Proceedings of the 17th International Conference „Mechanics of Composite Materials”, Latvia, Riga, May 28-June 1, 2012, p. 93;
- Goremikins V., Rocens K. un Serdjuks D. Daži racionāli konstrukciju risinājumi inženierbūvē // Apvienotā pasaules latviešu zinātnieku III un Letonikas IV kongresa „Zinātne, sabiedrība un nacionālā identitāte” sekcijas „Tehniskās zinātnes” tēžu krājums, Rīga, 2011. gada 24.-27. oktobris. – Rīga: RTU, 2011. – 61.-62. lpp;
- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Rational Geometrical Parameters of Cable Truss for Suspension Bridge // Abstracts of OAS 2011: International Conference on Optimization and Analysis of Structures. Estonia, Tartu, August 25-27, 2011, p. 12;
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Cable Truss Analyses for Suspension Bridge // Proceedings of the International Scientific Conference “Civil Engineering ‘11”, Latvia, Jelgava, May 12-13, 2011, p. 32;
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Rational Structure of Composite trussed beam // Proceedings of the 16th international conference „Mechanics of Composite Materials”, Latvia, Riga, May 24-28, 2010, p. 75.

Mācību metodiskajā izdevumā:

- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Konstrukīvo elementu no plastmasām (pultrūzijas kompozītmateriāliem) aprēķins (aprēķinu pamatprincipi un piemēri). Metodiskie norādījumi. – Rīga: RTU, 2010, – 34. lpp. (ISBN 978-9934-8151, www.goremikins.com).

1. LIELLAIDUMA IEKĀRTĀS KONSTRUKCIJAS; DARBA MĒRĶIS UN UZDEVUMI

1.1. Liellaiduma konstrukciju klasifikācija

Dažādos literatūras avotos pie liellaiduma konstrukcijām pieskaita konstrukcijas bez starpbalstiem un laidumu, kas pārsniedz 18, 24, 30, 36, 45, 60 un 100 m [57, 108, 121, 130 145]. Bet citos avotos konstrukcijas tiek sauktas par liellaiduma, ja tieši laiduma izmēri definē estētisko attieksmi pret būvi [66].

Liellaiduma konstrukcijas lieto sabiedrisko ēku (teātru, izstāžu paviljonu, koncertzāļu, sporta zāļu, slēgto stadionu, tirgus paviljonu u. c.), speciāla uzdevuma ēku (angāru, garāžu u. c.), ražošanas ēku (lidmašīnu būves, kuģubūves, mašīnbūves cehu u. c.) un tiltu celtniecībā. Šo pārsegumu konstrukcijas ēkām un tiltiem pēc konstruktīva risinājuma ir līdzīgas, bet to lietojamības un arhitektonisko īpatnību dēļ tie tiek klasificēti atsevišķi. [57, 130]

Atkarībā no konstruktīvā risinājuma izšķir:

- plakanās sistēmas liellaiduma pārsegumus;
- telpiskās sistēmas liellaiduma pārsegumus.

Plakanās sistēmas liellaiduma pārsegumi sastāv no atsevišķiem plakaniem nesošajiem elementiem, kuru asis atrodas vienā plaknē. Telpiskās sistēmas liellaiduma pārsegumiem ir raksturīgs spēku telpiskais sadalījums, jo nesošo elementu asis neatrodas vienā plaknē.

Liellaiduma pārsegumu iedalījums ēkām pēc statiskās shēmas, kā arī literatūrā minētie maksimālie laidumi ir parādīti 1.1. tabulā.

1.1. tabula
Pārsegumu shēmas un literatūrā minētie maksimālie laidumi ēkām [57, 108, 127, 130]

Konstrukcijas shēma	Literatūrā minētie maksimālie laidumi, m
Kopnes	100
Rāmju	150
Arku	200
Velvju	100
Telpiskās kopnes	100
Kupolu	200
Vanšu	200
Iekārtās konstrukcijas	300

Tiltu sadalījums atkarībā no nesošo konstrukciju veida un atbilstošā laiduma ir attēlots 1.2. tabulā.

Tiltu tipi un atbilstošie laidumi [13, 56, 75, 109, 147]

Tilta tips	Laiduma intervāls, m	Lielākā laiduma tilts, laidums, gads
Koka kopnes	10–70	<i>Flisa</i> , Norvēģija, 70.3 m, 2003
Saspriegtā dzelzsbetona siju	10–330	<i>Shibanpo</i> , Ķīna, 330, 2006
Tērauda siju	15–376	<i>Sfalassa Bridge</i> , Itālija, 376 m, 1974
Dzelzsbetona arku	40–425	<i>Wanxian</i> , Ķīna, 425 m, 1997
Tērauda kopņu	40–550	<i>Pont de Quebec</i> , Kanāda, 549 m, 1917
Tērauda arku	50–550	<i>Chaotianmen</i> , Ķīna, 552 m, 2009
Vanšu	110–1100	<i>Russky</i> , Krievija, 1104 m, 2012
Iekārtie	150–2000	<i>Akaski-Kaikyo</i> , Japāna, 1991 m, 1998

No tabulas ir redzams, ka lielākie laidumi ir sasniedzami ar iekārtajām konstrukcijām.

Par iekārtām sauc konstrukcijas, kuru pamatelementi darbojas stiepē. Stieptajos elementos var vispilnīgāk izmantot augstas stiprības materiālus, jo to nestspēja tiek noteikta nevis pēc noturības, bet gan pēc stiprības. Piemēram, divas reizes palielinot spiestā tērauda elementa materiāla stiprību, divas reizes samazinās tērauda stiprības izmantošanas daļa. Elementu darbība stiepē dod iespēju pilnībā izmantot visu šķērsriezuma laukumu, turklāt iekārto konstrukciju efektivitāte palielinās, palielinoties laidumam. [119, 125]

Iekārtās sistēmas ir balstbīdes sistēmas, un balstbīdes uzņemšanai ir vajadzīga balstu sistēma.

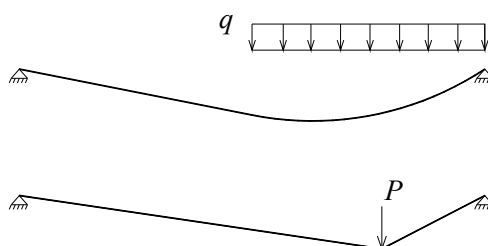
Ir divi stiepto pavedienu veidi: iekārtā trosē un vants. Iekārtās troses ir lokanie pavedieni, kas ir iekārto konstrukciju pamatelementi. Tās uzņem šķērsslodzes, ir garākas par attālumu starp stiprinājuma vietām un tām nav savas formas. Iekārtās troses pieņem formu, kas ir vienīgā iespējamā konkrētajai slodzei. Vantis neuzņem šķērsslodzi, tās ir stieptas tikai ar garenspekciem un vienmēr ir taisnas. [125]

Iekārtās konstrukcijas var iedalīt šādās grupās:

- vienoslas sistēmas ar lokanām trosēm;
- vienoslas sistēmas ar stingām vantīm;
- divjoslu sistēmas;
- tīkla sistēmas;
- membrānu sistēmas. [61, 87]

1.2. Iekārto konstrukciju deformativitātes samazināšana

Palielinātā deformējamība ir viena no iekārto konstrukciju pamatproblēmām [45, 110, 133]. Palielinātās deformējamības iemesls ir elastīgo un kinemātisko deformāciju rāšanās. Elastīgie pārvietojumi ir saistīti ar lielu iekšējo spēku rašanos. Elastīgie pārvietojumi maksimālās vērtības sasniedz laiduma vidū pilna laiduma slogošanas rezultātā. Kinemātiskos pārvietojumus izraisa iepriekšējās paraboliskās formas maiņa, kas veidojas nesimetriskas slodzes pielikšanas dēļ (1.1. att.). Tie nav saistīti ar troses elastīgajām īpašībām. Iekārtajām trošu konstrukcijām noteicošais paliek lietojamības robežstāvoklis. [43, 54, 129]



1.1. att. Iekārtās troses iepriekšējās formas maiņa

1.2.1. Elastīgo pārvietojumu samazināšana

Literatūrā ir minētas četras metodes, kā samazināt elastīgos pārvietojumus.

Pirmā metode ir saistīta ar mazas stiprības tērauda velmējumu izmantošanu. Šīs metodes racionalitāte balstās uz to, ka nesošajiem elementiem tiek lietots lētāks un izplatītāks materiāls nekā trosēm. Metodes racionalitāte saistīta arī ar to, ka troses elementu stiprība nav pilnībā izmatota, jo elementu šķērsgrizumus piemeklē pēc lietojamības robežstāvokļa. Šī metode atvieglo arī mezglu konstrukcijas. Velmējumu drošības koeficienti ir mazāki par trošu drošības koeficientiem. Šīs metodes trūkums ir konstrukcijas montāžas sarežģītība, kā arī palielinātais materiālu patēriņš un konstrukcijas svara palielināšanās.

Otrā metode ir saistīta ar nesošo elementu nosacītā elastības moduļa palielināšanu. Troses pagarinājums ir saistīts ne tikai ar stieplu elastīgajiem pārvietojumiem, bet arī ar stieplu pārvietojumiem kūlī. Šos pārvietojumus var samazināt, vīto trošu vietā lietojot paralēlo stieplu kūļus, kā arī veicot trošu iepriekšējo izstiepšanu, kas tiks detalizētāk apskatīts 1.3.2. apakšnodaļā.

Trešā metode ir saistīta ar iepriekš saspriegto dzelzsbetona elementu izmantošanu. Pārvietojumus var samazināt, ja tiek veikta tieši uz trošu konstrukciju nesošajiem elementiem

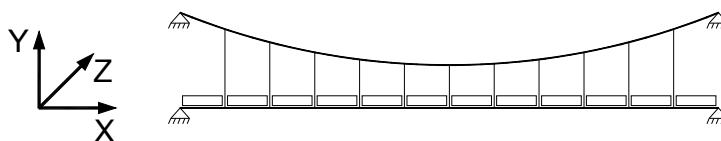
izvietotā dzelzsbetona klāja iepriekšējā saspiešana. Šīs metodes trūkums ir montāžas sarežģītības un konstrukcijas svara palielināšanās.

Ceturrtā metode ir saistīta ar nesošo trošu nokaru palielināšanu. Palielinot nokari, samazinās slodžu izraisītās iekšējās piepūles trosē. Metodes trūkums ir kinemātiskā stinguma samazināšanās. [129]

Tā, kā hibrīdajai kompozītajai tosei, kas sastāv no vidējā CFRP slāņa un tērauda ārējiem slāņiem, salīdzinājumā ar tēraudu ir daudzkārt lielāka īpatnējā stiprība, izmantojot šos materiālus, var vairākkārt samazināt iekārto konstrukciju pašsvaru, kas ir būtiska liellaiduma konstrukciju kopējas slodzes daļa, un attiecīgi samazināt iekārtās konstrukcijas elastīgus pārvietojumus [91].

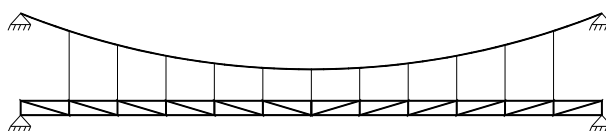
1.2.2. Kinemātisko pārvietojumu samazināšana

Lielo kinemātisko pārvietojumu problēmu var atrisināt, palielinot pašsvara un pieliktās slodzes attiecību, ko var panākt, pieliekot pieslodzi (1.2. att.) [48, 99]. Tomēr šī metode izraisa materiālu patēriņa palielināšanos.



1.2. att. Iekārtās sistēmas stabilizācija, pievienojot pieslodzi
(Šeit un tālāk tiks izmantota šī koordinātu sistēma)

Lai palielinātu iekārtās sistēmas stingumu, var palielināt stinguma sijas vai kopnes stingumu (1.3. att.). Šī metode ir izplatīta liellaiduma iekārtajiem tiltiem [118, 128, 100]. Tomēr šī metode arī noved pie tilta svara ievērojamas palielināšanās.



1.3. att. Iekārtās sistēmas stabilizācija, palielinot sijas stingumu

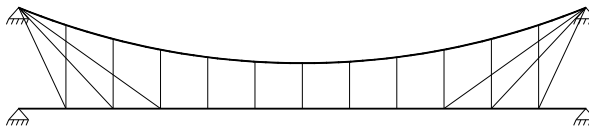
Sistēmas stinguma palielināšana var tikt sasniegta, samazinot nesošās troses nokari, bet šajā gadījumā palielināsies iekšējās piepūles trosē, kā arī balstbīde [129].

Sistēmas stingumu var palielināt, piestiprinot nesošo trosi pie stinguma sijas laiduma vidū (1.4. att.) [118, 128]. Šajā gadījumā palielināsies piepūles stinguma sijā, kā arī sijas un nesošās troses savienošana ir tehnoloģiski problemātiska.



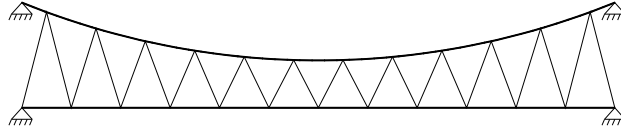
1.4. att. Iekārtās sistēmas stinguma palielināšana, savienojot nesošo trosi ar stinguma siju

Lielāki pārvietojumi iekārtajās sistēmās ir sasniedzami, kad tiek slogota apmēram puse no tilta laiduma. Var lietot slīpas vantis balstu tuvumā (1.5. att.) [128, 118]. Šo risinājumu izmantoja 19. gs., bet šīs metodes trūkums ir trošu kopējā garuma palielināšanās, kā arī nelabvēlīgais tilta izskats.



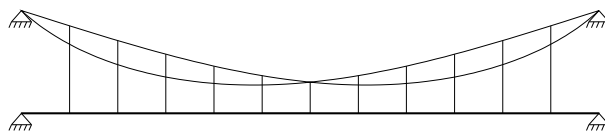
1.5. att. Iekārtās sistēmas stinguma palielināšana ar papildu slīpām vantīm

Taisno piekaru aizvietošana ar diagonāliem elementiem (1.6. att.) palielina sistēmas stingumu, bet tie palielina arī piepūles atsaitēs un atsaišu garumu. Slīpo atsaišu izmantošanas dēļ stinguma sijā darbojas papildu piepūles, kas rezultātā izraisa stinguma sijas materiālu patēriņa palielināšanos.



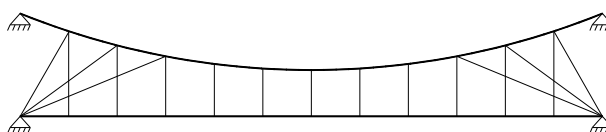
1.6. att. Iekārtās sistēmas stinguma palielināšana, izmantojot trīsstūrveida režģi

Nevienmērīgas slodzes izraisītos pārvietojumus var samazināt, izmantojot divķēžu sistēmu (1.7. att.) [118, 128]. Katras ķēdes apveids atbilst puslaiduma slogotas ķēdes apveidam.



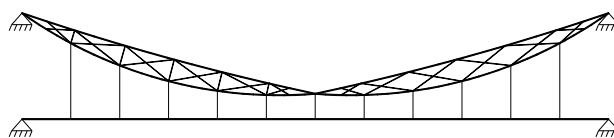
1.7. att. Divķēžu sistēmas izmantošana pārvietojumu samazināšanai

Iekārtās konstrukcijas pārvietojumus var samazināt, fiksējot nesošās troses apveidu ar slīpām trosēm (1.8. att.) [27, 118].



1.8. att. Nesošās troses apveida fiksēšana ar slīpām atsaitēm

Stingo ķēžu izmantošana ir sastopama gan iekārto tiltu (1.9. att.), gan pārsegumu būvniecībā [44, 128, 82]. Elementi šajā stingajā ķēdē darbojas arī spiedē un liecē. Elementi var būt veidoti no tērauda profiliem vai kopnēm [52]. Šīm konstrukcijām raksturīgs palielināts materiālu patēriņš. Šādas konstrukcijas piemērs ir Tauera tilts pāri Temzai Londonā, Lielbritānijā (1.10. att.).

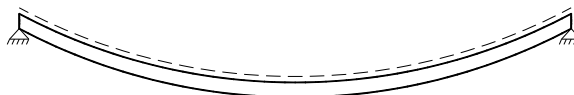


1.9. att. Iekārtais tilts ar stingajām ķēdēm



1.10. att. Tauera tilts pāri Temzai (Londonā, Lielbritānijā) [150]

Pie iekārtajām sistēmām ar stingām ķēdēm var arī pieskaitīt tiltus, kam klājs ir tieši uzlikts uz iekārtās stingās nesošās konstrukcijas (1.11. att.); šos tiltus sauc par spriegotas lentes tiltiem [99, 51].



1.11. att. Iekārtā sistēma ar spriegoto lenti

Literatūrā ir sastopamas arī divķēžu sistēmas, kur ķēdēm ir dažādas nokares un ķēdes savā starpā ir savienotas ar statņiem un atgāžņiem (1.12. att.). Šādām sistēmām piemīt palielināts stingums.



1.12. att. Sistēma ar divām ķēdēm, kas savienotas ar statņiem un atgāžņiem [128]

1.2.3. Kinemātisko pārvietojumu samazināšana, izmantojot trošu kopnes

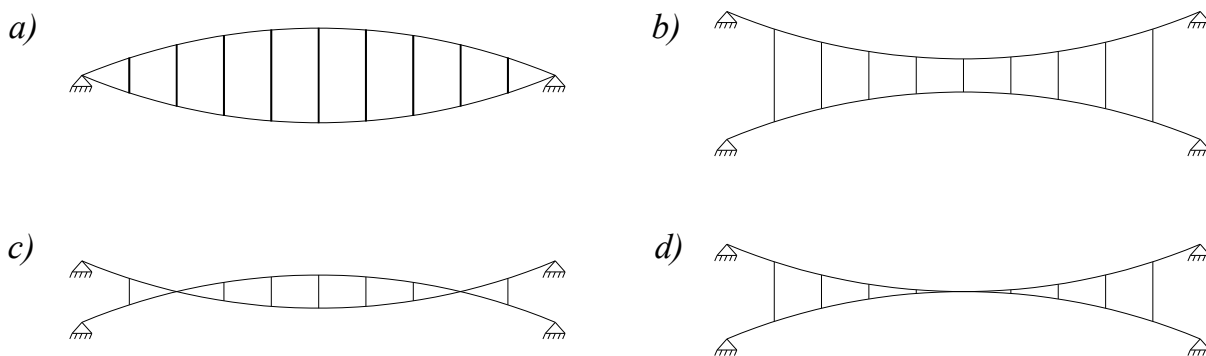
Atsevišķās iekārtās troses kinemātisko padevīgumu var samazināt, ievedot papildu trosi un pārvēršot sistēmu no vienjoslas par divjoslu [92, 105, 129, 131]. Šo sistēmu sauc par trošu kopni. Sistēma var būt veidota ar stinguma siju ar samazinātām stinguma īpašībām, piemēram, no viegliem kompozītmateriāliem, vai arī bez stinguma sijas, kur tās funkcijas pilda pati trošu kopne. Tas dod iespēju veidot trošu kopnes pilnībā no augstas stiprības elementiem, kas būtiski samazina konstrukcijas masu [136]. Sistēmas kopējais stingums tiek nodrošināts, veicot stabilizācijas troses saspriegšanu [83, 129]. Sistēmas ieliektā josla ir nesošā, bet izliektā – stabilizējošā [125]. Lai sistēmā nerastos spiedes spēki, sistēmai jābūt iepriekš saspriegtai. Iepriekšējā sasprieguma palielināšana palielina konstrukcijas stingumu pat līdz parasto kopņu stingumam [124]. Kopnes joslas savā starpā var būt sasaistītas ar stingiem statņiem, lokaniem piekariem, vienlaikus ar statņiem un piekariem vai slīpām atsaitēm. Ar piepūļu izmaiņu stabilizācijas trosē var regulēt ne tikai konstrukcijas stingumu, bet arī tās pašsvārstību frekvenci. Šādu konstrukciju izmantošana agrāk bija ierobežota kā materiālu slikto stiprības īpašību, tā arī nepietiekamo sasprieguma regulēšanas iespēju dēļ [128].

Izšķir divu veidu trošu kopnes – trošu kopnes ar vertikāliem režģa elementiem (1.13. att.) un trošu kopnes ar slīpiem režģa elementiem (1.14. att.). Trošu kopnes iedala arī pēc nesošo un stabilizācijas joslu savstarpējā izvietojuma. [125, 137]

Trošu kopnēm ar spiestiem spraišļiem (1.13. att. *a*), kuras sauc arī par abpusēji izliektām, nesošās un stabilizējošās joslas savienotas ar spiestiem spraišļiem, tāpēc šo sistēmu sauc arī par trošu-stieņu sistēmu. Šādu trošu kopņu priekšrocība ir tā, ka joslas pie balstiem savienotas vienā punktā, kas vienkāršo balstu uzbūvi. Trūkumi – spiesti, augsti spraišļi, kam noturības noteikumu dēļ nepieciešams palielināts materiālu patēriņš salīdzinājumā ar stieptiem piekariem, kā arī konstrukcijas nestabilitāte montāžas laikā, tādēļ jāparedz saišu izmantošana. Kopnes iepriekšējo saspriegšanu realizē, pagarinot spraišļus ar speciālu sajūgu palīdzību vai nostiepjot troses pie balstiem. [125, 137]

Ja stabilizācijas trose atrodas zem nesošās trose, tad vertikālie spraišļi pārvēršas par stieptiem piekariem. Šo sistēmu sauc arī par abpusēji ieliektu trošu kopni (1.13. att. *b*). Šīs sistēmas režģa elementi ir stiepti, un tos var izgatavot no lokaniem piekariem. Joslu savietošana centrā palielina konstrukcijas kinemātisko stabilitāti (1.13. att. *d*). Konstrukcijas trūkums ir vajadzība joslas stiprināt dažādos augstumos.

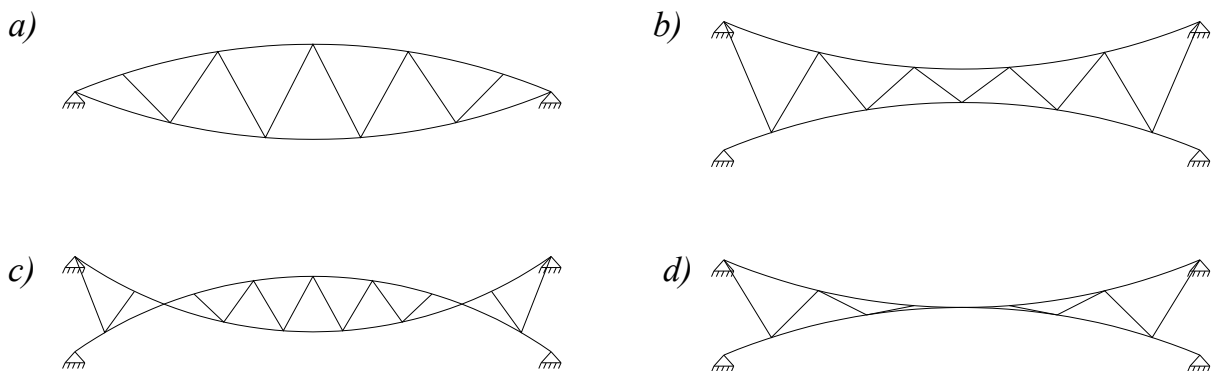
Kombinētā sistēma ar spiestiem spraišļiem un stieptiem piekariem, kuru arī sauc par izliekti-ieliektu trošu kopni (1.13. att. *c*), dod iespēju samazināt konstrukcijas kopējo augstumu un spiesto statņu augstumu, joslu nokares saglabājot dotajā līmenī. Šai trošu kopnei nesošās un stabilizējošās trose laidumā krustojas divreiz, rezultātā spraišļu garums samazinās, bet balstu tuvumā uzstāda piekarus, kas darbojas stiepē. [125, 137]



1.13. att. Trošu kopņu veidi ar vertikāliem režģa elementiem:

a – ar spiestiem spraišļiem starp joslām; *b* – ar stieptiem lokaniem piekariem; *c* – ar spiestiem spraišļiem un stieptiem lokaniem piekariem; *d* – ar stieptiem lokaniem piekariem un savietotām joslām

Trošu kopnes ar slīpiem režģa elementiem (1.14. att.) ir stingākas par trošu kopnēm ar taisniem režģa elementiem, tām raksturīgs palielināts stingums, īpaši – nevienmērīgu slodžu uzņemšanā [105]. Šo kopņu izmantošana ir racionāla tur, kur lietderīgā slodze būtiski pārsniedz pārseguma pašsvaru. Kopnes stingums palielinās, savietojot joslas kopnes centrā. Šo kopņu trūkums ir nepieciešamība katru atsaiti iepriekš saspriegt atsevišķi, jo tikai šajā gadījumā režģis darbosies racionāli. Trošu kopni ar trīsstūrveida režģi (1.14. att. *b*), kuru projektējuši inženieri G.D. Popovs un V.M. Vahurkins, pirmo reizi izmantoja 1953. g., pārsedzot 874 m lielu piekārtā ceļa laidumu Volgogradā, Krievijā. Lielu izplatību trošu kopnes ar stieptām atsaitēm un savietotām joslām (1.14. att. *d*) ieguva Zviedrijā 1960-tajos gados, kur inženieris D. Javerts (*D. Jawerth*) izstrādāja detalizētu šo kopņu aprēķina teoriju un organizēja to masveida ražošanu. [90, 125]

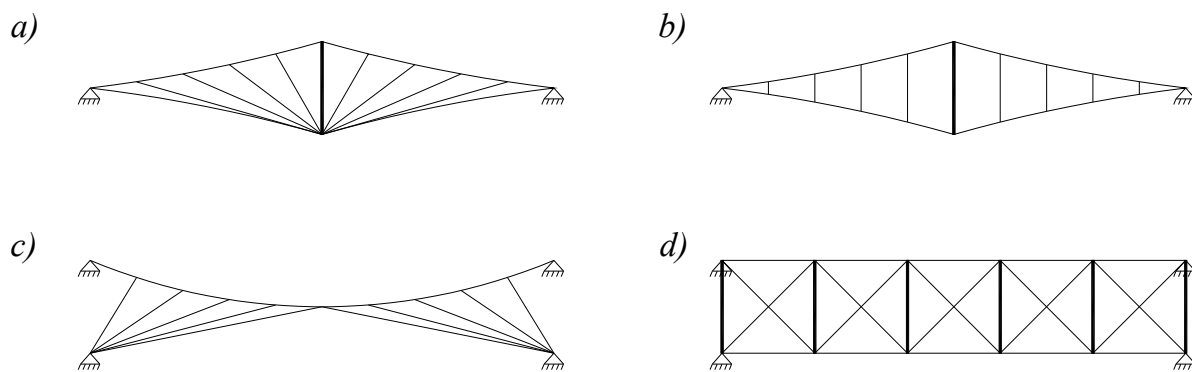


1.14. att. Trošu kopnes ar slīpiem režģa elementiem:

a – ar spiesti atgāžņiem; *b* – ar stieptām atsaitēm; *c* – ar spiesti atgāžņiem un stieptām atsaitēm; *d* – ar stieptām atsaitēm un savietotām joslām

Eksistē arī citi mazāk izplatīti trošu kopņu risinājumi (1.15. att.). Trošu kopnes ar vertikālo centrālo statni (1.15. att. *a*, *b*) priekšrocība ir tā, ka joslas pie balstiem savienotas vienā punktā un salīdzinājumā ar abpusēji izliekto trošu kopni tai ir samazināts spiesto elementu skaits. Bet šim kopņu veidam ir raksturīga palielināta deformējamība. Trošu kopnes ar paralēlām joslām (1.15. att. *d*) priekšrocība ir paralēlās joslas, kas paplašina tās izmantošanas iespējas, bet kopnei ir liels spiesto elementu skaits, kā arī liela deformējamība.

[90]



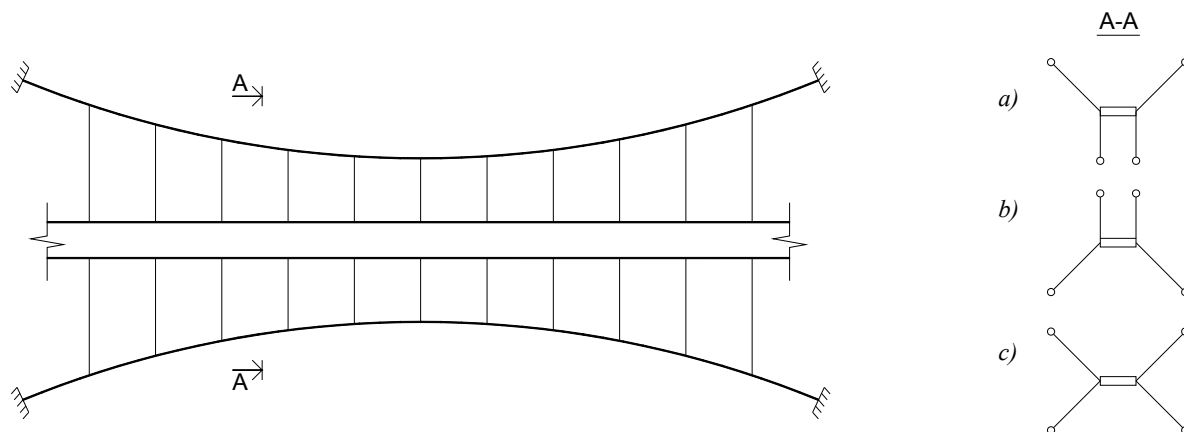
1.15. att. Trošu kopņu veidi:

a – ar centrālo spiesto statni un radiālām stieptām atsaitēm; *b* – ar centrālo spiesto statni un vertikāliem stieptiem piekariem; *c* – ar ārējām radiālām stieptām atsaitēm; *d* – ar paralēlām joslām un spiesti vertikāliem statņiem

Konstrukciju var saspriegt, nostiepjot apakšjoslu vai režģa elementus. Mainot nostiepuma spēku, var regulēt konstrukcijas stāvokli [136]. Parasti nesošās troses nokare ir lielāka par stabilizācijas troses nokari. Jo lielāka ir joslu nokare, jo mazāki spēki tur darbojas, bet palielināts ir troses kopējais garums, kā arī konstrukcijas kopējais augstums.

Horizontālās slodzes uzņemšanai nesošo vai stabilizācijas trosi vai tās abas var veidot ar nokari arī horizontālā plaknē (1.16. att.) [99, 129, 132]. Šīs sistēmas ir izplatītas gājēju un

cauruļvadu tiltiem. Šo sistēmu trūkums ir atsaišu sasprieguma zudums laika gaitā [129].



1.16. att. Trošu izvietojums tilta šķērsvirzienā

Trošu kopņu izmantošana īpaši efektīva ir ēkām ar riņķveida plānu. Šīm ēkām ir raksturīga balstbīdes spēku līdzsvarotība, kurus pilnībā uzņem balsta gredzens, kurš darbojas spiedē. Īpaši izplatīta ir sistēma, saukta par „velosipēda riteni”, kuras galvenā sastāvdaļa ir iekšējais gredzens. Nesošās troses piestiprina pie šī gredzena augšējās malas, bet stabilizējošās – pie apakšējās.

1.3. Trošu negatīvo īpašību novēršana

1.3.1. Trošu aizsardzība pret temperatūras svārstībām

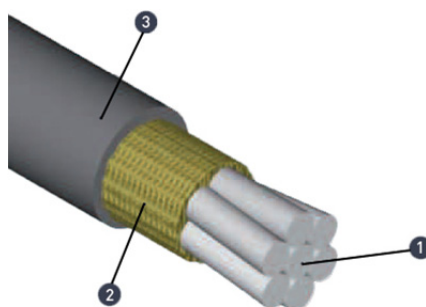
Projektējot trošu konstrukcijas, īpaša uzmanība jāpievērš iespējamai temperatūras maiņai, kas var izraisīt būtiskus pārvietojumus, tāpēc jāparedz speciāli pasākumi trošu aizsardzībai pret temperatūras svārstībām.

Literatūrā tika atrasti šādi aizsardzības pasākumi pret temperatūras svārstībām:

- aizsardzība ar polietilēna pārklājumu;
- aizsardzība ar sildelementu;
- aizsardzība ar siltuma pārnēsēju;
- garuma regulēšanas mehānismu izmantošana.

Trosi pret apkārtējās vides iedarbību var aizsargāt ar dažāda veida pārklājumiem, no kuriem visizplatītākais ir augsta blīvuma polietilēns (ABPE vai HDPE). Augsta blīvuma polietilēns ABPE ir ciets, gaisnecaurļaidīgs, izturīgs pret augstu temperatūru materiāls, kā arī tam piemīt ievērojama ķīmiskā un bioloģiskā izturība, laba triecienizturība, augsta stiepes

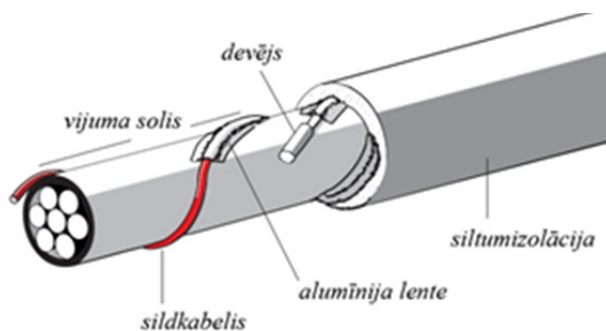
izturība, necīga ūdensuzsūce. ABPE apšuvums nodrošina troses aizsardzību pret ārējiem faktoriem, ieskaitot ultravioletā starojuma iedarbību (1.17. att.). [143]



1.17. att. Troses aizsardzība ar augsta blīvuma polietilēnu:
1 – galvanizēta trose; 2 – vaska pildījums; 3 – ABPE pārklājums [104]

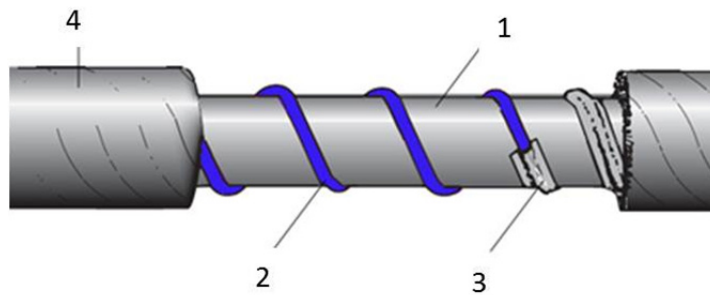
Termiskās izplešanās koeficients polietilēnam ir aptuveni 6 reizes lielāks nekā tērauda trosē, tāpēc polietilēna caurules ir apvalkotas ar polivinila lenti, lai kontrolētu temperatūras izmaiņas un samazinātu dažādu spriegumu lielumu [143].

Zemā temperatūrā vantis var apledot. Viens no to aizsardzības pasākumiem ir siltumizolācijas un sildelementa – sildkabeļa izmantošana (1.18. att.). Ir trīs sildkabeļa novietošanas metodes uz troses: garenvirzienā, viļņotas līnijas veidā un spirālveidā. Liela diametra trosēm var izmantot divus un vairāk sildkabeļus.



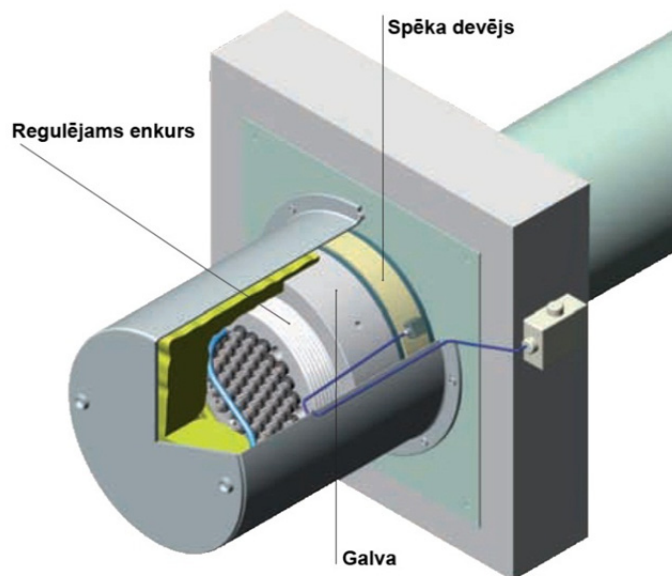
1.18. att. Troses aizsardzība pret temperatūras maiņu ar siltumizolāciju un sildkabeļi

Lai samazinātu temperatūras ietekmi uz trošu konstrukcijām, var izmantot kādu siltumnesēju, piemēram, tosolu vai antifrīzu, kurš plūst pa cauruli, kas apvīta ap trosi (1.19. att.). Caurule pieslēgta kompresoram, kurš sūknē siltumnesēju, kā arī sildītājam un kondicionētājam, kuri savukārt vai nu uzsilda, vai atdzesē siltumnesēju. Metodes priekšrocība ir tā, ka siltajā laikā konstrukcija tiek dzesēta, bet aukstajā laikā – sasildīta.



1.19. att. Troses aizsardzība ar siltuma pārnēsēju:
1 – trosē; 2 – caurule ar siltumnesēju; 3 – alumīnija lente; 4 – siltumizolācija

Temperatūras maiņas ietekmē vantis var mainīt savus izmērus – ja temperatūra palielinās, vanšu izmēri arī palielinās, un otrādi. Šos pārvietojumus var kompensēt, izmantojot aktīvus automātiskos kompensatorus (1.20. att.), kas nostiepj vai atslābina trosi [126]. Šī ierīce sastāv no hidrauliskā domkrata, kurš pieslēgts datoram un var automātiski regulēt troses garumu.



1.20. att. Slāpētājs (aktīvais tendons) [104]

1.3.2. Trošu iepriekšējā izstiepšana

Trošu kā būvkonstrukciju elementu trūkums ir to diezgan lielās neelastīgās deformācijas un rezultātā arī samērā neliels elastības modulis, it īpaši pēc pirmās sloģšanas. Šo parādību var izskaidrot ar troses vīto struktūru, jo tās dēļ stiepes spēki trosē starp atsevišķajām dzīslām un stieplēm sadalās nevienmērīgi. Vienkārtējā savijuma trosēm

elastības modulis par 15–35% mazāks nekā parastai stieplei, bet divkārtšā savijuma trosēm – par 50–60% mazāks. [119]

Troses reālais elastības modulis pirms tās izstiepšanas montāžas laikā parasti ir mazāks par teorētisko, jo troses transportēšanas un apstrādes procesā stieplu vijumu blīvums tiek izjaukts [120].

Tāpēc, lai samazinātu neelastīgās deformācijas (relatīvais pagarinājums, kas var sasniegt pat līdz 6% no troses sākotnējā garuma), novērstu daļu no šļūdes deformācijām, paaugstinātu elastības moduli, kā arī pārbaudītu gatavo troses elementu ar enkuriem, veic troses iepriekšējo izstiepšanu [149]. Pēc iepriekšējās izstiepšanas, pateicoties troses šķērsriezuma sablīvēšanai un atsevišķo dzīslu struktūras pagarinājumam, iegūst vienmērīgāku troses visa šķērsriezuma darbu visos slodzes režīmos, daļēji samazinās neelastīgās deformācijas, palielinās un stabilizējas elastības modulis [149]. Veicot iepriekšējo izstiepšanu, troses elastības moduli iespējams palielināt par 15–25%, bet kalpošanas laiku – par 30–40% [151].

Literatūrā aprakstīti trīs trošu iepriekšējās izstiepšanas paņēmieni:

- troses statiskā izstiepšana pirms troses montāžas, kas veikta uz taisna horizontāla stenda ar hidraulisko domkratu;
- troses dinamiskā izstiepšana, kas veikta tieši uz trošu vīšanas mašīnas, kas ir trošu izgatavošanas pēdējā operācija;
- troses izstiepšana pēc troses montāžas konstrukcijā, apvienojot šo procedūru ar iepriekšējā sasprieguma veidošanu [149].

Trosi ir iespējams vai nu izstiept un izturēt laikā no 30 minūtēm līdz 2 stundām zem slodzes, kas pārsniedz aprēķina stiepes spēku par 10–20%, vai arī izstiept, veicot divkārtējo, trīskārtējo vai četrkārtējo slogošanu, pie kam pēc katras slogošanas atslogojot trosi līdz nullei [152].

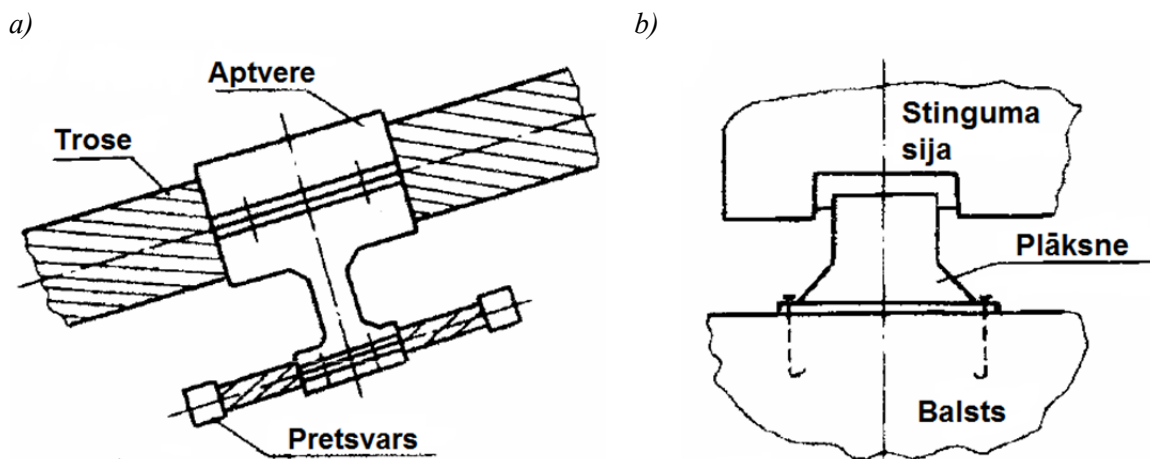
1.3.3. Pasākumi svārstību slāpēšanai

Lai noslāpētu svārstības, izmanto gan konstruktīvos pasākumus, gan slāpētājus.

Pie konstruktīvajiem pasākumiem pieskaita vairāku trošu sistēmu izmantošanu, kur katrai trosei ir sava pašsvārstību frekvence un svārstības dzēš cita citu, dzelzsbetona izmantošana stinguma sijai vai piloniem (palielinās slāpēšanas ātrums – svārstību

logaritmiskais dekrement) un A-veida pilonu izmantošana.

Slāpētāji var būt uzlikti gan trosēi, gan stinguma sijām. Troses slāpētāju (1.21. att. *a*) darbības princips balstās uz to, ka slāpētāja divu pretsvaru, izvietotu uz īsas troses, pašsvārstību frekvences atšķiras no troses pašsvārstību frekvencēm, un tās dzēš cita citu. Laiduma konstrukcijas horizontālo svārstību slāpēšanai var stinguma siju savienot ar balstu, izmantojot tērauda plāksni (1.21. att. *b*). [114, 116, 118]



1.21. att. Slāpēšanas ierīces:
a – troses; *b* – stinguma sijas [118]

1.4. Iekārto konstrukciju izmantošana tiltiem

1.4.1. Iekārto tiltu vispārējs raksturojums

Iekārtie tilti ir konstrukcijas, kam galvenie nesošie elementi ir stieptas piekārtās troses [13]. Iekārtie tilti ir ļoti svarīgas, pievilcīgas konstrukcijas, kam piemīt būtiskas tehniskās, ekonomiskās un estētiskās priekšrocības [42, 55].

Mūsdienās iekārtais tilts ir vispiemērotākā ļoti liela laiduma tiltu konstrukcija. Divdesmit vai vēl vairāk no visgarākajiem tiltiem pasaulē ir tieši iekārtie tilti. Tilts ar visgarāko centrālo laidumu ir *Akashi Kaikyō* tilts Japānā [16], kura laidums ir 1991 m (1.22. att.). Tik lielus laidumus iespējams sasniegt tāpēc, ka iekārto tiltu galvenie nesošie elementi ir stiepti un normālo spriegumu sadalījums tiem ir tuvs vienmērīgam [53].



1.22. att. *Akashi Kaikyō* tilts – tilts ar visgarāko centrālo laidumu pasaulē [142]

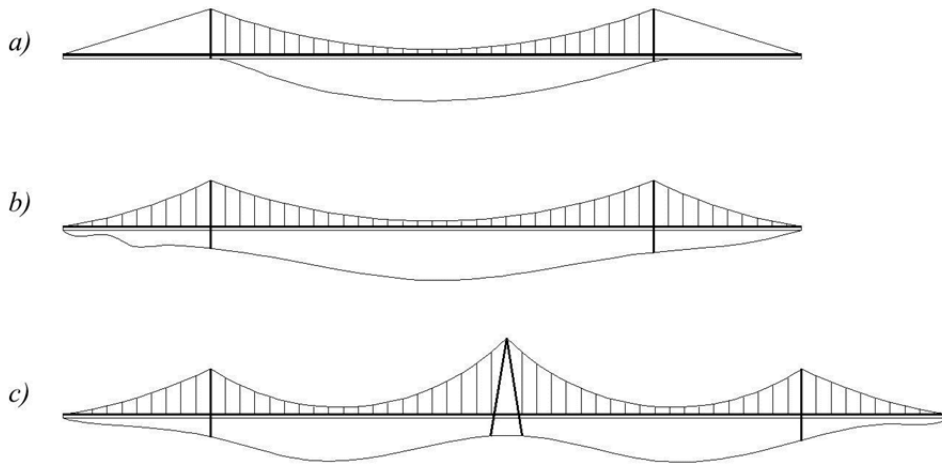
Iekārtie tilti ir pazīstami jau kopš seniem laikiem. Iekārtos ķēžu tiltus būvēja jau pirms 2000 gadiem Indijā un Ķīnā. Tās bija ģeometriski mainīgas sistēmas bez stinguma sijas. Šīs sistēmas bija ļoti padevīgas, vēja iedarbībā tās varēja viegli sabrukt. Lai piešķirtu konstrukcijai vajadzīgo stingumu, 18. gs., kad sāka attīstīties tērauda ražošana, sāka izmantot stinguma sijas un kopnes. 1801. gadā ASV tika uzbūvēts Jakoba Krika iekārtais tilts ar laidumu 21.3 m. Kliftona tilts, kas tika pabeigts 1864. gadā Lielbritānijā, ir senākais iekārtais autoceļa tilts, kas joprojām ir izmantojams. Tilta nesošā konstrukcija ir veidota no kaltām tērauda ķēdēm. Par pirmo modernā tipa iekārto tiltu tiek atzīts Bruklinas tilts ASV, kas pabeigts 1883. gadā. Šī tilta ar laidumu 486 m veidošanā izmantotas tērauda stieples. Arvien jaunāku tehnoloģiju ieviešanas rezultātā iekārto tiltu laidumi visu laiku palielinās. 1998. gadā Japānā tika uzbūvēts *Akashi Kaikyō* iekārtais tilts ar līdz šim brīdim pasaulē visgarāko centrālo laidumu – 1991 m. [16, 41, 79, 82, 128]

Aprakstot iekārto tiltu vēsturi, vienmēr tiek pieminēts traģiskais negadījums, kad 1940. gadā sabruka *Tacoma Narrows* tilts Vašingtonā, ASV ar centrālo laidumu 853 m. Tilts sabruka tikai četrus mēnešus pēc atklāšanas 19 m/s liela vēja iedarbībā neatbilstošas aerodinamiskās noturības dēļ. Kopš šī laika aerodinamiskie aprēķini iekārtajiem tiltiem kļuva obligāti. [2, 58, 97, 118]

1.4.2. Iekārto tiltu veidi

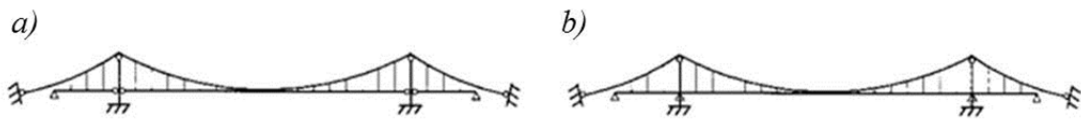
Iekārtie tilti tiek klasificēti pēc laidumu skaita, pēc stinguma sijas nepārtrauktības, kā arī pēc piekaru un enkurojuma veida [16].

Pēc laidumu skaita izšķir vienlaiduma, divlaidumu vai trīslaidumu ar diviem piloniem, kā arī daudzlaidumu iekārtos tiltus ar trīs vai vairāk piloniem (1.23. att.). Trīslaidumu iekārtie tilti ir visizplatītākie. Daudzlaidumu iekārtajiem tiltiem būtiski ir pilonu horizontālie pārvietojumi. [16, 86]



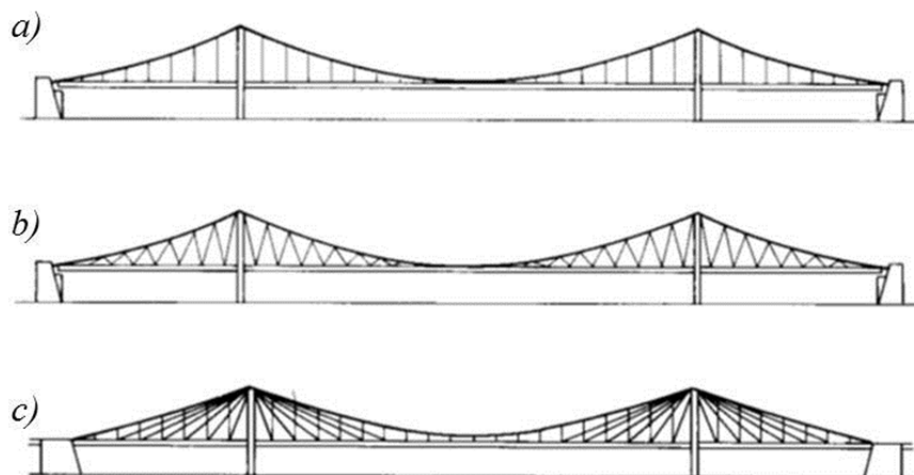
1.23. att. Iekārto tiltu iedalījums pēc laidumu skaita:
a – vienlaiduma; *b* – trīslaidumu; *c* – daudzlaidumu

Iekārto tiltu stinguma sija var būt divlocīklu vai nepārtraukta (1.24. att.). Divlocīklu sijās vairāk izmanto autoceļu tiltiem, nepārtrauktās – dzelzceļa tiltiem, lai nodrošinātu vilciena pārvietošanos [16].



