



**SIA „MEŽA UN KOKSNES PRODUKTU  
PĒTNIECĪBAS UN ATTĪSTĪBAS  
INSTITŪTS”**

Reģ. Nr. LV 43603022749

Dobeles iela 41, Jelgava, LV-3001

Tālr. +371 63010605 \* Fakss +371 63010609 \* E-pasts meka@e-koks.lv \* Internets [www.e-koks.lv](http://www.e-koks.lv)

**sadarbībā ar**



## **„ MODERNU UN ILGTSPĒJĪGU KOKA KONSTRUKCIJU IZPĒTE”**

### **Tilta monitoringa rezultāti un priekšlikumi līmēta koka tilta konstrukciju veikspējas uzlabošanai**

**Pētījuma noslēdzošā atskaite**

Pētījuma pasūtītājs: AS „Latvijas valsts meži”

Izpildītājs: SIA „Meža un koksnes produktu pētniecības un attīstības institūts”

*sadarbībā ar*

SIA „Inženierbūve”

Pētījums veikts saskaņā ar 17/07/2013 noslēgto līgumu Nr. 5.5-5.1-001r\_101\_13\_35

**Jelgava 2015**

Saskaņā ar 2013. gada 17. jūlijā noslēgto līgumu nr. 5.5-5.1-001r\_101\_13\_35 starp AS "Latvijas valsts meži" un SIA "Meža un koksnes produktu pētniecības un attīstības institūts" par pētniecības pakalpojumu sniegšanu, SIA „INŽENIERBŪVE” speciālistu grupa veica eksperimentāli inovatīvas pilnizmēra līmētas koka konstrukcijas pētniecības darbu un monitoringu.

Darba izpildē piedalījās SIA „INŽENIERBŪVE” eksperti:

Pētniecības darbu un monitoringa vadītājs:

*MSc.*, R. Lācis (Būvsertifikāts Nr. 20-5025 un Nr. 20-6999)

Tiltu inženieris:

*MSc.Ing.*, K. Gode (