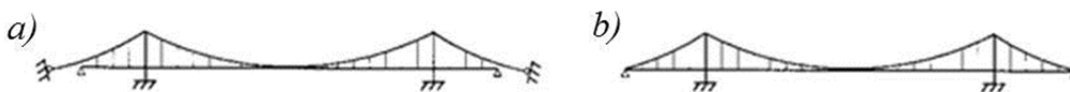
1.24. att. Stinguma sijas veidi:
a – divlocīklu; *b* – nepārtrauktā [5]

Piekari iekārtajiem tiltiem var būt vertikālie vai diagonālie, kā arī kombinētie (1.25. att.). Diagonālie piekari palielina konstrukcijas stingumu, bet vienlaikus palielinās arī piepūles gan piekaros, gan stinguma sijā. [16, 102, 133]



1.25. att. Iekārto tiltu piekaru sistēmas:
a – vertikālie piekari; *b* – diagonālie piekari; *c* – kombinētā piekarinātā un vanšu sistēma [27]

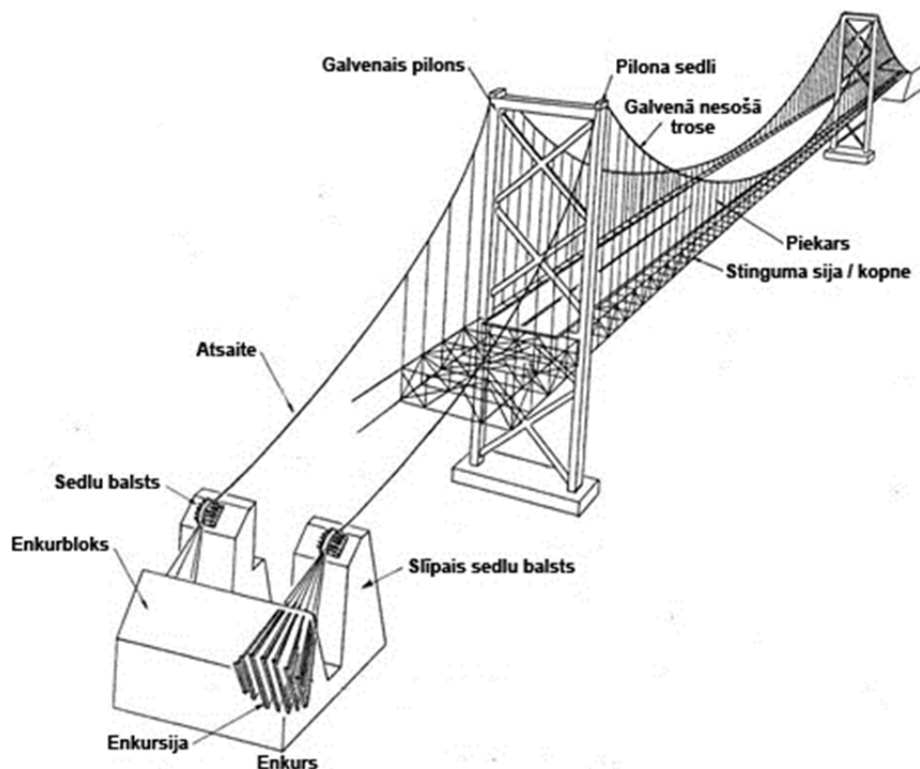
Pēc enkurojuma veida iekārtos tiltus iedala uz ārpusi enkurotos un pašenkurotos (1.26. att.). Plašāk izmanto uz ārpusi veiktos enkurojumus. Šādiem enkurojumiem nepieciešami masīvi balsti. Pašenkurošanas sistēmā galvenās troses savienotas ar stinguma siju, rezultātā stinguma sijā darbojas lieli spiedes spēki. [16, 128]



1.26. att. Iekārto tiltu enkurojuma veidi:
a – uz ārpusi enkuroti; *b* – pašenkurotie [5]

1.4.3. Iekārto tiltu konstruktīvās komponentes

Iekārtā tilta konstrukcijas galvenās komponentes ir stinguma sija, galvenā nesošā trose, piekari, piloni un enkuri (1.27. att.). Stinguma sija/kopne – gareniska konstrukcija, kas uzņem un izkliedē transporta slodzi un nodrošina konstrukcijas aerodinamisko stabilitāti. Galvenās nesošās troses – sasieta kopā paralēlu stieplu trošu grupa, kas balsta stinguma siju ar piekariem un pārnes slodzi uz piloniem. Galvenie piloni – vertikālas konstrukcijas, kas balsta galvenās troses un pārnes slodzi uz pamatiem. Enkuri – masīvi betona bloki, kas enkuro galvenās troses un kalpo kā tilta gala balsti. [16, 78]

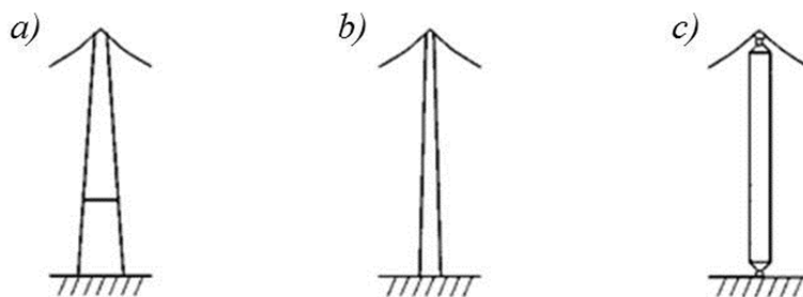


1.27. att. Iekārtā tilta sastāvdaļas [16]

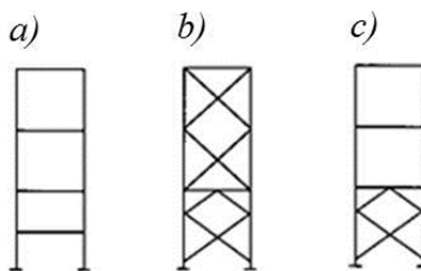
1.4.3.1. Piloni

Iekārtā tilta garenvirzienā izšķir stingos, padevīgos un bezmomentu pilonus (1.28. att.). Liellaiduma iekārtajiem tiltiem ierīko padevīgos pilonus, stingos balstus, lai nodrošinātu vajadzīgo tilta stingumu, veido daudzlaidumu tiltiem, savukārt bezmomentu balstus – neliela laiduma tiltiem. [16, 106]

Tilta šķērsvirzienā izšķir portāla pilonus, pilonus ar stinguma saitēm, kā arī iespējami kombinētie pilonu risinājumi (1.29. att.). [16]



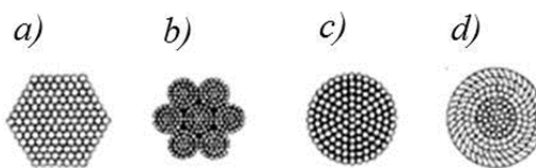
1.28. att. Pilonu konstrukcija tilta garenvirzienā:
a – stingais pilons; *b* – padevīgais pilons; *c* – bezmomentu pilons [16]



1.29. att. Pilonu konstrukcija tilta šķērsvirzienā:
a – portāla pilons; *b* – pilons ar stinguma saitēm; *c* – kombinētais pilons [16]

1.4.3.2. Troses

Pirmajos iekārtajos tiltos galveno trošu ražošanai izmantoja ķēdes, stingās ķēdes, kā arī citus materiālus. Modernajos liellaiduma tiltos, sākot ar Bruklinas tiltu (1883. g.), lieto auksti stieptās galvanizētās tērauda stieples. Iekārto tilto galvenajām trosēm izmanto paralēlus stieplu kūļus, kā arī spirālveida un vītās troses (1.30. att.). Piekari var būt veidoti kā tērauda stieņi, vītās troses, paralēlo stieplu troses u. c. Modernajos iekārtajos tiltos izmanto paralēlo stieplu troses. Paralēlo stieplu troses var pārnest lielāku slodzi, jo tām nav griezes momenta, tomēr to padevīgums ir ierobežots un ir grūti panākt vienmērīgu slodzes pārdalīšanu starp stieplēm. Vītās troses, veidotas no kūļiem, raksturo lielāks padevīgums un iespēja veidot mazus liekuma rādiusus. Tās ir vairāk piemērotas celšanas mehānismiem nekā tiltiem. Slēgtā profila trošu priekšrocība ir ārējo rindu aizsargājošā funkcija, bet to var nodrošināt, arī apstrādājot troses ar aizsargmateriāliem. [16, 67, 77, 131]

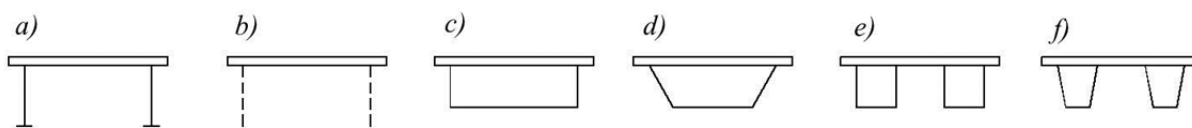


1.30. att. Iekārto tilto trošu stieplu kūļu veidi:
a – paralēlo stieplu trose; *b* – vītā trose; *c* – spirālveida trose; *d* – slēgtā profila spirālveida trose [16]

1.4.3.3. Stinguma sijas konstrukcija

Atkarībā no materiāla izšķir tērauda, dzelzsbetona un tērauda-dzelzsbetona stinguma sijas. Racionālākās ir tērauda stinguma sijas, kam ir mazāks pašsvars. Atkarībā no šķērsriezuma veida izšķir dubult-T profila stinguma sijas, kopnes un kārbveida stinguma sijas (1.31. att.). Izvēloties stinguma sijas veidu, liela uzmanība jāpievērš tās

aerodinamiskajām īpašībām, gaisa applūstamībai. Pēc iespējas jāizvēlas sijas šķērsriezums, kam ir labāka applūstamība (1.32. att.). [15, 16, 118]



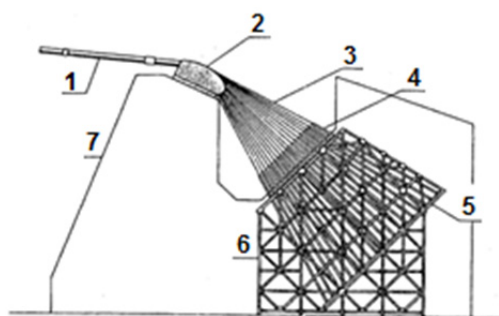
1.31. att. Stinguma siju šķērsriezuma veidi:
a – siju; b – kopnes; c–f – dzelzsbetona kārbveida



1.32. att. Stinguma siju šķērsriezumi ar uzlabotu applūstamību

1.4.3.4. Enkurbalsti

Galvenās troses enkursistēmas var iedalīt divās grupās – gravitācijas un tuneļa tipa. Gravitācijas enkursistēma, lai pretotos stiepes spēkiem galvenajā trosē, izmanto pašmasu (1.33. att.). Tuneļa tipa enkursistēma galvenās troses stiepes spēkus pārnes uzreiz uz zemi. Šai sistēmai ir vajadzīgi atbilstoši ģeotehniskie apstākļi. [16, 19, 107]



1.33. att. Gravitācijas enkursistēma:
1 – galvenā trosē; 2 – segļi; 3 – dzīslas; 4 – stieptās saites; 5 – enkursija; 6 – atbalstrāmis; 7 – enkurs [16]

1.4.4. Iepriekš saspriegto iekārto konstrukciju izmantošana

Iepriekš saspriegto iekārto tiltu sistēmu plašāk izmanto gājēju tiltu veidošanā. Kā piemērus var minēt gājēju tiltu *Am Kohenhof* Štutgartē, Vācijā (1990. g., laidums 42.5 m, 1.34. att.) un tiltu pāri Šērai Tūrā, Francijā (2001. g., laidums 235 m, 1.35. att.). Tiltu stabilizācijas troses ir izliektas arī horizontālā virzienā, lai uzņemtu vēja slodzes. Tiltā klājs var būt tieši savienots ar nesošo trosi, kā, piemēram, gājēju tilts Rozenšteina parkā Štutgartē, Vācijā (1977. g., laidums 28.9 m, 1.36. att.), vai ar stabilizācijas trosi. Iepriekš saspriegto

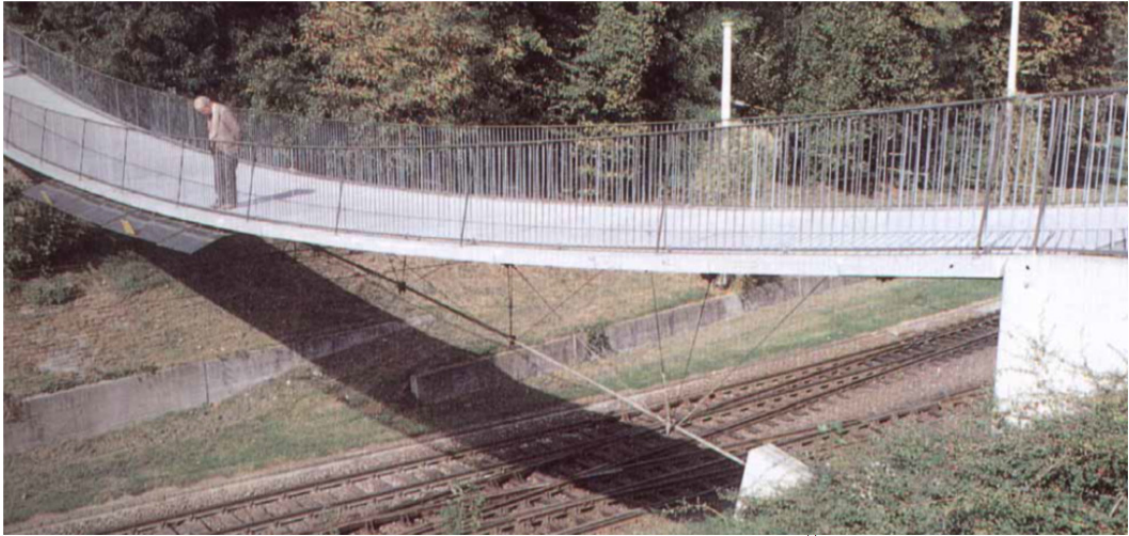
iekārto tiltu sistēmu bieži izmanto cauruļvadu tiltos (1.37. att. un 1.38. att.).



1.34. att. Iepriekš saspriegtais gājēju tilts *Am Kohenhof* (Štutgartē, Vācijā) [by *Eckhard Bernstorff*, www.bridgemeister.com]



1.35. att. Iepriekš saspriegtais gājēju tilts pāri Šērai (Tūrā, Francijā) [by *David Denenberg*, www.bridgemeister.com]



1.36. att. Iepriekš saspriegtais gājēju tilts Rozenšteina parkā (Štutgartē, Vācijā). Klājs savienots ar nesošo trosi [90]



1.37. att. Cauruļvadu tilts pāri Grīnriverai (Vaiomingā, ASV, 2004. g., laidums 584.9 m) [by Eric Sakowski, www.bridgemeister.com]



1.38. att. Iepriekš saspriegtais cauruļvadu tilts Piramida ezera apkārtnē (Kalifornijā, ASV, 2007. g., 114.3 m) [by Eric Sakowski, www.bridgemeister.com]

Literatūrā netika atrasti iepriekš saspriego iekārto konstrukciju izmantošanas piemēri smagiem autoceļu vai dzelzceļa tiltiem, kas ir saistīts ar to, ka tilta šķērsvirziena nesošo konstrukciju, kā arī klāja konstrukciju veidošanā līdz šim izmantoja zemas īpatnējās stiprības materiālus, rezultātā konstrukciju pašsvars bija liels un šīs konstrukcijas nebija nepieciešams stabilizēt. Bet līdz ar jauno kompozītmateriālu ieviešanu tiltu būvniecībā, jaunu spriegotāj-mehānismu, kā arī jaunu aprēķina metožu ieviešanu šo konstrukciju izmantošana autoceļu tiltiem kļūst aktuāla.

1.5. Iepriekš saspriego iekārto konstrukciju statiskā aprēķina metodes

Konstrukciju aprēķina metodes var iedalīt tuvinātās, analītiskās un skaitliskās. Iekārto konstrukciju tuvinātās aprēķina metodes dažādiem konkrētiem gadījumiem aprakstītas virknē literatūras avotu [49, 50, 62, 63, 125, 128].

Laidumā izkliedētās slodzes gadījumā, ievērtējot balstu atrašanos dažādos līmeņos, balstu pārvietojumus un temperatūras ietekmi, iekārtās troses sastiepumu noteic pēc analītiskās sakarības (1.1) [128]:

$$H_1^3 + \left[\frac{EA \int q_0^2 dx \cos^5 \beta}{2lH_0^2} - H_0 + \frac{l\alpha t \cos \beta + \nu \sin \beta \cos^2 \beta + \delta \cos^3 \beta}{l} EA \right] H_1^2 - \frac{EA \int q_1^2 dx}{2l} \cos^5 \beta = 0, \quad (1.1)$$

kur H_1 – troses sastiepums pēc slodzes pielikšanas;

H_0 – troses iepriekšējais sastiepums pirms slodzes pielikšanas;

q_0 – sākotnējā slodze;

q_1 – papildus pieliktā slodze;

dx – horizontālās koordinātas pieaugums;

l – laidums;

β – balstu savienošanas līnijas slīpuma leņķis pret horizontu;

t – temperatūras palielinājums;

α – termiskās izplešanās koeficients;

ν – balsta punkta vertikālie pārvietojumi;

δ – balsta punkta horizontālie pārvietojumi;

E – elastības modulis;

A – šķērsriezuma laukums.

Vispārīgā gadījumā iekārtās troses spriegumu-deformāciju stāvokli apraksta ar sakarību (1.2) [63]:

$$\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dx} \left(\frac{dy}{dx} + \frac{1}{2} \frac{dv}{dx} \right) + \frac{dw}{dx} \left(\frac{dz}{dx} + \frac{1}{2} \frac{dw}{dx} \right) = \frac{H - H_0}{EA} \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 \right]^{3/2}, \quad (1.2)$$

kur x – neatkarīgā ass;

y un z – no x atkarīgās assis;

u – pārvietojumu komponente x ass virzienā;

v – pārvietojumu komponente y ass virzienā;

w – pārvietojumu komponente z ass virzienā.

Trošu kopnes aprēķini ar analītiskām metodēm ir darbietilpīgi, bet tuvinātās metodes izmantojamas konkrētiem gadījumiem. Precīzus rezultātus pie samēra maza darbietilpīguma var iegūt, lietojot skaitliskās metodes, visizplatītākā no kurām tagad ir automatizētā galīgo elementu metode (GEM). Viena no spēcīgākajām GEM programmām ir ANSYS, kas ir bieži lietots līdzeklis zinātnisko un inženieruzdevumu risināšanai.

Troses modelēšanai GEM programmā ANSYS izmanto divmezglu telpiskā stieņa elementu LINK10. Šo elementu raksturo bilineārā stinguma matrica (1.3), kas atkarīga no deformāciju virziena, rezultātā elements var darboties tikai stiepē. Elementam pazūd stingums, ja elementā sāk darboties spiedes spēki. Elementam mezglā ir trīs brīvības pakāpes: pārvietojumi x , y un z . Lieces stingums elementa īpašībās nav iekļauts. Elementam ir iespējami lieli pārvietojumi un stinguma palielinājums, mainoties spriegumam. Stinguma palielināšanās efektu ievēro ar papildus spriegumu-stingumu matricu (1.4).

Elementa ievaddati ir mezglu koordinātas, šķērsriezuma laukums, iepriekšējais pagarinājums un materiāla īpašības. Slodzes ir pieliktas mezglos. Elementa risinājuma izejas dati ir mezglu pārvietojumi, garenspēks, spriegumi, deformācijas. Elementam var būt divi stāvokļi: elements ir saspriegts vai elements ir atslābis. Elementa ierobežojumi: elementa garumam un laukumam jābūt lielākiem par nulli, elements nav spējīgs uzņemt lieces slodzes,

spriegumi elementa garumā sadalās vienmērīgi, temperatūra elementa garumā mainās lineāri. [5, 6]

$$[K_i] = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & -C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -C_1 & 0 & 0 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1.3)$$

kur A – elementa šķērsriezuma laukums;

E – elementa elastības modulis;

L – elementa garums;

C_1 – stinguma koeficients, $C_1 = 1$ stiepes gadījumā, $C_1 = 0$ spiedes gadījumā.

$$[S_i] = \frac{F}{L} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 & -C_2 & 0 \\ 0 & 0 & C_2 & 0 & 0 & -C_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -C_2 & 0 & 0 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & -C_2 & 0 & 0 & C_2 \end{bmatrix}, \quad (1.4)$$

kur F – asspēks, pirmajai iterācijai $F = AE\varepsilon^{in}$, visām sekojošajām iterācijām – asspēks elementā;

C_2 – stinguma koeficients, $C_2 = 1$ stiepes gadījumā, $C_2 = 0$ spiedes gadījumā.

Trošu konstrukciju aprēķins ir ģeometriski nelineārs aprēķina uzdevums. ANSYS programmā ir realizēta Ņūtona-Rafsona pieeja nelineāro problēmu risināšanai. Šajā pieejā slodzi sadala posmos. Katra slodzes posma robežās sistēma uzskatama par lineāru.

Iekārto trošu konstrukcijām raksturīga lielo pārvietojumu ģeometriskā nelinearitāte. Nelineāro konstrukciju, kam ir lieli pārvietojumi, uzvedību raksturo ar lieliem mezglu kinemātiskajiem pārvietojumiem pie relatīvi mazām elementu elastīgajām deformācijām. ANSYS datorprogrammā lielo pārvietojumu risināšanai izmanto korotācijas (pagriežto koordinātu) pieeju. Nelinearitāti ievērtē ar speciālas formas deformāciju-pārvietojumu

sakarību matricu (1.5) [5, 6]:

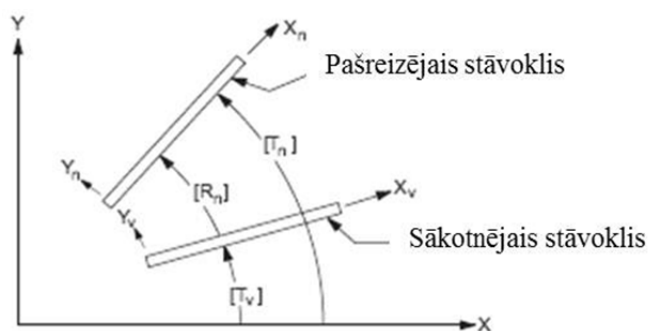
$$[B_n] = [B_v][T_n], \quad (1.5)$$

kur $[B_n]$ – deformāciju-pārvietojumu sakarību matrica elementa stāvoklī pēc kārtējā slodzes posma;

$[B_v]$ – parastā mazo deformāciju-pārvietojumu sakarību matrica elementa sākotnējā koordinātu sistēmā;

$[T_n]$ – ortogonālā transformācijas matrica no sākotnējās elementa koordinātu sistēmas uz koordinātu sistēmu pēc kārtējā slodzes posma.

Koriģētā transformācijas matrica $[T_n]$ saista elementa koordinātu sistēmu pēc kārtējā slodzes posma ar globālo koordinātu sistēmu (1.39. att.), ko noteic pēc sakarības (1.6).



1.39. att. Elementa transformācijas formulējums [6]

$$[T_n] = [T_v][R_n], \quad (1.6)$$

kur $[T_v]$ – elementa sākotnējā stāvokļa transformācijas matrica;

$[R_n]$ – rotācijas matrica.

Elementa tangenciālā stinguma matricu iegūst pēc sakarības (1.7), savukārt elementa rekonstruētā spēka vektoru – pēc sakarības (1.8).

$$[K_e] = \int_{l_n} [T_n]^T [B_v]^T [D][B_v][T_n] dx_n, \quad (1.7)$$

kur $[K_e]$ – elementa stinguma matrica;

$[D]$ – materiāla īpašību matrica;

l_n – elementa garums pēc kārtēja slodzes posma;

x_n – elementa garenass stāvoklis pēc kārtēja slodzes posma.

$$\{F_e^{nr}\} = \int_{l_n} [T_n]^T [B_v]^T [D] \{\varepsilon_n^{el}\} dx_n, \quad (1.8)$$

kur $\{F_e^{nr}\}$ – elementa rekonstruētā spēka vektors;

$\{\varepsilon_n^{el}\}$ – elementa elastīgās deformācijas.

Elementa elastīgās deformācijas aprēķinātas pēc sakarības (1.9):

$$\{\varepsilon_n^{el}\} = [B_v] \{u_n^d\}, \quad (1.9)$$

kur $\{u_n^d\}$ – elementa pārvietojumi, kas rodas no deformācijām.

Kopējos elementa pārvietojumus var aprēķināt pēc sakarības (1.10). Atrisinot vienādojumu sistēmas, iegūst mezglu atjaunotās koordinātas. [5, 6]

$$\{u_n\} = \{u_n^r\} + \{u_n^d\}, \quad (1.10)$$

kur $\{u_n\}$ – elementa kopējo pārvietojumu vektors globālajā koordinātu sistēmā;

$\{u_n^r\}$ – elementa kā cietā ķermeņa kinemātisko pārvietojumu vektors.

1.6. Iekārto konstrukciju pašsvārstību frekvenču noteikšana

Pašsvārstību frekvences noteikšanai iekārtajiem tiltiem [118] rekomendē izmantot formulu (1.11) 1, 3, ... svārstību formai un formulu (1.12) 2, 4, ... svārstību formai.

$$\omega_{v,i} = \sqrt{\frac{i^4 \pi^4 EI}{l^4 m} + H \frac{i^2 \pi^2}{l^2 m} + \left(\frac{2}{\pi}\right)^6 \frac{8\pi^4 E_c A_c f^2}{i^2 L_c l^3 m}}, \quad (1.11)$$

$$\omega_{v,i} = \sqrt{\frac{i^4 \pi^4 EI}{l^4 m} + H \frac{i^2 \pi^2}{l^2 m}}, \quad (1.12)$$

kur i – svārstību formas numurs;
 $\omega_{v,i}$ – vertikālo svārstību leņķiskā frekvence;
 EI – stinguma sijas lieces stingums;
 l – laidums;
 m – laiduma 1 m masa;
 H – nesošās troses horizontālā balstbīde;
 E_c – nesošās troses elastības modulis;
 A_c – nesošās troses šķērsriezuma laukums;
 f – nesošās troses nokare;
 L_c – nesošās troses garums.

Iepriekš saspriegto iekārto konstrukciju pašsvārstību frekvenču noteikšana pašlaik tiek veikta ar darbietilpīgām diskrētajām metodēm [4, 8, 9, 72, 128]. Trūkst vienkāršotas iepriekš saspriegto iekārto konstrukciju pašsvārstību frekvenču noteikšanas metodes, kas pavērtu iespēju vienkāršot aprēķinus konstrukciju variantu izstrādes procesā [17].

1.7. Ģenētiskais algoritms konstrukciju racionālu raksturlielumu noteikšana

Būvkonstrukciju optimizācijas galvenais uzdevums un gala mērķis ir labākās konstrukcijas risinājuma meklējums. Būvkonstrukciju optimizāciju veic iepriekš formulētiem optimalitātes kritērijiem vai principiem. Pētāmās konstrukcijas vislabākie raksturojumi, kas jānosaka optimizācijas procesā, ir optimizācijas parametri. Būvkonstrukciju neatkarīgie raksturlielumi, kas ietekmē optimizācijas parametrus, ir vadāmie faktori. [93]

Optimizācijas algoritmus var iedalīt divās pamatklasēs: deterministiskie un varbūtiskie algoritmi. Deterministiskos algoritmus visbiežāk lieto, ja eksistē skaidra sakarība starp vadāmajiem faktoriem un optimizācijas parametriem. Ja sakarība starp faktoriem un parametriem nav skaidra vai ir pārāk sarežģīta, vai arī meklēšanas lauks ir pārāk liels, tad problēmu atrisināt deterministiski ir grūti. Šajā gadījumā problēmu vieglāk risināt ar varbūtiskajiem algoritmiem. Lielākā daļa no šiem algoritmiem balstās uz Monte-Karlo metodes. Lai paaugstinātu algoritmu efektivitāti, izmanto adaptīvo meklēšanu, kad vadāmo faktoru vērtību noteikšanai nākamajai iterācijai algoritms izmanto heuristiskās funkcijas, kas izmanto informāciju, ko algoritms savācis iepriekšējās iterācijās. Viens no varbūtiskajiem algoritmiem ar adaptīvo meklēšanu ir ģenētiskais algoritms. [7, 65, 112]

Ģenētiskais algoritms ir stohastiska globālās meklēšanas metode, kuras pamatā ir dabiskā selekcija, process, kurš vada bioloģisko evolūciju. Ģenētiskais algoritms ir metode, kas dod iespēju risināt gan ierobežotas, gan neierobežotas optimizācijas problēmas. Ģenētiskie algoritmi tiek izmantoti, lai risinātu dažādas optimizācijas problēmas, kas nav piemērotas standarta optimizācijas algoritmiem, piemēram, problēmas, kam mērķa funkcija ir pārtraukta, nav diferencējama, ir stohastiska vai ļoti nelineāra. [68, 18]

Ģenētiskā algoritma galvenā priekšrocība ir tā, ka atšķirībā no citām metodēm, kas sagatavo vienīgo atrisinājumu meklēšanas laukumā, ģenētiskais algoritms apstrādā potenciālo atrisinājumu populāciju [7].

Ģenētiskais algoritms optimizē derīguma funkciju, ko optimizācijas teorijā sauc par mērķa funkciju. Individīds (ko pārstāv hromosoma) ir jebkurš punkts, kuram var izmantot derīguma funkciju. Derīguma funkcijas vērtība indivīdam ir tā rezultāts. Hromosomai jāsaturs informācija par indivīda raksturlielumiem (optimizācijas faktoriem). Šim nolūkam izmanto kodēšanu – visizplatītākā ir binārā rinda. Piemēram, indivīdu ar diviem raksturlielumiem x_1 un x_2 var kodēt ar hromosomas struktūru, kā parādīts 1.40. att. [3, 18, 68].

Hromosoma 1	1 1 0 1 1 0 0 1 0 0 1 1 0 1 1 0
Hromosoma 2	1 1 0 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1 1 1 0
	<div style="display: flex; justify-content: center; gap: 50px;"> ⏟ x_1 ⏟ x_2 </div>

1.40. att. Individīda hromosomas kodēšana binārās rindas veidā:
 x_1 un x_2 – indivīda raksturlielumi

Populācija ir indivīdu masīvs. Katrā iterācijā ģenētiskais algoritms veic skaitļošanas sēriju par pašreizējo paaudzi, lai radītu jauno paaudzi. Katra nākamā populācija tiek saukta par jauno paaudzi. Lai radītu nākamo paaudzi, ģenētiskais algoritms izvēlas noteiktus indivīdus pašreizējā paaudzē, kurus sauc par „vecākiem”, un izmanto viņus, lai radītu indivīdus nākamajai paaudzei, ko sauc par „bērniem”. Algoritms izvēlas tos vecākus, kuriem ir labāks funkcijas derīgums. Algoritma darbības blokshēma ir parādīta 1.41. att. [29, 68].



1.41. att. Ģenētiskā algoritma blokshēma

Algoritms sākas ar nejaušas populācijas radīšanu definētajā apgabalā. Katrā solī ģenētiskais algoritms izmanto pašreizējo populāciju, lai radītu bērnus, kuri formēs nākamo paaudzi. Algoritms izvēlas vecākus ar labāku funkcijas derīgumu un izmanto viņu hromosomas bērnu radīšanai. Ģenētiskais algoritms nākamajai paaudzei rada trīs tipu bērnus:

- Elites bērns – indivīds pašreizējā paaudzē ar labāko funkcijas derīguma vērtību. Indivīds automātiski izdzīvo nākamajai paaudzei.
- Krustošanas bērns – bērns, kuru rada, sakrustojot divu vecāku hromosomas.
- Mutācijas bērns – bērns, kuru rada, veicot nejaušas izmaiņas vienam vecākam. [3, 29, 68]

Hromosomu krustošanu algoritms veic, nejauši izvēloties krustošanas punktu un visu hromosomas daļu pirms krustošanas punkta nokopējot no viena vecāka un visu pēc krustošanas punkta nokopējot no otra vecāka (1.42. att.). Algoritms var izvēlēties arī vairākus krustošanas punktus. [3, 29, 68]

Hromosoma 1	1 1 0 1 1 0 0 1 0 0 1 1 0 1 1 0
Hromosoma 2	1 1 0 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1 1 1 0
Pēcnācējs 1	1 1 0 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1 1 1 0
Pēcnācējs 2	1 1 0 1 1 0 0 1 0 0 1 1 0 1 1 0

1.42. att. Ģenētiskā algoritma krustošanas princips
(| – krustošanas punkts)

Lai algoritmam būtu novērsta iespēja atrast tikai lokālo optimumu, algoritms veic sakrustoto hromosomu mutācijas. Hromosomas binārās kodēšanas gadījumā algoritms nejauši maina dažus bitus no 1 uz 0 vai no 0 uz 1 (1.43. att.). [68, 29, 3]

Oriģinālais pēcnācējs 1	1 1 0 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1 1 1 0
Oriģinālais pēcnācējs 2	1 1 0 1 1 0 0 1 0 0 1 1 0 1 1 0
Mutācijas pēcnācējs 1	1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 1 1 0
Mutācijas pēcnācējs 2	1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 0 1 0 0

1.43. att. Ģenētiskā algoritma mutācijas princips

Ģenētiskais algoritms var izmantot dažādus apstāšanās kritērijus: vai nu ir sasniegts maksimālais paaudžu skaits, vai ir sasniegts aprēķina laika limits, vai derīguma funkcijas vērtība labākajam punktam pašreizējā populācijā ir mazāka vai vienāda ar uzdoto, vai arī vidējās svērtās derīguma funkcijas vērtību maiņa ir mazāka vai vienāda ar uzdoto [29, 68].

1.8. Darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir izstrādāt racionālu liellaiduma iepriekš saspriegtās trošu konstrukcijas risinājumu, kas nodrošinātu trošu kopnes mazākus pārvietojumus salīdzinājumā ar atsevišķo nesošo iekārto trosi, nepalielinot materiālu patēriņu, šādas kopnes aprēķina algoritmu, noskaidrot šādas kopnes priekšrocības, iekārtā tilta konstrukcijā galveno nesošo trosi aizstājot ar izstrādāto iepriekš saspriegto trošu konstrukciju, kā arī eksperimentāli pārbaudīt iegūtos rezultātus.

Pēc darbā minētās literatūras analīzes secināts, ka mērķa sasniegšanai nepieciešams atrisināt šādus uzdevumus.

- Izstrādāt racionālu no pārvietojumu viedokļa trošu kopnes elementu izvietojumu iepriekš saspriegtai iekārtajai konstrukcijai, tās aprēķina algoritmus GEM programmatūrai ANSYS un optimizēšanas algoritmus ar ģenētisko algoritmu MatLAB un ANSYS programmēšanas vidēm un atrast racionālus parametrus trošu kopnei, kā arī izstrādāt racionālu no materiālu patēriņa viedokļa hibrīdo kompozīto trosi iepriekš saspriegtai iekārtajai konstrukcijai un pārbaudīt tās drošumu CFRP slāņa sabrukšanas gadījumā.
- Izpētīt iepriekš saspriegtās iekārtās trošu konstrukcijas darbību dažāda veida iedarbību gadījumā, noteikt izstrādātās trošu kopnes priekšrocības un trūkumus salīdzinājumā ar atsevišķo nesošo trosi un izstrādāt racionālu piekārto konstrukciju.
- Eksperimentāli pārbaudīt iepriekš saspriegtās iekārtās trošu konstrukcijas modeļus gan ar atsevišķo nesošo trosi, gan trošu kopni un salīdzināt tos, eksperimentāli pārbaudīt izstrādātos iepriekš saspriegtās iekārtās trošu konstrukcijas skaitliskos modeļus, kā arī eksperimentāli pārbaudīt temperatūras maiņas un iepriekšējā sasprieguma zuduma ietekmi uz iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas fizisko modeli.
- Izstrādāt iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas vienkāršotu pašsvārstību frekvenču noteikšanas metodi un eksperimentāli pārbaudīt to, izmantojot iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas modeli, kā arī noteikt vertikālās pašsvārstību frekvences iepriekš saspriegtam iekārtajam tiltam.

2. RACIONĀLA IEPRIEKŠ SASPRIEGTA IEKĀRTĀ KONSTRUKCIJA

2.1. Trošu kopnes racionāla risinājuma izvēle

2.1.1. Trošu kopnes struktūras izvēle

Ir pieņemta hipotēze, ka pārvietojumus iepriekš saspriegtai iekārtajai konstrukcijai var papildus samazināt, aizvietojot atsevišķo nesošo trosi ar trošu kopni. Vienmērīgi izkliedētas slodzes gadījumā visracionālākā no materiālu patēriņa un pārvietojumu viedokļa ir iekārtā trose, bet nevienmērīgas slodzes gadījumā iekārtā trose maina savu sākotnējo formu, t. i., rodas kinemātiskie pārvietojumi. Trošu kopņu kinemātisko pārvietojumu novērtēšanai par joslu apveidu ir pieņemts riņķa līnijas loks. Šim joslu apveidam pieliekot vienmērīgu slodzi, joslas maina savu sākotnējo apveidu, cenšoties pieņemt parabolas apveidu, bet sākotnējās formas maiņai traucē režģis. Šī joslu apveida izvēle dod iespēju vienkāršoti novērtēt trošu kopņu sākotnējās formas saglabāšanas spēju salīdzinājumā ar iekārto trosi, pieliekot tikai vienmērīgu slodzi.

Apskatītie trošu kopņu veidi ir parādīti 2.1. att. [28, 129, 131]. Trošu kopnes *a–e* nevar eksistēt bez iepriekšējā sasprieguma. Trošu kopne ar divām ieliektām joslām *f* var uzņemt slodzi bez papildus saspriegšanas un visi kopnes elementi ir stiepti, kas dod iespēju samazināt materiālu patēriņu. Trošu kopnes ir aprēķinātas ar GEM programmas LIRA 9.6. palīdzību [101]. Trošu elementu nestspēja noteikta saskaņā ar Eirokodeksu pēc 2.1. tabulā dotajām sakarībām.

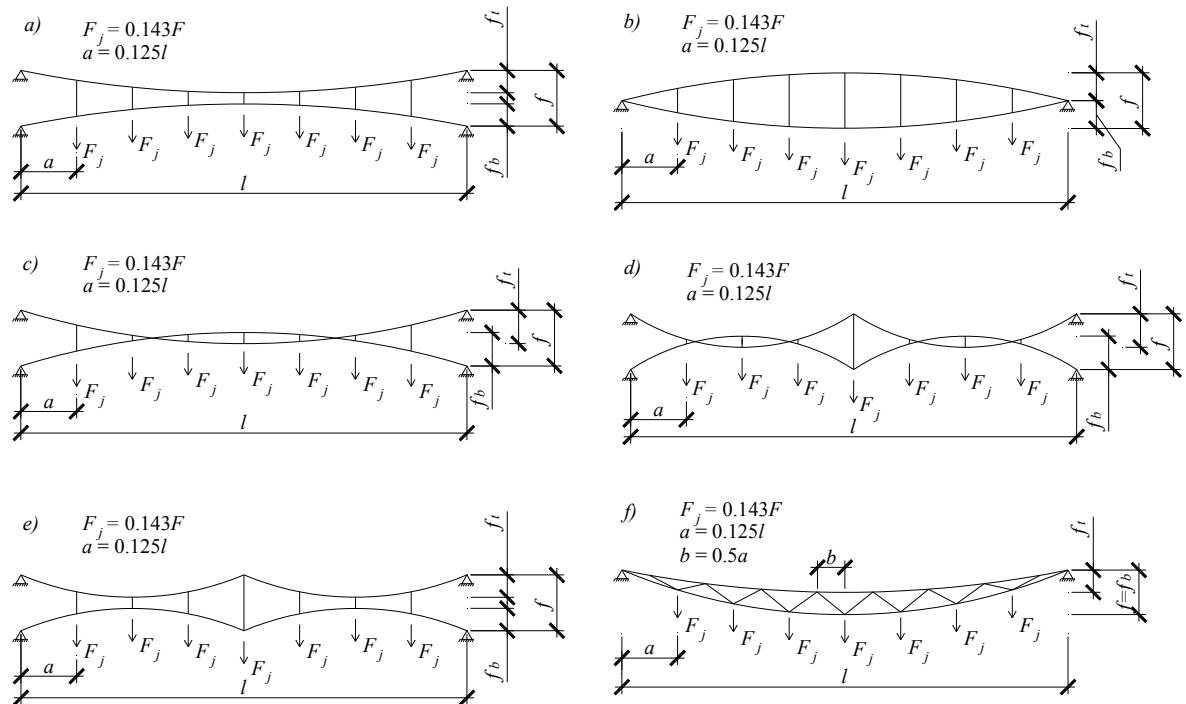
2.1. tabula

Troses nestspējas noteikšana [147]

Definīcija	Formulas	Nr.
Troses aprēķina nestspēja	$F_{Rd} = \frac{F_{uk}}{1.5\gamma_R}$	(2.1)
Troses pārraušanas normatīvais spēks	$F_{uk} = F_{\min} k_e$	(2.2)
Troses nestspēja	$F_{\min} = d^2 R_r K$	(2.3)
Pārraušanas spēka koeficients	$K = \frac{\pi f k}{4}$	(2.4)
Apzīmējumi: γ_R – drošības koeficients; k_e – zuduma koeficients; kas atkarīgs no galu nostiprinājuma; R_r – troses klase vai troses stieplu stiepes stiprība; f – aizpildījuma koeficients; k – savīšanas zuduma koeficients		

Attiecība starp trošu kopņu izlieci un atsevišķās troses izlieci ir apkopota 2.2. tabulā.

No tabulas var redzēt, ka vismazākie pārvietojumi ir trošu kopnei ar divām ieliektām joslām, kas nozīmē, ka saglabāt sākotnējo formu tā var vislabāk. Šī kopne ir izvēlēta par pētīšanas objektu. Tika salīdzinātas kopnes, kam ir vienāda masa, laidums un augstums. Par konstrukciju materiālu ir pieņemts tērauds.



2.1. att. Trošu kopņu veidi:

a – ar stieptiem piekariem; b – ar spiestiem spraišļiem; c – ar stieptiem piekariem un spiestiem spraišļiem; d – ar centrālo statni, stieptiem piekariem un spiestiem spraišļiem; e – ar centrālo statni un stieptiem piekariem; f – ar divām ieliektām joslām un stieptām atsaitēm; a – attālums starp slodzes pielikšanas punktiem; l – laidums; F – slodze; f – kopnes augstums; f_b – apakšjoslas nokare; f_t – augšjoslas nokare

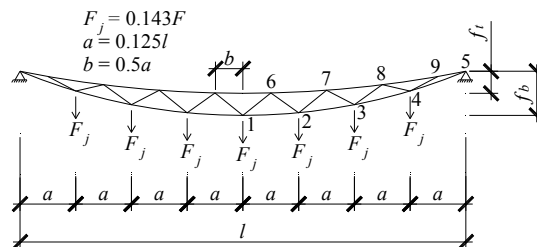
2.2. tabula

Attiecība starp trošu kopņu izlieci un atsevišķās troses izlieci

Trošu kopnes veids	Attiecība starp trošu kopnes izlieci un atsevišķās nesošās troses izlieci
a – ar stieptiem piekariem	1.33
b – ar spiestiem spraišļiem	0.88
c – ar stieptiem piekariem un spiestiem spraišļiem	0.93
d – ar centrālo statni, stieptiem piekariem un spiestiem spraišļiem	17.8
e – ar centrālo statni un stieptiem piekariem	18.2
f – ar divām ieliektām joslām un stieptām atsaitēm	0.59

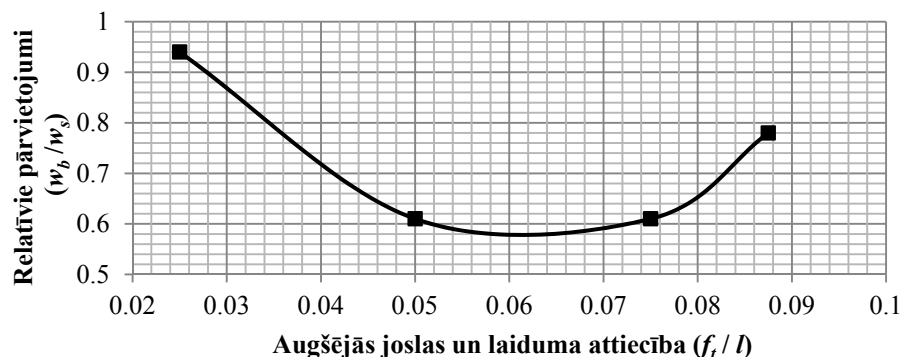
2.1.2. Izejas parametri trošu kopnei ar divām ieliektām joslām

Nākamais darba solis ir noteikt racionālās vērtības galvenajiem trošu kopnes parametriem, tādiem kā apakšjoslas nokare, augšjoslas nokare, apakšjoslas mezglu skaits, kā arī racionāls režģa veids. Par joslu apveidu ir pieņemts riņķa līnijas loks. Konstruktijas aprēķina shēma ir parādīta 2.2. att. Pieņemts, ka visām konstrukcijām būs vienāds materiālu patēriņš g un pielikta vienāda slodze. Pētīšanas kritērijs ir kopnes minimālie vertikālie pārvietojumi w_b dažādos punktos, kuri ir salīdzināti ar atsevišķās nesošās troses, kuras nokare ir 1/10 laiduma, vertikālajiem pārvietojumiem w_s . Par trošu kopnes elementiem ir pieņemtas tērauda troses, kuru elastības modulis ir 167 000 MPa; troses stieplu pārraušanas spēks – 1960 MPa. Aprēķini ir veikti ar GEM programmas LIRA 9.6 palīdzību [123].



2.2. att. Trošu kopne ar divām ieliektām joslām

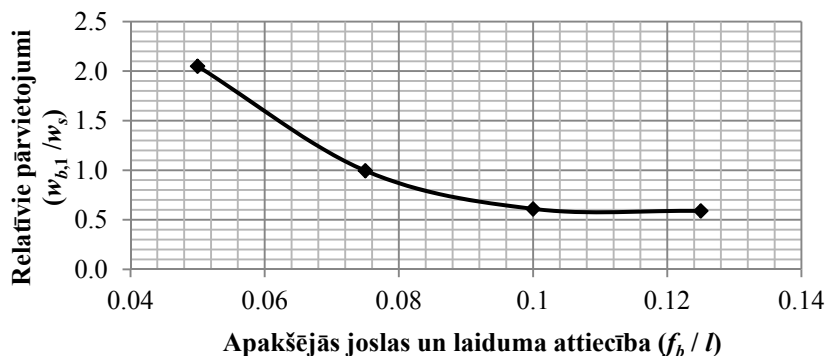
Sakarība starp augšjoslas nokari, kas izteikta kā laiduma daļa, un relatīvajiem pārvietojumiem ir atspoguļota 2.3. att. Relatīvā apakšjoslas nokare ir vienāda ar 1/10 laiduma. Attiecības starp apakšjoslas, augšjoslas un režģa elementu materiālu patēriņu un kopējo materiālu patēriņu ir vienādas attiecīgi ar 0.69, 0.25 un 0.06. Apakšjoslas slodžu pielikšanas punktu skaits ir 7. Racionālā vērtība atrodas starp 1/20 un 1/15 no laiduma jeb 1/2 un 2/3 no apakšjoslas nokares.



2.3. att. Sakarība starp trošu kopnes augšjoslas nokari un relatīvajiem pārvietojumiem

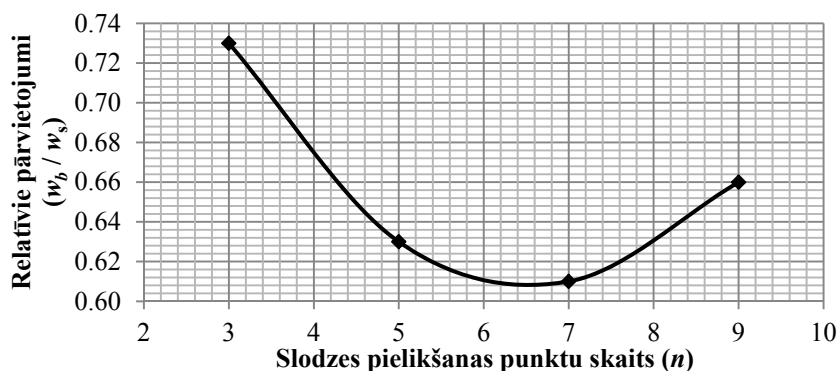
Sakarība starp apakšjoslas nokari, kas izteikts kā laiduma daļa, un relatīvajiem

pārvietojumiem ir atspoguļota 2.4. att. Augšjoslas nokare ir vienāda ar 1/2 no apakšjoslas nokares. Ir parādīts, ka pārvietojumi samazinās, palielinot apakšjoslas nokari, tomēr apakšjoslas nokares palielināšanu ierobežo konstruktīvās prasības.



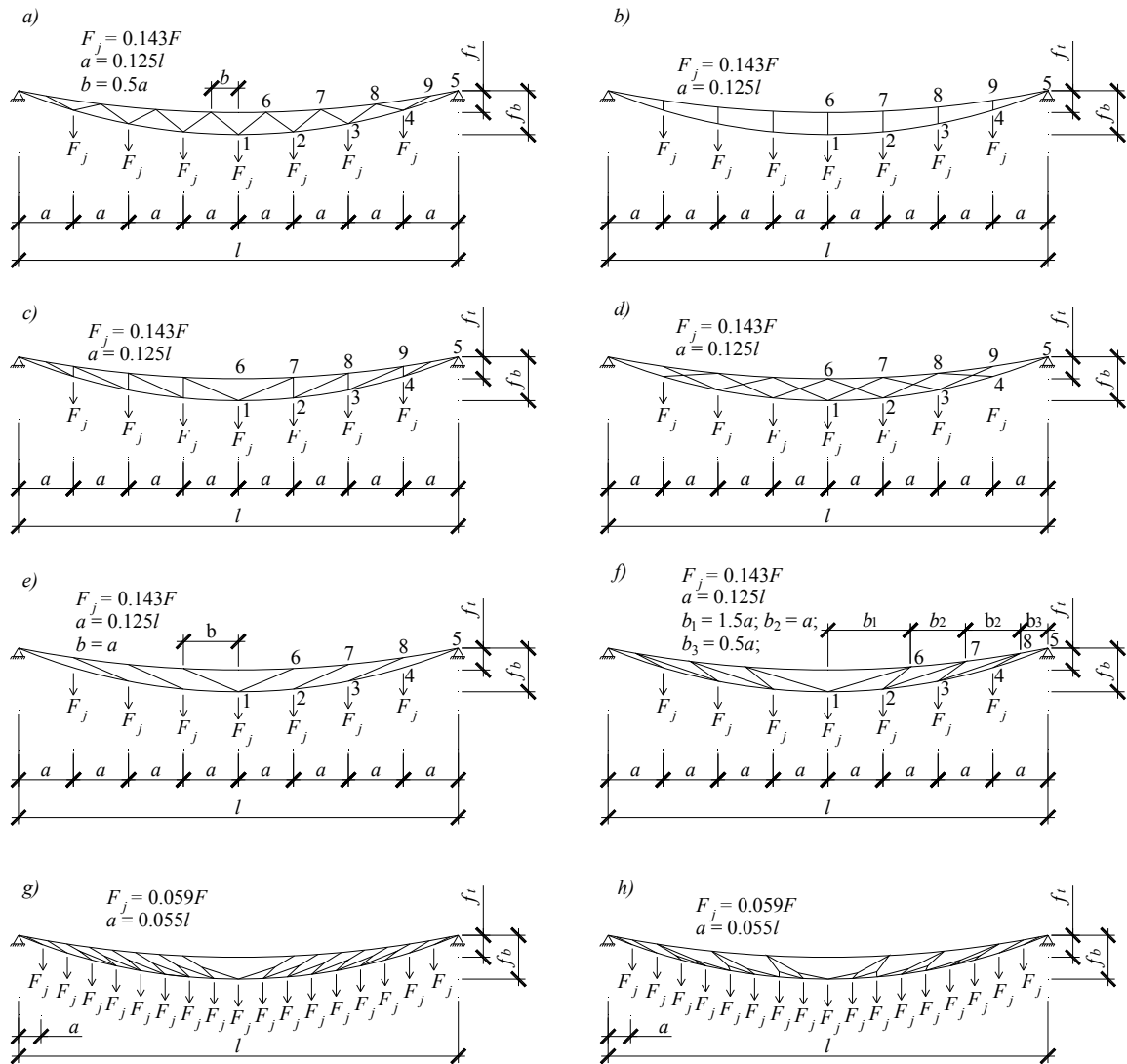
2.4. att. Sakarība starp trošu kopnes apakšjoslas nokari un relatīvajiem pārvietojumiem

Sakarība starp slodzes pielikšanas punktu skaitu un relatīvajiem pārvietojumiem ir atspoguļota 2.5. att. Relatīvā apakšjoslas nokare ir vienāda ar 1/10 laiduma. Augšjoslas nokare ir vienāda ar 1/2 apakšjoslas laiduma. Visacionālākā vērtība tiek sasniegta 7 punktu gadījumā.



2.5. att. Sakarība starp trošu kopnes slodzes pielikšanas punktu skaitu un relatīvajiem pārvietojumiem

Tika izanalizēti dažādi trošu kopnes režģa veidi, lai noteiktu racionālāko no tiem no pārvietojumu viedokļa (2.6. att.). Pārvietojumu rezultāti atkarībā no režģa elementu veida ir apkopoti 2.3. tabulā. Labākie rezultāti sasniegti ar *d*, *e* un *f* veida režģiem, bet, lietojot *g* un *h* veida režģus, var palielināt slodzes pielikšanas punktu skaitu, nepalielinot pārvietojumus un augšjoslas mezglu skaitu. Tālākiem pētījumiem tika izvēlēta trošu kopne ar divām ieliektām joslām un krusta režģi, kura pēc sākotnējiem aprēķiniem nevienmērīgas slodzes gadījumā uzrādīja mazākos pārvietojumus [32].



2.6. att. Trošu kopnes ar dažāda veida režģa elementiem

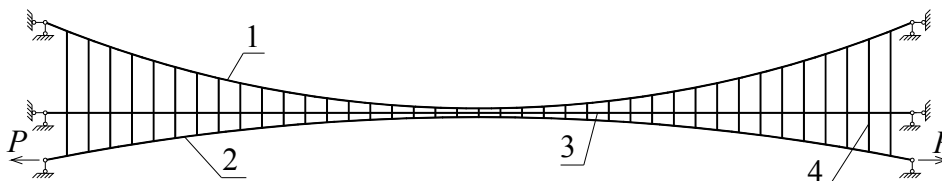
2.3. tabula

Trošu kopņu pārvietojumi atkarībā no režģa veida

Režģa veids	Pārvietojumu relatīvās vērtības
<i>a</i>	$w_{b,1} = 0.61w_s$
<i>b</i>	$w_{b,1} = 1.07w_s$
<i>c</i>	$w_{b,1} = 0.59w_s$
<i>d</i>	$w_{b,1} = 0.51w_s$
<i>e</i>	$w_{b,1} = 0.46w_s, w_{b,3} = 0.50w_s$
<i>f</i>	$w_{b,1} = 0.26w_s, w_{b,3} = 0.55w_s$
<i>g</i>	$w_{b,1} = 0.44w_s, w_{b,3} = 0.56w_s$
<i>h</i>	$w_{b,1} = 0.51w_s$

2.2. Iepriekš saspriegtai iekārtajai konstrukcijai izmantojamas trošu kopnes optimizācija

Trošu kopni ar divām ieliektām joslām un krusta režģi var uzskatīt par režģoto trosi, kuru var izmantot kinemātisko pārvietojumu samazināšanai. Lai pilnvērtīgi izpētītu šīs kopnes priekšrocības un trūkumus salīdzinājumā ar atsevišķo nesošo trosi, šī kopne tika lietota iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas (2.7. att.) galvenās nesošās troses vietā.



2.7. att. Iepriekš saspriegta iekārtā konstrukcija:

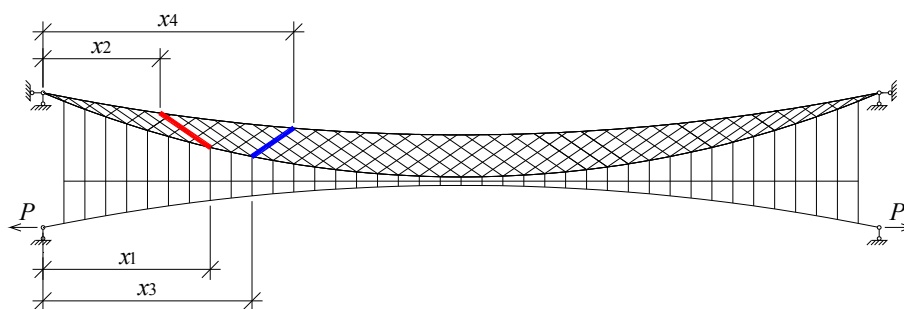
1 – nesošā trose; 2 – stabilizācijas trose; 3 – klājs; 4 – piekari; P – iepriekšējais saspriegums

2.2.1. Optimizācijas objekta apraksts

Par pētīšanas objektu pieņemta iepriekš saspriegta iekārtā konstrukcija, kam augšjosla ir aizvietota ar trošu kopni ar divām ieliektām joslām un krusta režģi. Pētīšanas objekta aprēķina shēma ir parādīta 2.8. att. un 2.9. att. Pieņemts, ka konstrukcijas laidums l ir 200 m. Attālums no nesošās troses balstīšanas punkta līdz klājam ir 21 m. Attālums no stabilizācijas troses balstīšanas punkta līdz klājam ir 11 m. Konstrukcijas platums b vienāds ar 18.2 m. Trošu kopnes apakšjoslas nokare f_b ir vienāda ar 20 m. Konstrukcija ir iepriekš saspriegta ar stabilizācijas trosi gan horizontālā, gan vertikālā plaknē. Stabilizācijas troses nokare gan horizontālā, gan vertikālā plaknē ir 10 m. Klājs ar galvenajām nesošajām konstrukcijām ir savienots ar piekariem ar soli a , vienādu ar 5 m.

Troses savilce, lai samazinātu horizontālos spēkus klāja šķērsvirzienā, kuri veidojas sasprieguma dēļ, ir izvietota starp piekariem konstrukcijas šķērsvirzienā. Iepriekš saspriegtās horizontālās troses, lai uzņemtu horizontālos spēkus klāja garenvirzienā, ir izvietotas gar klāju.

Konstrukcijas elementi ir veidoti no iepriekš saspriegtām tērauda trosēm, kuru elastības modulis ir 167 GPa un aprēķina stiepes stiprība – 914 MPa [22, 24, 69]. Pašvara slodze g , kas ir pielikta konstrukcijai, ir vienāda ar 51.1 kN/m. Konstrukcija ir slogota ar tiltiem raksturīgo slodzi [21]. Lietderīgā slodze q , kas ir vienāda ar 82.2 kN/m, var būt pielikta jebkurā laiduma vietā. Izklidētā slodze ir reducēta uz punkta slodzi un ir pielikta piekaru un



2.10. att. Režģa elementu izvietojums

Režģa elementu ar slīpumu uz trošu kopnes malām izvietojums ir izteikts ar izteiksmi (2.5); režģa elementu ar slīpumu uz trošu kopnes vidu izvietojums ir izteikts ar izteiksmi (2.6):

$$x_2 = x_1 - (\text{root1} \cdot x_1^2 + \text{root2} \cdot x_1 + \text{root3}), \quad (2.5)$$

$$x_4 = x_3 + (\text{root4} \cdot x_3^2 + \text{root5} \cdot x_3 + \text{root6}), \quad (2.6)$$

kur x_2 un x_4 – attālumi no pilona līdz režģa elementa savienojumam ar augšjoslu;
 x_1 un x_3 – attālumi no pilona līdz režģa elementa savienojumam ar apakšjoslu;
 $\text{root1} \dots \text{root6}$ – vienādojumu sistēmas (2.7) saknes.

Polinomu saknes režģa elementiem 1–3 ar slīpumu uz trošu kopnes malām tiek noteiktas, atrisinot vienādojumu sistēmu (2.7):

$$\begin{cases} s_1 = \text{root1} \cdot a_1^2 + \text{root2} \cdot a_1 + \text{root3} \\ s_2 = \text{root1} \cdot a_2^2 + \text{root2} \cdot a_2 + \text{root3} \\ s_3 = \text{root1} \cdot a_3^2 + \text{root2} \cdot a_3 + \text{root3}, \end{cases} \quad (2.7)$$

kur s_1 – attālums starp x_1 un x_2 , ja $x_1 = a_1$;
 s_2 – attālums starp x_1 un x_2 , ja $x_1 = a_2$;
 s_3 – attālums starp x_1 un x_2 , ja $x_1 = a_3$;
 a_1 – attālums no pilona līdz pirmā režģa elementa puslaidumā savienojumam ar augšjoslu;
 a_2 – attālums no pilona līdz vidējā režģa elementa puslaidumā savienojumam ar augšjoslu;

a_3 – attālums no pilona līdz pēdējā režģa elementa puslaidumā savienojumam ar augšjoslu.

Saknes attālumiem 4–6 – attiecīgi s_4 , s_5 un s_6 – var noteikt tādā pašā veidā.

Materiālu sadalījums starp trošu kopnes elementiem ir izteikts ar izteiksmēm (2.8):

$$\begin{aligned}g &= g_b + g_t + g_w \\g_1 &= g_b / g \\g_3 &= g_w / g,\end{aligned}\tag{2.8}$$

kur g – trošu kopnes kopējais materiālu patēriņš;

g_b – apakšjoslas materiālu patēriņš;

g_t – augšjoslas materiālu patēriņš;

g_w – režģa elementu materiālu patēriņš.

2.2.2. Iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas aprēķina algoritms GEM programmatūrā ANSYS

Iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas aprēķiniem GEM programmatūrā ANSYS uzrakstīta speciāla makrokomanda ANSYS programmēšanas valodā, kas ir līdzīga Fortran programmēšanas valodai. Uzrakstīto makrokomandu var viegli palaist ANSYS vidē. Makrokomanda definē elementu materiālus un šķērsgriezumus, veido konstrukcijas ģeometriju, sadala konstrukciju galīgos elementos, aprēķina deformācijas un spriegumus. Makrokomandas blokshēma ir parādīta 2.11. att.

Trošu kopnes elementi, stabilizācijas trose, piekari, savilces un klāja troses ir modelēti ar divpunktu galīgiem elementiem LINK10 ar maza stinguma opciju, kas piešķirta gan garenvirzienā, gan perpendikulārā virzienā, un tikai ar stiepes (trošes) opciju.

Elementu materiāls ir lineārs, izotropš, tā elastības modulis ir 167 000 MPa, Puasona koeficients – 0.3.

Aprēķinu tips – ģeometriski nelineārs, statiskais, ievērojot lielo pārvietojumu efektus, jo trošu konstrukcijām pirms stabilizācijas raksturīgi lieli pārvietojumi [59, 60].

Galvenie iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas ievadparametri ir laidums, piekaru solis (slodzes pielikšanas solis), trošu kopnes apakšjoslas nokare, trošu kopnes augšjoslas nokare, stabilizācijas troses nokare, trošu kopnes materiālu patēriņš, apakšjoslas un augšjoslas

Tā kā trošu kopnes punktus grūti ievadīt, ievadot katra punkta koordinātas atsevišķi, punktu koordinātas ievadītas ar formulām, izmantojot ciklus. Klāja punktu koordinātas ievadītas ar izteiksmi (2.9):

$$\begin{cases} x = a \cdot i \\ y = 0 \\ z = k \cdot b, \end{cases} \quad (2.9)$$

kur x – horizontālā koordināta;
 y – vertikālā koordināta;
 z – trešā koordināta;
 i – punkta numurs, kas mainās no 0 līdz l/a ;
 a – piekaru solis;
 b – konstrukcijas platums;
 k – koeficients, labajam zaram $k = 1$, kreisajam – $k = 0$;
 l – konstrukcijas galvenais laidums.

Lai programma zinātu, pie kura konstrukcijas elementa pieder katrs punkts, punkti ir numurēti un katras konstrukcijas elementa sākuma un beigu punkts tiek saglabāts.

Trošu kopnes apakšjoslas koordinātas ir aprēķinātas pēc formulām (2.10):

$$\begin{cases} x = a \cdot i \\ y = -\frac{4 \cdot f_b \cdot x \cdot (l - x)}{l^2} + h_b \\ z = k \cdot b, \end{cases} \quad (2.10)$$

kur f_b – apakšjoslas nokare;
 h_b – attālums no nesošās troses nostiprināšanas vietas līdz klājam.

Stabilizācijas troses koordinātas aprēķinātas pēc formulām (2.11):

$$\begin{cases} x = a \cdot i \\ y = \frac{4 \cdot f_{st,y} \cdot x \cdot (l-x)}{l^2} - h_{st,y} \\ z = -\frac{4 \cdot f_{st,z} \cdot x \cdot (l-x)}{l^2} \pm h_{st,z} + (k \cdot b), \end{cases} \quad (2.11)$$

kur $f_{st,y}$ – stabilizācijas troses nokare X0Y plaknē;

$f_{st,z}$ – stabilizācijas troses nokare X0Z plaknē;

$h_{st,y}$ – attālums no stabilizācijas troses piestiprināšanas vietas līdz klājam X0Y plaknē;

$h_{st,z}$ – attālums no stabilizācijas troses piestiprināšanas vietas līdz klājam X0Z plaknē.

Kopnes augšjoslas punkti ir atkarīgi no režģa elementu izvietojuma. Vienādojumu sistēma (2.7) tika atrisināta ar ANSYS, izmantojot matricas metodi – vienādojumi (2.12) – (2.16) [30].

$$\Delta = a_1^2 \cdot a_2 - a_1^2 \cdot a_3 - a_1 \cdot a_2^2 + a_1 \cdot a_3^2 + a_2^2 \cdot a_3 - a_2 \cdot a_3^2 \quad (2.12)$$

$$\Delta_1 = s_1 \cdot a_2 - s_1 \cdot a_3 - a_1 \cdot s_2 + a_1 \cdot s_3 + s_2 \cdot a_3 - a_2 \cdot s_3 \quad (2.13)$$

$$\Delta_2 = a_1^2 \cdot s_2 - a_1^2 \cdot s_3 - s_1 \cdot a_2^2 + s_1 \cdot a_3^2 + a_2^2 \cdot s_3 - s_2 \cdot a_3^2 \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} \Delta_3 = & a_1^2 \cdot a_2 \cdot s_3 - a_1^2 \cdot s_2 \cdot a_3 - a_1 \cdot a_2^2 \cdot s_3 + \\ & + a_1 \cdot s_2 \cdot a_3^2 + s_1 \cdot a_2^2 \cdot a_3 - s_1 \cdot a_2 \cdot a_3^2 \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$root1 = \Delta_1 / \Delta$$

$$root2 = \Delta_2 / \Delta \quad (2.16)$$

$$root3 = \Delta_3 / \Delta,$$

kur Δ – determinants.

Augšjoslas punktu koordinātas režģa elementiem ar slīpumu uz malām laiduma pusei ir noteiktas pēc vienādojuma (2.17):

$$\begin{cases} x_2 = x_1 - (root1 \cdot x_1^2 + root2 \cdot x_1 + root3) \\ y = -\frac{4 \cdot f_t \cdot x_2 \cdot (l-x_2)}{l^2} + h_b \\ z = k \cdot b, \end{cases} \quad (2.17)$$

kur $x_1 = a \cdot i$;

i mainās no 1 līdz $(l/a)/2$;

f_i – augšjoslas nokare.

Augšjoslas punktu koordinātas režģa elementiem ar slīpumu uz centru laiduma pusei ir noteiktas pēc vienādojuma (2.18):

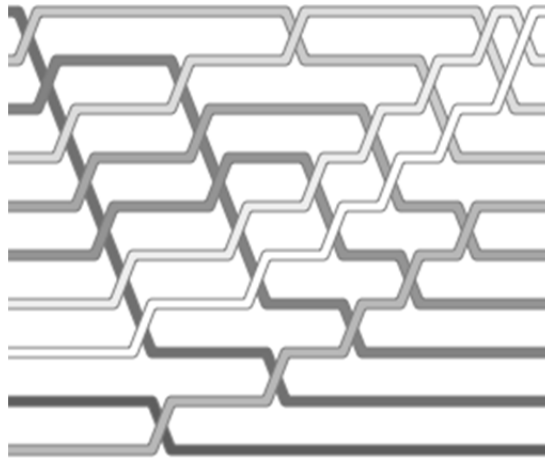
$$\begin{cases} x_4 = x_3 + (\text{root4} \cdot x_3^2 + \text{root5} \cdot x_3 + \text{root6}) \\ y = -\frac{4 \cdot f_i \cdot x_4 \cdot (l - x_4)}{l^2} + h_p \\ z = k \cdot b, \end{cases} \quad (2.18)$$

kur $x_3 = a \cdot i$;

i mainās no 1 līdz $(l/a)/2$.

Augšjoslas punktu koordinātas otrai laiduma pusei ir noteiktas pēc tādas pašas metodes [31].

Tā kā augšjoslas punkti nav sakārtoti pēc horizontālās koordinātas, nav iespējams tos automātiski savienot. Tāpēc augšjoslas punkti jāsakārto tā, lai pirmajam punktam būtu vismazākā horizontālā koordināta, bet pēdējam – vislielākā. Lai sakārtotu punktu numuru un koordinātu masīvu pēc horizontālās koordinātas, izmantota burbuļkārtošanas metode (2.12. att.). Burbuļkārtošana ir kārtošanas veids, kuras gaitā kārtojamā masīva blakuselementi, ja tie neapmierina uzdoto sakārtotības kritēriju, pakāpeniski tiek samainīti vietām. Process beidzas, kad mainīšana vietām vairs nav iespējama, kas nozīmē, ka masīvs ir sakārtots [146, 148]. Kad sakārtošana ir paveikta, punktus ar ciklu palīdzību var savienot automātiski.

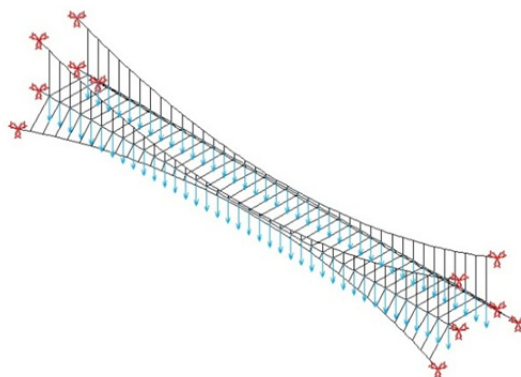


2.12. att. Burbuļkārtošanas metodes darbības vizualizācija [148]

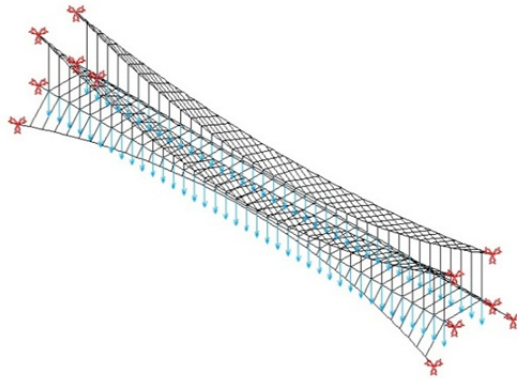
LINK10 galīgā elementa aprēķina konstantes ir šķērsriezuma laukums un iepriekšējā relatīvā deformācija. Šie parametri ir ievadīti ar ciklu palīdzību.

Konstrukcijas iepriekšējais saspriegums ir veidots stabilizācijas trosē, ievadot iepriekšējo relatīvo deformāciju.

Kad priekšprocesora operācijas ir paveiktas, var palaist aprēķinu un pēc aprēķina pabeigšanas nolasīt deformācijas un spriegumus. Rezultāti saglabājas speciālajā rezultātu failā, kuru var ielādēt EXCEL datorprogrammā tālākai rezultātu apstrādei. ANSYS iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas modeļi ar atsevišķo trosi un trošu kopni ir parādīti 2.13. att. un 2.14. att. Izstrādātais trošu kopnes aprēķina algoritms var automātiski pēc dotajiem parametriem aprēķināt kopnes konstrukciju, kā arī var tikt ātri pārveidots citu, ar trošu kopni saistītu uzdevumu risināšanai.



2.13. att. Iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas ANSYS modelis ar atsevišķo nesošo trosi



2.14. att. Iepriekš saspieltas iekārtās konstrukcijas ANSYS modelis ar trošu kopni

2.2.3. Optimizācijas vispārējā nostādne

Optimizācijas mērķis ir noteikt racionālās īpašības trošu kopnei ar divām ieliektām joslām un krusta režģi iepriekš saspiegtai iekārtajai konstrukcijai no kopējo vertikālo pārvietojumu minimizēšanas viedokļa.

Racionāla trošu kopnes konstrukcija ir definēta ar racionālu augšjoslas nokari f_t , racionālu režģa elementu izvietojumu (definēts ar attālumiem s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 un s_6) un racionālu materiālu sadalījumu starp trošu kopnes elementiem (definēts ar attiecībām g_1 un g_3).

Apakšjoslas nokare f_b , trošu kopnes materiālu patēriņš g , stabilizācijas troses materiālu patēriņš, saspiieguma līmenis, tilta ģeometriskie parametri – pilona augstums, laidums un piekaru solis – ir optimizācijas nemainīgie faktori.

Attālumi s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 un s_6 , attiecības g_1 un g_3 un sakarības starp augšjoslas un apakšjoslas nokarēm f_t / f_b ir optimizācijas mainīgie faktori.

Optimizācijas problēma ir minimizēt mērķa funkciju (2.19):

$$w_{tot} \left(s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, g_1, g_2, \frac{f_t}{f_b} \right), \quad (2.19)$$

kas pakļauta (2.20):

$$[K(U)] \cdot \{U\} = [F(U)], \quad (2.20)$$

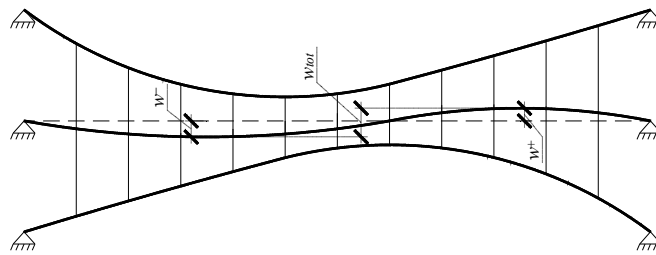
un vienādojumiem (2.5)–(2.8),

kur $[K(U)]$ – stinguma matrica;

$\{U\}$ – pārvietojumu vektors;

$[F(U)]$ – spēka vektors.

Kopējie vertikālie pārvietojumi w_{tot} tiek noteikti, summējot pārvietojumus virzienā uz augšu w^+ un virzienā uz leju w^- (2.15. att.). Maksimālie vertikālie pārvietojumi iekārtajām trošu konstrukcijām rodas, ja slodze pa laiduma garumu ir pielikta nesimetriski, tāpēc apskatīti dažādi slogošanas gadījumi. Problēma risināta statiskā, nelineārā stadijā.



2.15. att. Iepriekš sasprīgtas iekārtās konstrukcijas vertikālo deformāciju forma nesimetriskas slogošanas gadījumā

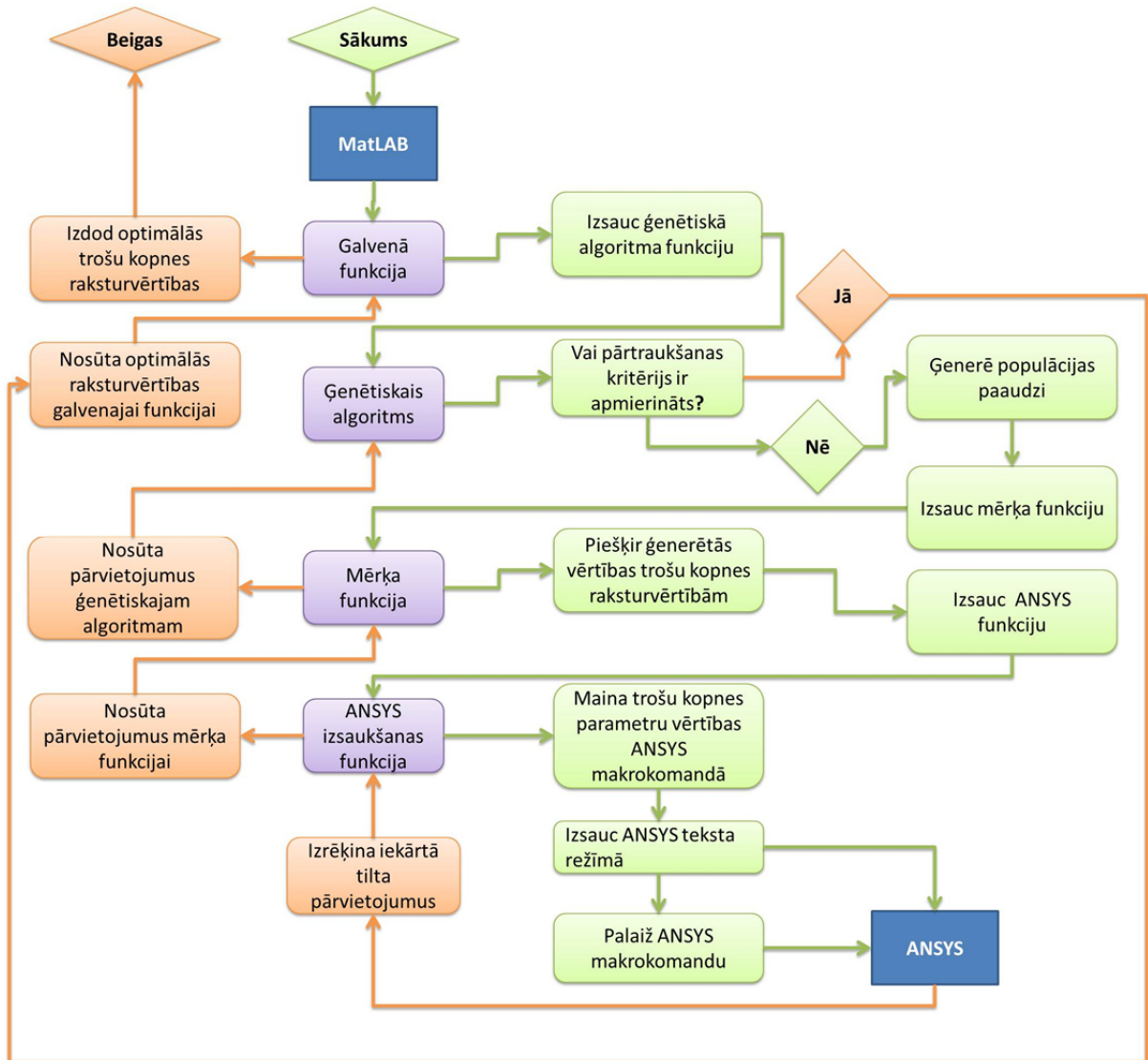
2.2.4. Iepriekš sasprīgtai iekārtajai konstrukcijai izmantojamas trošu kopnes optimizācijas algoritms

Trošu kopnes optimizācija pēc 9 mainīgiem faktoriem veikta ar ģenētiskā algoritma palīdzību, kurš dod iespēju automatizēt sarežģītu optimizācijas uzdevumu risināšanu [26, 65, 70, 88, 89].

Optimizācijai izmantots matemātiskās programmatūras MatLAB rīks GA Toolbox. MatLAB programmēšanas vidē uzrakstīta speciāla programma, kas dod iespēju aprēķināt funkcijas derīgumu, izmantojot GEM [96]. GEM programma ANSYS izmantota, lai aprēķinātu iepriekš sasprīgtas iekārtās konstrukcijas pārvietojumus [64].

Optimizācijas algoritms MatLAB programmēšanas vidē realizēts ar trim funkcijām: galveno funkciju, mērķa funkciju un ANSYS izsaušanas funkciju (Ansys funkcija; 2.16. att.). Galvenā funkcija izsauc ģenētiskā algoritma funkciju ar noteiktiem parametriem. Ģenētiskā algoritma funkcija ģenerē populācijas paaudzi un izsauc mērķa funkciju. Mērķa funkcija piešķir ģenerētās vērtības trošu kopnes raksturvērtībām un izsauc Ansys funkciju. Ansys funkcija maina trošu kopnes parametru vērtības speciāli uzrakstītajā ANSYS makrokomandā, izsauc ANSYS teksta režīmā, palaiž makrokomandu, saņem no ANSYS pārvietojumu rezultātus un nosūta rezultātus mērķa funkcijai, kas savukārt tos nosūta ģenētiskajam algoritmam. Pēc iegūtajiem rezultātiem ģenētiskais algoritms ģenerē nākamo

populācijas paaudzi utt., kamēr netiek sasniegts pārtraukšanas kritērijs. Pārtraukšanas kritērijs: kad vidējo un minimālo pārvietojumu vērtību attiecība nepārsniedz uzdoto vērtību. ANSYS makrokomanda ir speciāli ANSYS rakstīta komanda, kas iekļauj sevī visas trošu kopnes aprēķināšanai nepieciešamās komandas.



2.16. att. Optimālo parametru skaitļošanas blokshēma

2.2.5. Trošu kopnes optimizācijas procesā iegūtie racionālie parametri

Tika noteikti trošu kopnes racionālie parametri. Optimizācija ar ģenētisko algoritmu veikta ar 10 paaudzēm, populācijas izmērs – 50 gadījumi, no kuriem nākamās populācijas veidošanai izvēlēti 5 labākie varianti. Katrā eksperimentā bija jāveic pa 39 ANSYS

aprēķiniem dažādām slodžu kombinācijām. Racionāla attiecība starp augšjoslas un apakšjoslas nokarēm: $f_l/f_b = 0.5089$. Racionāla attiecība starp apakšjoslas materiālu patēriņu un trošu kopnes materiālu patēriņu: $g_b/g = 0.4512$. Racionāla attiecība starp režģa elementu materiālu patēriņu un trošu kopnes materiālu patēriņu: $g_w/g = 0.0673$. Racionālās attālumu s_1 , s_2 , s_3 , s_4 , s_5 un s_6 vērtības ir attiecīgi 4.8147, 16.3004, 16.3190, 0.9800, 12.6897 un 16.2324 m.

Racionālais režģa elementu ar slīpumu uz trošu kopnes malām izvietojums ir noteikts no attālumiem s_1 , s_2 un s_3 . Tas ir izteikts ar attālumu x_2 katram režģa elementam atkarībā no attāluma x_1 polinoma (2.21) veidā:

$$x_2 = 2.6828 \cdot 10^{-3} \cdot x_1^2 + 0.5972 \cdot x_1 - 2.8678, \quad (2.21)$$

kur x_1 – attālums no pilona līdz apakšjoslas mezglam;

x_2 – attālums no pilona līdz augšjoslas mezglam.

Racionālais režģa elementu ar slīpumu uz trošu kopnes centru izvietojums ir noteikts no attālumiem s_4 , s_5 un s_6 . Tas ir izteikts ar attālumu x_4 katram režģa elementam atkarībā no attāluma x_3 polinoma (2.22) veidā:

$$x_4 = -1.9933 \cdot 10^{-3} \cdot x_3^2 + 1.3698 \cdot x_3 - 0.8194, \quad (2.22)$$

kur x_3 – attālums no pilona līdz apakšjoslas mezglam;

x_4 – attālums no pilona līdz augšjoslas mezglam.

2.2.6. Trošu kopnes apveida un topoloģijas optimizācija ar ģenētisko algoritmu pēc 47 mainīgiem faktoriem

Topoloģijas optimizācija ir metode, kas optimizē materiāla izvietojumu dotajā aprēķina tilpumā. Trošu kopnes režģa topoloģijas optimizācija ir saistīta ar režģa elementu racionāla izvietojuma un materiāla sadalījuma starp režģa elementiem piemeklēšanu.

Trošu kopnes režģa elementu materiāla sadalījums starp režģa elementiem ir izteikts ar masas daļām katram režģa elementam no kopējās trošu kopnes masas. Par mainīgajiem faktoriem pieņemtas 20 masas daļas režģa elementiem, vēršot uz kopnes malām (g_{w01} –

g_{w20}), un 19 masas daļas režģa elementiem, vēršiem uz kopnes centru (g_{w21} – g_{w39}).

Trošu kopnes racionālais režģa elementu izvietojums definēts ar attālumiem s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 un s_6 .

Trošu kopnes augšjoslas un apakšjoslas nokaru attiecība (f_i/f_b) un apakšjoslas masas daļa (g_1) no kopnes kopējās masas ir optimizācijas papildus mainīgie faktori. Tātad kopā ir 47 mainīgie optimizācijas faktori.

Optimizācija veikta, izmantojot izstrādāto optimizācijas algoritmu. Optimizācija ar ģenētisko algoritmu realizēta ar 40 paaudzēm, populācijas izmērs ir 100 gadījumi, no kuriem nākamās populācijas veidošanai izvēlēti 10 labākie varianti.

Atrastie racionālie trošu kopnes raksturlielumi ir atspoguļoti 2.4. tabulā.

Veicot trošu kopnes optimizāciju pēc 47 faktoriem, trošu kopnes vertikālos pārvietojumus visneizdevīgāk pieliktās slodzes gadījumā salīdzinājumā ar trošu kopni, kas optimizēta pēc 9 faktoriem, izdevās samazināt par 4.5%. Trošu kopnes pārākums no pārvietojumu viedokļa salīdzinājumā ar atsevišķo trosi palielinājās no 26.6% līdz 29.9%. Tā kā iegūtais risinājums, kas optimizēts pēc 47 mainīgiem faktoriem, būtiski neatšķiras no risinājuma, kas optimizēts pēc 9 mainīgiem faktoriem, tālāk darbā tiks analizēts risinājums, kas optimizēts pēc 9 mainīgiem faktoriem.

2.4. tabula

Iegūtās optimizācijas faktoru racionālās vērtības

Faktors	Vērtība	Faktors	Vērtība	Faktors	Vērtība
g_1	0.4035	g_{09}	0.00351	g_{25}	0.00039
f_i/f_b	0.4842	g_{10}	0.00457	g_{26}	0.00132
s_1	4.9546	g_{11}	0.00249	g_{27}	0.00056
s_2	19.9830	g_{12}	0.00389	g_{28}	0.00086
s_3	17.8008	g_{13}	0.00440	g_{29}	0.00064
s_4	0.7753	g_{14}	0.00184	g_{30}	0.00144
s_5	15.1424	g_{15}	0.00209	g_{31}	0.00279
s_6	18.2514	g_{16}	0.00401	g_{32}	0.00278
g_{01}	0.00206	g_{17}	0.00229	g_{33}	0.00440
g_{02}	0.00102	g_{18}	0.00151	g_{34}	0.00332
g_{03}	0.00109	g_{19}	0.00387	g_{35}	0.00251
g_{04}	0.00107	g_{20}	0.00192	g_{36}	0.00489
g_{05}	0.00112	g_{21}	0.00218	g_{37}	0.00262
g_{06}	0.00134	g_{22}	0.00016	g_{38}	0.00205
g_{07}	0.00461	g_{23}	0.00124	g_{39}	0.00436
g_{08}	0.00270	g_{24}	0.00043		

2.3. Hibrīdās kompozītās troses izmantošana iepriekš saspriegtai iekārtajai konstrukcijai

Maksimālais iekārtā tilta laidums, kuram nesošās konstrukcijas veidotas no tērauda trosēm, pēc formulas (2.23) [128], pieņemot, ka troses stiepleņu pārraušanas spēks ir 1960 MPa un blīvums – 7850 kg/m³, ir 4657 m. Pēc [103] literatūras avota iespējamais laidums ir 7000 m. Izmantojot tērauda troses vietā CFRP lentes Sika CarboDur ar stiepes stiprību 2800 MPa un blīvumu 1500 kg/m³, maksimālo tilta laidumu var palielināt līdz 37 838 m.

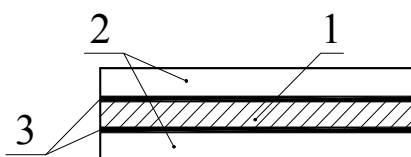
$$l = \frac{0.4 \cdot R}{\gamma}, \quad (2.23)$$

kur R – stiepes stiprība, γ – blīvums.

CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymer – polimērs, stiegrots ar oglekļa šķiedrām) kompozītmateriāliem ir virkne priekšrocību – liela īpatnējā stiprība, laba pretestība agresīvā vidē, mazs blīvums [91, 111].

Bet CFRP piemīt arī daži trūkumi, kas kavē to lietošanu konstrukcijās. Relatīvi mazais pagarinājums pie sabrukšanas, virsmas sabrukšanas iespējamība, sliktās īpašības perpendikulāri šķiedrām, savienojumu veidošanas sarežģītība un lielā cena ir galvenie CFRP trūkumi salīdzinājumā ar tēraudu. Mazais pagarinājums pie sabrukšanas (konstrukcijai ir trausls sabrukums) samazina konstrukcijas drošumu slodzes acumirkliņa palielinājuma gadījumā. [91, 111]

Minētos CFRP trūkumus var daļēji atrisināt, izmantojot hibrīdo kompozīto trosi, kur CFRP slānis ir pastiprināts ar tērauda slāņiem (2.17. att.).

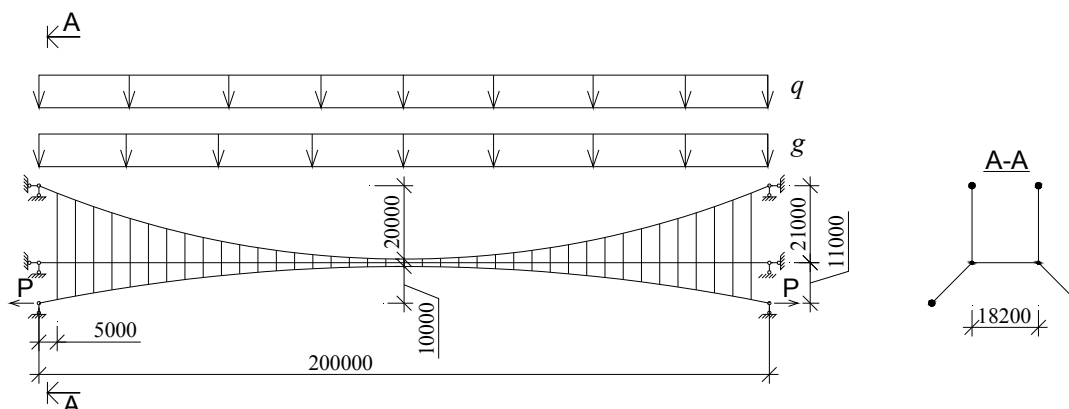


2.17. att. Hibrīdās kompozītās troses šķērs griezumā:
1 – CFRP slānis; 2 – tērauda slānis; 3 – līme

2.3.1. Izvēlētās konstrukcijas raksturojums

Darbā hibrīdās kompozītās troses izmantošanas īpatnības pētītas, to izmantojot par iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas nesošo trosi.

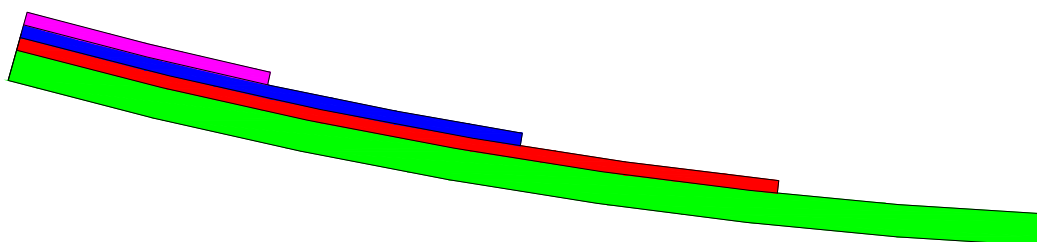
Izstrādāta hibrīdās kompozītās troses konstrukcija iepriekš saspiestai iekārtajai konstrukcijai ar laidumu 200 m, nesošās troses nokari 1/10 laiduma jeb 20 m un stabilizācijas troses nokari 1/20 laiduma jeb 10 m (2.18. att.). Konstrukcija slogota ar lineāri izkliedēto pašsvara slodzi 51.1 kN/m un lietderīgo slodzi 82.2 kN/m. Konstrukcija ir iepriekš saspiesta. Saspieguma līmenis ir vienāds ar 60% no galvenās nesošās troses nestspējas. [38]



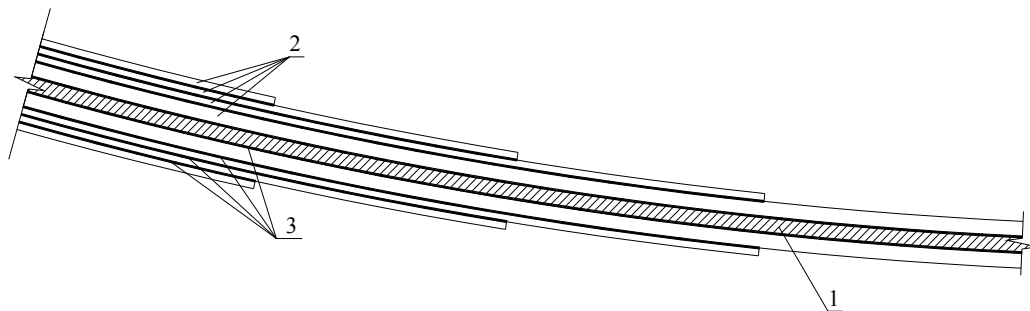
2.18. att. Iepriekš saspiestas iekārtās konstrukcijas aprēķina shēma

Lai samazinātu konstrukcijas svaru, materiālu patēriņu, kā arī pārvietojumus, galveno nesošo tērauda trosi var aizvietot ar hibrīdo kompozīto trosi, kas sastāv no vidējā CFRP slāņa un ārējiem tērauda slāņiem. Tērauda slāņi var veikt gan aizsardzības funkcijas, gan drošības funkcijas gadījumā, ja CFRP slānis sabrūk.

Piepūļu sadalījums pa troses garumu nav vienāds (2.19. att.), tāpēc, lai vienmērīgāk noslogotu trosi, katru posmu var veidot ar atšķirīgu tērauda šķērsgriezumu, kas dod iespēju samazināt materiālu patēriņu (2.20. att.).

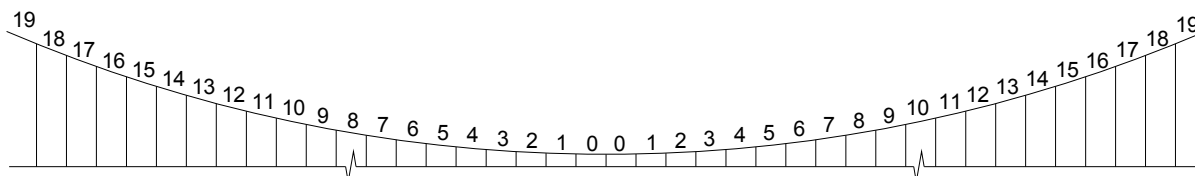


2.19. att. Piepūļu sadalījums pa troses garumu nelielā tās posmā



2.20. att. Hibrīdās kompozītās troses shēma:
1 – CFRP josla; 2 – tērauda joslas; 3 – līme

Piepūļu sadalījums pa troses garumu nav vienmērīgs, bet piepūles ir vienādas posmā starp piekariem, tāpēc trosē ir sadalīta 40 posmos, kas norobežoti ar piekariem. Posmu numerācija veikta no troses centra uz malām, sākot ar 0-to posmu (2.21. att.). Lai vienmērīgāk noslogotu trosi, troses tērauda šķēsgriezuma laukums katrā posmā ir cits.



2.21. att. Nesošās troses sadalījums posmos

2.3.2. Materiālu izvēle

Tā kā iekārto konstrukciju trūkums ir lielā deformējamība, lai samazinātu elastīgos pārvietojumus, izvēlēts CFRP ar sevišķi lielu elastības moduli – *ePLATE HM512*, ko ražo kompānija *Mitsubishi Plastics Composites America, Inc* [81]. Materiāla īpašības atspoguļotas 2.5. tabulā, un tam raksturīga neliela elastības moduļa palielināšanās.

2.5. tabula

CFRP materiāla ar sevišķi lielu elastības moduli īpašības [81]

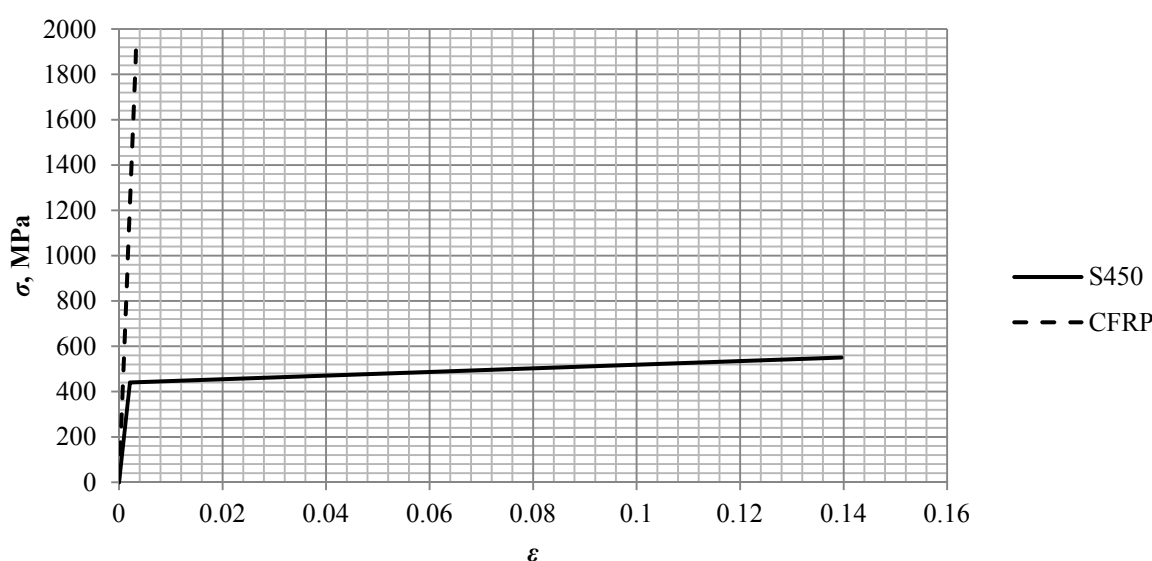
Stiepes elastības modulis, GPa	Stiepes stiprība, MPa	Kritiskā relatīvā deformācija (pirms sabrukšanas)
514	1923	0.00332

Arējiem slāņiem izvēlēts S450 klases tērauds [23]. Tā īpašības atspoguļotas 2.6. tabulā. Pieņemts elastīgi-plastiskais tērauda uzvedības modelis ar lineāro deformāciju nostiprinājumu. Spriegumu-deformāciju līknes atspoguļotas 2.22. att.

S450 klases tērauda īpašības

Plūstamības robeža f_y , MPa	Robežstiprība f_u , MPa	Elastības modulis elastīgajā stadijā, MPa	Elastības modulis plastiskajā stadijā, MPa	Relatīvā deformācija pirms tecēšanas sākuma	Kritiskā relatīvā deformācija (pirms sabrukšanas)
440	550	210 000	800	0.002	0.14

Materiāli tika speciāli piemeklēti tā, lai tērauda joslas nodrošinātu hibrīdo kompozīto trosi ar tādu vajadzīgo plastiskās deformācijas lielumu, kāds pietrūkst CFRP joslai, t. i., tērauda joslas sāk tecēt tieši tajā brīdī, kad CFRP slānis sabrūk.



2.22. att. Sevišķi liela elastības moduļa CFRP un S450 klases tērauda spriegumu-deformāciju līknes: σ – spriegums; ε – relatīvā deformācija

2.3.3. Tērauda joslu racionālu šķērsriezuma laukumu noteikšana

Iekārtās konstrukcijas piepūļu sadalījumu, kā arī spriegumu sadalījumu vienāda šķērsriezuma gadījumā pa troses garumu labi apraksta otrās pakāpes polinoms. Tāpēc, lai noteiktu racionālu tērauda sadalījumu pa troses garumu, tērauda šķērsriezuma laukumu katrā posmā aprakstīsim ar otrās pakāpes polinomu (2.24):

$$A_{ter,i} = c + b \cdot i + a \cdot i^2, \quad (2.24)$$

kur i – posma numurs, skaitot no troses vidusdaļas ($i = 0 \div 19$);

$A_{ter,i}$ – tērauda slāņu šķērsriezuma laukums i -tajā posmā;

c , b , a – vienādojumu koeficienti, kas pieņemti par optimizācijas mainīgajiem faktoriem.

Tērauda šķērsriezuma laukums vidējam posmam ($i = 0$) ir vienāds ar koeficientu c . CFRP slāņa šķērsriezuma laukums ir pieņemts vienāds ar reducēto tērauda slāņu šķērsriezuma laukumu vidējā posmā (2.25). CFRP un tērauda šķērsriezuma laukumu attiecību var mainīt pēc vajadzības.

$$A_{CFRP} = A_{ter,i=0} \cdot \frac{E_{ter}}{E_{CFRP}}, \quad (2.25)$$

kur A_{CFRP} – CFRP šķērsriezuma laukums;

$A_{ter,i=0}$ – tērauda šķērsriezuma laukums vidējā posmā;

E_{ter} un E_{CFRP} – tērauda un CFRP elastības moduļi.

Vienādojuma (2.24) koeficientu atrašanai izmantots ģenētiskais algoritms, kurš realizēts MatLAB programmēšanas vidē. Spriegumi aprēķināti ar GEM programmu ANSYS 12. Aprēķinos CFRP slāni aizstāj ar ekvivalento tērauda slāni. Optimizācijas problēma ir minimizēt starpību starp spriegumiem trosē un pieļaujamajiem spriegumiem (2.26). Tā kā spriegumi trosē pēc vienādojuma racionālo koeficientu atrašanas var nedaudz pārsniegt pieļaujamus, par pieļaujamajiem spriegumiem ir pieņemti spriegumi, kas par 1 MPa mazāki par tērauda plūstamības robežu (2.27). Uz tēraudu reducētie CFRP pieļaujamie spriegumi ir lielāki par tēraudam pieļaujamajiem spriegumiem.

$$([\sigma] - \sigma_i) \rightarrow 0, \quad (2.26)$$

kur $[\sigma]$ – pieļaujamie spriegumi;

σ_i – spriegumi i -tajā posmā.

$$[\sigma] = f_y - 1 \text{ MPa} = 339 \text{ MPa}. \quad (2.27)$$

Racionālie vienādojuma (2.24) koeficienti tika atrasti (2.28):

$$A_{ier,i} = 0.05166833 + 0.0007213 \cdot i + 0.0000947 \cdot i^2. \quad (2.28)$$

Pie atrastajiem koeficientiem spriegumi atsevišķos posmos tēraudā būs 339 ± 0.769 MPa, kas nepārsniedz pieļaujamo lielumu – 440 MPa. Konstruktijas pārvietojumi lietderīgās slodzes gadījumā ir vienādi ar 0.2069 m, kas ir mazāk par 1/300 no laiduma, kopējie pārvietojumi (lietderīgās, pašsvara un sasprieguma slodzes gadījumā) ir vienādi ar 0.7723 m.

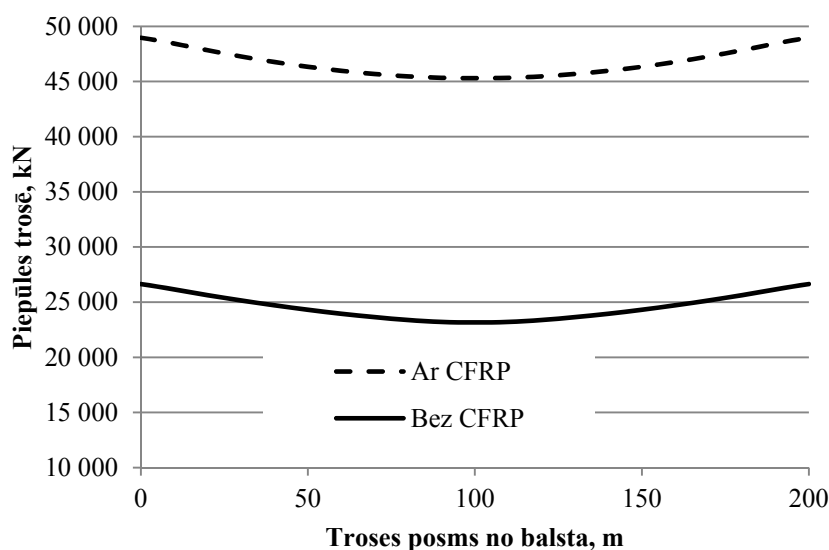
2.4. Ārkārtējas situācijas analīze konstrukcijai ar hibrīdo kompozīto trosi

2.4.1. Konstrukcijas darbība CFRP slāņa sabrukšanas gadījumā

CFRP materiālam iespējams trauislais sabrukums, kas var rasties acumirklīga, pārāk liela slodzes pieauguma rezultātā (piemēram, lidmašīnas kritiens – liels trieciens). Pēc slodzes acumirklīgā pieauguma tā atgriežas iepriekšējā, projektētajā stāvoklī. Rezultātā CFRP slānis sabrūk. Uzdevums ir noskaidrot, vai nesošā konstrukcija pilnīgi sabruks CFRP slāņa sabrukšanas gadījumā, vai nē. Pieliekot slodzi iepriekš sasprīgtai iekārtajai konstrukcijai, kad tēraudam tiek pārsniegta plūstamības robeža, palielinās nokare, kas izraisa ass spēka, kā arī iepriekšējā sasprīguma līmeņa samazināšanos, un rezultātā samazinās normālsprīgumi, kas darbojas trosē.

Aprēķini veikti ar GEM programmas ANSYS 12 palīdzību. Materiāls modelēts ar bilineāro izotropo modeli ar deformāciju nostiprinājumu (TB, BISO opcija ANSYS vidē). Dinamiskie efekti šajā posmā nav ievērtēti.

Atrastā racionālā materiālu sadalījuma gadījumā noteikts, ka troses nokare palielināsies par 4.5511 m. Tad tecēšana apstāsies. Sprīgumi trosē būs no 442.6 MPa līdz 450 MPa. Troses pagarinājums ir 1.3%. Piepūļu sadalījums pa troses garumu pirms un pēc CFRP slāņa sabrukšanas ir attēlots 2.23. att.



2.23. att. Piepūļu sadalījums pa troses garumu pirms un pēc CFRP slāņa sabrukšanas

2.4.2. Tērauda joslu minimālo šķērsriezuma laukumu noteikšana

Pārvietojumi iepriekš veiktajā aprēķinā, tērauda tecēšanai apstājoties, bija 4.5 m. Pēc konstruktīviem apsvērumiem pieļaujamo pārvietojumu lielumu var pieņemt 10 m (lai tilts nenokristu ūdenī). Tātad ir pārvietojumu rezerve, kas dod iespēju samazināt tērauda šķērsriezuma laukumu un palielināt CFRP šķērsriezuma laukumu.

Minimālais tērauda šķērsriezuma laukums 0-tajā posmā, kurš CFRP slāņa sabrukšanas gadījumā nodrošina pārvietojumus pieņemtajās robežās (10.0 m) noteikts, izmantojot iterācijas metodi. Noteikts, ka pie tērauda šķērsriezuma laukuma 0-tajā posmā, vienāda ar 0.02798 m^2 , pārvietojumi CFRP slāņa sabrukšanas gadījumā būs 9.9993 m, bet spriegumi mainīsies no 450.6 līdz 468.8 MPa. Tātad noteikts minimālais tērauda šķērsriezuma laukums, lai konstrukcija, sabrūkot CFRP slānim, nesagrūtu un neiekristu ūdenī.

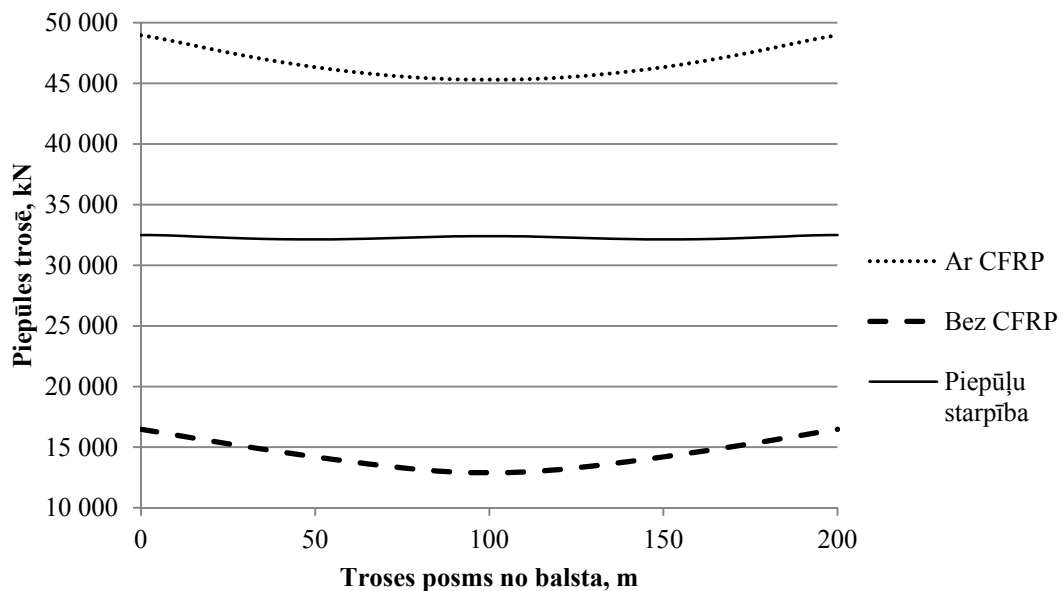
Vajadzīgais CFRP šķērsriezuma laukums un koriģētie vienādojuma (2.24) koeficienti a un b atrasti, izmantojot ģenētisko algoritmu. CFRP šķērsriezuma laukums izteikts kā tērauda šķērsriezuma laukuma daļa 0-tajā posmā (2.29). Koeficienti a , b un d ir mainīgie optimizācijas faktori.

$$A_{CFRP} = d \cdot A_{ter,i=0}, \quad (2.29)$$

kur d – CFRP šķērsriezuma laukuma daļas koeficients.

Tika noteikts racionālais materiālu sadalījums. Dinamiskie efekti šajā posmā nav ievērtēti. Vienādojuma (2.24) racionālās koeficientu vērtības ir: $a = 0.0000194 \text{ m}^2$; $b = 0.0000824 \text{ m}^2$; $c = 0.02798 \text{ m}^2$. Vienādojuma (2.29) racionālā koeficienta vērtība ir vienāda ar $d = 1.0977795$. Spriegumi mainīsies no 438.2 līdz 439.8 MPa.

No grafika (2.24. att.) var redzēt, ka piepūles trosē pēc CFRP slāņa sabrukšanas un tērauda tecēšanas beigām līdz līdzsvara stāvoklim samazināsies, un to samazinājums nav vienmērīgs pa troses garumu. Piepūles samazināsies no 66.4% līdz 71.5%. Spriegumi pēc CFRP slāņa sabrukšanas un tērauda tecēšanas beigām līdz līdzsvara stāvoklim būs robežās no 450.7 līdz 468.8 MPa.



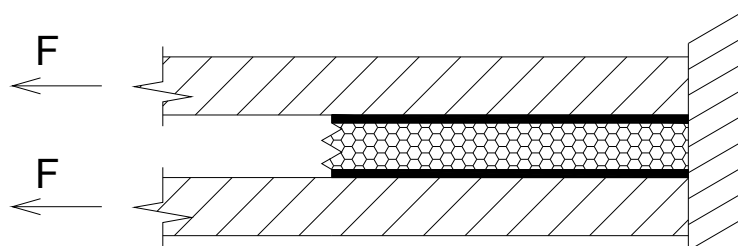
2.24. att. Piepūļu sadalījums pa troses garumu

Sabrūkot CFRP slānim, konstrukcija sāk svārstīties. Dinamiskos efektus var ievērtēt ar dinamiskās iedarbes koeficientu. Pēc [21] dinamiskās iedarbes koeficients lietderīgajai slodzei vienāds ar $\Phi = 1.24$, bet pastāvīgajai slodzei pieņemta maksimālā pēc [21] iespējamā dinamiskās iedarbes koeficienta vērtība $\Phi = 2$. Ievērojot dinamiskās iedarbes koeficientus, noteikts racionālais tērauda materiāla sadalījums pa troses garumu, kā arī CFRP un tērauda šķērsriezuma laukumu attiecība 0-tajā posmā. Vienādojuma (2.24) koeficientu racionālās vērtības ir: $a = 0.00002068 \text{ m}^2$; $b = 0.00006958 \text{ m}^2$; $c = 0.04416 \text{ m}^2$. Vienādojuma (2.29) koeficienta racionālā vērtība ir vienāda ar $d = 0.5395$. Kā redzams, ievērojot dinamiskos efektus, tērauda šķērsriezuma laukums jāpalielina par 58%, bet CFRP šķērsriezuma laukums jāsamazina divas reizes.

2.4.3. Vidējā sagrautā slāņa ietekme uz ārējo slāņu darbu

Iepriekšējos aprēķinos pieņemts, ka vidējā slāņa sagraušanas gadījumā vienā vietā tas vairs nedarbosies visā troses garumā. Šis pieņēmums tika pārbaudīts analītiski un eksperimentāli.

Vājinātā apgabala aprēķina shēma ir parādīta 2.25. att. CFRP slāņa sabrukums var notikt jebkurā vietā. Piepūles elementos ir no 45 313 līdz 48 970 kN attiecīgi vidējos un malas elementos. Minimālais bīdes spēks šuvē $F = 22\ 656$ kN.



2.25. att. Vājinātā elementa aprēķina shēma

Kā rāda pētījumi [94, 10, 12, 20], elastīgās līmes bīdes spriegumi koncentrējas malas zonā; šīs joslas lielumu var pieņemt vienādu ar 2 mm (2.26. att.). Pieņemot šuves bīdes stiprību $[\tau] = 15$ MPa (līmei Sikadur 30), pēc sakarības (2.30) var noteikt, ka šādos apstākļos ir vajadzīgs 755 m liels troses biezums, lai nodrošinātu, ka līme nesagrūs. Tik liels biezums nav iespējams, kas nozīmē, ka gadījumā, ja vidējais slānis tiks pārrauts vienā troses vietā, līme pakāpeniski sabruks un vidējais slānis pilnībā tiks izslēgts no darba.

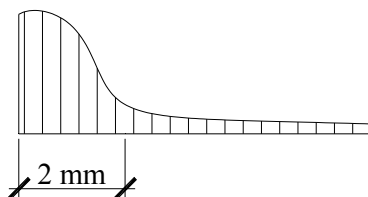
$$b = F / ([\tau] \cdot l), \quad (2.30)$$

kur b – šuves biezums;

F – pieliktais spēks;

$[\tau]$ – līmes bīdes stiprība;

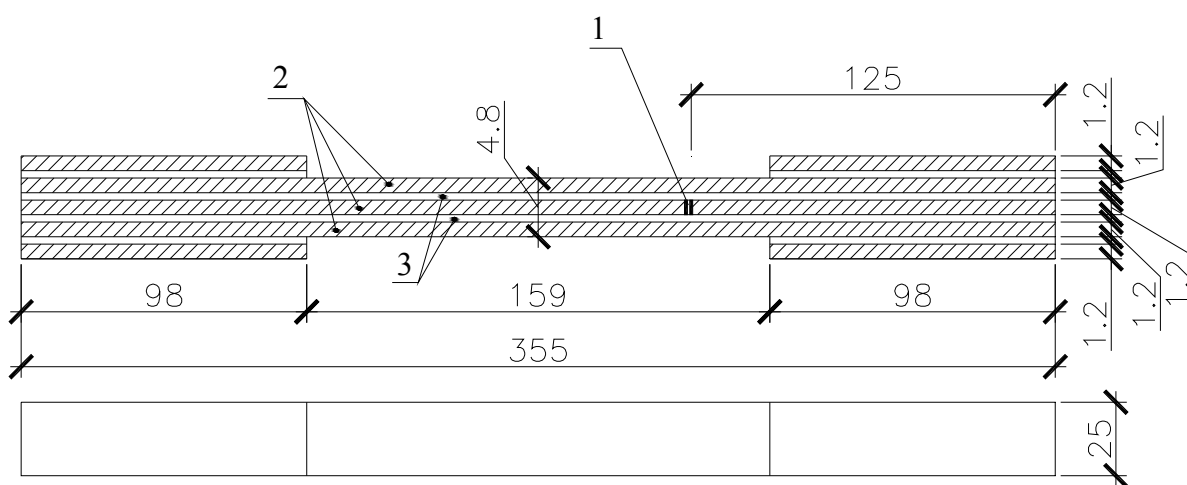
l – šuves garums.



2.26. att. Bīdes spriegumu koncentrācija savienojuma malas zonā

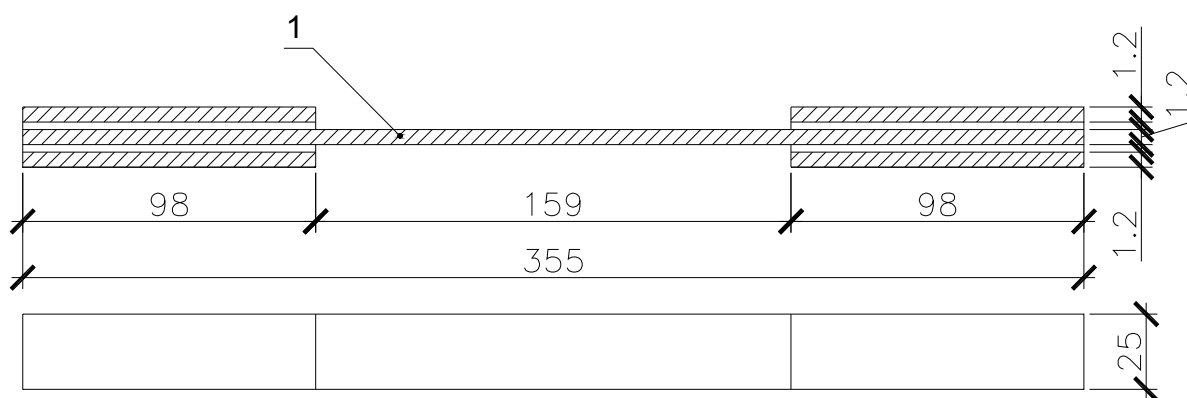
2.4.4. Vidējā pārtrauktā slāņa ietekmes uz ārējo slāņu darbu eksperimentālā noteikšana

Lai pārlicinātos, ka pēc vidējā slāņa iziešanas no darba ārējie slāņi strādās atsevišķi visā garumā, tika veikts eksperiments. Pārbaudīti trīs trīsslāņu tērauda paraugi, kam vidējais slānis bija pārtraukts, un tie salīdzināti ar vienslāņa paraugiem. Trīsslāņu paraugs sastāvēja no trīs 1.2 mm biežām tērauda joslām, kas savā starpā salīmētas ar līmi Sikadur 30. Vidējais slānis ir pārtraukts (2.27. att.). Vienslāņa parauga shēma ir attēlota 2.28. att. Elementu materiālu īpašības ir apkopotas 2.7. tabulā.



2.27. att. Trīsslāņu parauga shēma:

1 – vidējā slāņa pārtraukums; 2 – tērauda joslas; 3 – līme



2.28. att. Vienslāņa parauga shēma:

1 – tērauda josla

Parauga elementu materiāla īpašības

Tērauds DC01, EN 10130		
Plūstamības robeža f_y , MPa	Robežstiprība f_u , MPa	Kritiskā relatīvā deformācija (pirms sabrukšanas)
182	305	0.43
Līme Sikadur 30		
Elastības modulis, MPa	Adhēzija ar tēraudu, MPa	Bīdes stiprība, MPa
12 800	22	15

Sagrautais trīsslāņu paraugs ir parādīts 2.29. att., kur redzams, ka vidējais slānis ir pārtraukts. Paraugi tika stiepti līdz to sabrukumam, un tika mērītas deformācijas.



2.29. att. Sagrautais trīsslāņu paraugs

Paraugu testēšanas rezultātā konstatēts, ka slāņi darbojas kopā tikai tērauda elastīgajā stadijā, bet, kad sākas tecēšana, līme sāk atslāņoties un plaisāt (2.30. att.). Arī sabrukuma aina un deformācijas pie sabrukšanas (38%) trīsslāņu paraugiem ir līdzīgas kā vienslāņa tērauda paraugiem. Šie fakti liecina par to, ka pēc tecēšanas sākšanās slāņi sāk darboties atsevišķi.



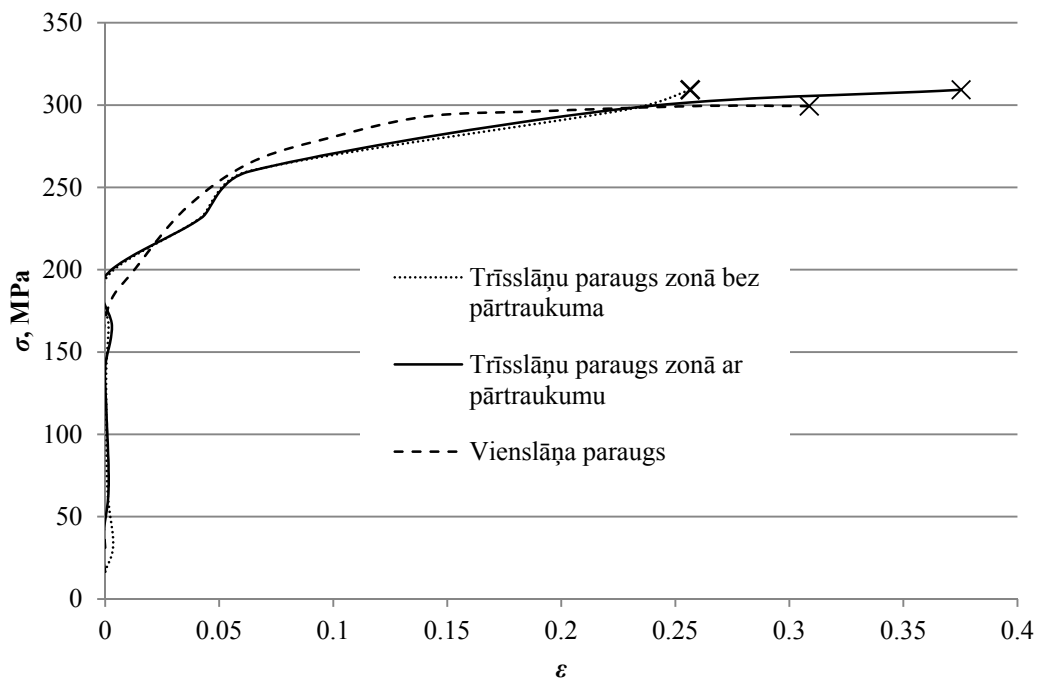
2.30. att. Līmes sabrukšana

Trīsslāņu paraugi tika salīdzināti ar vienslāņa paraugiem (2.31. att.). Trīsslāņu paraugu vidējā relatīvā deformācija bija 22.9%, savukārt vienslāņa paraugu vidējā relatīvā deformācija bija 22.1%, kas nozīmē, ka paraugi deformējas vienādi un vidējais pārtrauktais slānis un līme neietekmē paraugu darbu. Spriegumu un relatīvo deformāciju sakarība 3. vienslāņa paraugam un 3. trīsslāņu paraugam zonā ar pārtraukumu un zonā bez pārtraukuma parādīta 2.32. att.

Spriegumi aprēķināti, neievērojot pārtrauktā slāņa šķērsriezuma laukumu. Trīsslāņu paraugu vidējie spriegumi pie sabrukšanas, neievērtējot vidējo slāni un līmi, ir 297.6 MPa, vienslāņa paraugu – 297.7 MPa, kas nozīmē, ka vidējais pārtrauktais slānis neietekmē paraugu darbu.



2.31. att. Trīsslāņu un vienslāņa paraugu salīdzināšana (trīs augšējie paraugi – vienslāņa, trīs apakšējie paraugi – trīsslāņu)



2.32. att. Sakarība starp spriegumiem un relatīvajām deformācijām 3. trīsslāņu paraugam un 3. vienslāņa paraugam

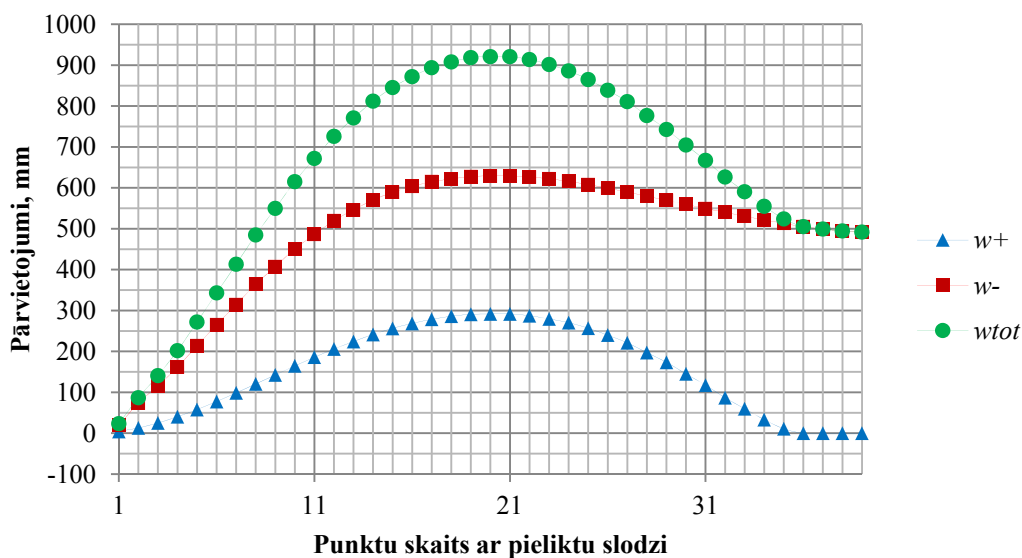
Iegūtie analītiskie un eksperimentālie rezultāti liecina, ka vidējais pārtrauktais slānis ietekmē paraugu darbu tikai tērauda elastīgajā darbības stadijā, bet pēc tālākās slodzes palielināšanas vidējais slānis jau neietekmē ārējo slāņu darbu.

3. IEPRIEKŠ SASPRIEGTO IEKĀRTO TROŠU KONSTRUKCIJU DARBĪBAS ANALĪZE

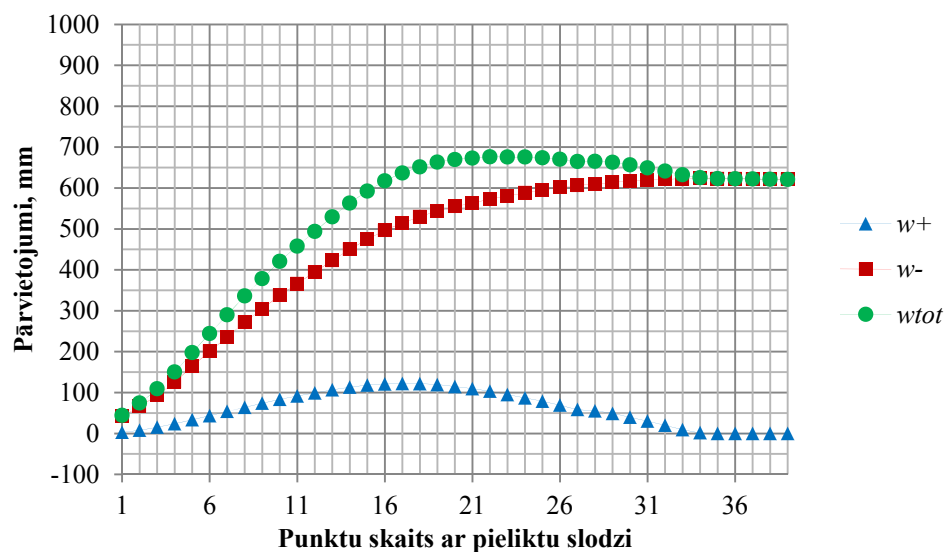
3.1. Atsevišķas nesošās troses un trošu kopnes darbības salīdzinoša analīze iepriekš saspriegtai iekārtajai konstrukcijai

Tika salīdzināti iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas ar atsevišķām nesošajām trosēm un trošu kopnēm ar racionāliem parametriem (optimizācija veikta pēc 9 mainīgiem faktoriem) pārvietojumi. Atsevišķās troses un trošu kopnes materiālu patēriņš bija vienāds. Aprēķini veikti ar GEM programmas ANSYS palīdzību.

Maksimālie pārvietojumi konstrukcijai ar atsevišķām nesošajām trosēm ir sasniedzami, ja slodze ir pielikta punktos no 1 līdz 20 (2.8. att.). Maksimālie pārvietojumi konstrukcijai ar trošu kopnēm ir sasniedzami, ja slodze ir pielikta punktos no 1 līdz 22, kas nozīmē, ka, lai dabūtu maksimālos pārvietojumus, vajag slogot lielāku daļu no konstrukcijas laiduma. Sakarības starp maksimālajiem pārvietojumiem un punktu skaitu ar pieliktu slodzi konstrukcijām ar atsevišķām nesošajām trosēm un trošu kopnēm ir parādītas attiecīgi 3.1. att. un 3.2. att.

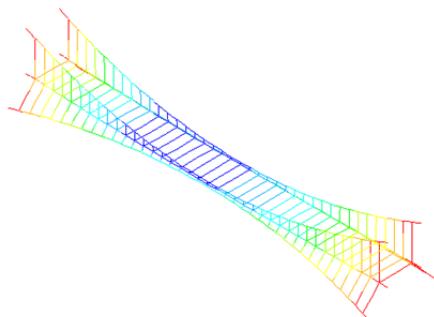


3.1. att. Sakarības starp maksimālajiem pārvietojumiem un punktu skaitu ar pieliktu slodzi konstrukcijai ar atsevišķām nesošajām trosēm

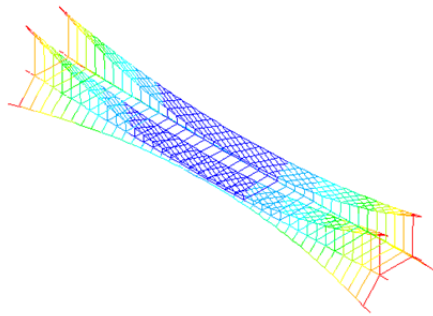


3.2. att. Sakarības starp maksimāliem pārvietojumiem un punktu skaitu ar pieliktu slodzi konstrukcijai ar trošu kopnēm

Konstrukcijai ar atsevišķām nesošajām trosēm maksimālie pārvietojumi, kad slodze ir pielikta punktos no 1 līdz 20, ir laiduma otrajā ceturtdaļā (3.3. att.). Konstrukcijai ar trošu kopnēm maksimālie pārvietojumi, kad slodze ir pielikta punktos no 1 līdz 20, ir tuvāk laiduma centram (3.4. att.). Maksimālie pārvietojumi uz augšu un apakšu konstrukcijai ar atsevišķām nesošajām trosēm ir sasniedzami, kad slodze ir pielikta punktos no 1 līdz 20, bet konstrukcijai ar trošu kopnēm maksimālie pārvietojumi uz augšu rodas, kad slodze ir pielikta punktos no 1 līdz 17, bet uz apakšu – kad slodze pielikta punktos no 1 līdz 34. Konstrukcijai ar atsevišķām nesošajām trosēm pārvietojumi, kad slodze ir pielikta visam laidumam, ir par 87% mazāki par pārvietojumiem, kad slodze ir pielikta pusei laiduma, bet konstrukcijai ar trošu kopnēm šī starpība ir tikai 9%, tātad konstrukcijai ar trošu kopnēm pārvietojumu lielums gandrīz nav atkarīgs no slodzes pielikšanas vietas – konstrukcija nav labila.



3.3. att. Deformācijas shēma iepriekš saspiegtai iekārtajai konstrukcijai ar atsevišķām nesošajām trosēm (zilā krāsā parādīti maksimālie pārvietojumi, sarkanā – minimālie)



3.4. att. Deformācijas shēma iepriekš saspiegtai iekārtajai konstrukcijai ar trošu kopnēm

Maksimālie pārvietojumi gadījumā, kad slodze izvietota sliktākā pozīcijā, ir parādīti 3.1. tabulā. Starpība starp maksimālajiem pārvietojumiem uz augšu konstrukcijai ar atsevišķām nesošajām trosēm un trošu kopnēm vienāda ar 58.2%, savukārt šī starpība starp maksimālajiem pārvietojumiem uz apakšu ir 1.0%. Izmantojot trošu kopnes atsevišķo nesošo trošu vietā sliktākajā slodzes izvietojuma gadījumā, maksimālie kopējie vertikālie pārvietojumi samazinās par 26.6%.

3.1. tabula

Iepriekš saspieltas iekārtās konstrukcijas ar atsevišķām nesošajām trosēm un trošu kopnēm pārvietojumi

Iepriekš saspielta iekārtā konstrukcija ar	Slodzes pielikšanas punkti	Maksimālie klāja pārvietojumi uz apakšu, mm	Maksimālie klāja pārvietojumi uz augšu, mm	Maksimālie klāja kopējie pārvietojumi, mm
atsevišķām nesošajām trosēm	1–20	629.3	291.7	921.0
	1–39	492.0	0	492.0
trošu kopnēm	1–17	514.5	122.0	636.6
	1–34	623.3	1.9	625.2
	1–22	572.8	103.1	675.9
	1–39	620.8	0	620.8

Pārvietojumu samazinājums nevienmērīgas slodzes gadījumā trošu kopnei ar divām ieliektām joslām salīdzinājumā ar atsevišķo nesošo trosi sasniedzams ar piepūļu pārdalīšanu starp apakšjoslu un augšjoslu racionāla režģa elementu izvietojuma un materiālu sadalījuma starp elementiem dēļ. Augšjoslai, kam ir mazāka nokare, salīdzinājumā ar apakšjoslu raksturīgi mazāki kinemātiskie pārvietojumi nevienmērīgas slodzes gadījumā, bet kopnes apakšjoslai, kam ir lielāka nokare, raksturīgi mazāki elastīgie pārvietojumi [129]. Racionāls augšjoslas un apakšjoslas savstarpējais izvietojums, racionāls materiālu sadalījums starp trošu kopnes elementiem, kā arī racionāls režģa elementu izvietojums dod iespēju izlīdzināt

pārvietojumus simetriskas un nesimetriskas slodzes gadījumā. Augšjosla vairāk paredzēta kopnes kinemātisko pārvietojumu samazināšanai nesimetriskas slodzesgadījumā, bet apakšjosla – elastīgo pārvietojumu samazināšanai simetriskas slodzes gadījumā. Racionāli veidots režģis izlīdzina spriegumus starp augšjoslu un apakšjoslu dažādos slodzes pielikšanas gadījumos.

Trošu kopnei salīdzinājumā ar atsevišķo nesošo trosi ir trīsreiz lielāks mezglu skaits, bet trošu kopējais garums atkarībā no laiduma ir no 3 līdz 10 reizēm lielāks. Trošu kopējā garuma un mezglu skaita palielināšana sarežģī to izgatavošanas, montāžas un regulēšanas, kā arī apsekošanas un trošu virsmas apstrādes procesus. Trošu kopnes projektēšanas darbietilpība palielinās salīdzinājumā ar atsevišķās nesošās troses projektēšanu.

3.2. Trošu kopnes un atsevišķas nesošās troses deformativitātes salīdzinājums dažādiem laidumiem

Lai parādītu trošu kopnes priekšrocības no pārvietojumu viedokļa salīdzinājumā ar atsevišķo nesošo trosi dažādiem laidumiem, pārbaudītas trošu kopnes konstrukcijas laiduma intervālā no 50 līdz 350 m. 50 m liels laidums atbilst liellaiduma konstrukcijas apakšējai robežai, bet 350 m liels laidums pieņemts kā vidējā laiduma piemērs virtuālam iekārtajam trīslaidumu tiltam pār Daugavu.

Lai novērtētu trošu kopnes priekšrocības no pārvietojumu viedokļa salīdzinājumā ar atsevišķo nesošo trosi atkarībā no laiduma, izvēlētas konstrukcijas ar vienādu laiduma un galvenās un stabilizācijas troses attiecību, vienādu sasprieguma līmeni un piekaru soli, kā arī vienādiem spriegumiem nesošajās un stabilizācijas trosēs.

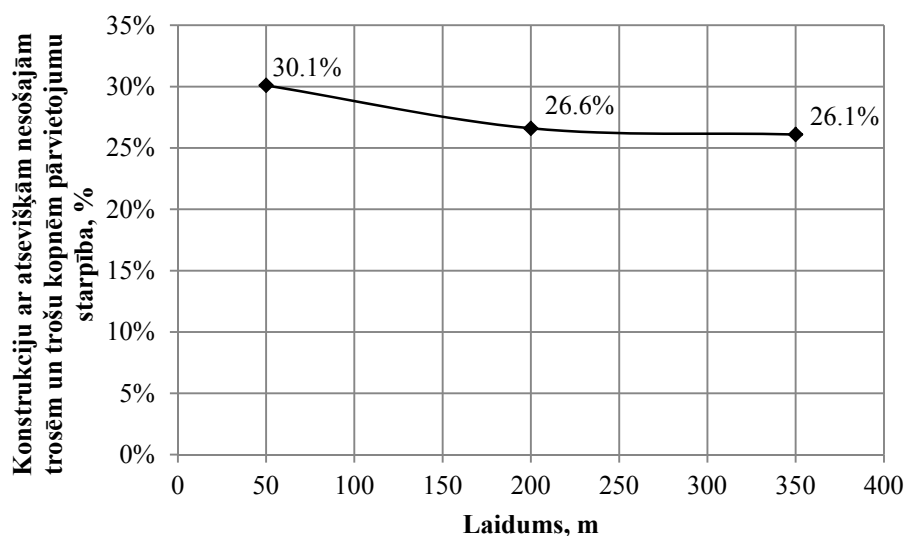
Lai objektīvāk noteiktu trošu kopnes priekšrocības, visām konstrukcijām ir veikta optimizācija pēc 9 mainīgiem faktoriem ar izstrādāto algoritmu.

Noteiktie racionālie raksturlielumi trošu kopnei ar laidumu 50, 200 un 350 m ir atspoguļoti 3.2. tabulā.

Sakarība starp trošu kopnes un atsevišķās nesošās troses pārvietojumu starpību atkarībā no laiduma visneizdevīgākās slodzes gadījumā ir parādīta 3.5. att. Pierādīts, ka laiduma intervālā no 50 līdz 350 m konstrukcijas ar trošu kopnēm pārvietojumi ir par 26–30% mazāki par konstrukcijas ar atsevišķām nesošajām trosēm pārvietojumiem.

Trošu kopnes racionālie parametri

Parametrs nosaukums	Parametra apzīmējums	Parametra vērtība		
		Laidums 50 m	Laidums 200 m	Laidums 350 m
Attiecība starp augšjoslas un apakšjoslas nokarēm	f_t/f_b	0.4293	0.5089	0.5358
Attiecība starp apakšjoslas materiālu patēriņu un trošu kopnes materiālu patēriņu	g_b/g	0.5870	0.4512	0.4684
Attiecība starp režģa elementu materiālu patēriņu un trošu kopnes materiālu patēriņu	g_w/g	0.0842	0.0673	0.0673
Attālumi, kas definē režģa elementu izvietojumu	s_1	0.7785 m	4.8147 m	1.5595 m
	s_2	7.1937 m	16.3004 m	24.6802 m
	s_3	9.6487 m	16.3190 m	28.5679 m
	s_4	0.7150 m	0.9800 m	0.5029 m
	s_5	7.9753 m	12.6897 m	24.2618 m
	s_6	2.4367 m	16.2324 m	22.7034 m

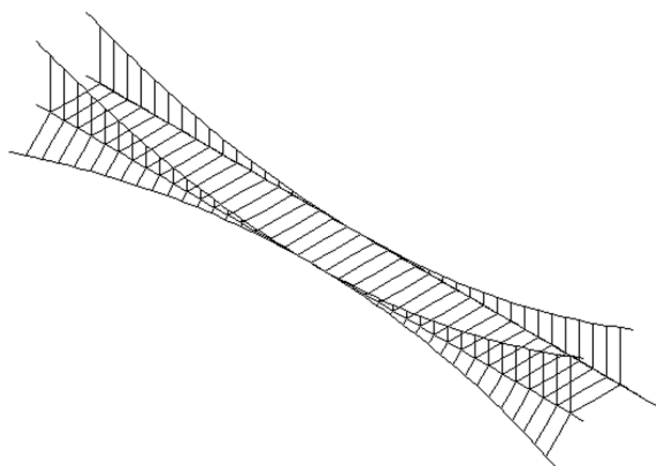


3.5. att. Sakarība starp konstrukciju ar atsevišķām nesošajām trosēm un trošu kopnēm pārvietojumu starpību atkarībā no laiduma visneizdevīgākās slodzes gadījumā

3.3. Iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas deformativitātes samazināšana, veicot joslu savietošanu

Saspriegtās iekārtās konstrukcijas pārvietojumus var samazināt, savietojot nesošās un stabilizācijas troses (3.6. att.). Pārvietojumus šajā gadījumā var samazināt par 35.5%.

Lai noteiktu, kādu efektu dos trošu kopnes ar krusta režģi izmantošana šai konstrukcijai atsevišķās nesošās troses vietā, bija jāveic optimizācija ar ģenētisko algoritmu ar iepriekšējā nodaļā aprakstīto metodi un jauniem konstrukcijas parametriem. Tika noteikti trošu kopnes racionālie parametri. Racionāla attiecība starp augšjoslas un apakšjoslas nokarēm: $f_t/f_b = 0.6807$. Racionāla attiecība starp apakšjoslas materiāla patēriņu un trošu kopnes materiālu patēriņu: $g_b/g = 0.7032$. Racionāla attiecība starp režģa elementu materiālu patēriņu un trošu kopnes materiālu patēriņu: $g_w/g = 0.0590$. Racionālas attālumu s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 un s_6 vērtības ir attiecīgi 4.7436, 16.8739, 12.7383, 0.8378, 7.1666 un 17.9073 m. Iepriekš saspriegtai iekārtajai konstrukcijai ar savietotām joslām atsevišķo nesošo trošu vietā izmantojot trošu kopnes, pārvietojumus var samazināt par 5.5%. Maksimālo pārvietojumu rezultāti iepriekš saspriegtai iekārtajai konstrukcijai ar atsevišķām nesošajām trosēm un trošu kopnēm ir parādīti 3.3. tabulā.



3.6. att. Iekārtās konstrukcijas modelis ar savietotām nesošajām un stabilizācijas trosēm

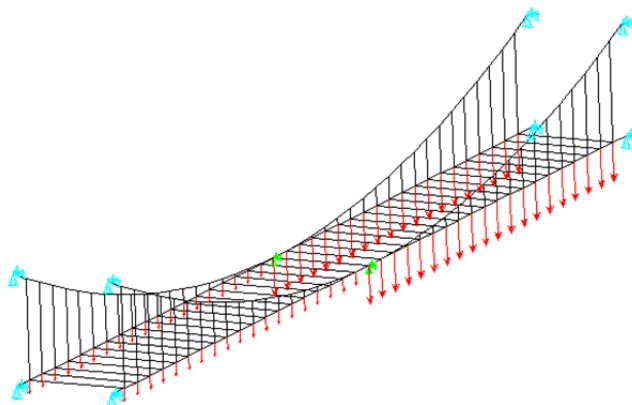
3.3. tabula

Iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas ar atsevišķām nesošajām trosēm un trošu kopnēm pārvietojumi gadījumā, kad nesošā trose un stabilizācijas trose ir savietotas

Iepriekš saspriegta iekārtā konstrukcija ar	Slodzes pielikšanas punkti	Maksimālie klāja pārvietojumi uz apakšu, mm	Maksimālie klāja pārvietojumi uz augšu, mm	Maksimālie klāja kopējie pārvietojumi, mm
Atsevišķām nesošajām trosēm	1-27	498.1	87.7	585.7
	1-30	515.9	71.0	586.9
	1-29	514.1	80.6	594.7
	1-39	470.5	0.0	470.5
Trošu kopnēm	1-24	471.6	61.1	532.7
	1-32	525.2	20.2	545.5
	1-29	46.3	515.8	562.1
	1-39	509.1	0.0	509.1

3.4. Nespriegtas un saspieltas iekārtās konstrukcijas deformativitātes salīdzinājums

Lai novērtētu saspieltas iekārtās konstrukcijas priekšrocības salīdzinājumā ar nespriegtu konstrukciju (3.7. att.), aprēķināti maksimālie pārvietojumi nespriegtai iekārtajai konstrukcijai. Pārvietojumi ir atspoguļoti 3.4. tabulā. Kā redzams no tabulas, pārvietojumi daudzkārt (par 340%) pārsniedz saspieltas konstrukcijas pārvietojumus.



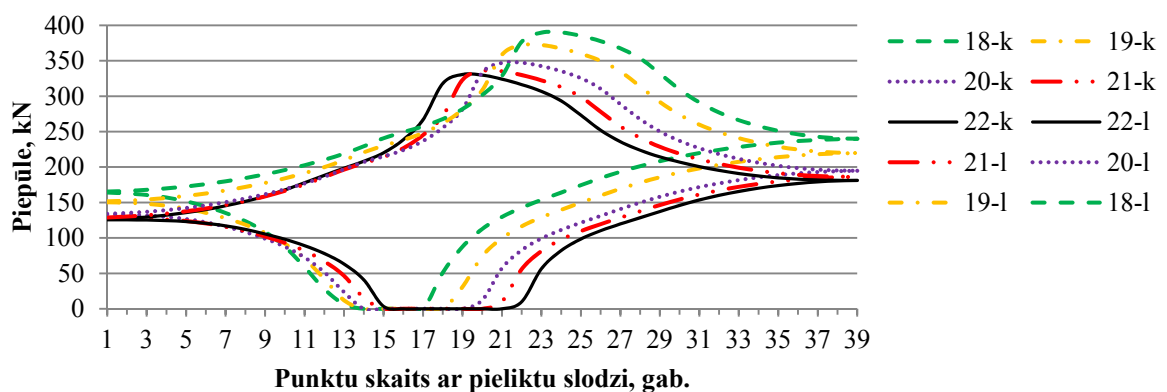
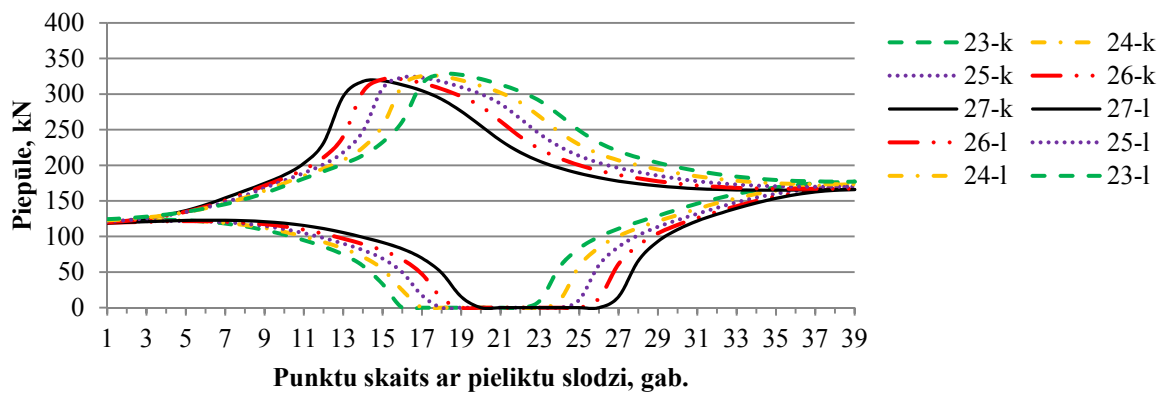
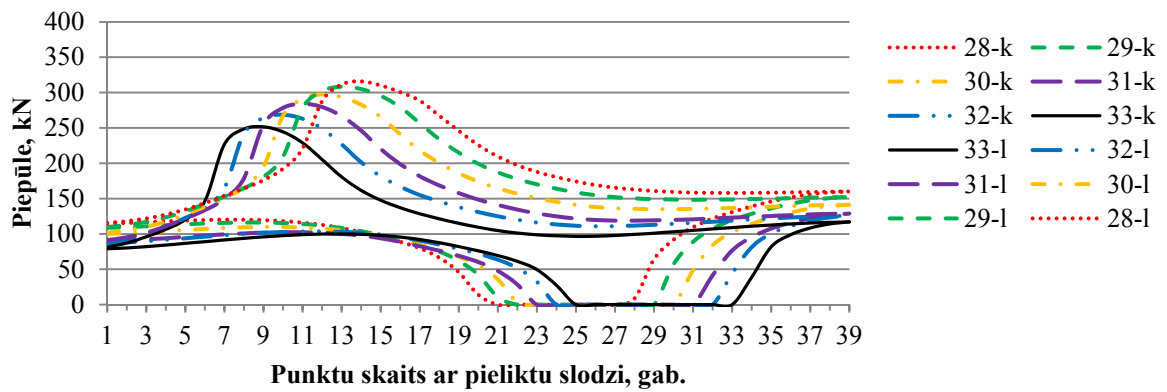
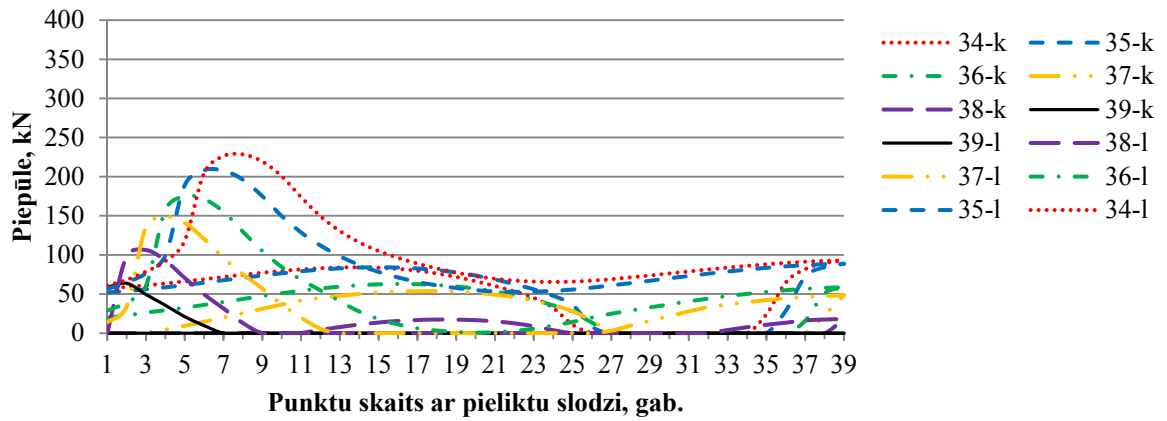
3.7. att. Nespriegta iekārtā konstrukcija

3.4. tabula
Nespriegtas iekārtās konstrukcijas ar atsevišķām nesošajām trosēm pārvietojumi

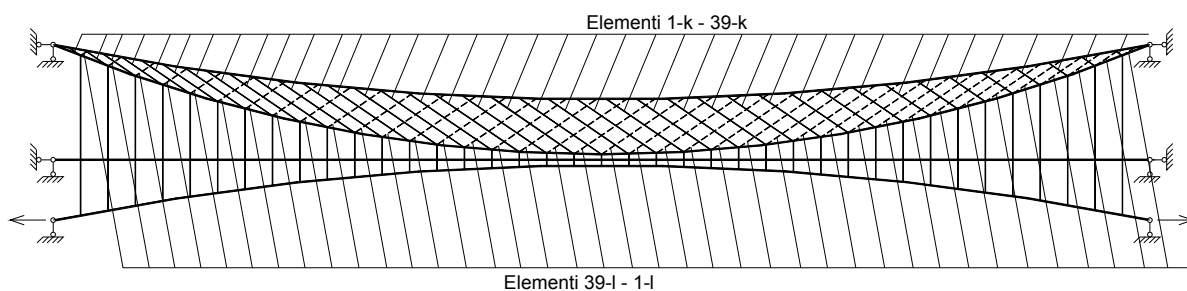
Slodzes pielikšanas punkti	Maksimālie klāja pārvietojumi uz apakšu, mm	Maksimālie klāja pārvietojumi uz augšu, mm	Maksimālie klāja kopējie pārvietojumi, mm
1–11	1697.5	919.8	2617.3
1–23	1286.1	1192.5	2478.6
1–39	156.0	778.2	934.2

3.5. Trošu kopnes režģa darbība

Atkarībā no pieliktās slodzes daži režģa elementi var nepiedalīties darbā, jo troses elementi nevar uzņemt spiedes spēkus. 44 režģa elementi no 78 var kaut kāda slogojuma gadījumā neiesaistīties darbā. Sakarība starp punktu skaitu ar pielikto slodzi, skaitot no kreisā balsta, un piepūles režģa elementos, kuri var neiesaistīties darbā, ir attēlota 3.8. att. Režģa elementu numerācija ir attēlota 3.9. att. No grafika seko, ka kādās slodžu kombinācijās režģa elements var neiesaistīties darbā, bet citās tas var uzņemt būtisku piepūli. Bet ir arī elementi, piemēram, 38-k, 39-k, 1-l, 2-l, kuri visās slodžu kombinācijās vai nu neiesaistās darbā, vai uzņem nelielu piepūli.



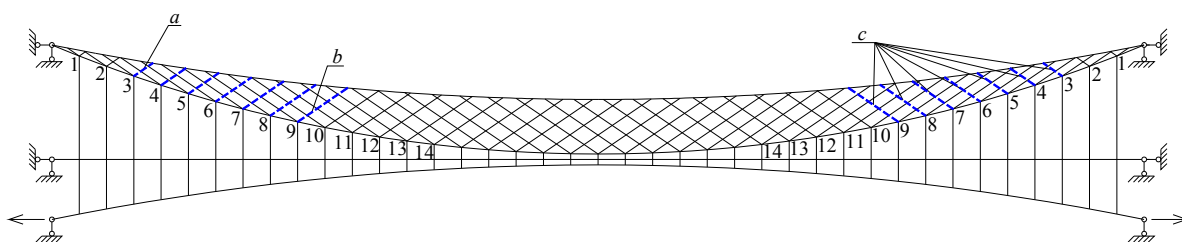
3.8. att. Sakarība starp punktu skaitu ar pieliktu slodzi, skaitot no kreisā balsta, un piepūli režģa elementos, kuri var neiesaistīties darbā



3.9. att. Trošu kopnes režģa elementu numerācija

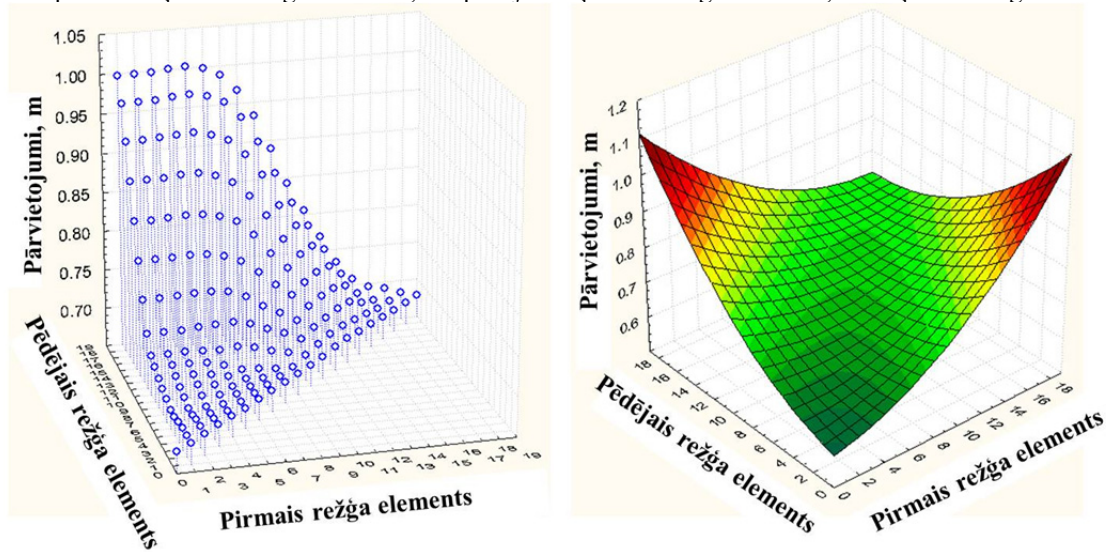
3.6. Trošu kopnes krustveida režģa vienkāršošans iespēja

Iepriekš saspieltas iekārtās konstrukcijas trošu kopnes krusta režģi var vienkāršot, izņemot režģa elementus, kuri dažādās slodžu kombinācijās izstājas no darba (3.10. att.). Darbā ir parādīts, kā mainās maksimālie konstrukcijas pārvietojumi, izņemot režģa elementus nepārtraukti, piemēram, no 3 līdz 9. Izņemto elementu materiālu patēriņš ir vienmērīgi sadalīts starp atlikušajiem režģa elementiem. Sakarība starp izņemtajiem režģa elementiem un pārvietojumiem ir parādīta 3.11. att.



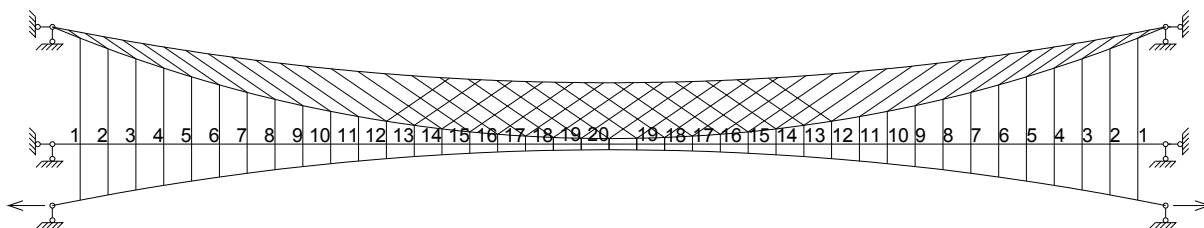
3.10. att. Trošu kopnes režģa vienkāršošana:

a – pirmais izņemtais režģa elements; *b* – pēdējais izņemtais režģa elements; *c* – izņemtie režģa elementi



3.11. att. Sakarība starp izņemtajiem režģa elementiem un pārvietojumiem (eksperimentālie punkti un aproksimācija)

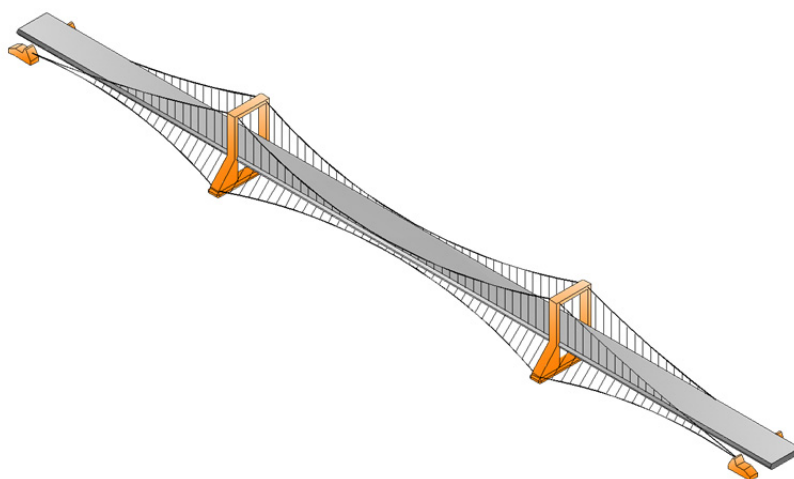
Pieņemot, ka maksimālie pārvietojumi nevar palielināties vairāk par 5% salīdzinājumā ar pilno režģi, maksimālais izņemto elementu skaits ir sasniedzams, izņemot elementus no 1 līdz 11 (3.12. att.). Pārvietojumi palielināsies līdz 0.6998 m, t. i., par 3.5% (pilnam režģim – 0.6759 m). Bet, izņemot režģa elementus no 3 līdz 5, maksimālos pārvietojumus var pat samazināt līdz 0.6726 m, t. i., par 0.5%. Izņemot visus elementus ar slīpumu uz centru, pārvietojumi palielinās līdz 0.9971 m jeb par 48%.



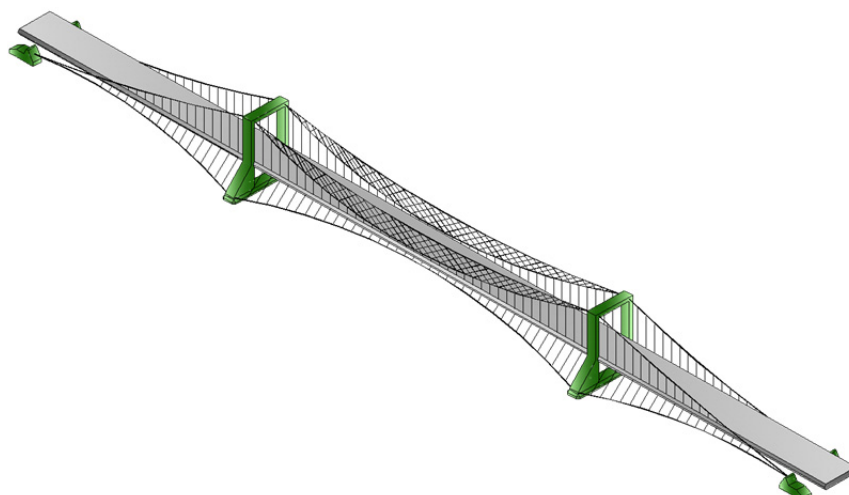
3.12. att. Vienkāršotais režģis

3.7. Iepriekš saspieltas trošu konstrukcijas izmantošanas piemērs uz iekārtā tilta bāzes

Viens no iepriekš saspieltas iekārtās konstrukcijas izmantošanas piemēriem ir tilta konstrukcija (3.13. att.). Gadījumā, kad atsevišķās nesošās troses nevar nodrošināt vajadzīgo konstrukcijas stingumu, atsevišķās nesošās troses var aizvietot ar trošu kopnēm ar izliektām joslām (3.14. att.).

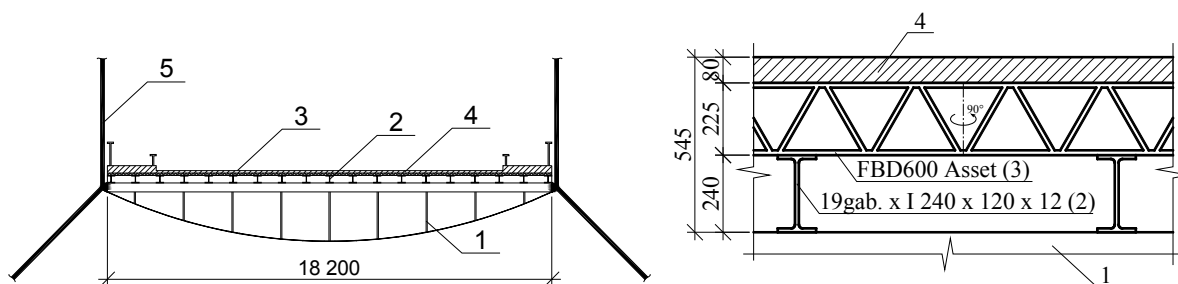


3.13. att. Iepriekš saspieltais iekārtā tilts ar atsevišķām trosēm kā galvenajām nesošajām elementiem



3.14. att. Iepriekš saspiertais iekārtais tilts ar trošu kopnēm kā galvenajām nesošajām elementiem

Pieņemts, ka tiltam ir divas braukšanas joslas katrā virzienā un divas gājēju joslas. Tilta klājs ir veidots no pultrūzijas kompozītmateriālu šprengesijām [33, 34, 37, 39], pultrūzijas kompozītmateriālu dubult-T profila sijām I 240 ar soli 1 m [25, 98] un pultrūzijas kompozītmateriālu plātnes FBD600 ASSET, kas speciāli veidota autotransporta tiltiem un atbilst Eirokodeksa prasībām [25, 46, 84]. Plātne ir pārklāta ar 80 mm biezu asfalta slāni [85]. Pieņemts, ka troses ir pārklātas ar augsta blīvuma polietilēnu un apsildāmas ar elektriskajiem kabeļiem, lai samazinātu temperatūras maiņas izraisītos efektus [115]. Iespējamie iepriekšējā saspiereguma zudumi tiek kontrolēti ar aktīvajiem tendoniem [1].



3.15. att. Tilta klāja konstrukcija:

1 – pultrūzijas kompozītmateriālu šprengesija; 2 – pultrūzijas kompozītmateriālu dubult-T profila sijas; 3 – pultrūzijas kompozītmateriālu plātne; 4 – asfalta segums; 5 – piekari

Ir iespējams būtiski samazināt tilta sijas stinguma prasības tilta iepriekšējās saspieregšanas dēļ. Šis aspekts dod iespēju izmantot vieglus kompozītmateriālus tilta klāja konstrukcijai, kā arī veidot tiltus ar lielu laidumu un samazinātu materiālu patēriņu salīdzinājumā ar tērauda vai betona tiltiem [16, 118, 132, 133].

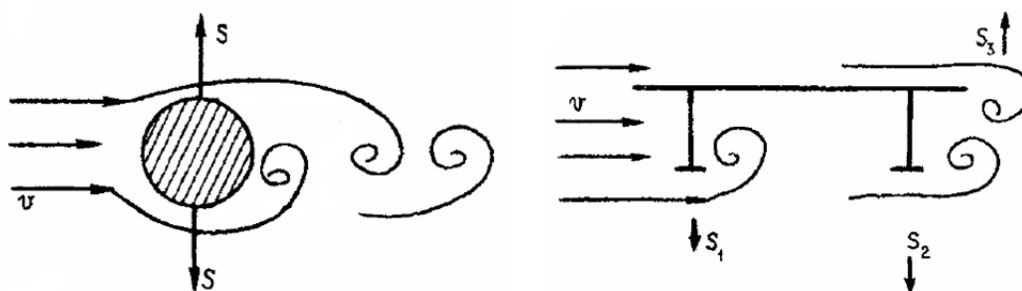
Uz tilta laiduma konstrukciju var iedarboties šādas slodzes: pašsvara slodze,

iepriekšējā sasprieguma slodze, satiksmes slodze (statiskā, dinamiskā, centrbēdzes, bremsēšanas un paātrinājuma, ārkārtējā), vēja slodze, ledus slodze, kā arī ārkārtējā slodze [73].

Šajā apakšnodaļā ir apskatīts iepriekš saspregtas iekārtas konstrukcijas dabu tiltiem specifisko iedarbju gadījumā: horizontālā vēja slodze, bremsēšanas un paātrinājuma slodze, temperatūras maiņa, tilta šķērsvirzienā nevienmērīgā slodzes un pilonu pārvietojumi. Apakšnodaļā tiks arī izstrādāta viegla stinguma sijas konstrukcija.

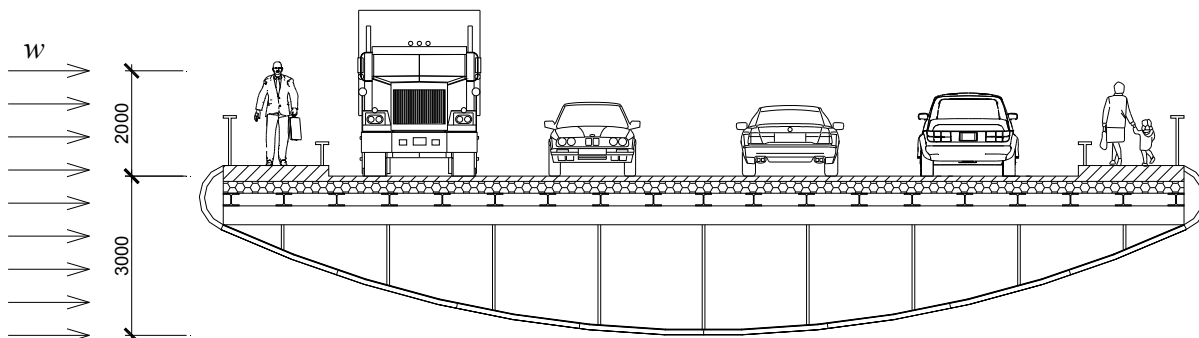
3.7.1. Konstrukcijas aprēķins uz horizontālās vēja slodzes iedarbību

Gaisa plūsmai, aptekot šķēršļus, veidojas virpuļi (3.16. att.). Šo parādību sauc par Karmana celiņiem [74, 118]. Virpuļi izraisa svārstības, kas ir perpendikulāras plūsmai, un uz ķermeni iedarbojas spēks S .



3.16. att. Karmana celiņi [118]

Lai uzlabotu tilta aerodinamiskos raksturojumus un applūstamību, tilts ir nosegts ar plātnēm. Maksimālais vēja slodzes iedarbības laukums būs tiltam ar transportu. Šo laukumu aprēķina kā summu no tilta konstrukcijas laukuma un zonas, kas par 2 m augstāka par brauktuvi (3.17. att.).



3.17. att. Tilts ar uzlabotiem aerodinamiskajiem raksturojumiem

Vēja aprēķina spēku, kas darbojas uz vienu slodzes pielikšanas punktu, var aprēķināt

pēc formulas (3.1) [21, 75, 47]:

$$F_{w,d} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot A_{ref,x} \cdot \gamma_f \quad (3.1)$$

kur $v_{b,0}$ – vēja pamatātrums;

C – vēja slodzes koeficients, $C = 3,37$ (pēc [75] 11.1. tabulas);

ρ – gaisa blīvums, $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$;

$A_{ref,x}$ – atskaites laukums, $A_{ref,x} = 5 \cdot (3+2) = 25 \text{ m}^2$;

γ_f – slodzes drošības faktors, $\gamma_f = 1.5$

Vēja pamatātrumu var noteikt pēc sakarības (3.2):

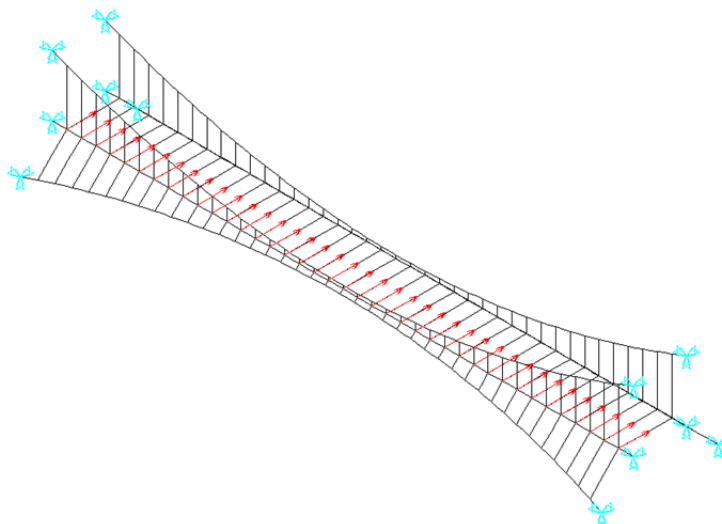
$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (3.2)$$

kur $v_{b,0}$ – vēja pamatātruma fundamentālā vērtība, $v_{b,0} = 23 \text{ m/s}$;

c_{dir} – virziena faktors, $c_{dir} = 1$;

c_{season} – gadalaika faktors, $c_{season} = 1$.

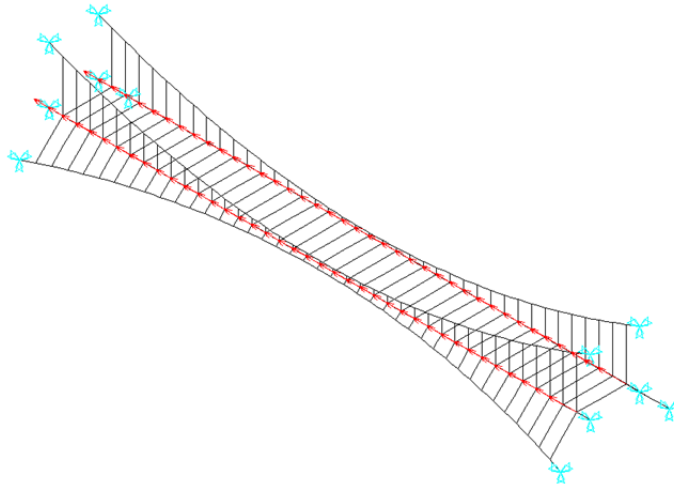
Vēja aprēķina spēks, kas darbojas uz vienu iepriekš saspriegta iekārtā tilta konstrukcijas slodzes pielikšanas punktu, ir vienāds ar $F_{w,d} = 42 \text{ kN}$ (3.18. att.). Lai uzņemtu šo slodzi, stabilizācijas troses ir izvietotas ar nokari horizontālā plaknē. Šī vēja slodze izraisa 0.125 m lielus horizontālos pārvietojumus laiduma centrā, kas ir 1/1600 no laiduma un ir pieņemami.



3.18. att. Horizontālās vēja slodzes iedarbība

3.7.2. Konstruktijas aprēķins uz horizontālo bremzēšanas slodžu iedarbību

Izmantojot iepriekš saspriegot iekārto konstrukciju tiltiem, uz to iedarbojas arī horizontālās bremzēšanas slodzes, kas vērstas laiduma virzienā (3.19. att.). Šo spēku summa ir vienāda ar 900 kN [21], un to uzņemšanai horizontālas iepriekš saspriegtās troses ir izvietotas gar tilta klāju. Šie spēki nav lieli, un to uzņemšanai pietiek troses ar šķērsgriezuma laukumu 2 cm². Trose jāspriepdz līdz spriegumam, kas vienāds ar pusi no aprēķina sprieguma.



3.19. att. Horizontālo bremzēšanas slodžu iedarbība

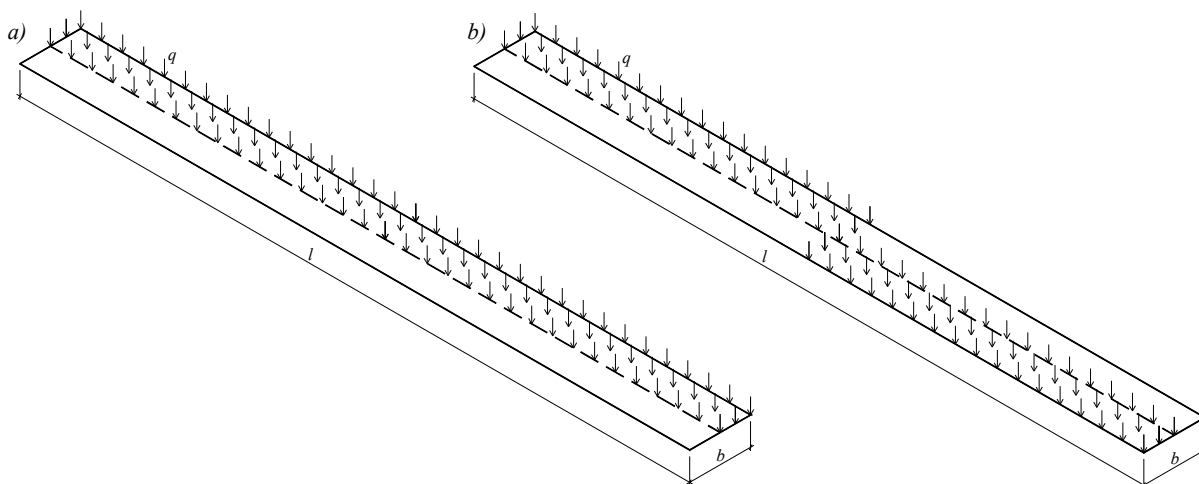
3.7.3. Temperatūras ietekmes ievērtēšana

Ar GEM programmatūras ANSYS palīdzību noteikta temperatūras ietekme uz iepriekš saspriegot iekārto konstrukciju ar laidumu 200 m, temperatūrai mainoties no -40 līdz $+40$ °C, kas var būt iespējams Latvijas apstākļos. Temperatūras maiņas rezultātā izraisītajiem pārvietojumiem un iepriekšējā sasprieguma līmeņa maiņai ir lineārs raksturs. Temperatūras maiņas rezultātā izraisītā izliece temperatūrai mainoties no -40 °C līdz $+40$ °C, pieņemot par atskaites punktu 0 °C, ir no $-1/2551$ līdz $1/2506$ no laiduma, kas būtiski neietekmē konstrukcijas ekspluatāciju. Būtiskāka ir iepriekšējā sasprieguma maiņa, kas ir vienāda ar 8.5% no projektētās, temperatūrai mainoties par 40 °C. Tāpēc reālajos projektos jāparedz aizsardzības līdzekļi, kas novērstu temperatūras maiņas izraisīto sasprieguma līmeņa maiņu.

3.7.4. Racionāls nesošo un stabilizējošo trošu izvietojums šķērsvirzienā

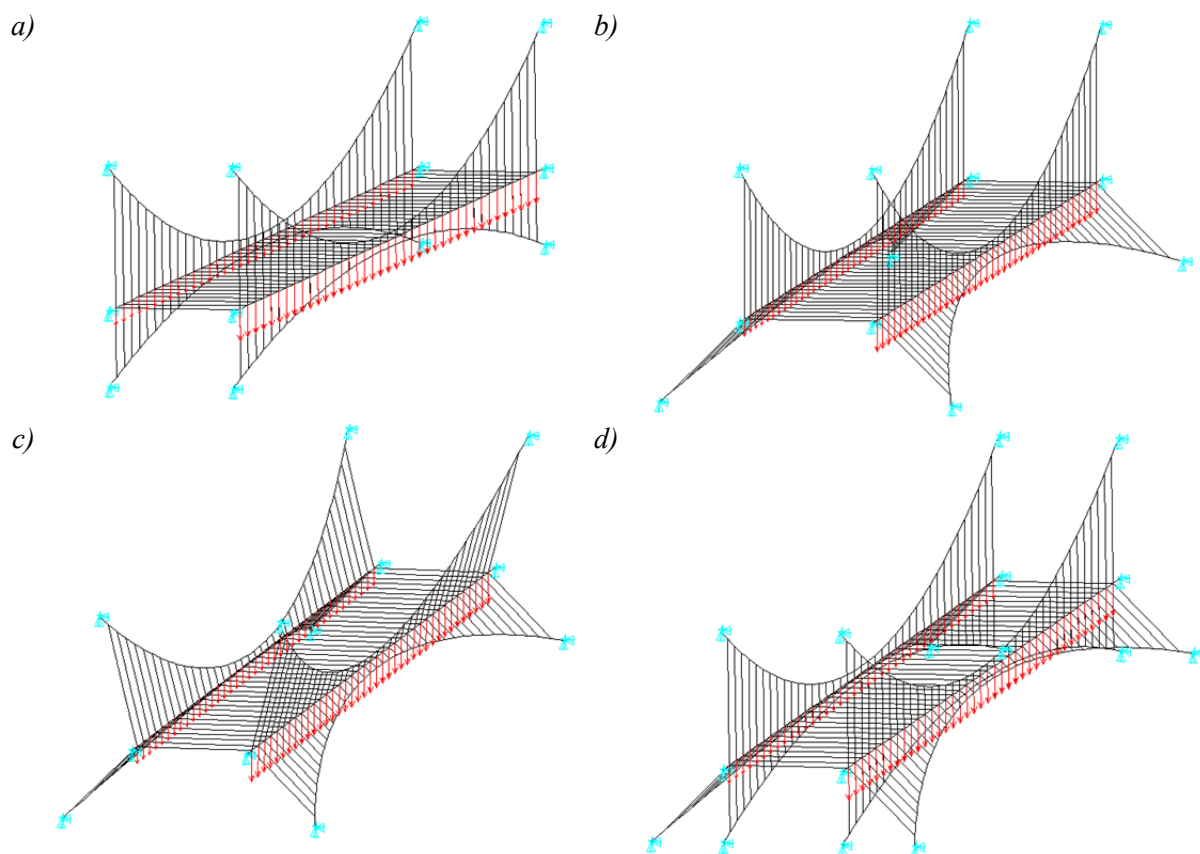
Viena no tiltu problēmām ir nevienmērīgie pārvietojumi klāja šķērsvirzienā gadījumā, kad slodze ir pielikta tilta pusei šķērsvirzienā [36]. Starpība starp izvēlētās iekārtās konstrukcijas kreisās un labās puses pārvietojumiem gadījumā, kad slodze pielikta klāja pusei šķērsvirzienā (3.20. att. *a*), ir vienāda ar 0.2781 m. Bet pārvietojumu starpība gadījumā, kad slodze pielikta klāja divām ceturtdaļām šahveidā (3.20. att. *b*), ir vienāda ar 0.4414 m [35]. Pārvietojumu starpība ir liela, un jāparedz pasākumi šo pārvietojumu starpības samazināšanai.

Pārvietojumus var samazināt, lietojot aktīvos tendonus, palielinot konstrukcijas kopējo stingumu, piemēram, palielinot iepriekšējā sasprieguma līmeni vai veidojot trošu kopni ar ieliektām joslām. Izmantojot trošu kopni ar ieliektām joslām, pārvietojumu starpību var samazināt par 29.1%. Cits risinājums ir izstrādāt konstrukciju, kuru mazāk ietekmēs nevienmērīga slodze.



3.20. att. Nevienmērīgas slodzes iedarbības gadījumi

Lai noteiktu labāko konstrukcijas risinājumu, tika analizēti šādi četri risinājumi: konstrukcija ar taisnām atsaitēm (3.21. att. *a*), konstrukcija ar slīpām apakšējām atsaitēm (3.21. att. *b*), konstrukcija ar slīpām augšējām un apakšējām atsaitēm (3.21. att. *c*), kā arī konstrukcija ar četrām stabilizācijas trosēm (3.21. att. *d*). Materiālu patēriņš visām apskatītajām konstrukcijām ir vienāds. Konstrukcijas analizētas pie slodzes gadījumā, kurš attēlots 3.20. att. *a*.

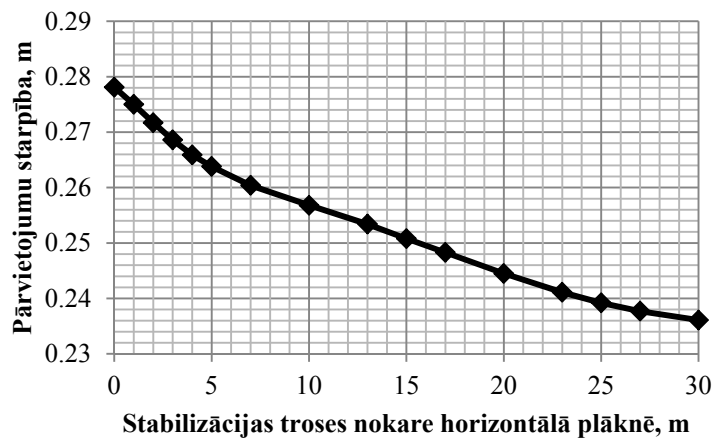


3.21. att. Dažādi iekārtās konstrukcijas elementu izvietojumi:

a – konstrukcija ar taisnām atsaitēm; *b* – konstrukcija ar slīpām apakšējām atsaitēm; *c* – konstrukcija ar slīpām augšējām un apakšējām atsaitēm; *d* – konstrukcija ar četrām stabilizācijas trosēm

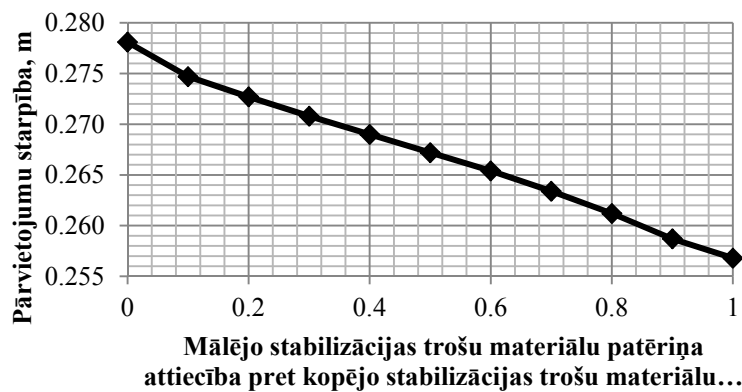
Pārvietojumi konstrukcijai ar taisnām atsaitēm (3.21. att. *a*) ir vienādi ar 0.2781 m.

Konstrukcijai ar slīpām apakšējām atsaitēm (3.21. att. *b*) noteikta sakarība starp pārvietojumiem un stabilizācijas troses nokari horizontālā plaknē (3.22. att.). Redzams, ka, palielinot stabilizācijas troses nokari horizontālā plaknē, samazinās pārvietojumu starpība. Pie 10 m lielas nokares iespējams samazināt pārvietojumu starpību par 7.7%, pie 20 m – par 12.1%, bet pie 30 m – par 15.1%. Bet pie 30 m lielas stabilizācijas troses nokares pārvietojumi no slodzes, kas pielikta laiduma pusei garenvirzienā, palielinās par 66%, kā arī nokares palielināšana horizontālā plaknē sarežģī teritorijas plānošanu, tāpēc pieņemta stabilizācijas troses nokare 10 m, tajā pašā laikā pārvietojumi no slodzes, kas pielikta laiduma pusei garenvirzienā, palielinās par 21.1%.

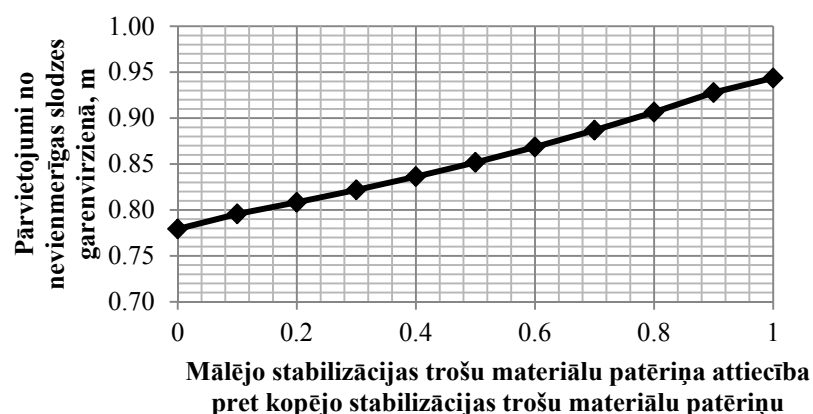


3.22. att. Sakarība starp stabilizācijas troses nokari un pārvietojumu starpību

Konstrukcijai ar četrām stabilizācijas trosēm (3.21. att. *d*), kad malējo stabilizācijas trošu nokare ir vienāda ar 10 m, noteikta sakarība starp materiālu sadalījumu starp malējām un centrālajām stabilizācijas trosēm un pārvietojumu starpību (3.23. att.), kā arī sakarība starp kopējiem garenvirzienā nevienmērīgas slodzes izraisītiem pārvietojumiem un materiālu sadalījumu (3.24. att.). Redzams, ka pārvietojumu starpība samazinās, palielinot slīpo elementu materiālu patēriņu, savukārt pārvietojumi no nevienmērīgas slodzes garenvirzienā palielinās, turklāt gandrīz trīs reizēs straujāk. Tā kā stabilizācijas trose ar nokari horizontālā plāknē ir vajadzīga, lai uzņemtu vēja slodzi, pieņemts, ka materiālu sadalījums starp centrālajām un malējām stabilizācijas trosēm būs vienāds attiecīgi ar 0.5 un 0.5.

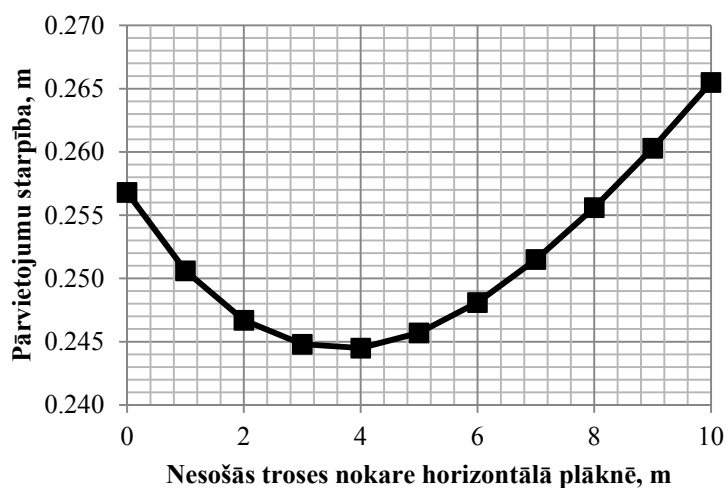


3.23. att. Sakarība starp stabilizācijas trošu materiālu sadalījumu un pārvietojumu starpību

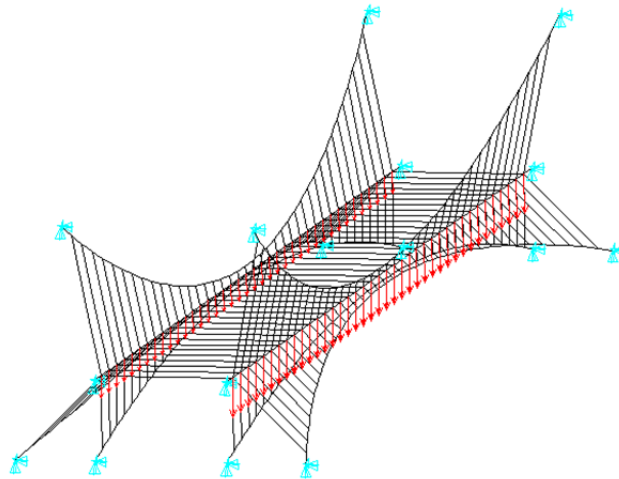


3.24. att. Sakarība starp stabilizācijas trošu materiālu sadalījumu un garenvirzienā nevienmērīgas slodzes izraisītiem pārvietojumiem

Konstrukcijai ar slīpām augšējām un apakšējām atsaitēm (3.21. att. c) noteikta sakarība starp pārvietojumiem un nesošās troses nokari horizontālā plaknē (3.25. att.). Redzams, ka racionāla nesošās troses nokare horizontālajā plaknē ir 4 m, kas dod iespēju samazināt pārvietojumu starpību par 4.8%. Pārvietojumi no slodzes, kas pielikta puslaidumā tilta garenvirzienā, tajā pašā laikā palielināsies par 0.97%, kas ir pieņemams. Par gala konstrukciju pieņemta konstrukcija ar četrām stabilizācijas trosēm un pagrieztām attiecībā pret horizontālo plakni nesošajām trosēm (3.26. att.).



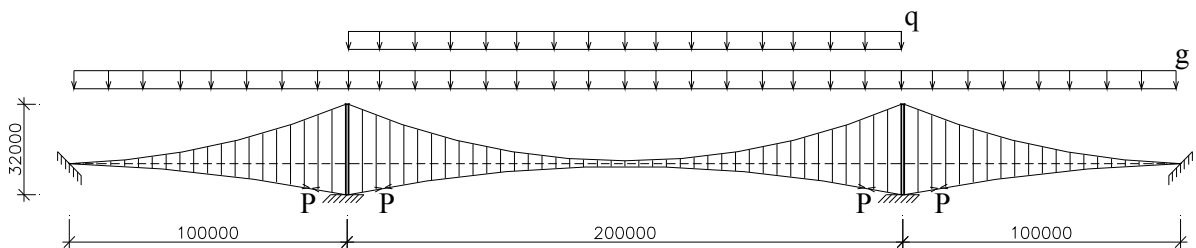
3.25. att. Sakarība starp nesošās troses nokari un pārvietojumu starpību



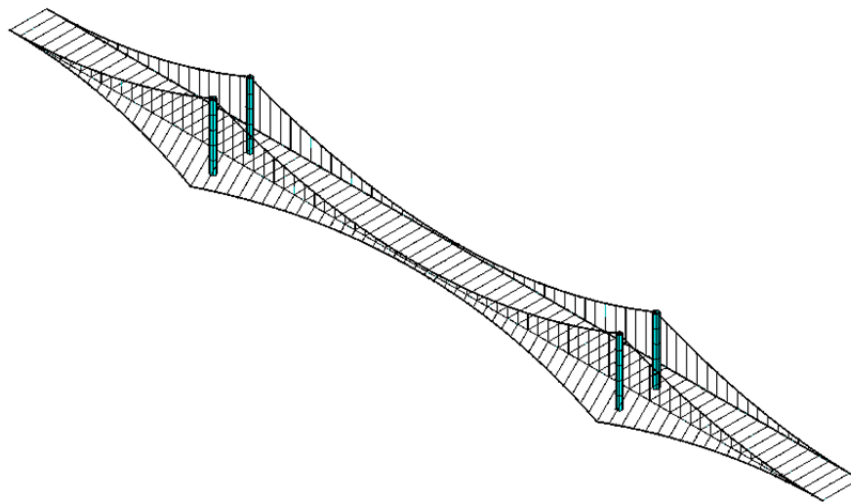
3.26. att. Iekārtā konstrukcija ar četrām stabilizācijas trosēm un slīpām atsaitēm

3.7.5. Konstrukcijas darbības analīze balstu pārvietojumu gadījumā

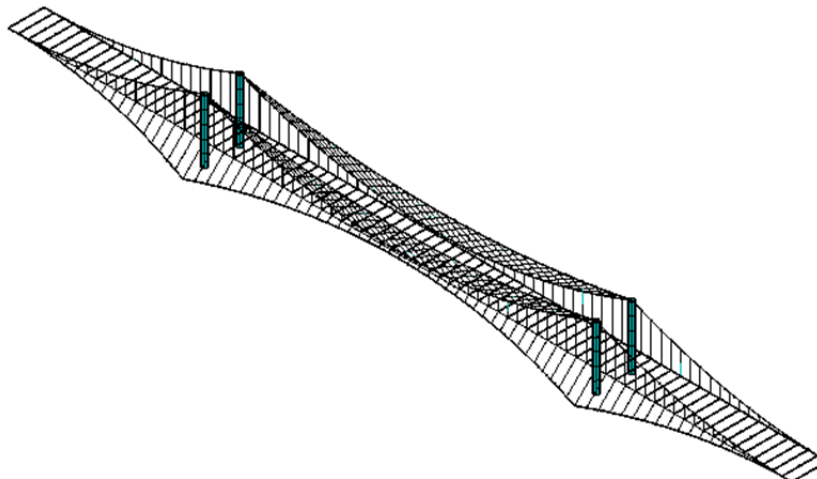
Lai novērtētu balstu pārvietojumu ietekmi uz konstrukcijas kopējiem pārvietojumiem, analizēta stinga pilona konstrukcija trīslaidumu tiltam (3.27. att.). Trīslaidumu tilta konstrukcija modelēta GEM programmas ANSYS vidē. Modelēts iekārtais tilts gan ar atsevišķām nesošajām trosēm, gan trošu kopnēm (3.28. att. un 3.29. att.). Maksimālie ass spēki pilonā darbosies tilta visu trīs laidumu slogošanas gadījumā, bet maksimālie momenti radīsies, kad tiks noslogots tikai tilta centrālais laidums.



3.27. att. Konstrukcijas shēma pilona aprēķiniem



3.28. att. Iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas ar atsevišķām nesošajām trosēm ANSYS modelis tiltam ar piloniem

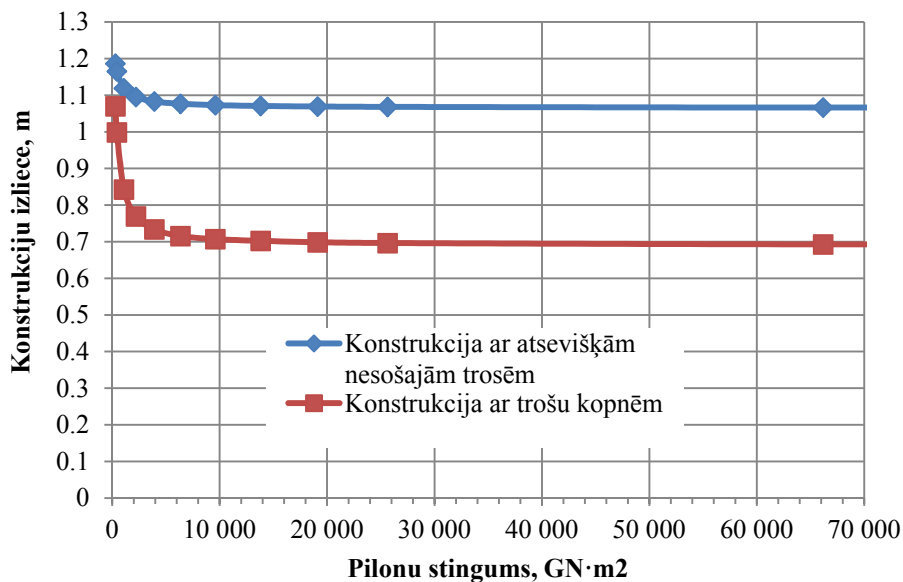


3.29. att. Iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas ar trošu kopnēm ANSYS modelis tiltam ar piloniem

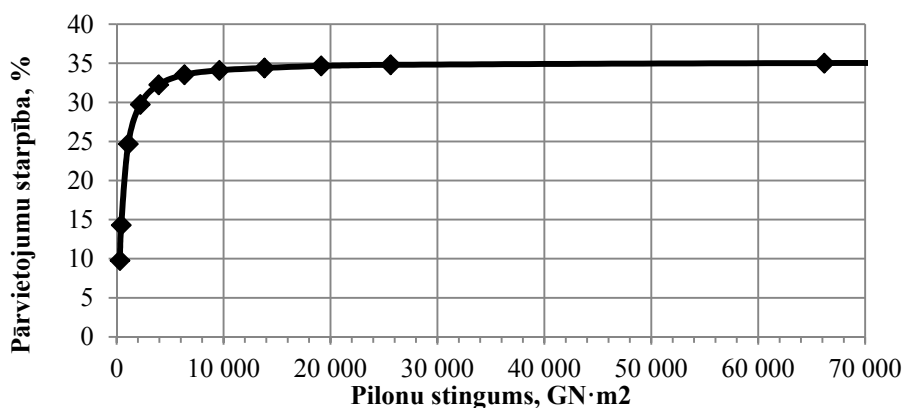
Nepietiekama pilona lieces stinguma gadījumā tieši pilona horizontālie pārvietojumi visvairāk ietekmē konstrukcijas kopējos pārvietojumus. Ir divas pilonu pārvietojumu samazināšanas iespējas – vai nu pilona stinguma palielināšana, vai aktīvo domkratu izmantošana, kas automātiski palielina malējo laidumu sasprieguma spēkus.

Atkarībā no pilonu stinguma iegūti konstrukcijas vertikālie pārvietojumi vidējam laidumam visneizdevīgākās slodzes gadījumā gan iekārtajam tiltam ar atsevišķām nesošajām trosēm, gan iekārtajam tiltam ar trošu kopnēm (3.30. att.). Ja ir mazs pilonu stingums ($300 \text{ GN}\cdot\text{m}^2$), trošu kopņu izmantošana iepriekš saspriegtam iekārtajam tiltam no pārvietojumu viedokļa ir par 10% izdevīgāka, bet šajā gadījumā konstrukcijas izliece ir vienāda ar $1/170$ laiduma, kas nav pieņemams no lietojamības robežstāvokļa viedokļa. Ja pilonu stingums ir

lielāks, trošu kopņu izmantošanas priekšrocības salīdzinājumā ar atsevišķo nesošo trošu izmantošanu palielinās līdz 35% – sakarība starp pilonu stingumu un pārvietojumu starpību starp konstrukciju ar atsevišķām nesošajām trosēm un trošu kopnēm ir parādīta 3.31. att.



3.30. att. Sakarība starp pilonu stingumu un konstrukciju izlieci



3.31. att. Sakarība starp pilonu stingumu un pārvietojumu starpību starp konstrukciju ar atsevišķām nesošajām trosēm un konstrukciju ar trošu kopnēm visneizdevīgākās slodzes gadījumā

3.7.6. Stinguma sijas konstrukcijas analīze

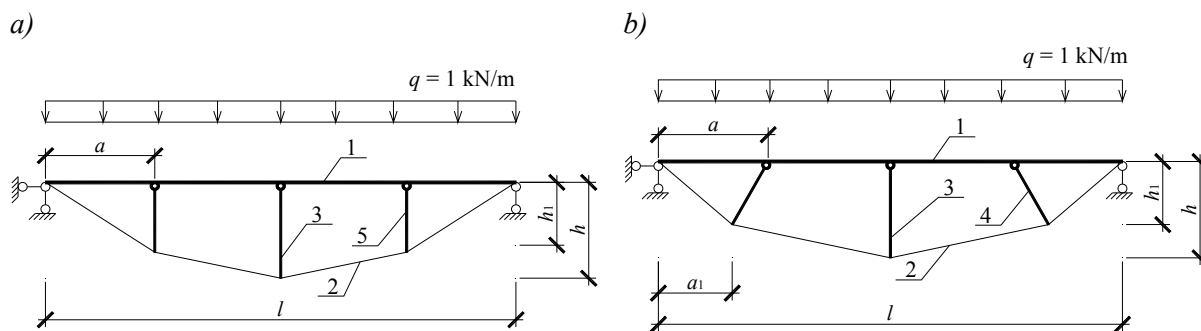
3.7.6.1. Šprengēlsijas racionāla konstrukcija

Tērauda konstrukciju efektivitātes paaugstināšana pašreiz ir viena no būvniecības svarīgākajām problēmām.

Viena no metodēm, kā var palielināt siju efektivitāti, ir špreņģeļu sistēmas izmantošana [122, 138]. Labāku efektu var sasniegt, vertikālo elementu vietā izmantojot diagonālos elementus. Lai novērtētu slīpo režģa elementu izmantošanas priekšrocības no materiālu patēriņa viedokļa salīdzinājumā ar taisniem elementiem, izvēlētas divas špreņģesijas ar laidumu 12 m: viena – ar taisniem elementiem, otra – ar slīpiem elementiem (3.32. att.).

Sijas slogotas ar vienmērīgi izkliedēto slodzi 1 kN/m. Par augšjoslas un statņu materiālu izvēlēts tērauds ar tecēšanas robežu 280 MPa. Par apakšjoslas materiālu izvēlēta tērauda trosē ar stiepļu stiepes stiprību 1960 MPa un troses elastības moduli 170 GPa.

Lai salīdzinātu šīs špreņģesijas, jānoteic racionālie parametri abu veidu špreņģesijām. Optimizācijas mērķis ir minimizēt materiālu patēriņu. Optimizācijas mainīgie faktori špreņģesijai ar vertikāliem statņiem ir sijas augstums h , malējo statņu augstums h_1 un attālums no balsta līdz malējam statnim a . Mainīgie faktori sijai ar slīpiem statņiem ir sijas augstums h , malējo statņu augstums h_1 , attālums no balsta līdz malējā statņa un augšjoslas savienojumam a , attālums no balsta līdz malējā statņa un apakšjoslas savienojumam a_1 . Racionālie parametri noteikti ar virsmas atbildes optimizācijas metodi.



3.32. att. Špreņģesiju aprēķina shēmas:

a – špreņģesija ar vertikāliem malējiem statņiem; b – špreņģesija ar slīpiem malējiem statņiem; 1 – augšjosla; 2 – apakšjosla; 3 – centrālais statnis; 4 – malējais slīpais statnis; 5 – malējais vertikālais statnis; a – attālums no balsta līdz augšjoslas un malējā statņa savienojumam; a_1 – attālums no balsta līdz malējā slīpā statņa savienojumam ar apakšjoslu; h – špreņģesijas augstums; h_1 – malējā statņa vertikālais izmērs

Sakarība starp materiālu patēriņu un mainīgajiem faktoriem ir izteikta ar otrās pakāpes polinomiem (3.3) un (3.4) attiecīgi špreņģesijai ar taisniem malējiem statņiem un sijai ar slīpiem malējiem statņiem:

$$P_a = b_0 + b_1 \cdot h + b_2 \cdot a + b_3 \cdot h_1 + b_{11} \cdot h^2 + b_{12} \cdot h \cdot a + b_{13} \cdot h \cdot h_1 + b_{22} \cdot a^2 + b_{23} \cdot a \cdot h_1 + b_{33} \cdot h_1^2, (3.3)$$

$$P_b = b_0 + b_1 \cdot h + b_2 \cdot a + b_3 \cdot a_1 + b_4 \cdot h_1 + b_{11} \cdot h^2 + b_{12} \cdot h \cdot a + b_{13} \cdot h \cdot a_1 + b_{14} \cdot h \cdot h_1 + b_{22} \cdot a^2 + b_{23} \cdot a \cdot a_1 + b_{24} \cdot a \cdot h_1 + b_{33} \cdot a_1^2 + b_{34} \cdot a_1 \cdot h_1 + b_{44} \cdot h_1^2, \quad (3.4)$$

kur P_a un P_b – materiālu patēriņš attiecīgi šprengējsijai ar taisniem statņiem un šprengējsijai ar slīpiem statņiem;

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{22}, b_{23}, b_{33}$ – polinomu koeficienti.

Polinomu koeficienti noteikti no skaitliskā pilnā faktora eksperimenta [71, 80, 117]. Eksperimenti ir saistīti ar iekšējo piepūļu noteikšanu elementos ar GEM programmas LIRA 9.6 palīdzību un elementu šķērsgriezumu piemeklēšanu pēc pastāvošajām normām.

Racionālās mainīgo faktoru vērtības ir noteiktas, atrisinot vienādojumu sistēmu, kas iegūta, pielīdzinot atvasinājumus pēc katra faktora nullei.

Noteiktie polinomu koeficienti atspoguļoti 3.5. tabulā.

3.5. tabula

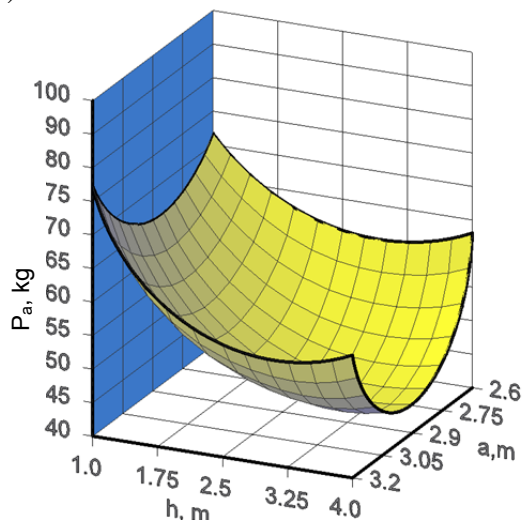
Polinomu koeficienti

Koeficienta apzīmējums	Polinoma koeficientu vērtības šprengējsijai ar taisniem statņiem	Polinoma koeficientu vērtības šprengējsijai ar slīpiem statņiem
b_0	387.0540	215.358
b_1	-3.6141	-175.258
b_2	16.2759	-171.295
b_3	-905.5000	-48.6105
b_4		455.119
b_{11}	2.4378	68.1405
b_{12}	-2.4778	54.55
b_{13}	-4.4444	34.5403
b_{14}		-235.703
b_{22}	53.2778	26.7259
b_{23}	-422.7780	19.1656
b_{24}		-99.8139
b_{33}	1404.3300	3.9044
b_{34}		-62.5264
b_{44}		156.977

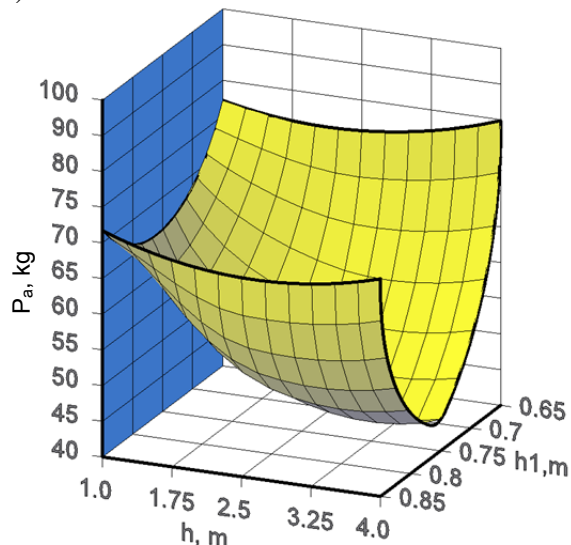
Modeļa adekvātuma novērtēšanai izmantots determinācijas faktors R^2 , kas ir vienāds ar 0.85 un 0.86 attiecīgi modelim ar šprengējsiju ar taisniem statņiem un modelim ar šprengējsiju ar slīpiem statņiem un kas apmierina minēto inženieruzdevumu. Sakarības starp materiālu patēriņu un mainīgajiem faktoriem šprengējsijai ar taisniem statņiem ir parādītas

3.33. att., bet špreņģelšijai ar slīpiem statņiem – 3.34. att.

a)



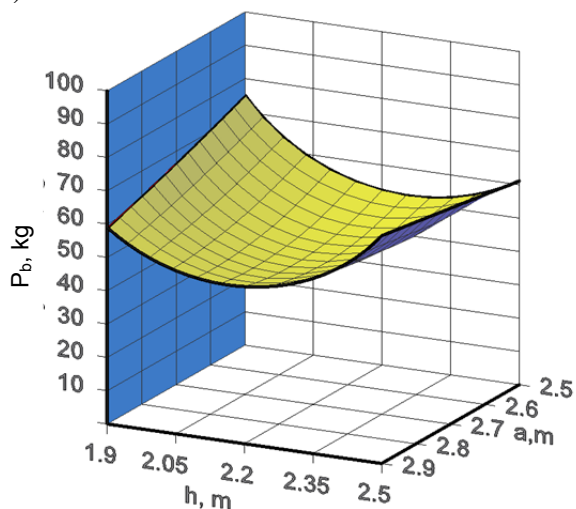
b)



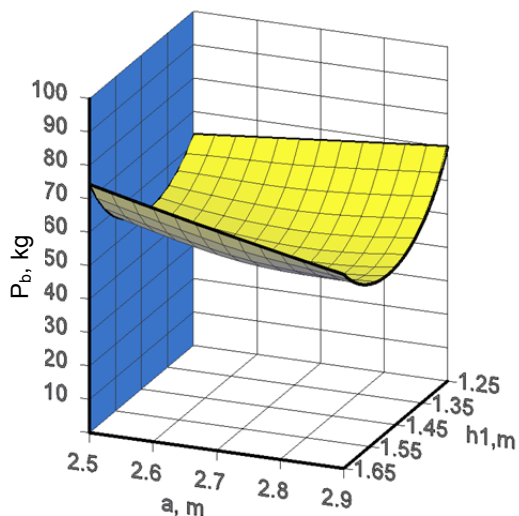
3.33. att. Sakarības špreņģelšijai ar taisniem malējiem statņiem:

a – sakarība starp materiālu patēriņu, sijas augstumu un attālumu no balsta līdz malējam statnim (pie $h_1/h = 3/4$);
b – sakarība starp materiālu patēriņu, sijas augstumu un malējā statņa augstumu (pie $a = 2.9$ m); P_a – materiālu patēriņš; h – sijas augstums; a – attālums no balsta līdz malējā statņa un augšjoslas savienojumam; h_1 – malējo statņu augstums

a)



b)



3.34. att. Sakarības špreņģelšijai ar slīpiem malējiem statņiem:

a – sakarība starp materiālu patēriņu, sijas augstumu un attālumu no balsta līdz malējam statnim (pie $h_1 = 1.45$ m; $a_1 = 1.2$ m); *b* – sakarība starp materiālu patēriņu, sijas augstumu un malējā statņa augstumu (pie $a_1 = 2.0$ m; $h = 2.2$ m); P_a – materiālu patēriņš; h – sijas augstums; a – attālums no balsta līdz malējā statņa un augšjoslas savienojumam; h_1 – malējo statņu augstums; a_1 – attālums no balsta līdz malējā statņa un apakšjoslas savienojumam

Tika atrastas racionālās raksturvērtības špreņģelšijām no materiālu patēriņa viedokļa. Špreņģelšijai ar taisniem statņiem racionālais attālums no balsta līdz malējā statņa un augšjoslas savienojumam a ir vienāds ar 2.74 m, racionālais sijas augstums h ir vienāds ar

2.56 m, savukārt racionālais malējo statņu augstums h_1 ir vienāds ar 1.82 m.

Špreņģeļsijai ar slīpiem statņiem racionālais attālums no balsta līdz malēja statņa un augšjoslas savienojumam a ir vienāds ar 2.84 m, racionālais attālums no balsta līdz malējā statņa un apakšjoslas savienojumam a_1 ir vienāds ar 1.91 m, racionālais sijas augstums h ir vienāds ar 2.48 m, savukārt racionālais malējo statņu augstums h_1 ir vienāds ar 1.63 m.

Racionālo raksturvērtību gadījumā materiālu patēriņš špreņģeļsijai ar taisniem malējiem elementiem ir 42.97 kg, bet špreņģeļsijai ar slīpiem elementiem – 40.92 kg, kas nozīmē, ka, izmantojot slīpus statņus taisno statņu vietā, materiālu patēriņš samazinās par 5%.

3.7.6.2. Pultrūzijas kompozītmateriālu špreņģeļsijas racionāla konstrukcija

Pultrūzijas kompozītmateriālu profilus pēdējā laikā plaši izmanto liekto elementu veidošanai. Pultrūzijas kompozītmateriālu profilu izmantošana tradicionālo materiālu, piemēram, tērauda vietā palielinātas īpatnējās stiprības dēļ dod iespēju samazināt konstrukciju masu. Šis aspekts ir ļoti svarīgs liellaiduma konstrukcijām, kam konstrukcijas masa ir viena no nozīmīgākajām slodzes sastāvdaļām [113].

Pultrūzijas kompozītmateriālu mehāniskās īpašības var mainīt, mainot sastāvdaļu sastāvu. Izturība pret ķīmiskajām vielām, labākas elektroizolācijas un siltumizolācijas īpašības ir svarīgas, salīdzinot tos ar tradicionālajiem materiāliem.

Bet lielākais pultrūzijas kompozītmateriālu profilu trūkums ir nepietiekamā kopējā noturība lieces momenta darbības plaknē, kas kavē šo materiālu izmantošanu liellaiduma konstrukcijās. Šī problēma var tikt atrisināta, izveidojot racionālu špreņģeļsijas konstrukciju, kam augšjoslas stabilitāte ir nodrošināta ar atbilstošu režģa risinājumu.

Cits pultrūzijas kompozītmateriālu profilu trūkums salīdzinājumā ar tēraudu ir to mazais elastības modulis, rezultātā lietojamības robežstāvoklis kļūst noteicošais un elementu stiprība netiek pilnībā izmantota. Vēl viens pultrūzijas profilu trūkums ir profilu maksimālais augstums, kurš ir limitēts. Tomēr arī šīs problēmas var atrisināt, izveidojot racionālu špreņģeļsiju.

Minēto iemeslu dēļ šīs nodaļas mērķis ir parādīt iespēju izveidot liellaiduma konstrukciju no pultrūzijas kompozītmateriālu profiliem.

Konstrukcijas laidums pieņemts vienāds ar 46 m, kas atbilst liellaiduma konstrukcijām, bet par konstrukcijas tipu – špreņģeļsija. Sijas augšjosla ir taisna, tāpēc šādu konstrukciju var lietot dažādiem mērķiem. Konstrukcijas balstīšanas veids ir līdzīgs brīvi

balstītas sijas balstīšanai, kas dod iespēju izmantot to ar vairāk kolonnu veidiem salīdzinājumā ar iespīlētiem balstiem, kur darbojas horizontālie spēki. Šo konstrukciju var izmantot arī tiltiem. Konstrukcijas apakšjosla ir izliekta, šis tips vairāk atbilst lieces momenta epīrai.

Sijas augšjosla ir veidota no vislielākā pieejamā dubult-T veida pultrūzijas kompozītmateriāla profila ar augstumu 360 mm. Konstrukcijas režģa elementi ir veidoti no kvadrātveida pultrūzijas kompozītmateriāla caurulēm, bet apakšjosla – no tērauda troses. Konstrukcija ir iepriekš saspriegta. Elementu mehāniskās īpašības apkopotas 3.6. tabulā.

Augšjosla ar režģa elementiem sadalīta 3 m garos posmos. Šis solis ir vispiemērotākais dubult-T veida pultrūzijas kompozītmateriāla profilam ar augstumu 360 mm, jo profila nestspēja ir gandrīz identiska gan pēc nestspējas, gan lietojamības robežstāvokļiem. Posmu garums pie balstiem ir vienāds ar 2 m, lai līdzsvarotu iekšējos spēkus, jo malējo un vidējo joslas elementu nostiprinājuma shēmas atšķiras.

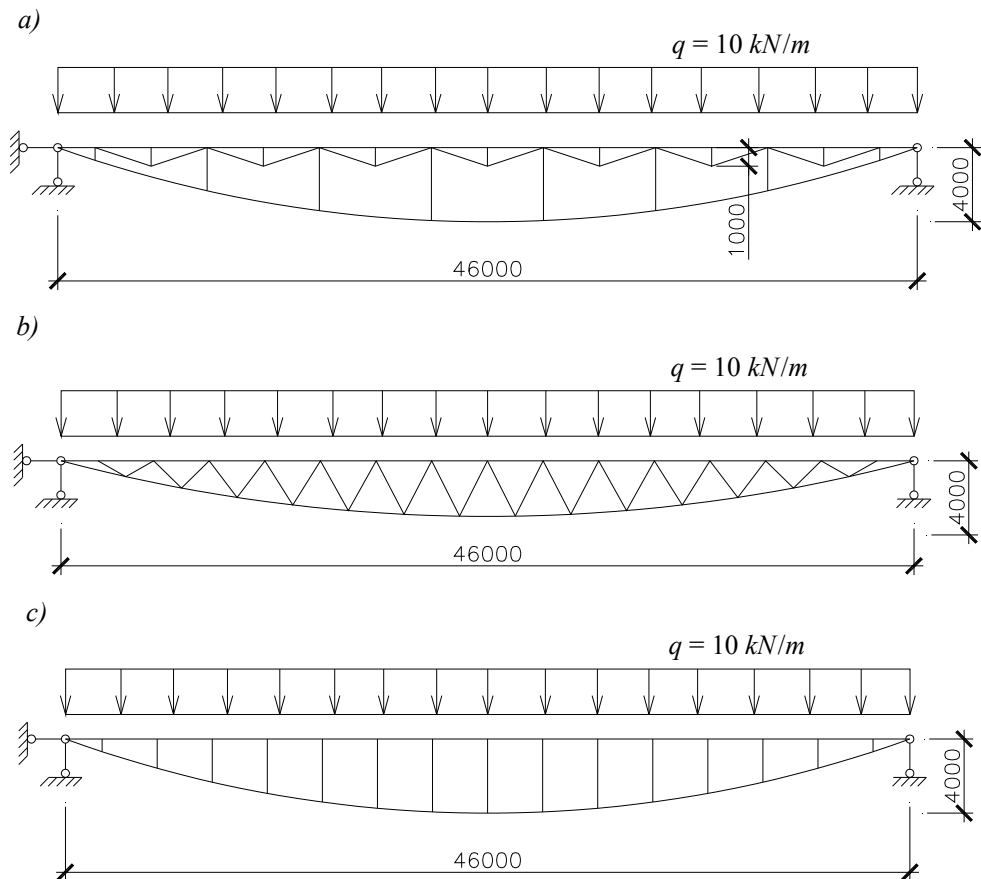
Pieņemts, ka konstrukcija ir nostiprināta plaknē, kas perpendikulāra lieces momenta darbības plaknei, ar saitēm mezglos.

3.6. tabula

Elementu mehāniskās īpašības

Elements	Augšjosla	Režģa elementi	Apakšjosla
Materiāls	Pultrūzijas kompozītmateriāls	Pultrūzijas kompozītmateriāls	Tērauds
Elastības modulis	$E_{0^{\circ}}=28\ 000\ \text{MPa}$	$E_{0^{\circ}}=167\ 000\ \text{MPa}$	$E_{0^{\circ}}=23\ 000\ \text{MPa}$
Lieces stiprība	$f_{b,0^{\circ}}=240\ \text{MPa}$	$f_{b,0^{\circ}}=240\ \text{MPa}$	
Stiepes stiprība	$f_{t,0^{\circ}}=240\ \text{MPa}$	$f_{t,0^{\circ}}=240\ \text{MPa}$	
Spiedes stiprība	$f_{c,0^{\circ}}=240\ \text{MPa}$	$f_{c,0^{\circ}}=240\ \text{MPa}$	
Troses stieplu stiepes stiprība			$R_r=1960\ \text{MPa}$

Lai noskaidrotu labāko režģa elementu izvietojumu, tika analizēti dažādi šprengēlsijas režģa veidi (3.35. att.). Apskatīta šprengēlsija ar papildšprengēļiem, šprengēlsija ar trīsstūrveida režģi un šprengēlsija ar vertikāliem statņiem. Konstrukcijas analizētas no pārvietojumu viedokļa. Konstrukcijām ir vienāds augstums – 4 m, un tās slogotas ar izkliedēto slodzi $q = 10\ \text{kN/m}$.

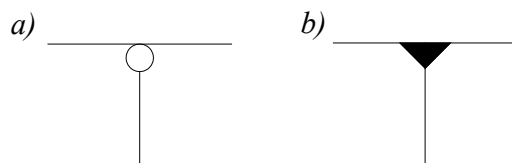


3.35. att. Špreņģeļsiju veidi:

a – špreņģeļsija ar papildšpreņģeļiem; *b* – špreņģeļsija ar trīsstūrveida režģi; *c* – špreņģeļsija ar vertikāliem statņiem (telpiskās saites netika veidotas)

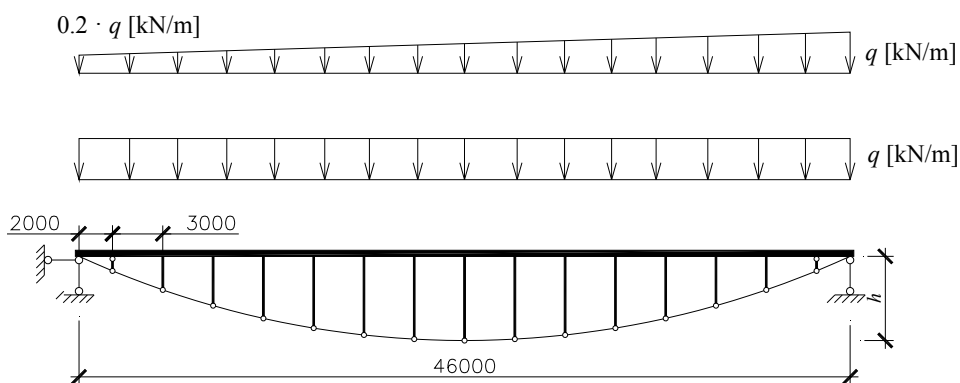
Racionālākā no analizētajiem špreņģeļsiju veidiem no pārvietojumu viedokļa ir špreņģeļsija ar vertikāliem statņiem. Špreņģeļsija ar trīsstūrveida režģi darbojas labāk nevienmērīgas slodzes iedarbībā, bet šī veida sijām ir grūtāk veidot saspriegumu. Špreņģeļsijas ar papildšpreņģeļiem izmantošana dod iespēju samazināt statņu materiālu patēriņu par 20%, bet nepieciešams par 46% lielāks troses materiālu patēriņš. Tāpēc par pētīšanas objektu izvēlēta špreņģeļsija ar vertikāliem statņiem, bet nevienmērīgas slodzes uzņemšanai sija pastiprināta ar diagonāliem elementiem.

Apskatīti dažādi augšjoslas un režģa elementu mezglu tipi: stingie mezgli un locīklu tipa mezgli (3.36. att.). Locīklu mezglu izmantošana dod iespēju samazināt lieces momentu savienojumā, bet stingo mezglu veidošana – samazināt aprēķina garumu par 30% un kopējie konstrukcijas pārvietojumi samazinās par 25%. Tāpēc stingie mezgli izvēlēti režģa elementu un augšjoslas savienošanai visiem režģa elementiem, izņemot malējos, kur rodas lieli lieces momenti mezglos – tur izvēlēti locīklu mezgli.



3.36. att. Mezglu tipi:
a – locītklu tipa mezgls; *b* – stingais mezgls

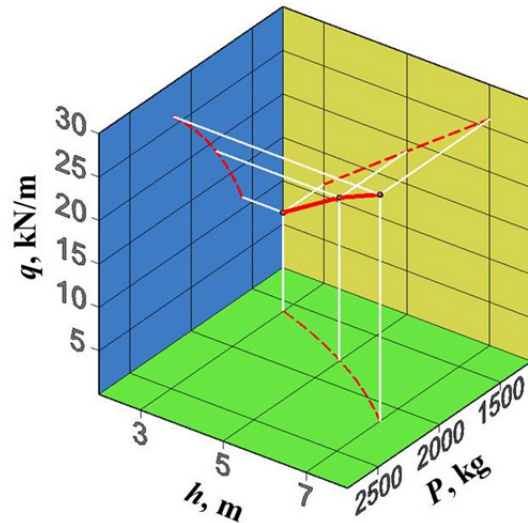
Špreņģeļsijas nestspējas noteikšanai izvēlēta špreņģeļsija ar vertikāliem statņiem un laidumu 46 m (3.37. att.). Par mainīgo faktoru pieņemts špreņģeļsijas augstums. Konstrukcija pārbaudīta pēc nestspējas un lietojamības robežstāvokļiem. Maksimālā pieļaujamā izliece ir vienāda ar 1/300 laiduma. Aprēķina mērķis ir noteikt maksimālo slodzi, kādu var pielikt konstrukcijai, un nodrošināt, lai elementu šķērsriezumi būtu pilnībā izmantoti gan pēc nestspējas, gan pēc lietojamības robežstāvokļiem, kā arī noteikt materiālu patēriņu atkarībā no mainīgā faktora.



3.37. att. Špreņģeļsijas aprēķina shēma:
q – nestspēja; *h* – sijas augstums (nav parādītas telpiskās saites)

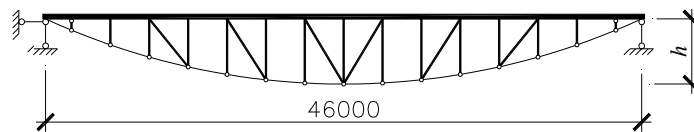
Iekšējās piepūles, kas darbojas elementos, ir noteiktas ar GEM programmas LIRA 9.6 palīdzību [95]. Vertikālie režģa elementi un augšjosla ir stiepti liekta, malējie režģa elementi ir centriski spiesti. Apakšjosla ir stiepta. Konstrukcijas elementi ir aprēķināti, izmantojot standartpieejas [25, 40, 139, 140, 141].

Špreņģeļsijas nestspēja ir lielāka sijām, kam ir lielāks augstums, bet tālāku augstuma palielināšanu ierobežo statņu šķērsriezuma izmēri. Sakarība starp špreņģeļsijas nestspēju, materiālu patēriņu un špreņģeļsijas augstumu ir parādīta 3.38. att. Redzams, ka špreņģeļsijas augstumam mainoties no 3 līdz 7 m, tās nestspēja palielinās no 11.4 līdz 26.1 kN/m, tajā pašā laikā materiālu patēriņš – no 1585 līdz 2147 kg.



3.38. att. Sakarība starp špreņģeļsijas augstumu, tās nestspēju un materiālu patēriņu:
 h – špreņģeļsijas augstums; q – nestspēja; P – materiālu patēriņš

Konstrukcijas pārbaude veikta nevienmērīgas slodzes iedarbībā. Sasprieguma līmenis un elementu šķērsgriezumi bija tādi paši kā simetriskā slogojuma gadījumā. Nestspējas robežstāvoklis dažāda augstuma izvēlētajām konstrukcijām bija nodrošināts, bet lietojamības robežstāvoklis nebija nodrošināts, jo maksimālie kopējie pārvietojumi nevienmērīgas slodzes iedarbībā bija 803 mm, bet pieļaujamie – 153 mm. Šīs problēmas atrisināšanai dažos konstrukcijas blokos tika ievietoti no pultrūzijas kompozītmateriāla kvadrātveida šķērsgriezuma profiliem veidoti diagonālie elementi (3.39. att.), kas nodrošināja lietojamības robežstāvokļa izpildi, bet materiālu patēriņš palielinājās par 120 līdz 370 kg atkarībā no konstrukcijas augstuma.



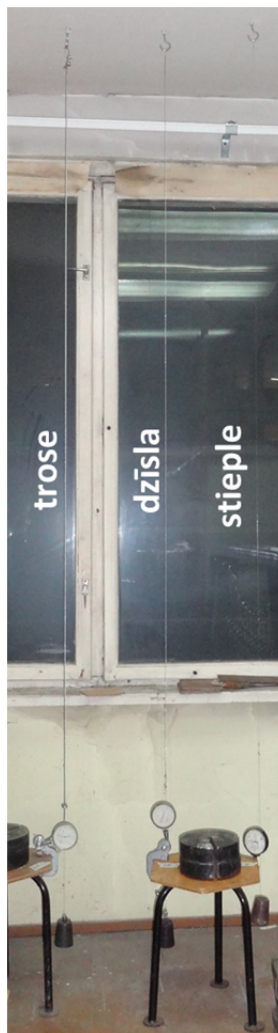
3.39. att. Racionāla pultrūzijas kompozītmateriālu špreņģeļsija

4. IEPRIEKŠ SASPRIEGTAS IEKĀRTĀS TROŠU KONSTRUKCIJAS EKSPERIMENTĀLĀ PĀRBAUDE UN TĀS REZULTĀTI

4.1. Temperatūras ietekme uz trosi un tās elementiem

4.1.1. Eksperimenta apraksts

Lai noteiktu temperatūras ietekmi uz trosi un tās elementiem, eksperimentam izvēlēta 3 mm diametra trose 6×19+WSC, šīs troses centrālā dzīsla un dzīslas centrālā stieple. Troses un tās elementu viens gals piestiprināts pie griestiem, un šie paraugi nostiepti ar atsvaru otrā galā un piestiprināti pie izlieču mērītājiem (4.1. att.). Eksperimenta gaitā paraugi tika atdzesēti, tad uzsildīti un atkal atdzesēti līdz sākuma temperatūrai. Visu paraugu sākuma garums bija 1608 mm.



4.1. att. Temperatūras ietekmes uz troses un tās elementiem eksperimentālā pārbaude

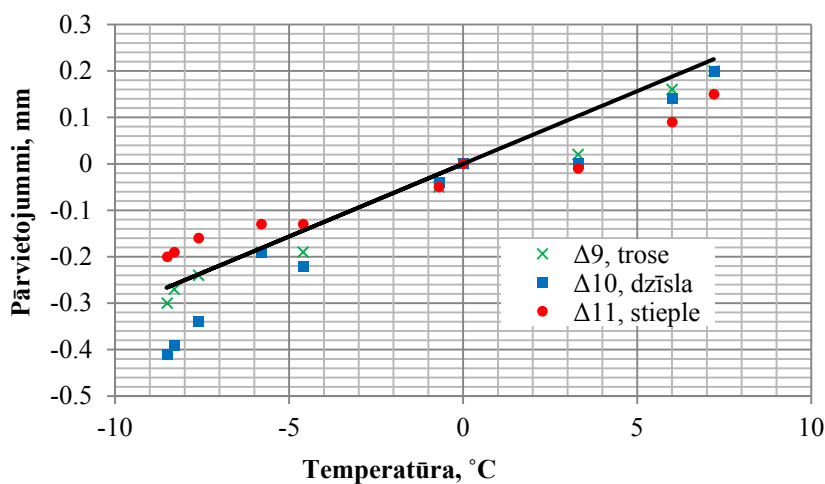
4.1.2. Eksperimenta rezultāti

Eksperimentāli noteiktie pārvietojumi atkarībā no temperatūras maiņas, kā arī teorētiski noteiktie pārvietojumi ir apkopoti 4.1. tabulā un aplūkojami 4.2. att.

4.1. tabula

Paraugu pārvietojumi atkarībā no temperatūras maiņas

$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\Delta 9,$ trose, mm	$\Delta 10,$ dzīsla, mm	$\Delta 11,$ stieple, mm	$\Delta,$ teorēt., mm
0	0	0	0	0
-4.6	-0.19	-0.22	-0.13	-0.14
-7.6	-0.24	-0.34	-0.16	-0.23
-8.3	-0.27	-0.39	-0.19	-0.25
-8.5	-0.30	-0.41	-0.20	-0.26
-5.8	-0.19	-0.19	-0.13	-0.18
-0.7	-0.05	-0.04	-0.05	-0.02
3.3	0.02	0.0	-0.01	0.10
6.0	0.16	0.14	0.09	0.18
7.2	0.20	0.20	0.15	0.22



4.2. att. Sakarība starp temperatūras maiņu un troses un tās elementu pārvietojumiem

Visiem paraugiem noteikts termiskās izplešanās koeficients. Termiskās izplešanās koeficients trosēi: $\alpha_{tr} = 13 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; dzīslai: $\alpha_{dz} = 14 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; stieplei: $\alpha_{st} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Rezultāti ir salīdzināmi ar tērauda termiskās izplešanās koeficientu: $\alpha_{tēr} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

4.2. Troses elastības moduļa palielināšana

4.2.1. Eksperimenta apraksts

Eksperimentiem izvēlēta 2 mm diametra trosē 6×7-WSC.

Noteikti troses ģeometriskie parametri:

- stieples vijuma leņķis dzīslā – $\alpha = 20^\circ$;
- dzīslas vijuma leņķis trosē – $\beta = 18^\circ$.

Minimālais teorētiskais troses pārraušanas spēks $F_{\min} = 2.75$ kN, troses aprēķina stiepes spēks $F_{Rd} = 1.65$ kN.

Eksperimentāli noteikts troses pārraušanas spēks. Tika testēti trīs troses paraugi. Pārraušanas spēks katram paraugam bija attiecīgi 3.85, 3.60 un 3.90 kN, visiem lielāks par teorētisko troses pārraušanas spēku.

Troses pārbaudes būtība – izstiept trosi ar noteikto slodzi un pārlicināties, ka pēc iepriekšējās izstiepšanas tās elastības modulis palielinās.

Troses sloģošana tika veikta statistiski, pakāpeniski stiepjot to soli pa solim ar atsvaru palīdzību. Katra soļa lielums ir apmēram 10% no troses aprēķina stiepes spēka, turklāt pēc atsvara uzlikšanas pagaida 2 minūtes, lai trosē notiktu pārvietojumi un tā stabilizētos (troses vītās struktūras dēļ), un tad veic nepieciešamo nolasījumu – pagarinājuma mērīšanu. Kad trosi atstāj – iztur laikā, tad mērījumus veic ik pēc 15 minūtēm pirmajā stundā un ik pēc 30 minūtēm nākamajās stundās [29].

Troses moduļa palielināšana veikta divos veidos:

- troses sloģošana un izturēšana zināmu laiku (turklāt sloģošanas un izturēšanas laiku var variēt);
- troses daudzkārtējā sloģošana bez izturēšanas laikā.

Pēc izturēšanas laikā trosi atkal sloģo tādā pašā veidā, lai salīdzinātu tās elastības moduli pirms un pēc sloģošanas.

Otrajā troses sloģošanas gadījumā veic izstiepšanas ciklu, kas sastāv no troses daudzkārtējās sloģošanas un atsloģošanas. Troses daudzkārtējo sloģošanu veic citu pēc citas bez izturēšanas laikā.

4.2.2. Eksperimenta mainīgo faktoru līmeņu definēšana

Troses elastības modulis E_{tr} ir atkarīgs no izstiepšanas slodzes P un izturēšanas laika t , kuri pieņemti par mainīgajiem faktoriem. Veikts pilna faktora eksperiments pēc diviem mainīgajiem faktoriem. Izstiepšanas slodzes līmeņi atkarīgi no aprēķina stiepes spēka un bija vienādi ar 100%, 120% un 140% no aprēķina spēka jeb attiecīgi 1.65, 1.98 un 2.31 kN. Visi slodzes līmeņi ir mazāki par troses pārraušanas spēku.

Izturēšanas laika līmeņi bija 0, viena un divas stundas.

4.2.3. Eksperimenta gaita

Troses paraugi slogoti, piekarinot paraugam slodzi (4.3. att.). Paraugi slogoti pakāpeniski, ar soli 20 kgf.

Troses eksperimentālo elastības moduļa vērtību var noteikt pēc formulas (4.1):

$$E_{tr1} = \frac{P \cdot l_{sak}}{S \cdot \Delta l}, \quad (4.1)$$

kur E_{tr1} – troses elastības modulis, GPa;

P – ass stiepes spēks, N;

l_{sak} – troses sākotnējais garums, mm;

S – troses šķērsriezuma laukums, mm²;

Δl – troses pagarinājums, mm.

Gan troses relatīvais pagarinājums, gan stiepes spriegums, gan elastības modulis tika aprēķināti atsevišķi katrā slogošanas posmā.



4.3. att. Troses stiepšanas process līdz slodzei $P_1=165.06$ kgf

Pēc katra stiepes slodzes pielikšanas soļa trose izturēta 2 minūtes un tikai pēc tam izmērīts tās pagarinājums starp spaiļu veidā uzstādītajām atzīmēm. Kad paraugu izturēja laikā, pagarinājums tika mērīts pēc katrām 15 minūtēm pirmajā stundā un ik pēc pusstundas otrajā stundā.

Pēc troses izstiepšanas un izturēšanas laikā trose tika slogota vēlreiz, lai konstatētu, kā mainās tās elastības modulis. Turklāt elastības moduļa salīdzināšana pirms un pēc iepriekšējās izstiepšanas veikta troses aprēķina stiepes nestspējas līmenī.

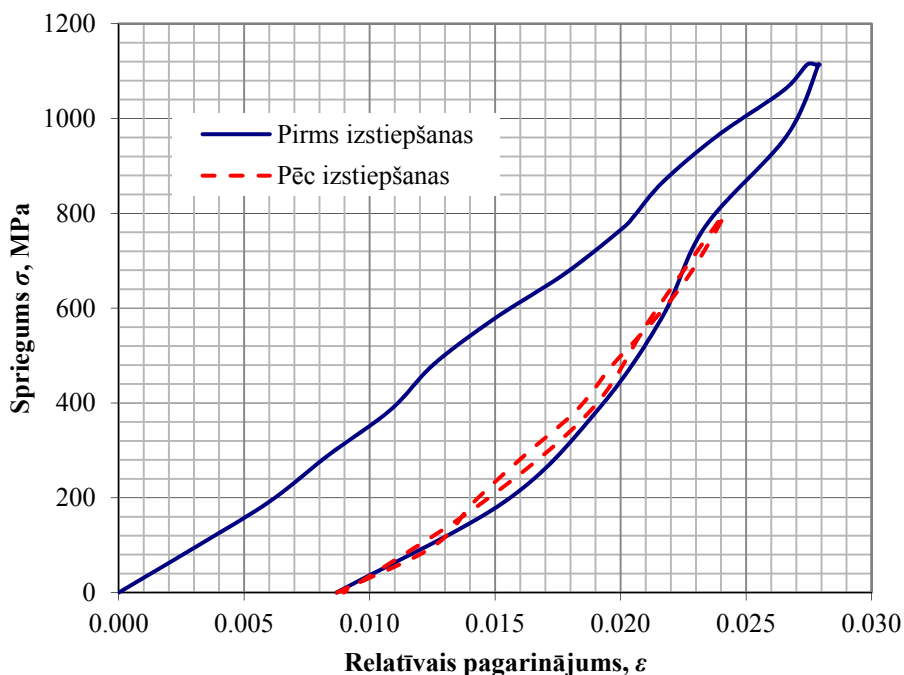
Eksperimenta otrā daļa notika bez parauga izturēšanas laikā, bet ar tā daudzkārtēju slogošanu un atslogošanu. Slogošanas process notika tādā pašā veidā, kā minēts iepriekš, ar tādu pašu iekārtu un parauga stiprinājuma principu.

Paraugi slogoti līdz slodzes zemākajam līmenim, 165 kgf. Veikti četri cikli, jo pēc ceturta slogošanas-atslogošanas cikla bija redzams, ka trose jau stabilizējusies un pagarinājums vairs nerodas; tas savukārt nozīmē, ka arī troses elastības moduļa ievērojamas palielināšanās vairs nebūs.

4.2.4. Rezultātu apkopojums

4.2.4.1. Troses elastības moduļa palielināšana ar izturēšanu laikā

Visiem paraugiem, izturot tos slodzes iedarbībā, elastības modulis palielinās. Troses vidējais sākotnējais elastības modulis pirms izstiepšanas bija 42.3 GPa. Spriegumu-deformāciju līknes paraugam, kas izstiepts ar 2.31 kN un izturēts 1 h, ir parādītas 4.4. att.



4.4. att. Spriegumu-deformāciju līknes trosi, kas tika izstiepta ar 231 kgf un izturēta vienu stundu

Noteikts elastības moduļa pieaugums paraugiem. Rezultāti ir apkopoti 4.2. un 4.3. tabulās.

4.2. tabula

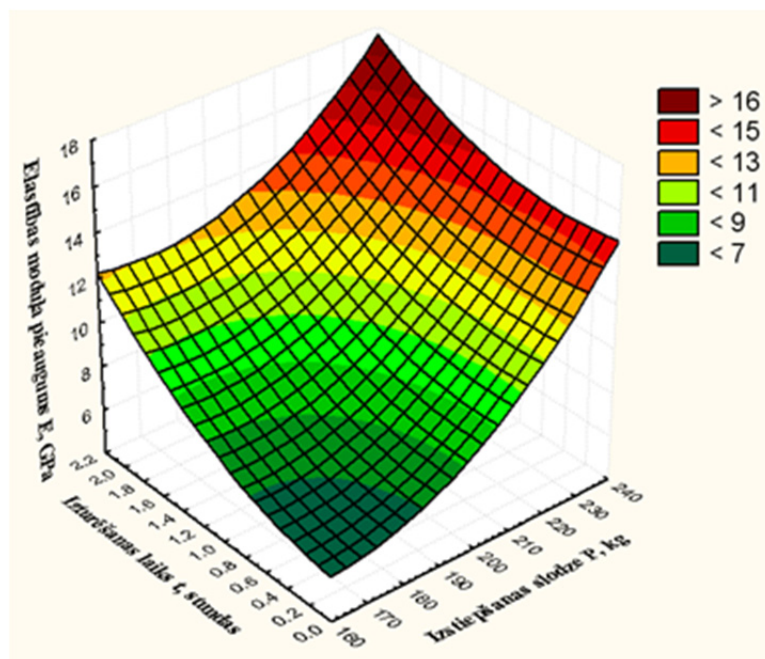
Elastības moduļa relatīvais pieaugums pēc iepriekšējās izstiepšanas

Slodze, kgf	Izturēšanas laiks, h		
	0	1	2
Elastības moduļa relatīvais pieaugums, %			
165	13.3	17.1	26.8
198	20.7	21.1	27.7
231	30.9	33.6	35.9

Elastības moduļa absolūtais pieaugums pēc iepriekšējās izstiepšanas

Slodze, kgf	Izturēšanas laiks, h		
	0	1	2
	Elastības moduļa absolūtais pieaugums, GPa		
165	6.1	7.7	11.0
198	8.0	9.0	12.0
231	13.1	13.0	15.5

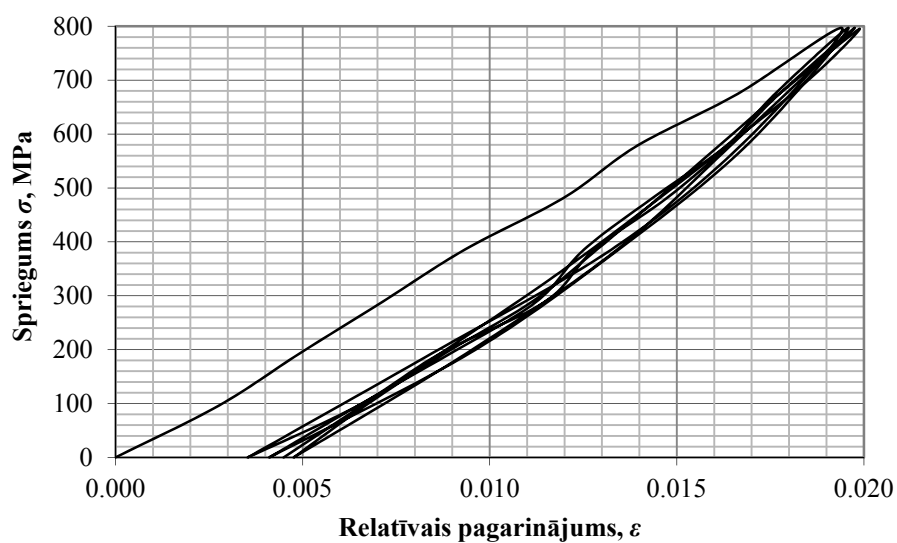
Sakarība starp izturēšanas laiku, pielikto slodzi un elastības moduļa pieaugumu ir parādīta 4.5. att.



4.5. att. Sakarība starp troses izturēšanas laiku, izstiepšanas slodzi un elastības moduļa pieaugumu

4.2.4.2. Troses elastības moduļa palielināšana, veicot tās daudzkārtējo izstiepšanu

Eksperimentāli novērtēta troses elastības moduļa palielināšanas iespēja, veicot tās daudzkārtējo slogošanu. Spriegumu-deformāciju līknes, iegūtas troses daudzkārtējā slogošanā, ir attēlotas 4.6. att.



4.6. att. Spriegumu-deformāciju līknes trosēi, veicot tās daudzkārtējo slogošanu

Troses elastības moduļa pieaugums atkarībā no slogošanas reižu skaita ir aplūkojams 4.4. tabulā.

4.4. tabula

Troses elastības moduļa pieaugums atkarībā no slogošanas reižu skaita

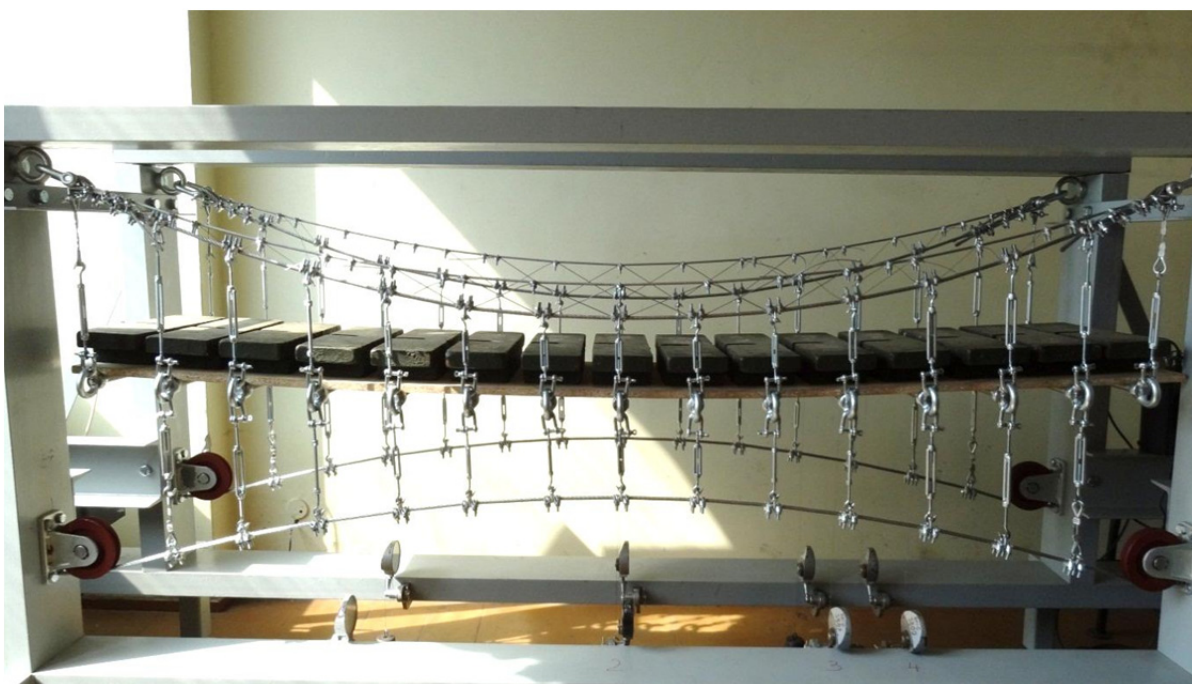
	Troses slogošanas reižu skaits		
	1	2	3
Elastības moduļa pieaugums, %	21.5	24.8	29.0

4.3. Iepriekš saspiestas iekārtās konstrukcijas modeļu eksperimentālā pārbaude

Lai izanalizētu iepriekš saspiestas iekārtās konstrukcijas darbību un salīdzinātu piedāvāto trošu kopni ar atsevišķo nesošo trosi, tika izbūvēti divi maza mēroga fiziskie modeļi (4.7. att. un 4.8. att.).



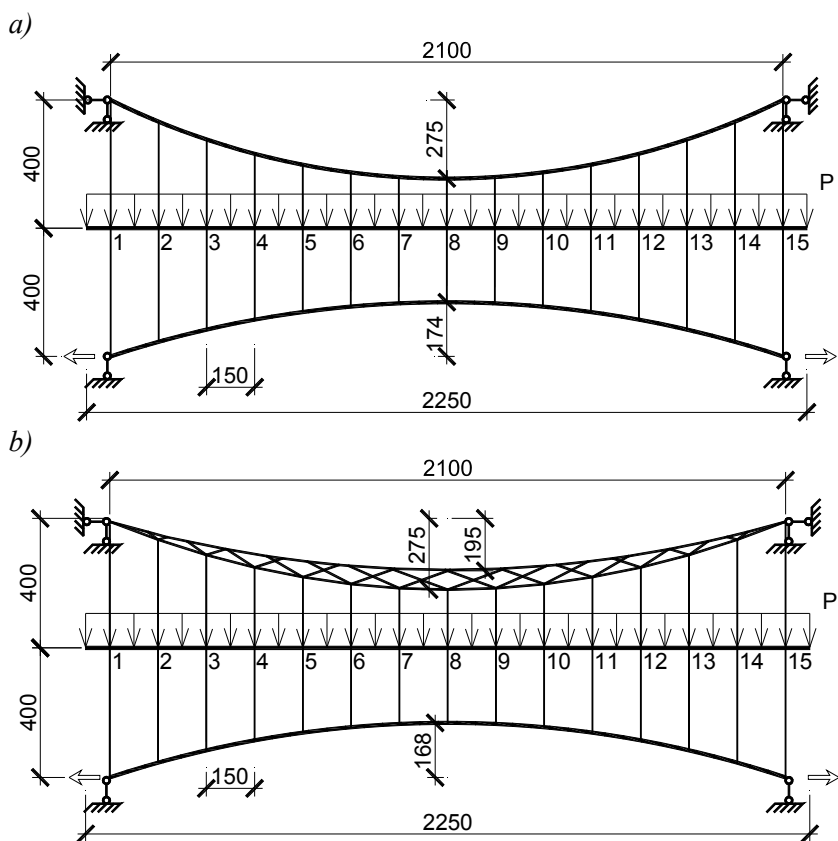
4.7. att. Iepriekš saspiestas iekārtās konstrukcijas ar atsevišķām nesošajām trosēm fiziskais modelis



4.8. att. Iepriekš saspiestas iekārtās konstrukcijas ar trošu kopnēm fiziskais modelis

4.3.1. Modeļu ģeometrija

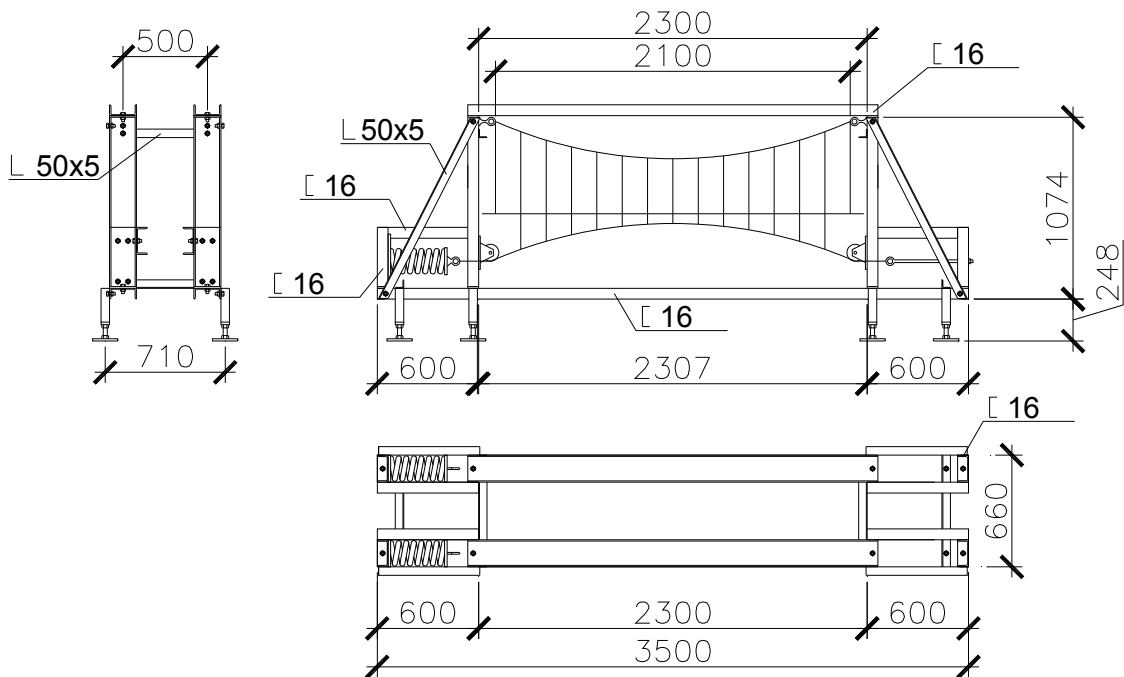
Iepriekš saspieltas iekārtās konstrukcijas maza mēroga fizisko modeļu laidums ir 2.1 m. Atsevišķo nesošo trošu un trošu kopņu apakšjoslas nokare f_b ir 275 mm. Trošu kopņu augšjoslas nokare f_t ir 195 mm. Stabilizācijas trošu nokare ir 174 mm. Klājs pie galvenajām nesošajām konstrukcijām ir pievienots ar piekariem 15 punktos ar soli 150 mm (4.9. att.).



4.9. att. Iekārto tiltu fizisko modeļu shēmas:

a – modelim ar atsevišķām nesošajām trosēm; *b* – modelim ar trošu kopnēm

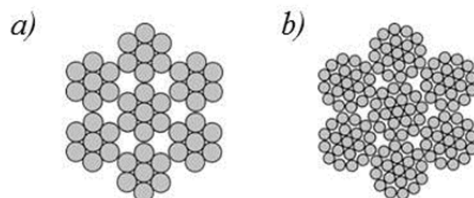
Modeļu pārbaudei izbūvēts speciāls stends, kas var nodrošināt konstrukcijas mezglu nepārvietojamību, uzņemt paredzētās slodzes, kā arī nodrošināt iespēju veidot iepriekšējo saspienumu un vajadzīgo mērinstrumentu izvietošanu. Pārbaudes stenda shēma ir parādīta 4.10. att.



4.10. att. Pārbaudes stenda shēma

4.3.2. Modeļu elementi

Modeļu trošu kopņu, atsevišķo nesošo trošu un stabilizācijas trošu elementi ir izgatavoti no tērauda trosēm. Izmantotas divu tipu troses: $6 \times 7 + \text{WSC}$ (*wire steel core* – tērauda stieplu kodols) un $6 \times 19 + \text{WSC}$ (4.11. att.). Abu tipu trosēm ir parastais kreisās rokas vijums (Zs) [11]. Abu trošu stieplu stiepes stiprība ir 1770 MPa, trošu aprēķina stiepes stiprība – 840 MPa. Trošu elastības modulis tika noteikts eksperimentāli – 60 000 MPa. Trošu raksturīgās vērtības ir parādītas 4.5. tabulā. Elementu diametri speciāli izvēlēti tā, lai trošu kopnes varētu veidot ar tādu pašu materiālu patēriņu kā atsevišķās troses.



4.11. att. Trošu šķērs griezumi: *a* – $6 \times 7 + \text{WSC}$; *b* – $6 \times 19 + \text{WSC}$

Fizisko modeļu trošu elementu raksturīgās vērtības

Elements	Troses tips	Diametrs, mm	Minimālais pārraušanas spēks F_{min} , kN	Aprēķina stiepes spēks F_{Rd} , kN
Fiziskais modelis ar atsevišķām nesošajām trosēm				
Galvenā trose	6×19+WSC	10.0	63.0	37.8
Stabilizācijas trose	6×19+WSC	8.0	40.3	24.2
Fiziskais modelis ar trošu kopnēm				
Apakšjosla	6×19+WSC	8.0	40.3	24.2
Augšjosla	6×19+WSC	5.5	17.8	10.7
Režģa elementi	6×7+WSC	2.0	2.7	1.6
Stabilizācijas trose	6×19+WSC	8.0	40.3	24.2

Iepriekšējais sasprīgums ir organizēts stabilizācijas trosē un realizēts ar uzgriežņa rotāciju un stieņa kustību. Lai trose varētu brīvi kustēties, tā ir atbalstīta caur bloku (4.12. att.).

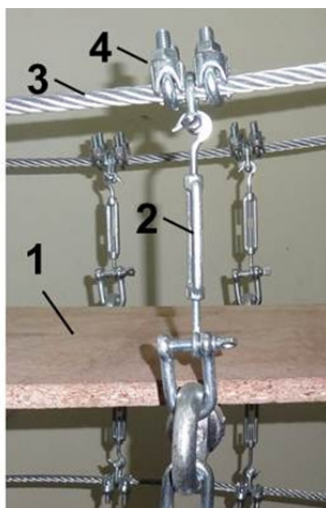


4.12. att. Sasprīgšanas mehānisms:

1 – stabilizācijas trose; 2 – bloks; 3 – uzgrieznis; 4 – stienis

Modeļu klājs ir veidots no orientētās kokskaidu plātnes (OSB). Klājam nav būtiskas nestspējas, OSB plātnes labās deformējamības dēļ tas tikai izklīdē slodzi starp piekariem.

Lai savienotu klāju ar nesošo trosi, izmantoti regulējamie piekari, ar kuriem var līmetņot klāju. Lai novērstu piekaru pārvietošanos gar trosi, tie ar trosēm savienoti ar U-veida vītņotām skavām (4.13. att.).



4.13. att. Klāja savienojums ar nesošo trosi ar piekariem:
1 – klājs; 2 – piekars; 3 – nesošā trose; 4 –U-veida vītņotā skava

Trošu kopnes režģa elementi ar joslām ir savienoti ar kontaktsavienojumu (4.14. att.), kam elementi ir iespiesti joslās. Šim savienojuma veidam piemīt pietiekama stiprība un ar to iespējams savienot īsus režģa elementus.



4.14. att. Režģa elementu savienojums ar joslām, izmantojot kontaktsavienojumu

4.3.3. Mērinstrumenti

Stiepes spēks stabilizācijas trosē tika mērīts ar elektronisko dinamometru *Scaim* *IPB50* (4.15. att.) un ar mehānisko dinamometru (4.16. att.). Elektroniskā dinamometra darbības princips balstīts uz elektriskā tiltiņa pretestības maiņu. Elektroniskā dinamometra mērīšanas precizitāte ir 0.25 kgf. Mehāniskā dinamometra darbības princips balstīts uz atsperes pārvietojumu mērīšanu un to pārvēršanu spēka mērvienībās pēc noteiktas sakarības.

Mehāniskais dinamometrs izstrādāts un veidots pašu spēkiem. Mehāniskā dinamometra mērīšanas precizitāte ir 0.5 kgf.

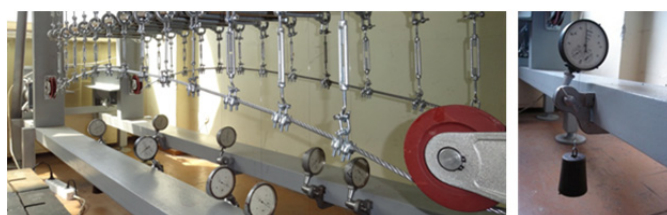
Klāja pārvietojumi tika mērīti 8 punktos ar Aistova tipa izlieču mērītājiem, kas dod iespēju mērīt izlieces plašā diapazonā (4.17. att.). Šo instrumentu precizitāte ir 0.005 mm.



4.15. att. Elektroniskais dinamometrs



4.16. att. Mehāniskais dinamometrs



4.17. att. Izlieces mērīšana

4.3.4. Modeļu pārbaudes process

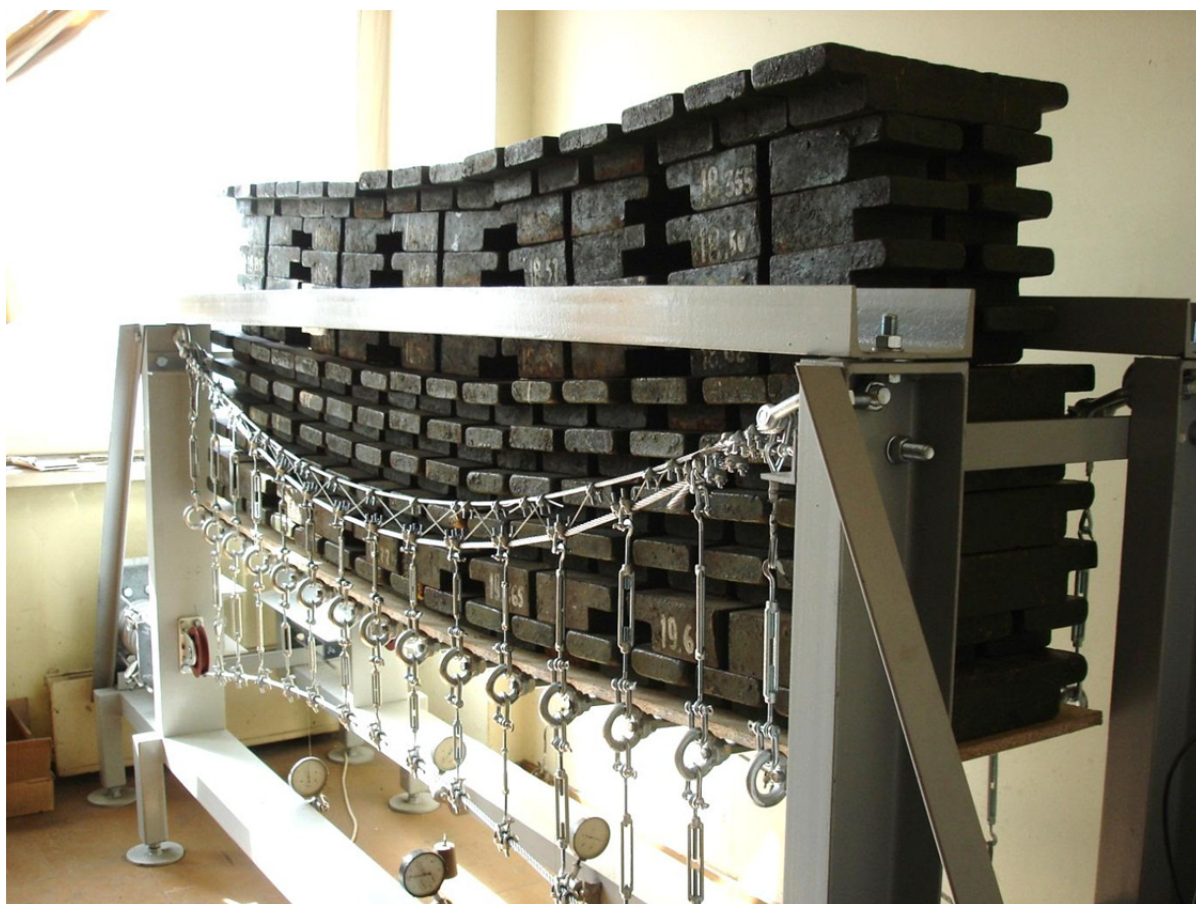
Par aprēķina slodzi pieņemts 93 kgf liels svars uz katru piekaru. Slodze bija pielikta simetriski pilnam laidumam un nesimetriski pusei laiduma. Simetriskās slodzes gadījumā pilnā slodze bija 2755 kgf (4.18. att.), kas kopā ar iepriekšējo sasprīgumu izraisīja 412.1 MPa lielu spriegumu nesošajā trosē jeb 0.49 no nesošās troses aprēķina stiepes

stiprības, bet nesimetriskās slogošanas gadījumā – 1495 kgf (4.19. att.).

Iepriekšējais saspriegums tika realizēts, nostiepjot stabilizācijas trosi. Stabilizācijas troses nostiepums ir mērīts stiepšanas vietā kgf, pieņemot, ka šī vērtība ir sasprieguma līmenis. Par aprēķina iepriekšējā sasprieguma līmeni katram zaram ir pieņemti 1000 kgf, kas izraisa 348.4 MPa lielu spriegumu stabilizācijas trosē jeb 0.4 no stabilizācijas troses aprēķina stiepes stiprības.

Lai samazinātu brīvās elementu deformācijas, kuru cēlonis ir vanšu struktūra, veikta konstrukcijas iepriekšējais izstiepums. Konstrukcija tika iepriekš izstiepta ar iepriekšējā sasprieguma līmeni 1200 kgf, kas ir par 20% lielāks par aprēķina sasprieguma līmeni, un slodzi 2940 kgf, kas ir par 6.7% lielāka par aprēķina slodzi, un tad izturēta laikā. Lai noskaidrotu maksimālos sasprieguma zudumus, tika izmantots izstiepšanas paņēmieni, kurš nav visizdevīgākais (izdevīgāk katru elementu iepriekš izstiept atsevišķi).

Modeļi slogoti ar tērauda atsvariem; katra svars – apmēram 20 kgf. Mērījumi nolasīti ar soli 285 kgf simetriskās slogošanas gadījumā un ar soli 155 kgf nesimetriskās slogošanas gadījumā, t. i., pa kārtām.



4.18. att. Simetriski slogots iepriekš saspriegta iekārtās konstrukcijas fiziskais modelis



4.19. att. Nesimetriski slogots iepriekš saspiertas iekārtās konstrukcijas fiziskais modelis

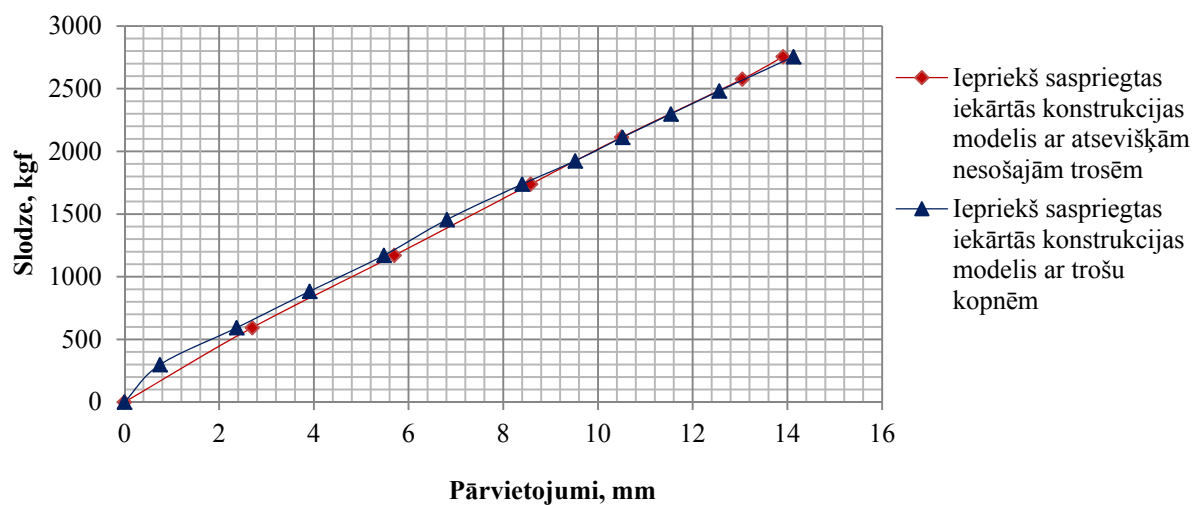
4.3.5. Modeļu pārbaudes rezultāti

Modeļi pārbaudīti simetriskas un nesimetriskas slodzes iedarbībā. Nesimetriskās slogošanas gadījumā noslogotā daļa pārvietojās uz apakšu, bet nenoslogotā – uz augšu (4.20. att.). Nesimetriskās slogošanas gadījumā noteicošie ir gan pārvietojumi uz augšu, gan uz apakšu. Kopējie pārvietojumi rēķināti kā pārvietojumu uz augšu un pārvietojumu uz apakšu absolūto vērtību summa. Simetriskās slogošanas gadījumā izšķirošie ir pārvietojumi uz apakšu.

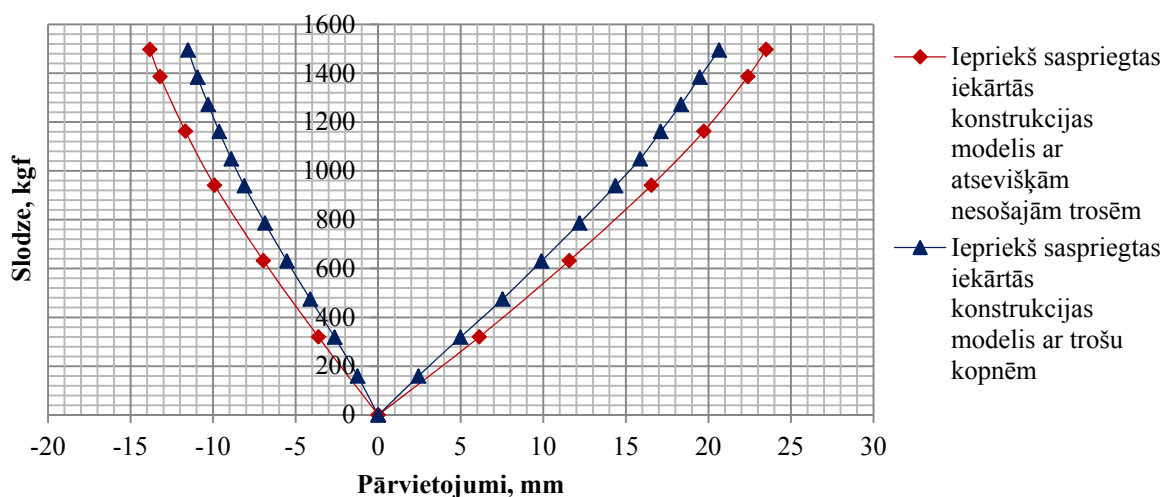


4.20. att. Modeļa pārvietojumi nesimetriskās slodzes gadījumā

Iepriekš saspriegto iekārtu konstrukciju modeļu ar atsevišķām nesošajām trosēm un trošu kopnēm pārvietojumi simetriskās slodzes gadījumā parādīti 4.21. att. Modeļu pārvietojumi nesimetriskās slodzes gadījumā parādīti 4.22. att. Eksperiments parādīja, ka pārvietojumi nesimetriskās slodzes gadījumā ir lielāki par pārvietojumiem simetriskās slodzes gadījumā. Pārvietojumi simetriskās slodzes gadījumā modelim ar atsevišķām nesošajām trosēm un modelim ar trošu kopnēm ir gandrīz vienādi, bet pārvietojumi nesimetriskās slodzes gadījumā ir mazāki iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas modelim ar trošu kopnēm.



4.21. att. Modeļu testēšanas rezultāti simetriskās slodzes gadījumā



4.22. att. Modeļu testēšanas rezultāti nesimetriskās slodžošanas gadījumā

Pārvietojumi tika aprēķināti arī skaitliski, izmantojot GEM programmu ANSYS, un iegūtie rezultāti salīdzināti ar eksperimentālajiem rezultātiem.

Maksimālie pārvietojumi apkopoti 4.6. tabulā. Starpība starp modeļa ar atsevišķām nesošajām trosēm un modeļa ar trošu kopnēm eksperimentāli noteiktajiem un skaitliski aprēķinātajiem (GEM) pārvietojumiem ir parādīta 4.7. tabulā.

4.6. tabula

Eksperimentāli noteiktie un skaitliski (GEM) aprēķinātie (iekavās) modeļu pārvietojumi

Slogošanas shēma	Klāja maksimālie pārvietojumi uz apakšu, mm	Klāja maksimālie pārvietojumi uz augšu, mm	Klāja maksimālie kopējie pārvietojumi, mm
Iepriekš saspieltas iekārtas konstrukcijas fiziskais modelis ar atsevišķām nesošajām trosēm			
Simetriskā slodze	14.71 (13.92)		
Nesimetriskā slodze	23.81 (21.79)	13.83 (14.25)	37.64 (36.04)
Iepriekš saspieltas iekārtas konstrukcijas fiziskais modelis ar trošu kopnēm,			
Simetriskā slodze	15.06 (14.76)		
Nesimetriskā slodze	21.04 (21.06)	11.61 (10.38)	32.65 (31.44)

Starpība starp modeļa ar atsevišķām nesošajām trosēm un modeļa ar trošu kopnēm pārvietojumiem

	Eksperimentālie rezultāti	Skaitliskie rezultāti
Simetriskā slodze		
Klāja maksimālie pārvietojumi uz apakšu	-2.4%	-6.0%
Nesimetriskā slodze		
Klāja maksimālie pārvietojumi uz augšu	16.1%	27.2%
Klāja maksimālie pārvietojumi uz apakšu	11.6%	3.4%
Klāja maksimālie kopējie pārvietojumi	13.3%	12.8%

Fizisko modeļu ar atsevišķām nesošajām trosēm un trošu kopnēm pārvietojumi simetriskās slogošanas gadījumā ir vienādi ar 15 mm, bet nesimetriskās slogošanas gadījumā kopējie pārvietojumi ir attiecīgi 37 un 32 mm. Eksperimentālie rezultāti ir tuvi skaitliski aprēķinātajiem. Starpība starp eksperimentāli iegūtajiem un skaitliski aprēķinātajiem rezultātiem izskaidrojama ar eksperimentālā un skaitliskā modeļa ģeometrijas nebūtiskām novirzēm. Balstu mezglu pārvietojumi nepārsniedza 3% no maksimālajiem konstrukcijas pārvietojumiem. Eksperimentālie rezultāti parādīja, ka nesimetriskās slogošanas gadījumā, aizvietojojot atsevišķas nesošās troses ar trošu kopnēm, var par 16% samazināt pārvietojumus uz augšu un par 12% – uz apakšu. Tajā pašā laikā kopējie pārvietojumi samazinājās par 13%.

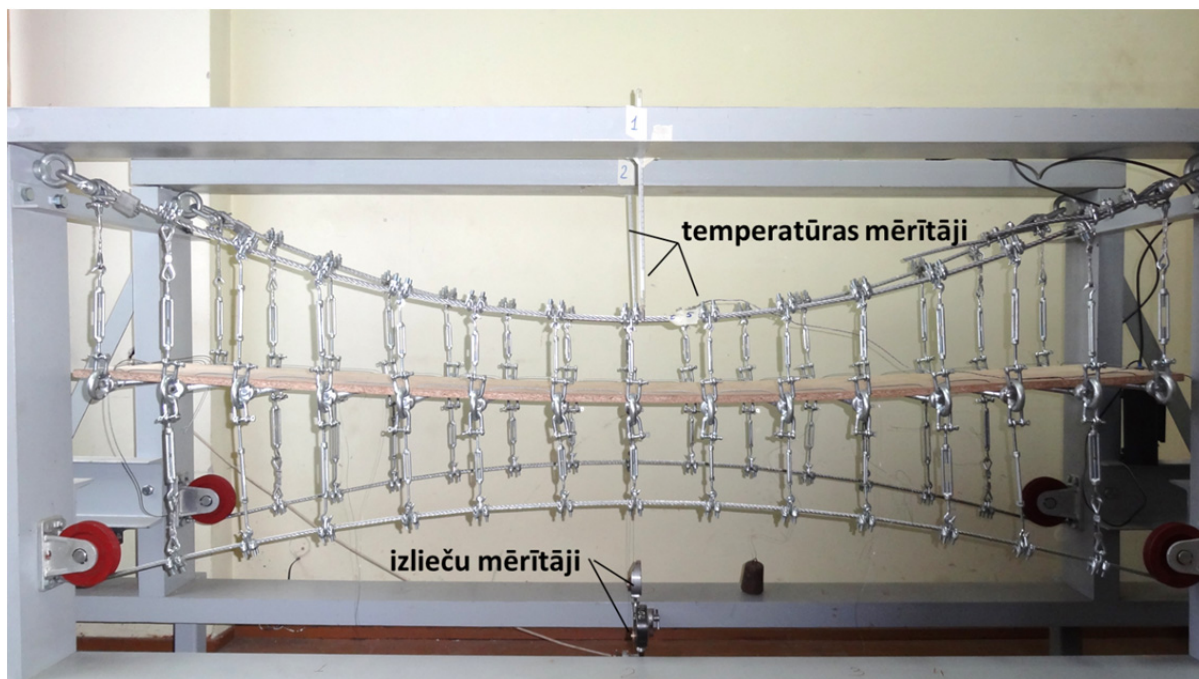
4.4. Temperatūras ietekme uz iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas modeli

4.4.1. Eksperimenta apraksts

Mainoties temperatūrai, iepriekš saspriegtām iekārtām konstrukcijām mainās iepriekšējā sasprieguma līmenis, kā arī veidojas izlieces.

Lai noteiktu temperatūras ietekmi uz iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas modeli, tas tika atdzesēts, uzsildīts un atkal atdzesēts līdz sākuma temperatūrai. Temperatūra tika mērīta kreisajam un labajam zaram. Pārvietojumi mērīti laiduma vidū kreisajam un labajam zaram. Iepriekšējā sasprieguma līmenis tika mērīts tikai labajam zaram, jo kreisā zara dinamometra konstrukcija bija ļoti pakļauta temperatūras maiņai un tas nevarēja dot precīzu

rezultātu. Eksperimentālais modelis parādīts 4.23. att.



4.23. att. Temperatūras ietekmes uz iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas modeli eksperimentālā pārbaude

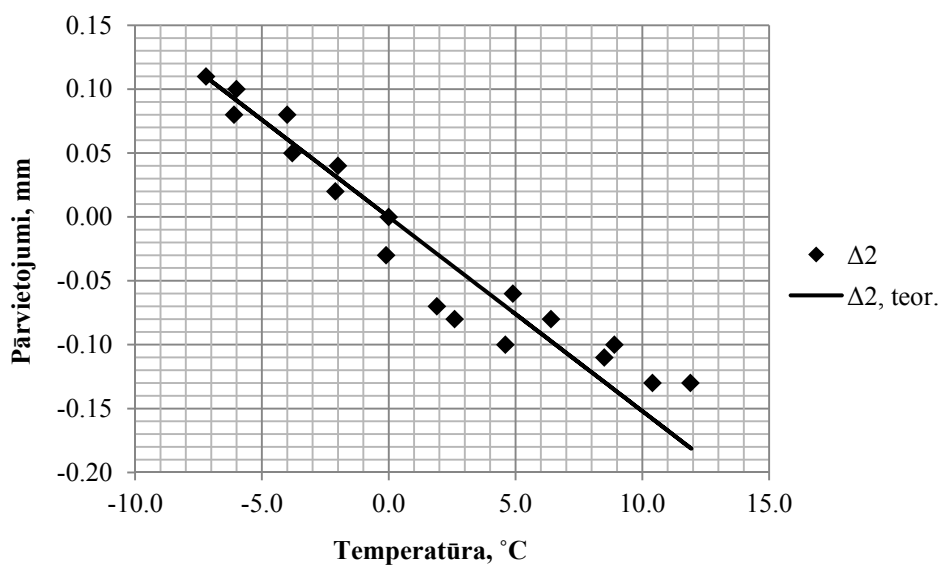
4.4.2. Eksperimentu rezultāti

Eksperimentāli tika noteikti pārvietojumi iekārtās konstrukcijas modeļa laiduma vidū, kā arī iepriekšējā sasprieguma līmeņa maiņa modelim. Rezultāti salīdzināti ar skaitliskajiem rezultātiem, kas iegūti ar GEM programmatūru ANSYS. Rezultāti apkopoti 4.8. tabulā un grafiski attēloti 4.24. att., 4.25. att. un 4.26. att. Eksperimentā iegūtie rezultāti ir līdzīgi aprēķinu ceļā iegūtajiem rezultātiem.

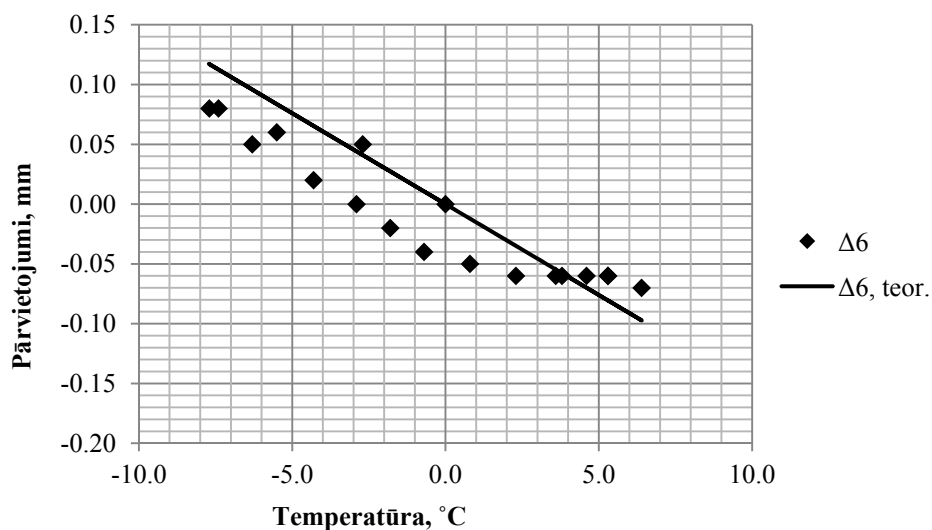
4.8. tabula

Eksperimentālā modeļa pārvietojumu un iepriekšējā sasprieguma līmeņa maiņa atkarībā no temperatūras

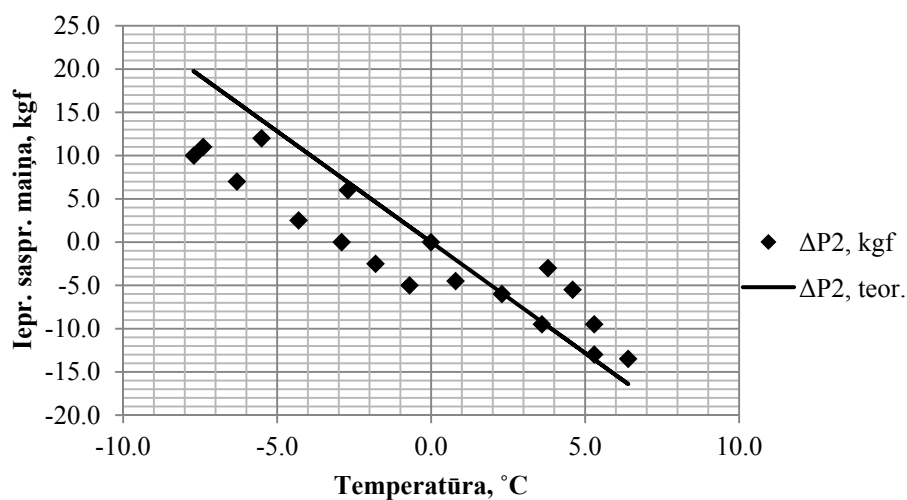
Temp. maiņa Δt_1 , °C	Kreisā zara pārvietojumi laiduma vidū Δ_2 , mm	Kreisā zara teorētiskie pārvietojumi laiduma vidū Δ_2 , teorēt., mm	Δt_2 , °C	Labā zara pārvietojumi laiduma vidū Δ_6 , mm	Labā zara teorētiskie pārvietojumi laiduma vidū Δ_6 , teorēt., mm	Iepriekšējā sasprieguma līmeņa maiņa labajam zaram, ΔP_2 , kgf	Iepriekšējā sasprieguma līmeņa teorētiskā maiņa labajam zaram ΔP_2 , teorēt., kgf
0	0	0	0	0	0	0	0
-2.0	0.04	0.03	-2.7	0.05	0.04	6.0	6.9
-4.0	0.08	0.06	-5.5	0.06	0.08	12.0	14.1
-6.0	0.10	0.09	-7.4	0.08	0.11	11.0	19.0
-7.2	0.11	0.11	-7.7	0.08	0.12	10.0	19.7
-6.1	0.08	0.09	-6.3	0.05	0.10	7.0	16.1
-3.8	0.05	0.06	-4.3	0.02	0.07	2.5	11.0
-2.1	0.02	0.03	-2.9	0.00	0.04	0.0	7.4
-0.1	-0.03	0.00	-1.8	-0.02	0.03	-2.5	4.6
1.9	-0.07	-0.03	-0.7	-0.04	0.01	-5.0	1.8
2.6	-0.08	-0.04	0.8	-0.05	-0.01	-4.5	-2.0
4.6	-0.10	-0.07	2.3	-0.06	-0.03	-6.0	-5.9
8.5	-0.11	-0.13	3.6	-0.06	-0.05	-9.5	-9.2
10.4	-0.13	-0.16	5.3	-0.06	-0.08	-13.0	-13.6
11.9	-0.13	-0.18	6.4	-0.07	-0.10	-13.5	-16.4
8.9	-0.10	-0.14	5.3	-0.06	-0.08	-9.5	-13.6
6.4	-0.08	-0.10	4.6	-0.06	-0.07	-5.5	-11.8
4.9	-0.06	-0.07	3.8	-0.06	-0.06	-3.0	-9.7



4.24. att. Sakarība starp temperatūras maiņu un modeļa pārvietojumiem kreisajam zaram



4.25. att. Sakarība starp temperatūras maiņu un modeļa pārvietojumiem labajam zaram



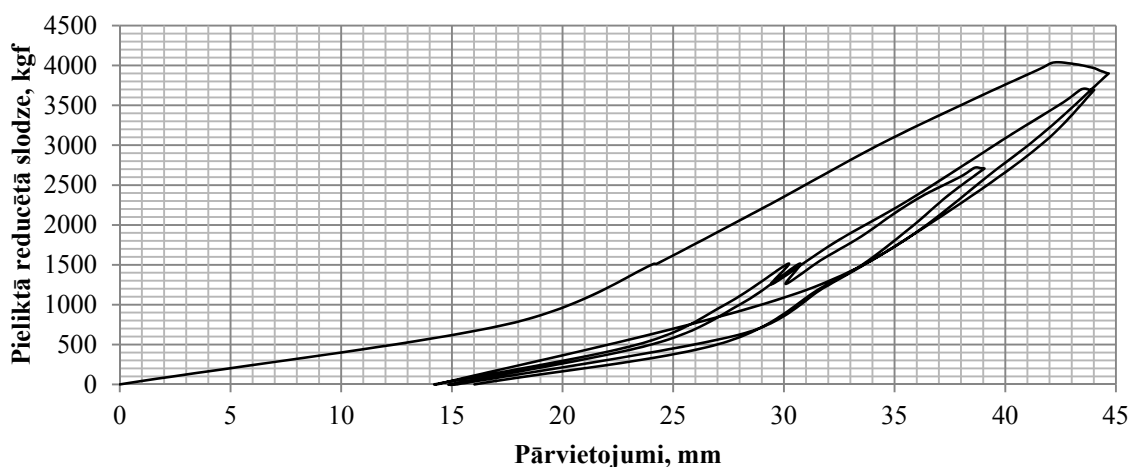
4.26. att. Sakarība starp temperatūras maiņu un modeļa iepriekšējā sasprieguma līmeņa maiņu labajam zaram

4.5. Iepriekš saspriegta iekārtās konstrukcijas modeļa elementu elastības moduļa stabilizācija

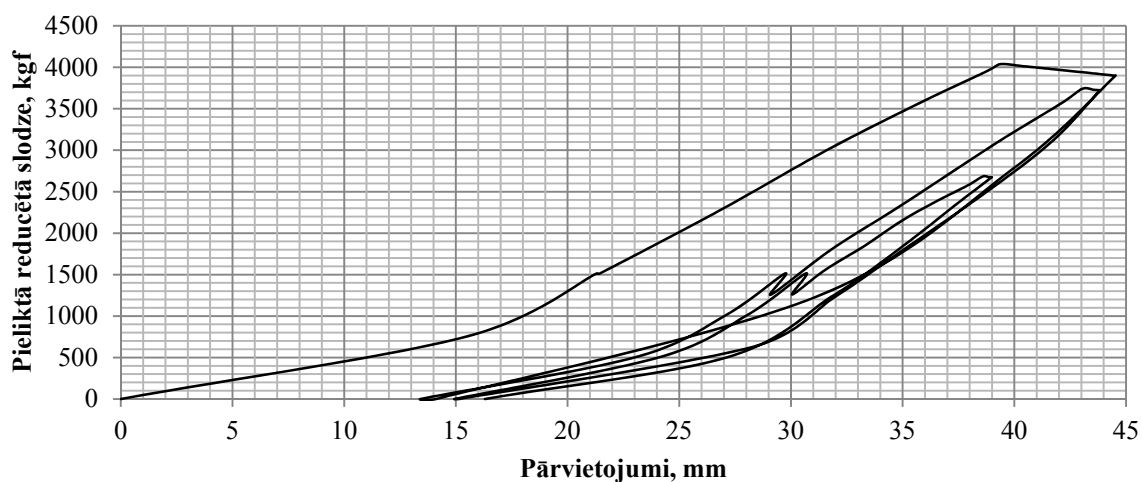
Lai stabilizētu iepriekš saspriegta iekārtās konstrukcijas modeļa troses elementu elastības moduli, t. i., novērstu neelastīgās deformācijas, modelis tika slogots ar slodzi, kas pārsniedz aprēķina slodzi: iepriekšējā sasprieguma līmenis palielināts no 1000 kgf līdz 1200 kgf, t. i., par 20%, pieliktā slodze palielināta no 2755 kgf līdz 2940 kgf, t. i., par 7%.

Pārvietojumi modeļa laiduma vidū fiksēti gan iepriekš saspriedzot konstrukciju, gan

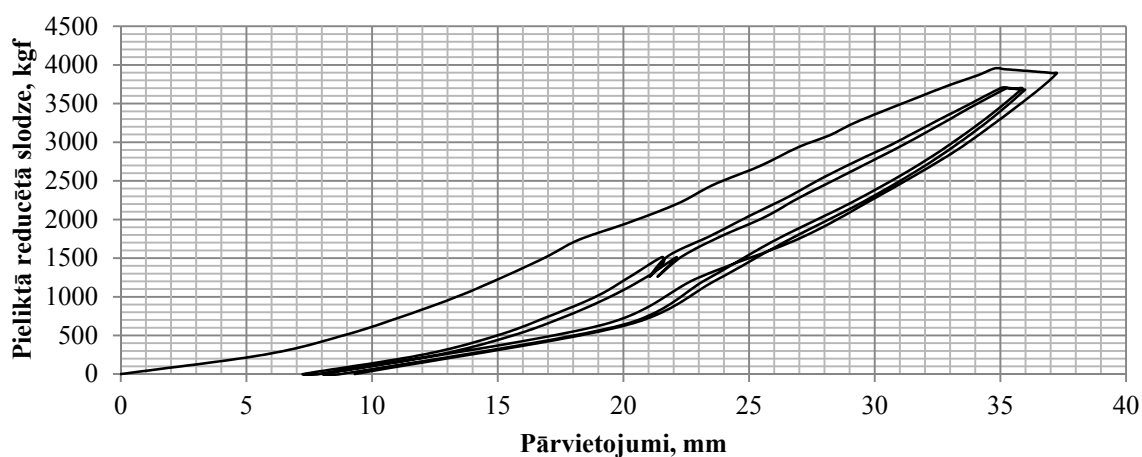
pieliekot slodzi. Lai uz vienas ass varētu atlikt gan iepriekšējā sasprieguma līmeni, gan pielikto slodzi, iepriekšējais saspriegums reducēts uz ekvivalento pielikto slodzi, t. i., ar GEM programmas ANSYS palīdzību pārvietojumiem no iepriekšējā sasprieguma piemeklēta pieliktā slodze, kas izraisītu tādus pašus pārvietojumus, piemēram, iepriekšējā sasprieguma līmenim 1000 kgf atbilst 1260 kgf liela pieliktā slodze. Sakarība starp pielikto slodzi un pārvietojumiem modeļa laiduma vidū kreisajam un labajam zaram parastai trosei un trošu kopnei parādīta 4.27. att. – 4.30. att.



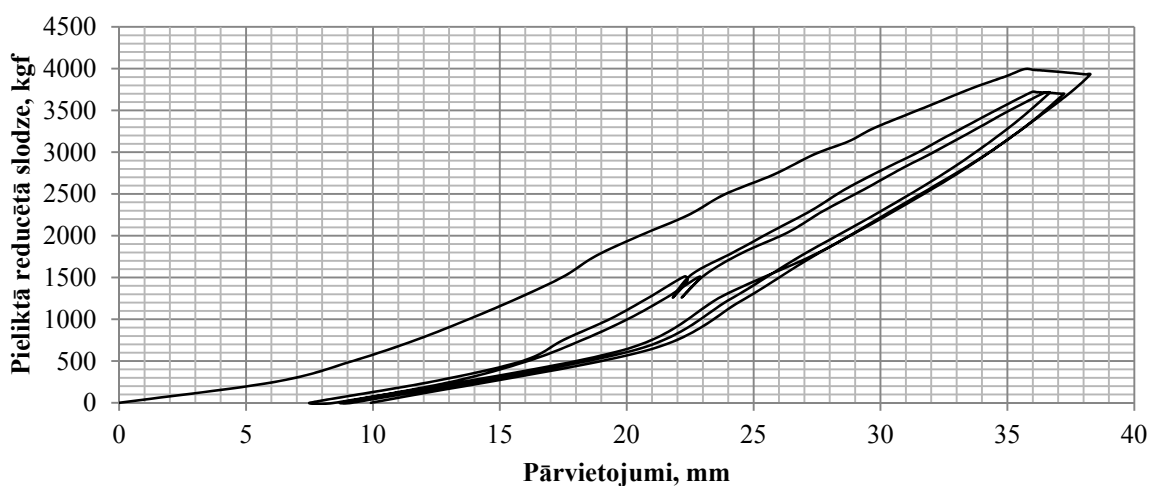
4.27. att. Sakarība starp pārvietojumiem un pielikto slodzi modelim ar atsevišķām nesošajām trosēm laiduma vidū kreisajam zaram



4.28. att. Sakarība starp pārvietojumiem un pielikto slodzi modelim ar atsevišķām nesošajām trosēm laiduma vidū labajam zaram



4.29. att. Sakarība starp pārvietojumiem un pielikto slodzi modelim ar trošu kopnēm laiduma vidū kreisajam zaram



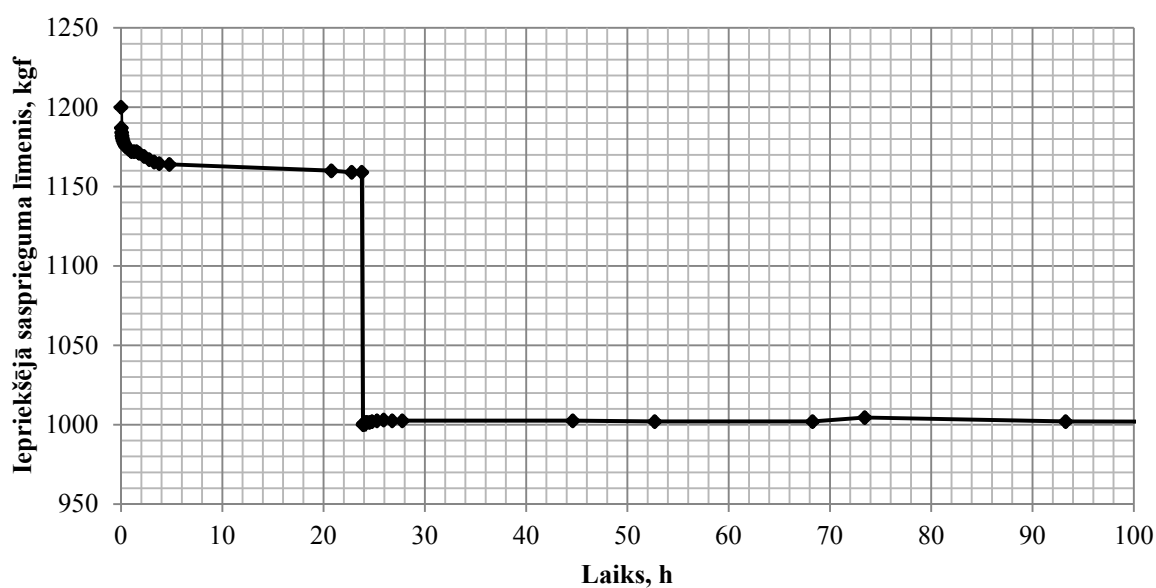
4.30. att. Sakarība starp pārvietojumiem un pielikto slodzi modelim ar trošu kopnēm laiduma vidū labajam zaram

No grafikiem var redzēt, ka paliekošās deformācijas modelim ar trošu kopnēm ir gandrīz divreiz mazākas par deformācijām modelim ar atsevišķām nesošajām trosēm, kā arī deformācijas pirmajā slogošanā modelim ar trošu kopnēm ir ievērojami mazākas. Tās ir trošu kopņu svarīgas priekšrocības.

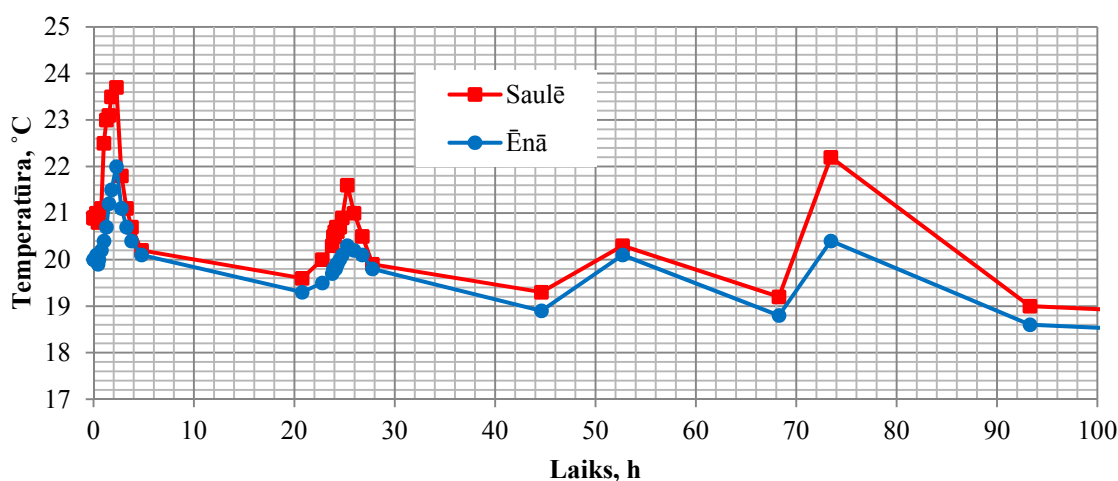
4.6. Iepriekšējā sasprieguma līmeņa zudums laikā

Lai pārbaudītu, kā iepriekšējā sasprieguma līmenis mainās laikā, veikts šāds eksperiments ar jau aprakstīto iepriekš saspriegta iekārtās konstrukcijas modeli ar atsevišķo nesošo trosi. Konstrukcija vispirms tika iepriekš saspriegta līdz sasprieguma līmenim, kas

pārsniedz aprēķina līmeni par 20%, t. i., līdz 1200 kgf, un šādā stāvoklī izturēta vienu dienu, kas ir realizējams arī reālos būvniecības apstākļos. Pēc vienas dienas iepriekšējā sasprieguma līmenis tika samazināts līdz aprēķina līmenim 1000 kgf, un tika novērota sasprieguma līmeņa maiņa. Sakarība starp iepriekšējā sasprieguma līmeņa maiņu un laiku 100 h periodā parādīta 4.31. att. Iepriekšējā sasprieguma zudums pēc 88 dienām samazinājās par 5 kgf, kas ir tikai 0.5% no projektētā līmeņa. Jāpiemin, ka sasprieguma līmeni ietekmē arī temperatūras svārstības. Temperatūra mērīta divās vietās: saulē un ēnā. Temperatūras maiņa 100 h periodā ir parādīta 4.32. att. Temperatūra svārstījās par 5 °C.



4.31. att. Iepriekšējā sasprieguma līmeņa zudums laikā



4.32. att. Temperatūras maiņa laikā

5. IEPRIEKŠ SASPRIEGTAS IEKĀRTĀS KONSTRUKCIJAS DINAMIKA

Dinamisko aprēķinu veikšana ir reglamentēta tiltu projektēšanas sastāvdaļa [2, 14]. Šajā nodaļā izstrādāta un pārbaudīta vienkāršota iepriekš saspriegto iekārto konstrukciju pašsvārstību frekvenču noteikšanas metode, kas paver iespēju vienkāršot aprēķinus konstrukciju variantu izstrādes procesā.

5.1. Pašsvārstību frekvenču noteikšanas metodikas izstrāde iepriekš saspriegtai iekārtai konstrukcijai

Iekārto konstrukciju pašsvārstību frekvenču noteikšanai pēc [118] ieteikumiem var izmantot vienkāršotas izteiksmes (5.1) 1, 3, ... svārstību formai un (5.2) 2, 4, ... svārstību formai. Pēc (5.1) un (5.2) formulām pašsvārstību frekvences var noteikt plakanai sistēmai.

$$\omega_{v,i} = \sqrt{\frac{i^4 \pi^4 EI}{l^4 m} + H \frac{i^2 \pi^2}{l^2 m} + \left(\frac{2}{\pi}\right)^6 \frac{8\pi^4 E_c A_c f^2}{i^2 L_c l^3 m}}, \quad (5.1)$$

$$\omega_{v,i} = \sqrt{\frac{i^4 \pi^4 EI}{l^4 m} + H \frac{i^2 \pi^2}{l^2 m}}, \quad (5.2)$$

kur i – svārstību formas numurs;
 $\omega_{v,i}$ – vertikālo svārstību leņķiskā frekvence;
 EI – stinguma sijas lieces stingums;
 l – laidums;
 m – 1 m laiduma masa;
 H – nesošās troses horizontālā balstbīde;
 E_c – nesošās troses elastības modulis;
 A_c – nesošās troses šķērsriezuma laukums;
 f – nesošās troses nokare;
 L_c – nesošās troses garums.

Zemsaknes izteiksmi formulās (5.1) un (5.2) var sadalīt šādās komponentēs:

$$\alpha_1 = \frac{i^4 \pi^4 EI}{l^4 m} - \text{atkarīga no stinguma sijas;}$$

$$\alpha_2 = H \frac{i^2 \pi^2}{l^2 m} - \text{atkarīga no nesošās troses balstbīdes};$$

$$\alpha_3 = \left(\frac{2}{\pi}\right)^6 \frac{8\pi^4 E_c A_c f^2}{i^2 L_c l^3 m} - \text{atkarīga no nesošās troses parametriem}.$$

Tā kā iepriekš saspriegtajai iekārtajai konstrukcijai atšķirībā no parastiem iekārtajiem tiltiem ir vēl stabilizācijas troses, ievēdīsim vēl divas komponentes stabilizācijas trosei:

$$\alpha_4 = H_s \frac{i^2 \pi^2}{l^2 m} - \text{atkarīga no stabilizācijas troses balstbīdes};$$

$$\alpha_5 = \left(\frac{2}{\pi}\right)^6 \frac{8\pi^4 E_{c,s} A_{c,s} f_s^2}{i^2 L_{c,s} l^3 m} - \text{atkarīga no stabilizācijas troses parametriem},$$

kur H_s – horizontālā stabilizācijas troses balstbīde;

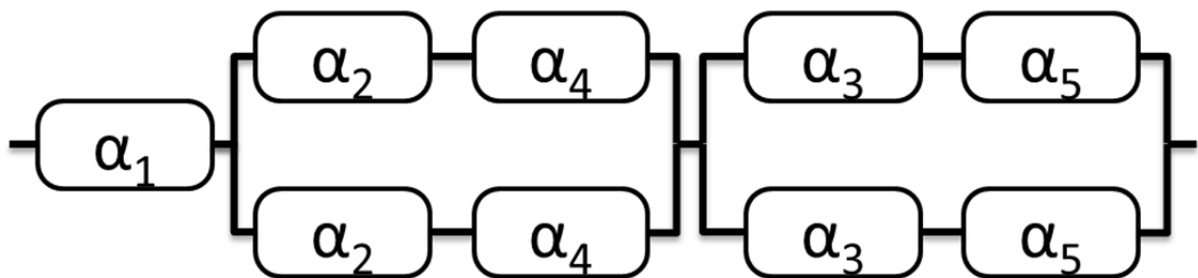
$E_{c,s}$ – stabilizācijas troses elastības modulis;

$A_{c,s}$ – stabilizācijas troses šķērsriezuma laukums;

f_s – stabilizācijas troses nokare;

$L_{c,s}$ – stabilizācijas troses garums.

Iepriekšējais saspriegums ievērtēts, ņemot vērā palielināto nesošās troses balstbīdi un stabilizācijas troses balstbīdi. (5.1) un (5.2) formulas sastādītas plakana sistēmai. Sastādīsim vienādojumus telpiskai sistēmai, pieņemot, ka nesošā trose un stabilizācijas trose izvietotas rindā, bet kreisais un labais zars – paralēli (5.1. att.).



5.1. att. Komponentu izvietojuma shēma

Sastādām pašsvārstību frekvences noteikšanas vienādojumus 1, 3, ... svārstību formai (5.3) un 2, 4, ... svārstību formai (5.4):

$$\omega_{v,i} = \sqrt{\alpha_1 + \frac{\alpha_2 + \alpha_4}{2} + \frac{\alpha_3 + \alpha_5}{2}}, \quad (5.3)$$

$$\omega_{v,i} = \sqrt{\alpha_1 + \frac{\alpha_2 + \alpha_4}{2}}, \quad (5.4)$$

kur

$$\alpha_1 = \frac{i^4 \pi^4 EI}{l^4 m}, \quad (5.5)$$

$$\alpha_2 = H \frac{i^2 \pi^2}{l^2 m}, \quad (5.6)$$

$$\alpha_3 = \left(\frac{2}{\pi}\right)^6 \frac{8\pi^4 E_c A_c f^2}{i^2 L_c l^3 m}, \quad (5.7)$$

$$\alpha_4 = H_s \frac{i^2 \pi^2}{l^2 m}, \quad (5.8)$$

$$\alpha_5 = \left(\frac{2}{\pi}\right)^6 \frac{8\pi^4 E_{c,s} A_{c,s} f_s^2}{i^2 L_{c,s} l^3 m}. \quad (5.9)$$

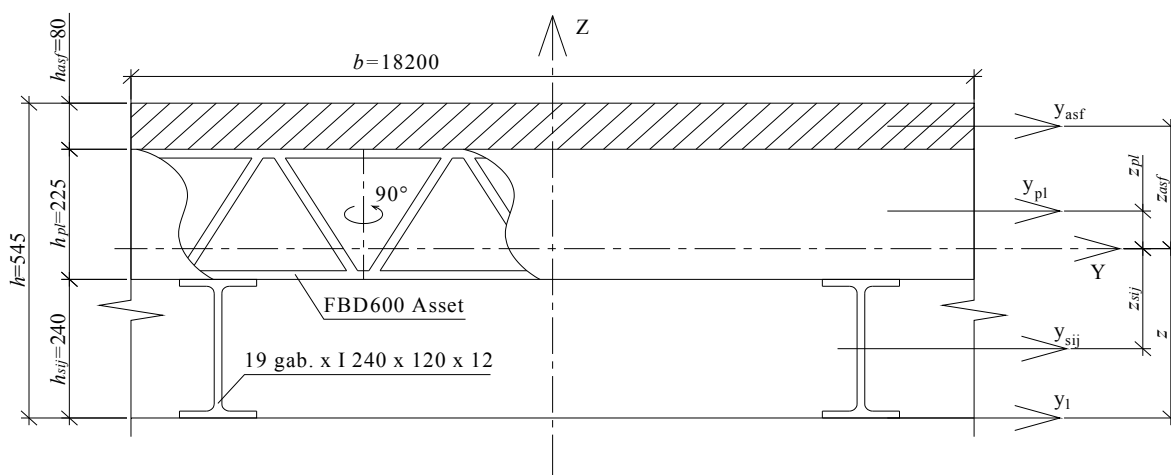
Pēc šīm formulām var aptuveni noteikt iepriekš saspriestu iekārto konstrukciju pašsvārstību frekvences.

5.2. Iepriekš saspriestas iekārtā tilta laiduma konstrukcijas pašsvārstību frekvenču analītisks aprēķins

Iepriekš saspriestas iekārtā tilta konstrukcijas, kuras laidums ir 200 m, pašsvārstību frekvences tika noteiktas pēc izstrādātās vienkāršotās metodes.

5.2.1. Tilta konstrukcijas šķēsgriezuma ģeometrisko raksturlielumu noteikšana

Tilta šķēsgriezuma shēma ir parādīta 5.2. att.



5.2. att. Tilta šķērsriezuma shēma

Sastāvdaļu ģeometriskie raksturlielumi ir šādi.

Sijām:

inerces moments – $I_{y,sij} = 19 \cdot 4.891 \cdot 10^{-5} = 9.293 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$;

laukums – $A_{sij} = 19 \cdot 5.596 \cdot 10^{-3} = 0.106 \text{ m}^2$;

elastības modulis – $E_{sij} = 28\,000 \text{ MPa}$.

Plātnei:

inerces moments – $I_{y,pl} = 18.2 \cdot 4.256 \cdot 10^{-4} = 77.459 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$;

laukums – $A_{pl} = 18.2 \cdot 5.4252 \cdot 10^{-2} = 0.987 \text{ m}^2$;

elastības modulis – $E_{pl} = 20\,000 \text{ MPa}$.

Asfaltbetona segumam:

inerces moments – $I_{y,asf} = 18.2 \cdot 0.08^3 / 12 = 7.765 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$;

laukums – $A_{asf} = 18.2 \cdot 0.08 = 1.456 \text{ m}^2$;

elastības modulis – $E_{asf} = 400 \text{ MPa}$.

Ģeometriskos raksturlielumus reducēsim uz siju materiālu.

Šķērsriezuma reducētais laukums:

$$A_{ef} = A_{sij} + A_{pl} \cdot \frac{E_{pl}}{E_{sij}} + A_{asf} \cdot \frac{E_{asf}}{E_{sij}} = 0.832 \text{ m}^2.$$

Laukuma daļu statisko momentu summa pret y_1 asi:

$$S_{ef,1} = A_{sij} \cdot \frac{h_{sij}}{2} + A_{pl} \cdot \left(h_{sij} + \frac{h_{pl}}{2} \right) \cdot \frac{E_{pl}}{E_{sij}} + A_{asf} \cdot \left(h - \frac{h_{asf}}{2} \right) \cdot \frac{E_{asf}}{E_{sij}} = 0.2717 \text{ m}^3 .$$

Šķēluma neitrālās ass attālums no y_1 ass:

$$z = \frac{S_{ef,1}}{A_{ef}} = 0.3265 \text{ m} .$$

Attālumi no šķērsriezuma neitrālās ass līdz katras sastāvdaļas neitrālajai asij:

$$z_{sij} = z - \frac{h_{sij}}{2} = 0.2065 \text{ m} ; z_{pl} = h_{sij} + \frac{h_{pl}}{2} - z = 0.026 \text{ m} ; z_{asf} = h - \frac{h_{asf}}{2} - z = 0.1785 \text{ m} .$$

Šķērsriezuma inerces moments:

$$\begin{aligned} I_{ef,y} &= \left(I_{y,sij} + A_{sij} \cdot z_{sij}^2 \right) + \left(I_{y,pl} + A_{pl} \cdot z_{pl}^2 \right) \cdot \frac{E_{pl}}{E_{sij}} + \left(I_{y,asf} + A_{asf} \cdot z_{asf}^2 \right) \cdot \frac{E_{asf}}{E_{sij}} = \\ &= 5.45 \cdot 10^{-3} + 6.01 \cdot 10^{-3} + 0.67 \cdot 10^{-3} = 12.13 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4 . \end{aligned}$$

5.2.2. Pašsvārstību frekvenču noteikšana

Izejas dati ir šādi:

klāja elastības modulis –	$E = 28 \text{ GPa} = 28 \cdot 10^8 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} ;$
trošes elastības modulis –	$E_c = E_{c,s} = 167 \text{ GPa} = 167 \cdot 10^8 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} ;$
klāja konstrukcijas inerces moments –	$I = 12.13 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4 ;$
konstrukcijas laidums –	$l = 200 \text{ m} ;$
nesošās trošes šķērsriezuma laukums –	$A_c = 4.66 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 ;$
stabilizācijas trošes šķērsriezuma laukums –	$A_{c,s} = 4.40 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 ;$
nesošās trošes nokare –	$f = 20 \text{ m} ;$
stabilizācijas trošes nokare –	$f_s = 10 \text{ m} ;$
nesošās trošes garums –	$L_c = 205.33 \text{ m} ;$

stabilizācijas troses nokare –	$L_{c,s} = 201.33 \text{ m};$
nenoslogota tilta masa –	$G_1 = 1142 \text{ t};$
nenoslogota tilta 1 m laiduma masa –	$m_1 = G_1 / l = 13.92 \text{ t/m};$
maksimāli noslogota tilta masa –	$G_2 = 2785 \text{ t};$
maksimāli noslogota tilta 1 m laiduma masa –	$m_2 = G_2 / l = 5.71 \text{ t/m}.$

Ar ANSYS programmatūras palīdzību noteikta balstbīde nenoslogotam un noslogotam tiltam.

Nenoslogotam tiltam:

nesošās troses balstbīde –	$H = 2776.5 \text{ t}\cdot\text{m/s}^2;$
stabilizācijas troses balstbīde –	$H_s = 5006.7 \text{ t}\cdot\text{m/s}^2;$

Maksimāli noslogotam tiltam:

nesošās troses balstbīde –	$H = 3260.0 \text{ t}\cdot\text{m/s}^2;$
stabilizācijas troses balstbīde –	$H_s = 4807.9 \text{ t}\cdot\text{m/s}^2.$

Pašsvārstību frekvence noteikta pēc formulām:

$$\omega_{v,i} = \sqrt{\alpha_1 + \frac{\alpha_2 + \alpha_4}{2} + \frac{\alpha_3 + \alpha_5}{2}} \text{ – nepāra svārstību formām,}$$

$$\omega_{v,i} = \sqrt{\alpha_1 + \frac{\alpha_2 + \alpha_4}{2}} \text{ – pāra svārstību formām,}$$

kur $\alpha_1 = \frac{i^4 \pi^4 EI}{l^4 m}; \alpha_2 = H \frac{i^2 \pi^2}{l^2 m}; \alpha_3 = \left(\frac{2}{\pi}\right)^6 \frac{8\pi^4 E_c A_c f^2}{i^2 L_c l^3 m}; \alpha_4 = H_s \frac{i^2 \pi^2}{l^2 m};$

$$\alpha_5 = \left(\frac{2}{\pi}\right)^6 \frac{8\pi^4 E_{c,s} A_{c,s} f_s^2}{i^2 L_{c,s} l^3 m}.$$

Rezultāti apkopoti 5.1. tabulā.

Pašsvārstību frekvences 200 m laiduma tiltam

	Pašsvārstību formas numurs			
	1	2	3	4
Nenoslogots tilts				
Pašsvārstību frekvence ω_i , Hz	1.1	0.8	1.3	1.7
Periods T , s	5.7	7.6	4.9	3.7
Pilnīgi noslogots tilts				
Pašsvārstību frekvence ω_i , Hz	0.7	0.5	0.8	1.1
Periods T , s	8.8	11.7	7.5	5.8

Iegūtie rezultāti ir ticami un ir salīdzināmi ar [118] piemērā iegūtajiem rezultātiem iekārtajam tiltam.

5.2.3. Iegūto dinamisko raksturlielumu novērtēšana

Vertikālo svārstību periods mainās robežās: $T_v = (3.7 \div 11.7)$ s. Ievērojot teorijas 20% neprecizitāti, iegūstam: $T_v = (3.0 \div 14.0)$ s.

Eirokodeksā [21] noteikts, ka pašsvārstību periods nedrīkst būt robežās: $T_v \neq (0.33 \div 1.0)$ s.

СНиП 2.05.03-84 (Tilti un caurules) [135] paredz, ka pašsvārstību periodam nedrīkst būt robežās: $T_v \neq (0.45 \div 0.6)$ s.

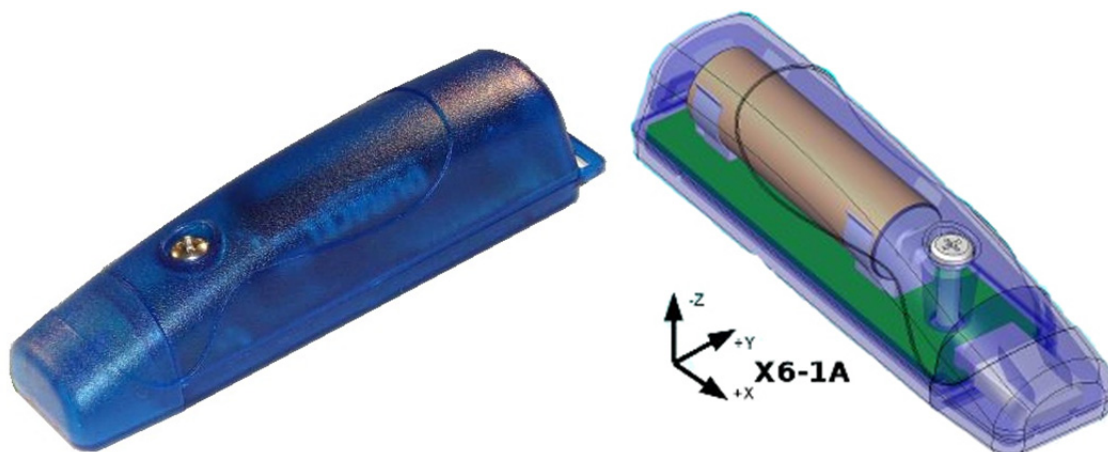
Tehniskos dzelzceļu, automobiļu un pilsētas tiltu un cauruļu projektēšanas noteikumos СН 200-62 [134] noteikts, ka pašsvārstību periodam nedrīkst būt robežās: $T_v \neq (0.3 \div 0.7)$ s.

Līdz ar to darbā noteiktās iepriekš saspriegtā tilta vertikālo pašsvārstību frekvences atbilst minētajām normām.

5.3. Pašsvārstību frekvenču un formu eksperimentāla noteikšana iepriekš saspieltas iekārtās konstrukcijas modelim

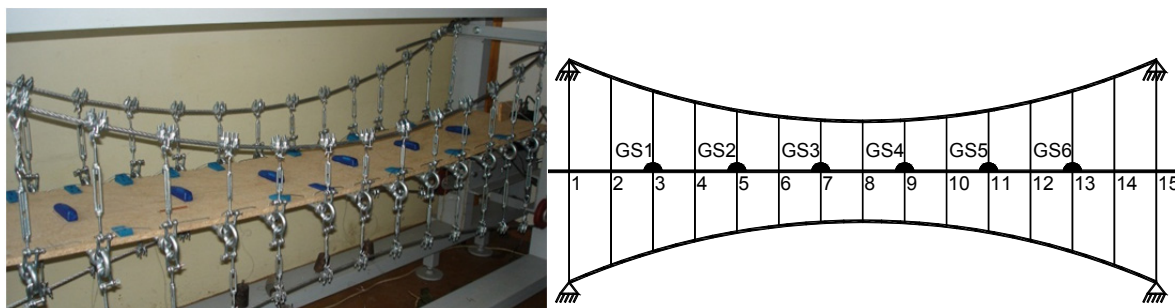
5.3.1. Eksperimenta apraksts

Lai noteiktu pašsvārstību frekvences iepriekš saspieltas konstrukcijas modelim, izmantoti paātrinājuma mērītāji (5.3. att.).



5.3. att. Paātrinājuma mērītāji

Paātrinājuma mērītāji (6 gab.) uzstādīti konstrukcijas punktos 3, 5, 7, 9, 11 un 13 (5.4. att.). Paātrinājuma mērītāji mēra paātrinājumu konkrētajā laika momentā ar intervālu 0.006255 s un iegūtos rezultātus ieraksta iekšējā atmiņā. Dati pēc eksperimenta pabeigšanas pārrakstīti datorā.



5.4. att. Paātrinājuma mērītāju izvietojuma shēma

Konstrukcijas vertikālo svārstību ierosināšanai tika nogriezts 20 kgf piekarinātais atsvars (5.5. att.). Atsvars bija piekarināts punktā 13. Šis punkts izvēlēts tādēļ, lai netiktu aplēptas kādas svārstību formas, kas varētu notikt, piemēram, ierosinot svārstības pa vidu.



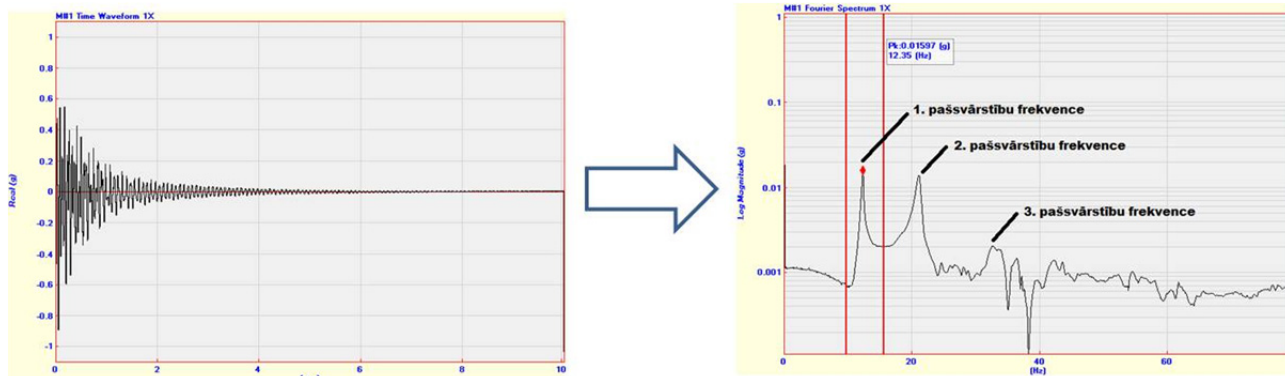
5.5. att. Svārstību ierosināšana, veicot atsvara nogriešanu

Eksperimenti veikti sešiem iepriekšējā sasprieguma līmeņiem: 0, 200, 400, 600, 800 un 1000 kgf, kas atbilst šādiem spriegumiem stabilizācijas vantī: 0, 69.7, 139.4, 209.1, 278.7 un 348.4 MPa.

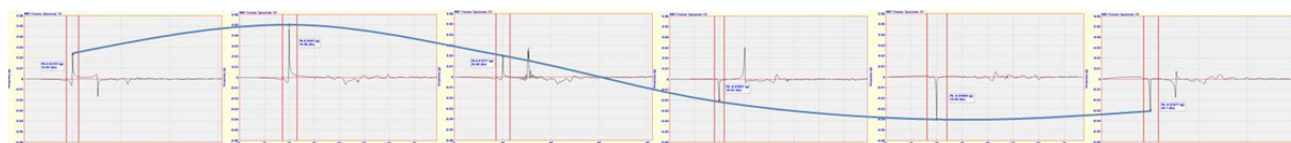
Horizontālo svārstību ierosināšanai konstrukcija tika slogota ar 20 kgf lielu horizontālo slodzi punktā 13, kura pēkšņi tika noņemta. Eksperiments notika pie iepriekšējā sasprieguma līmeņa 1000 kgf (348.4 MPa).

5.3.2. Eksperimenta datu apstrāde

Ar paātrinājuma mērītājiem iegūto datu apstrādei izmantota programmatūra ME'scopeVES, kas paātrinājuma-laika sakarību pārvērš par frekvences-atbildes funkciju, izmantojot Furjē transformācijas algoritmu (5.6. att.). Frekvences-atbildes funkcija sastāv no reālās un imaginārās komponentes jeb no magnitūdas un fāzes. No magnitūdas-frekvences grafika var noteikt pašsvārstību frekvences (5.6. att.), bet no imaginārās daļas – pašsvārstību formu, grafiski savienojot imaginārās daļas grafika maksimumus, iegūtus no katra mērītāja katrai pašsvārstību frekvencei (5.7. att.) [76].



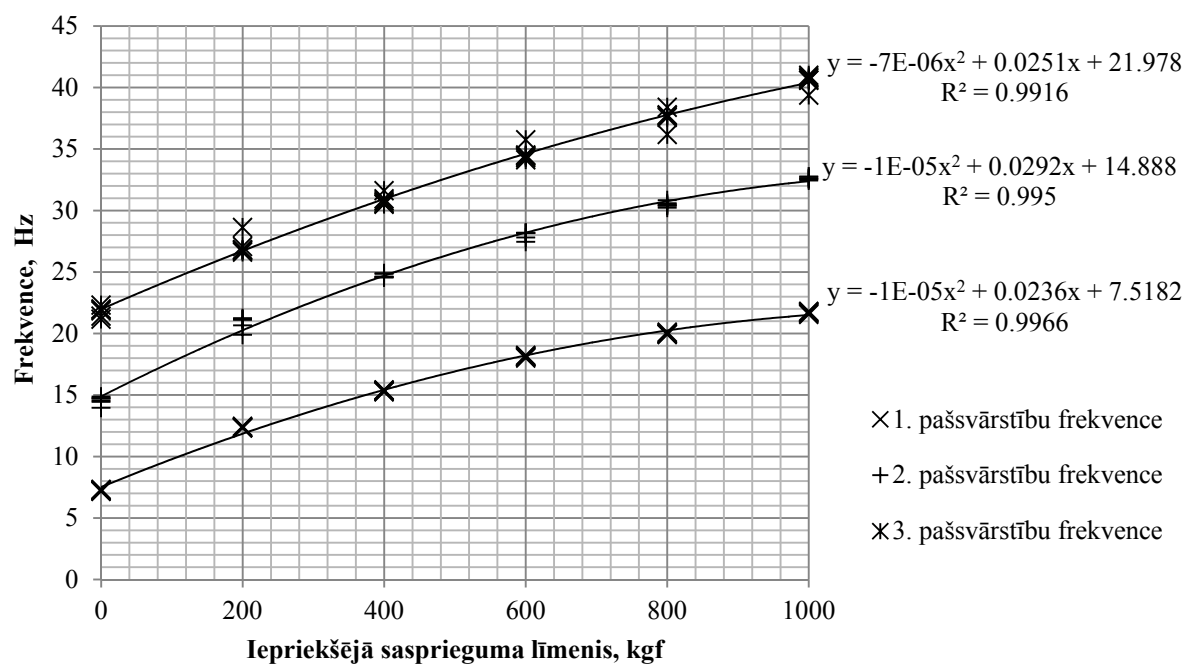
5.6. att. Paātrinājuma-laika sakarības pārvēršana par frekvences-atbildes funkciju



5.7. att. Pašsvārstības formas noteikšana

5.3.3. Eksperimentu rezultāti

Eksperimentāli no devējiem iegūtās pašsvārstību frekvences pirmajām trīs frekvencēm ir apkopotas 5.2. tabulā. Sakarība starp iepriekšējā sasprieguma līmeni un pašsvārstību frekvenci, kā arī datu aproksimācijas līknes un 2. kārtas polinomi ir parādīti 5.8. att. Horizontālā virziena pašsvārstību frekvences ir apkopotas 5.3. tabulā.



5.8. att. Sakarības starp iepriekšējā sasprieguma līmeni un pašsvārstību frekvencēm un aproksimācijas vienādojumi

5.2. tabula

Pašsvārstību frekvences vertikālā virzienā

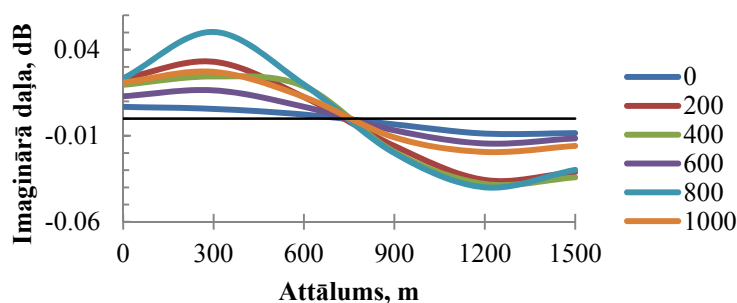
Iepriekšējā sasprieguma līmenis P , kgf	1. pašsvārstību frekvence, Hz						
	GS 1	GS 2	GS 3	GS 4	GS 5	GS 6	Vid.
0	7.18	7.27	7.18	7.33	7.23	7.26	7.24
200	12.37	12.32	12.36	12.35	12.46	12.39	12.38
400	15.26	15.33	15.28	15.40	15.35	15.42	15.34
600	18.18	18.23	18.11	18.11	18.00	18.10	18.12
800	19.95	19.97	20.11	19.92	19.99	20.06	20.00
1000	21.71	21.69	21.77	21.56	21.80	21.62	21.69
2. pašsvārstību frekvence, Hz							
0	14.56	14.44	14.75	14.87	13.96	14.71	14.55
200	21.14	20.66	21.24	21.12	20.79	21.18	21.02
400	24.63	24.55	24.59	24.85	24.58	24.9	24.68
600	28.19	27.8	28.17	28.17	27.45	28.15	27.99
800	30.42	30.22	30.83	30.38	30.49	30.59	30.49
1000	32.61	32.54	32.75	32.44	32.75	32.58	32.61
3. pašsvārstību frekvence, Hz							
0	21.84	21.41	21.93	22.31	22	21.17	21.78
200	28.62	26.72	26.62	26.79	26.82	27.07	27.11
400	31.61	30.66	30.56	30.79	30.51	30.95	30.85
600	35.75	34.45	34.41	34.51	34.12	34.28	34.59
800	38.4	37.57	37.78	37.72	36.18	37.72	37.56
1000	40.59	40.75	40.99	40.6	39.38	40.86	40.53

5.3. tabula

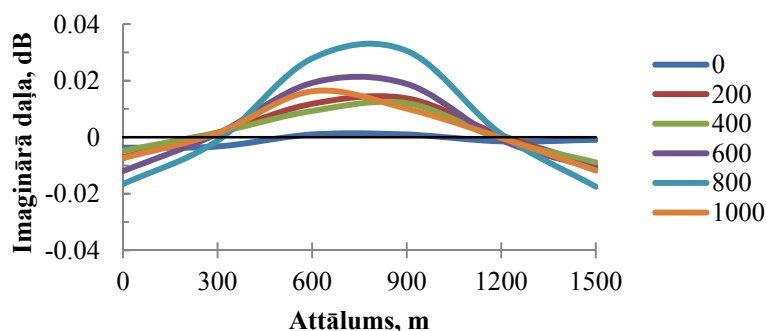
Pašsvārstību frekvences horizontālā virzienā, Hz

Pašsvārstību frekvence	GS 1	GS 2	GS 3	GS 4	GS 5	GS 6	Vid.
1. frekvence	6.86	6.81	6.89	6.83	6.82	6.82	6.84
2. frekvence	8.43	8.46	8.87	8.54	8.52	8.52	8.56
3. frekvence	27.23	27.48	27.92	27.68	27.69	27.54	27.59

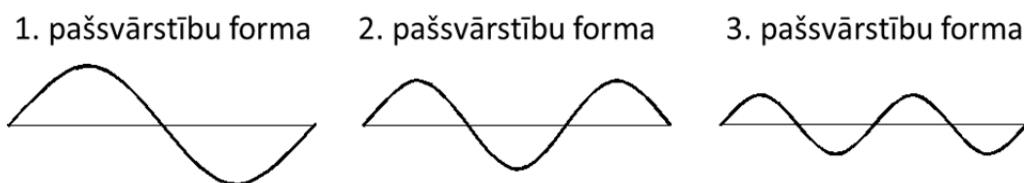
Svārstību forma pirmajām divām pašsvārstību frekvencēm vertikālā virzienā ir parādīta 5.9. att. un 5.10. att. Svārstību formu 3. frekvencei nebija iespējams precīzi noteikt. Tā kā konstrukcijas laidums ir 2100 mm un klāja gali nav nostiprināti, var secināt, ka pirmā svārstību forma sastāv no diviem pusviļņiem, otrā un trešā – attiecīgi no trim un četriem pusviļņiem. Svārstību formas ir parādītas 5.11. att.



5.9. att. 1. pašsvārstību frekvences svārstību forma



5.10. att. 2. pašsvārstību frekvences svārstību forma



5.11. att. Pašsvārstību formas

Autors izteic pateicības RTU Būvmehānikas katedrai un personīgi profesoram I. Radiņam un lektorei L. Gailei par iespēju lietot paātrinājuma mērīšanas aparāturu, kā arī par padomiem un konsultācijām mērinstrumentu efektīvai izmantošanai un datu apstrādei.

5.3.4. Modeļa pašsvārstību frekvenču noteikšana analītiskā veidā

Izejas dati:

klāja elastības modulis – $E = 2.3 \text{ GPa} = 2.3 \cdot 10^8 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$;

trošes elastības modulis – $E_c = E_{c,s} = 60 \text{ GPa} = 60 \cdot 10^8 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$;

klāja augstums – $h = 0.012 \text{ m}$;

klāja platums –	$b = 0.4 \text{ m};$
klāja inerces moments –	$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = 5.76 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4;$
konstrukcijas laidums –	$l = 2.1 \text{ m};$
nesošās troses šķērsriezuma laukums –	$A_c = 4.49 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2;$
stabilizācijas troses šķērsriezuma laukums –	$A_{c,s} = 2.87 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2;$
nesošās troses nokare –	$f = 0.275 \text{ m};$
stabilizācijas troses nokare –	$f_s = 0.174 \text{ m};$
nesošās troses garums –	$L_c = 2.196 \text{ m};$
stabilizācijas troses nokare –	$L_{c,s} = 2.138 \text{ m};$
modeļa pašsvars –	$G = 45.3 \text{ kgf};$
1 m laiduma masa –	$m = G / l = 21.57 \text{ kgf} / \text{m};$

Ar ANSYS programmatūras palīdzību noteiktas balstbīdes vērtības dažādiem iepriekšējā sasprieguma līmeņiem (5.4. tabula).

5.4. tabula

Balstbīde atkarībā no sasprieguma līmeņa

Sasprieguma līmenis P , kgf	Sasprieguma līmenis, MPa	Nesošās troses balstbīde H , kgf·m/s ²	Stabilizācijas troses balstbīde H_s , kgf·m/s ²
200	69.7	200	112.5
400	139.4	400	205.4
600	209.1	600	295.6
800	278.7	800	383.5
1000	348.4	1000	464.9

Pašsvārstību frekvence noteikta pēc formulām:

$$\omega_{v,i} = \sqrt{\alpha_1 + \frac{\alpha_2 + \alpha_4}{2} + \frac{\alpha_3 + \alpha_5}{2}} \text{ – nepāra svārstību formām,}$$

$$\omega_{v,i} = \sqrt{\alpha_1 + \frac{\alpha_2 + \alpha_4}{2}} \text{ – pāra svārstību formām,}$$

kur $\alpha_1 = \frac{i^4 \pi^4 EI}{l^4 m}$; $\alpha_2 = H \frac{i^2 \pi^2}{l^2 m}$; $\alpha_3 = \left(\frac{2}{\pi}\right)^6 \frac{8\pi^4 E_c A_c f^2}{i^2 L_c l^3 m}$; $\alpha_4 = H_s \frac{i^2 \pi^2}{l^2 m}$;

$$\alpha_5 = \left(\frac{2}{\pi}\right)^6 \frac{8\pi^4 E_{c,s} A_{c,s} f_s^2}{i^2 L_{c,s} l^3 m}.$$

Rezultāti apkopoti 5.5. tabulā.

5.5. tabula

Pašsvārstību frekvences iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas modelim

Iepriekšējā sasprieguma līmenis P , kgf	Pašsvārstību formas numurs		
	2	3	4
	Pašsvārstību frekvence ω_i , Hz		
200	10.7	23.8	32.4
400	13.2	26.5	35.9
600	15.3	28.9	39.1
800	17.2	31.2	42.1
1000	18.8	33.2	44.8

No eksperimenta noskaidrots, ka iepriekš saspriegtai iekārtajai konstrukcijai ar zema stinguma klāju pirmā pašsvārstību forma ar vienu pusvilni neparādās.

Pārbaudīsim iegūtā teorētiskā modeļa adekvātumu. Rezultāti ir apkopoti 5.6. tabulā.

5.6. tabula

Eksperimentāli un teorētiski iegūto pašsvārstību frekvenču salīdzinājums

Iepriekšējā sasprieguma līmenis P , kgf	Pašsvārstību formas numurs		
	2	3	4
	Starpība starp eksperimentāli un analītiski iegūtajām frekvencēm, %		
200	-15.9	11.5	16.2
400	-16.0	6.8	14.1
600	-18.2	3.2	11.6
800	-16.5	2.1	10.7
1000	-15.4	1.8	9.4

Maksimālā starpība ir -18.2%. Pašsvārstību frekvenču noteikšanas formulās var ievadīt mijiedarbības locekli, bet darba uzdevumos jāiegūst formulas aptuvenai pašsvārstību frekvenču noteikšanai. Tā kā pašsvārstību frekvenču noteikšanas iegūtās formulas balstās uz fizikāliem parametriem, mēroga faktors rezultātus neietekmēs.

SECINĀJUMI

Izstrādāts risinājums liellaiduma iepriekš saspriegtai divjoslu konstrukcijai, kuras nesošā josla veidota kā trošu kopne, kurā ietilpstošie stieņi neuzņem spiedes piepūles. Darba ietvaros ir optimizēts šīs kopnes apveids un topoloģija nolūkā iegūt risinājumu ar materiālu patēriņu, kas ekvivalents atsevišķai nesošai trosei, bet kas nodrošina ievērojami lielāku konstrukcijas stingumu. Darba ietvaros izstrādāti trošu kopnes aprēķina un optimizācijas algoritmi, noskaidrotas šādas kopnes priekšrocības uz iekārta tilta piemēra bāzes.

- Iepriekš saspriegtās tērauda trošu kopnes ar ieliektām joslām, optimizētu joslu apveidu un ar krustveida režģi ar optimizētu topoloģiju izmantošana būtiski samazina iepriekš saspriegtās iekārtas konstrukcijas pārvietojumus – laiduma intervālā no 50 līdz 350 m iepriekš saspriegtās divjoslu trošu konstrukcijas ar piedāvātajām trošu kopnēm teorētiskie pārvietojumi ir par 26–30% mazāki salīdzinājumā ar konstrukciju, kurā izmantotas atsevišķas nesošās troses. Izstrādātais šādas kopnes aprēķina algoritms GEM programmatūrai ANSYS automātiski pēc dotajiem parametriem veic minētās konstrukcijas aprēķinu, un tas var tikt operatīvi pārveidots citu, ar piedāvāto trošu kopni saistītu, uzdevumu risināšanai. Izmantojot ģenētisko algoritmu MatLAB programmēšanas vidē, izstrādātais trošu kopnes optimizācijas algoritms ātri nosaka konstrukcijas racionālus parametrus liela faktoru skaita gadījumā. No konstrukcijas stinguma viedokļa racionāli trošu kopnes parametri laidumiem 50, 200 un 350 m pie apakšjoslas nokares 1/10 laiduma ir: attiecība starp augšjoslas un apakšjoslas nokari šiem laidumiem ir attiecīgi 0.429, 0.510 un 0.536; attiecība starp apakšjoslas materiāla patēriņu un trošu kopnes kopējo materiāla patēriņu – attiecīgi 0.587, 0.451 un 0.468.
- Iepriekš saspriegtās divjoslu trošu konstrukcijas tērauda nesošās atsevišķās troses aizvietošana ar hibrīdu kompozītu trosi, kas sastāv no vidējā CFRP (ar oglekļa šķiedrām stiegrots plastiks) slāņa un pa troses garumu mainīga šķērsriezuma tērauda ārējiem slāņiem, ievērojami samazina trošu pašsvaru – 200 m laiduma un statiskas slodzes gadījumā pašsvara samazinājums sasniedz trīs reizes. Viens no iemesliem, kas rada šādu samazinājumu, ir racionāls tērauda sadalījums pa troses garumu, kas nodrošina praktiski vienmērīgu spriegumu sadalījumu troses komponentēs pa visu laidumu. Turklāt šāda troses struktūra nodrošina konstrukcijas kalpošanu arī ārkārtas gadījumā, ja tiek sagrauts CFRP slānis – tad, realizējoties tērauda plūstamības

procesam, nesošās troses nokare momentāni palielinās, bet piepūles trosē samazinās. Optimizācijas procesā racionāls tērauda un CFRP joslu materiālu sadalījums pa troses garumu ir pieņemts polinoma veidā, kura koeficienti noteikti ar ģenētisko algoritmu. Ievērtējot dinamiskos efektus, tērauda sastāvdaļas laukums jāpalielina par 58%, bet CFRP laukums jāsamazina divas reizes salīdzinājumā ar statisko sloojumu.

- Iepriekš saspriegtās iekārtas konstrukcijas ar trošu kopnēm izmantošana iekārtiem tiltiem dod iespēju izmantot vieglus kompozītmateriālus stinguma sijas konstrukcijai un nodrošina konstrukcijas drošu ekspluatāciju horizontālo slodžu iedarbībā. Šīs konstrukcijas nesošo un stabilizējošo joslu racionāls izvietojums šķērsvirzienā nodrošina nepieciešamo stingumu šķērsvirzienā nesimetriskās, tiltiem raksturīgas lietderīgas slodzes, kā arī vēja slodzes pielikšanas gadījumā.
- Iepriekš saspriegtā iekārto konstrukciju fizikālo modeļu eksperimentālās pārbaudes rezultāti apstiprina skaitlisko modeļu adekvātumu, rezultātu atšķirība ir 10%. Izmantojot fiziskos modeļus, eksperimentāli apstiprināti analītiski iegūtie rezultāti par trošu kopnes priekšrocībām no pārvietojumu viedokļa salīdzinājumā ar atsevišķu nesošo trosi nesimetriska slojuma gadījumā. Nesimetriska slojuma gadījumā izmantotā modeļa ar trošu kopnēm pārvietojumi ir par 13% mazāki nekā modelim ar atsevišķām nesošajām trosēm. Temperatūras izmaiņu izraisītie pārvietojumi un tiem atbilstošās iepriekšējā sasprieguma izmaiņas ir vērtējami kā būtiski faktori, un tie jāievērtē iepriekš saspriegtā trošu konstrukciju projektēšanā. Eksperimenta laikā (88 dienas) pie praktiski pastāvīgas temperatūras (20 ± 3 °C) iepriekšējā sasprieguma līmeņa zudums nepārsniedz 0.5%, ja konstrukcija iepriekš tiek izstiepta un izturēta ar saspriegumu, kas par 20% lielāks par aprēķināto saspriegumu, un tas uzskatāms par nenozīmīgu faktoru.
- Atšķirība starp rezultātiem, kas iegūti ar izstrādāto vienkāršoto pašsvārstību frekvenču noteikšanas metodi un eksperimentāli uz modeļa, nav lielāka par 20%, un tāpēc šī metode ir lietojama konstrukciju dinamiskiem aprēķiniem variantu izstrādes stadijā. Ar izstrādāto metodi noskaidrotās pašsvārstību frekvences iepriekš saspriegtai iekārtai trošu konstrukcijai atbilst pastāvošo tiltu projektēšanas normu prasībām (pašsvārstību periods neatrodas bīstamajā intervālā no 0.3 līdz 1 s).

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Achkire Y., Preumont A. *Active tendon control of cable-stayed bridges// Earthquake Engineering and Structural Dynamics.* – 1996. – 25(6) – pp. 585–597.
2. Akesson B. *Understanding Bridge Collapses.* – London: Taylor & Francis Group, 2008. – 282 p.
3. Alizadeh S., Shamsadini M. *Genetic Algorithms// International Journal of Computer Science and Network Security.* – 2011. – Vol.11 No. 4. – pp. 74–76.
4. Almutairi N.B., Hassan M.F., Abdel-Rohman M., Terro M. *Control of Suspension Bridge Nonlinear Vibrations// Journal of Engineering Mechanics © ASCE.* – 2006. – June. – pp. 659-670.
5. Ansys, Inc. *ANSYS Mechanical APDL Element Reference. Release 12.0 – ANSYS, 2009.*
6. Ansys, Inc. *Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications. Release 12.0 – ANSYS, 2009.*
7. Baušys R., Pankrašovaite I. *Optimization of Architectural Layout by the Improved Genetic Algorithm// Journal of Civil Engineering and Management.* – 2005. – Vol XI, No 1. – pp. 13-21.
8. Bochicchio I., Giorgi C., Vuk E. *Long-Term Damped Dynamics of the Extensible Suspension Bridge// International Journal of Differential Equations.* – 2010. – pp. 1-19.
9. Bruno D., Greco F., Lonetti P. *A Parametric Study on the Dynamic Behavior of Combined Cable-Stayed and Suspension Bridges under Moving Loads// International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics.* – 2009. – Nr. 10. – pp. 243-258.
10. Castagnetti D., Dragoni E. *Standard Finite Element Techniques for Efficient Stress Analysis of Adhesive Joints// International Journal of Adhesion & Adhesives.* – 2009. – Nr. 29. – pp. 125-135.
11. CERTEX. *Lifting Products and Service.* – Certex, 2011. – 232 p.
12. Chen J.F., Pan W.K. *Three Dimensional Stress Distribution in FRP-to-Concrete Bond Test Specimens// Construction and Building Materials.* – 2006. – Nr. 20. – pp. 46-58.
13. Chen W.F., Lui E.M. *Handbook of structural engineering.* – New York: CRC Press, 2005. – 625 p.
14. Chen W.F., Duan L. *Bridge Engineering. Seismic Design.* – New York: CRC Press LLC, 2003. – 452 p.
15. Chen W.F., Duan L. *Bridge Engineering. Substructure Design.* – New York: CRC Press LLC, 2003. – 258 p.

16. Chen W.F., Duan L. *Bridge Engineering Handbook*. – New York: CRC Press LLC, 2000. – 452 p.
17. Cheng J., Xiao R. *A simplified Method for Lateral Response Analysis of Suspension Bridges under Wind Loads*// *Communications in Numerical Methods in Engineering*. – 2006. – Nr. 22. – pp. 861-874.
18. Chipperfield A., Fleming P., Pohlheim H., Fonseca C. *Genetic Algorithm Toolbox. For Use with Matlab. Version 1.2*. – Sheffield: University of Sheffield, 1994. – 105 p.
19. Colford B.R., Clark C.A. *Feasibility Study into the Replacement or Augmentation of the Main Cables of a Long-Span Suspension Bridge*// *Bridge Structures*. – 2009. – Vol. 5. – pp. 119-133.
20. Engerer J.D., Sancaktar E. *The Effects of Partial Bonding in Load Carrying Capacity of Single Lap Joints*// *International Journal of Adhesion & Adhesives*. – 2011. – Nr. 31. – pp. 373-379.
21. European Committee for Standardization. *Eurocode 1: Actions on structures. Part 2: Traffic loads on bridges*. – Brussels, 2004.
22. European Committee for Standardization. *Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-11: Design of structures with tensile components*. – Brussels, 2007.
23. LVS EN 10025-2: 2005. *Hot rolled products of structural steels - Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels*.
24. Feyrer K. *Wire Ropes*. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – 317 p.
25. Fiberline Composites A/S. *Design Manual*. – Middelfart: Fiberline Composites A/S, 2002. – 326 p.
26. Fletcher R. *Practical methods of optimization. 2nd edition*. – London: John Willey & Sons Inc., 2000. – 451 p.
27. Gimsing N.J. *Cable Supported Bridges. Concept and Design*. – New York: John Wiley & Sons Ltd, 1983. – 412 p.
28. Gogol M. *Shaping of Effective Steel Structures*// *Scientific proceedings of Rzeszow Technical University*. – Rzeszow: Rzeszow Technical University, 2009. [Nr. 264], p. 43-56.
29. Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. *Decreasing Displacements of Prestressed Suspension Bridge*// *Journal of Civil Engineering and Management*. – 2012. – Volume 18, Issue 06. – pp. 858-866.
30. Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. *Decreasing of Displacements of Prestressed Cable Truss*// *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. – 2012. – Issue 6. – pp. 291-299.
31. Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. *Decreasing of Displacements of Prestressed Cable Truss*// *An International Journal of Science, Engineering and*

- Technology "World Academy of Science, Engineering and Technology". Special Journal Issues. – 2012. – Issue 0063. – pp. 554-562.*
32. *Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Rational Structure of Cable Truss// World Academy of Science, Engineering and Technology. Special Journal Issues. – 2011. – Issue 0076, pp. 571-578.*
 33. *Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Evaluation of Rational Parameters of Trussed Beam// Scientific Journal of RTU. Construction Science. – 2010. – Vol. 11. – pp. 21-25.*
 34. *Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Rational Large Span Structure of Composite Pultrusion Trussed Beam// Scientific Journal of RTU. Construction Science. – 2010. – Vol. 11. – pp. 26-31.*
 35. *Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Cable Truss Analyses for Suspension Bridge// Proceedings of 11th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development", Latvia, Jelgava, May 24-25, 2012. – Jelgava: Latvia University of Agriculture, 2012. – Vol. 11. – pp. 228-233.*
 36. *Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Cable Truss Analyses for Prestressed Suspension Bridge// Proceedings of the 8th International Conference of DAAAM Baltic Industrial Engineering, Tallinn, Estonia, April 19-21, 2012. – Tallinn: Tallinn University of Technology, 2012. – pp. 45-50.*
 37. *Goremikins V. and Serdjuks D. Rational Structure of Trussed Beam// Proceedings of the 10th international conference "Modern building materials, structures and techniques", Lithuania, May 19-21, 2010. – Vilnius: Technika, 2010. – pp. 613-618.*
 38. *Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Analysis of Hybrid Composite Cable for Prestressed Suspension Bridge// Proceedings of the 17th International Conference „Mechanics of Composite Materials”, Latvia, Riga, May 28-June 1, 2012. – Riga: Institute of Polymer Mechanics, 2012. – p. XX.*
 39. *Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Rational Structure of Composite trussed beam// Proceedings of the 16th international conference „Mechanics of Composite Materials”, Latvia, Riga, May 24-28, 2010. – Riga: Institute of Polymer Mechanics, 2010. – p. 75.*
 40. *Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Konstruktīvo elementu no plastmasām (pultrūzijas kompozītmateriāliem) aprēķins (aprēķinu pamatprincipi un piemēri). Metodiskie norādījumi. – Rīga: RTU, 2010. – 34. lpp.*
 41. *Griggs F.E. Lewis Wernwag and the Colossus of 1812. – 2010. – August. – pp. 217-230.*
 42. *Grigorjeva T., Juozapaitis A., Kamaitis Z. Static Analyses and Simplified Design of Suspension Bridges Having Various Rigidity of Cables// Journal of Civil Engineering and Management. – 2010. – Nr. 16(3). – pp. 363-371.*

43. Grigorjeva T., Juozapaitis A., Kamaitis Z., Paeglitis A. *Finite Element Modeling for Static Behavior Analysis of Suspension Bridges with Varying Rigidity of Main Cables*// *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. – 2008. – Nr. 3(3). – pp. 121-128.
44. Grigorjeva T., Juozapaitis A., Kamaitis Z. *Simplified Engineering Method of Suspension Bridges with Rigid Cables under Action of Symmetrical and Asymmetrical Loads*// *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. – 2006. – Nr. 1(1). – pp. 11-20.
45. Hambly E.C. *Bridge Deck Behaviour. Second edition*. – New York: E & FN Spon, 1998. – 308 p.
46. Hoffard T.A., Malvar L.J. *Fiber-Reinforced Polymer Composites in Bridges: A State-of-the-Art Report*. – California: Engineering Service Center, 2005. – 42 p.
47. Hong A.L., Ubertini F., Betti R. *Wind Analysis of a Suspension Bridge: Identification and Finite-Element Model Simulation*// *Journal Of Structural Engineering* © ASCE. – 2011. – January. – pp. 133-142.
48. Hsu G., Shu S., Yang J. *Application of Suspension Bridges Stiffened by Prestressed Concrete Slabs in China*// *Journal of Bridge Engineering* © ASCE. – 2007. – March/April. – pp. 256-260.
49. Hui-Li W., Si-Feng Q., Zhe Z., Cai-Liang H., Wen-Jun X. *The Basic Differential Equations of Self-Anchored Cable-Stayed Suspension Bridge*// *Mathematical Problems in Engineering*. – 2010. – pp. 1-12.
50. Idnurm J. *Discrete Analysis Method for Suspension Bridges*// *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. – 2006. – Nr. 1(2). – pp. 115-119.
51. Juozapaitis A., Norkus A. *Determination of Rational Parameters for the Advanced Structure of a Pedestrian Suspension Steel Bridge*// *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. – 2007. – Nr. 2(4). – pp. 173-181.
52. Juozapaitis A., Norkus A., Vainiunas P. *Shape Stabilization of Steel Suspension Bridge*// *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. – 2008. – Nr. 3(3). – pp. 137-144.
53. Juozapaitis A., Idnurm S., Kaklauskas G., Idnurm J., Gribniak V. *Non-Linear Analysis of Suspension Bridges with Flexible and Rigid Cables*// *Journal of Civil Engineering and Management*. – 2010. – Nr. 16(1). – pp. 149-154.
54. Juozapaitis A., Norkus A. *Displacement analysis of asymmetrically loaded cable*, *Journal of Civil Engineering and Management*. – 2004. – Nr. 10(4). – pp. 277-284.
55. Jupp E.W. *Bridge Watching*. – Portland: Intellect Ltd, 2000. – 163 p.
56. Just A. *Timber Bridges. New Alternative Spanning Europe (Presentation)*. – Ljubljana, 2006. – 50 p.
57. Kadišs F. *Metāla konstrukcijas*. – Rīga: Zvaigzne, 1991. – 416. lpp.

58. Khan M.A. *Bridge and Highway. Structure Rehabilitation and Repair.* – New York: MC Graw Hill, 2010. – 657 p.
59. Kmet S., Kokorudova Z. *Non-Linear Closed-Form Computational Model of Cable Trusses// International Journal of Non-Linear Mechanics.* – 2009. – Nr. 44. – pp. 735-744.
60. Kmet S., Kokorudova Z. *Nonlinear Analytical Solution for Cable Truss// Journal of Engineering Mechanics © ASCE.* – 2006. – January. – pp. 119-123.
61. Krishna P. *Tension Roofs and Bridges// Journal of Constructional Steel Research.* – 2001. – Nr. 57. – 1123-1140.
62. Kulbach V., Idnurm S., Idnurm J. *Discrete and Continuous Modeling of Suspension Bridges// Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Engineering – 2002.* – Nr. 8(2). – pp. 121-133.
63. Kulbach V. *Cable Structures. Design and Static Analysis.* – Tallinn: Estonian Academy Publishers, 2007. – 224 p.
64. Luo X.Q., Zhang Q.L., Chen L. *Form-Finding of a Mixed Structure with Cable Nets and Tubular Trusses// Journal of Constructional Steel Research.* – 2012. – Nr. 72. – pp. 192-202.
65. Lute V., Upadhyay A., Singh K.K. *Computationally Efficient Analysis of Cable-Stayed Bridge for GA-Based Optimization// Engineering Applications of Artificial Intelligence.* – 2009. – Nr. 22. – 750-758.
66. MacDonald A.J. *Structure and Architecture. Second Edition.* – Kent: Elsevier, 2001. – 151 p.
67. Mahmoud K.M. *Innovations in Bridge Engineering Technology.* – London: Taylor & Francis Group, 2007, – 367 p.
68. MathWorks. *MATLAB User's manual. What Is the Genetic Algorithm.* – MathWorks, 2011.
69. Mittal R.C., Jiwari R. *A Spectral Method for Suspension Bridge Model// International Journal of Applied Mathematics and Mechanics.* – 2009. – Nr. 5(5). – pp. 66-75.
70. Montgomery D.C. *Design and analysis of experiments. 5th edition.* – New York: John Willey & Sons Inc., 2001. – 697 p.
71. Myers R. H., Montgomery D.C. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Design Experiment. 2nd edition.* – New York: John Willey & Sons Inc., 2002. – 798 p.
72. Nagayama T., Abe M., Fujino Y., Ikeda K. *Structural Identification of a Non-Proportionally Damped System and Its Application to a Full-Scale Suspension Bridge// Journal of Structural Engineering © ASCE.* – 2005. – October. – pp. 1536-1545.
73. O'Connor C., Shaw P.A. *Bridge Loads.* – London: Spon Press, 2000. – 359 p.

74. Nowicki T., Flaga A. *Relation between Shape and the Phenomenon of Flutter for Bridge Deck-Like Bluff Bodies*// *Archives of Mechanics*. – 2011. – Nr. 63(2). – pp. 201-220.
75. Paeglītis A. *Tiltu projektēšana, būvniecība un ekspluatācija*. – Rīga: RTU, 2007. – 250. lpp.
76. Pakzad S.N., Fenves G.L. *Statistical Analysis of Vibration Modes of a Suspension Bridge Using Spatially Dense Wireless Sensor Network*// *Journal of Structural Engineering* © ASCE. – 2009. – July. – 863-872.
77. Pakrastiņš L. *Vanšu konstrukcijas. Speciālais kurss*. – Rīga: RTU, 2005. – 58. lpp.
78. Parke G., Hewson N. *ICE Manual of Bridge Engineering. Second Edition*. – London: Thomas Telford Ltd., 2008. – 735 p.
79. Passfield R.W. *Philip Louis Pratley (1884–1958): bridge design engineer*// *Canadian Journal of Civil Engineering*. – 2007. – Nr. 34. – 637-650.
80. Peleshko, I.; Yurchenko, V.; Beliaev, A. *Computer-Aided Design and Optimization of Steel Structural Systems. Scientific proceedings of Rzeszow Technical University, Nr.264, Rzeszow, Poland, 2009. Rzeszow: Rzeszow Technical University, 2009., pp. 145-154.*
81. Peris N. A. *Steel Beams Strengthened with Ultra High Modulus CFRP Laminates. Doctoral Dissertation*. – Kentucky: University of Kentucky, 2011. – 307 p.
82. Petroski H. *Engineers of Dreams. Great Bridge Builders and the Spanning of America*. New York: Vintage books, a division of random house, inc., 1996.
83. Raoof M., Davies T.J. *Influence of Variations in the Axial Stiffness of Steel Cables on Vertical Deflections of Cable Trusses*// *Journal of Constructional Steel Research*. – 2004. – Nr. 60. – 411-420.
84. Reeve S.R. *FRP Composite Bridge Decks: Barriers to Market Development*. – Kettering: National Composite Center, 2000. – 7 p.
85. Roy R.J., Debaiky A.S., Borazghi H., Benmokrane B. *Glass Fibre Reinforced Polypropylene Bridge Deck Panel Design, Fabrication and Load Testing*// *33rd Annual General Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, June 2-4, 2005, Toronto, Canada*. – Toronto: CSCE, 2005. – pp. 161-169.
86. Sandovic G., Juozapaitis A., Kliukas R. *Simplified Engineering Method of Suspension Two Span Pedestrian Steel Bridges with Flexible and Rigid Cables Under Action of Asymmetrical Loads*// *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. – 2011. – Nr. 6(4). – pp. 267-273.
87. Santoso K. *Wide-Span Cable Structures. Master Work*. – Berkeley: University of California, 2004. – 70 p.
88. Šešok D., Mockus J., Belevičius R., Kačeniauskas A. *Global Optimization of Grillages Using Simulated Annealing and High Performance computing*// *Journal of Civil Engineering and Management*. – 2010. – Nr. 16(1). – pp. 95-101.

89. Šešok D., Belevičius R. *Global Optimization of Trusses with a Modified Genetic Algorithm// Journal of Civil Engineering and Management*. – 2008. – Nr. 14(3). – pp. 147-154.
90. Schierle G.G. *Structure and Design*. – San Diego: Cognella, 2012. – 624 p.
91. Serdjuks D., Rocens K., Pakrastins L. *Hybrid Composite Cable with an Increased Specific Strength for Tensioned Structures// The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. – 2008. – Nr. 3(3). – pp. 129-136.
92. Serdjuks D., Rocens K. *Decrease the Displacements of a Composite Saddle-Shaped Cable Roof// Mechanics of Composite Materials*. – 2004. – Nr. 40(5). – pp. 675-684.
93. Serdjuks D. *Metodiskie norādījumi praktiskiem darbiem mācību priekšmetā „Konstrukciju optimizācija”*. – Rīga: RTU, 2004. – 28. lpp.
94. Silva L.F.M., Lopes M.J.C.Q. *Joint Strength Optimization by the Mixed-Adhesive Technique// International Journal of Adhesion & Adhesives*. – 2009. – Nr. 29. – pp. 509-514.
95. Sliseris J., Rocens K. *Curvature Analysis for Composite with Orthogonal, Asymmetrical Multi-Layer Structure// Journal of Civil Engineering and Management*. – 2010. – Nr. 16(2). – pp. 242-248.
96. Sliseris J., Rocens K. *Rational Structure of Panel with Curved Plywood Ribs// World Academy of Science, Engineering and Technology. Special journal Issues*. – 2011. – Nr.76. – pp. 317-323.
97. Spoth T., Whisler B., Moore T. *Crossing the Narrows// Civil Engineering*. – 2008. – February. – pp. 38-47.
98. *Steel Construction Institute. Composite Highway Bridge Design*. – Ascot: SCI, 2010. – 146 p.
99. *Strasky J. Stress Ribbon and Cable Supported Pedestrian Bridge*. London: Thomas Telford Publishing, 2005, 213 p.
100. *Strasky J. Design-Construction of Vranov Lake Pedestrian Bridge, Czech Republic// PCI Journal*. – 1997. – November-December. – pp. 60-68.
101. *Talvik I. Finite Element Modelling of Cable Networks with Flexible Supports// Computers and Structures*. – 2001. – Nr. 79. – pp. 2443-2450.
102. *Tang M. Rethinking Bridge Design: A New Configuration// Civil Engineering*. – 2007. – July. – pp. 38-45.
103. *Tang M. The Story of World// Civil Engineering*. – 2010. – March. – pp. 56-63.
104. *Tensacciai SpA. Stay Cables*. – Milano: Tensacciai SpA, 2009. – 32 p.
105. *Tibert G. Numerical Analyses of Cable Roof Structures*. – Stockholm: KTH, TS-Hogskoletryckeriet, 1999. – 196 p.

106. Tonia D.E., Zhao J.J. *Bridge Engineering. Design, Rehabilitation, and Maintenance of Modern Highway Bridges*. – New York: The MC Grow-Hill Company, 2007. – 493 p.
107. Turmo J., Luco J.E. *Effect of Hanger Flexibility on Dynamic Response of Suspension Bridges*// *Journal of Engineering Mechanics* © ASCE. – 2010. – December. – pp. 1444-1459.
108. Ulpe J., Kupče L. *Koka un plastmasu konstrukcijas*. – Rīga: Zvaigzne, 1991. – 304. lpp.
109. Virola J. *Long-Span Cable-Supported Bridges: General Review*// *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*. – 2009. – November. – pp. 304-304.
110. Walther R., Houriet B., Isler W., Moia P., Klein J.F. *Cable Stayed Bridges. Second edition*. – London: Thomas Telford, 1999. – 236 p.
111. Wang X., Wu Z. *Evaluation of FRP and Hybrid FRP Cables for Super Long-Span Cable-Stayed Bridges*// *Composite Structures*. – 2010., Nr. 92. – pp. 2582-2590.
112. Weise T. *Global Optimization Algorithms. Theory and Applications. 2nd Edition*. – Hefei: Thomas Weise, 2009. – 820 p.
113. Winkelman T.J. *Fiberglass Reinforced Polymer Composite Bridge Deck Construction in Illinois. Construction Report*. – Springfield: Illinois Department of Transportation, 2002. – 27 p.
114. Yau J.D., Yang Y.B. *Vibration Reduction for Cable-Stayed Bridges Traveled by High-Speed Trains*// *Finite Elements in Analysis and Design*. – 2004. – Nr. 40. – 341-359.
115. Xiang R., Ping-Ming H., Kui-Hua M., Zhi-Hua P. *Influence of Temperature on Main Cable Sagging of Suspension Bridge*// *Journal of Zhengzhou University Engineering Science*. – 2009. – Nr. 30(4). – pp. 22-25.
116. Zribi M., Almutairi N.B., Abdel-Rohman M. *Control of Vibrations due to Moving Loads on Suspension Bridges*// *Nonlinear Analysis: Modeling and Control*, – 2006. – Vol. 11, No. 3. – 293-318.
117. Барабаш М, Лазнюк М., Мартынова, М., Пресняков, Н. *Современные технологии расчета и проектирования металлических и деревянных конструкций*. – Москва: Издательство Ассоции строительных вузов, 2008. – 328 с.
118. Бахтин С., Овчинников И., Инамов Р. *Висячие и вантовые мосты*. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1999. – 124 с.
119. Беленя Е.И. *Металлические конструкции*. – Москва: Стройиздат, 2001. – 600 с.
120. Беленя Е.И. *Стальные конструкции: Спецкурс*. – Москва: Стройиздат, 1991. – 687 с.

121. Бойко Н. Архитектура пространства// Строительство и реконструкция. – 2009. – №7 (149), июль. – с. 28-30.
122. Ведеников Г. Металлические конструкции: Общий курс. – Москва: Стройиздат, 1998. – 760 с.
123. Городецкий А., Евзоров И. Компьютерные модели конструкций. – Киев: Факт, 2005. – 344 с.
124. Дмитриев Л., Кирсанов А. Вантовые покрытия (расчет и конструирование). Изд. 2-е. – Киев: Изд-во «Будивельник», 1974. – 272 с.
125. Ермолов В. Инженерные конструкции. – Москва: Высшая школа, 1991. – 408 с.
126. Ефимов П.П. Проектирование мостов. – Омск, 2006. – 111 с.
127. Зверев А.Н. Большепролетные конструкции покрытий общественных и промышленных зданий. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский Государственный Архитектурно строительный университет, 1998. – 60 с.
128. Качурин В., Брагин А., Ерунов Б. Проектирование висячих и вантовых мостов. – Москва: Издательство «Транспорт», 1971. – 280 с.
129. Кирсанов Н.М. Висячие системы повышенной жесткости. – Москва: Стройиздат, 1973. – 116 с.
130. Кузнецов В.В. Металлические конструкции. В 3 т. Т.2. Стальные конструкции зданий и сооружений. – Москва: изд-во АСВ, 1998. – 512 с.
131. Михайлов В. Предварительно напряженные комбинированные и вантовые конструкции. – Москва: АСВ, 2002. – 255 с.
132. Петропавловский А.А. Вантовые мосты (Cable Bridges). – Москва: Транспорт, 1985. – 224 с.
133. Смирнов В., Висячие мосты больших пролетов. – Москва: Высшая школа, 1970. – 408 с.
134. СН 200-62. Технические условия проектирования железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб. – Москва: Государственный комитет совета министров СССР по делам строительства, 1962. – 328 с.
135. СНиП 2.05.03-84. Мосты и трубы. – Москва: Минрегион России, 2011. – 346 с.
136. Трофимович В.В. Пермяков В.А. Проектирование предварительно напряженных вантовых систем. – Киев: Будивельник, 1970. – 136 с.
137. Трущев А. Пространственные металлические конструкции. – Москва: Стройиздат, 1983. – 216 с.
138. Шмидт А., Дмитриев П. Атлас строительных конструкций из клееной древесины и водостойкой фанеры. – Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2002. – 292 с.

139. *Strongwell Design Manual: Strongwell Corporation, [Electronical Resource]* – <http://www.strongwell.com/designmanual/viewer.aspx> – resource described on May 30, 2010
140. *Exel Structural Profiles: Exec Composites. [Electronical Resource]* – <http://www.exelcomposites.com/English/Products/StructuralProfiles/tabid/7750/language/en-US/Default.aspx> – resource described on May 30, 2010
141. *The Pultex Pultrusion Design Manual: Creative Pultrusion, INC, [Electronical Resource]* – <http://www.creativepultrusions.com/LitLibrary/designmanual/dmv4r6.pdf> – resource described on May 30, 2010
142. *Andrei M. 7 wonders of modern engineering// ZME Science.* <http://www.zmescience.com/space/7-wonders-of-modern-engineering/>. – 2008. – September. – sk. 17.05.2012.
143. *Weseman W.A. Cable Stays of Cable-Stayed Bridges.* – 1994. – <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/t514025.cfm>. – sk. 17.05.2012.
144. *Schlaich bergermann & partners. Bridges.* <http://www.sbp.de/en#build/category/93-Bridges>. – sk. 17.05.2012.
145. *Encyclopedia Britannica. Long-Span Buildings.* www.britannica.com. – sk. 17.05.2012.
146. *LZA Terminoloģijas komisija. Akadēmiskā terminu datubāze AkadTerm. Burbuļkārtošana.* <http://termini.lza.lv/term.php?term=burbu%C4%BCK%C4%81rto%C5%A1ana&list=burbu%C4%BCK%C4%81rto%C5%A1ana&lang=LV>. – sk.23.05.2012.
147. *Virola J. World's Longest Bridge Spans.* <http://bridge.aalto.fi/en/longspan.html>. – sk. 17.05.2012.
148. *Wikipedia. Bubble sort.* http://en.wikipedia.org/wiki/Bubble_sort. – sk. 23.05.2012.
149. *"Белур" ООО. Предварительно-вытянутые стальные канаты.* <http://belursib.ru/production/#item119>. – sk. 17.05.2012.
150. *Wikipedia. Tower Bridge.* http://en.wikipedia.org/wiki/Tower_Bridge. – sk. 18.05.2012.
151. *"Северсталь-метиз" ОАО. Северсталь-метиз предложил добывающей отрасли новую продукцию.* – 2011. – <http://www.metainfo.ru/ru/news/51535>. – sk. 17.05.2012.
152. *"Комплектация" ОАО. Предварительная вытяжка.* http://www.komplektacya.ru/ref_mat/steel_cable/test_cable4.htm. – sk. 17.05.2012.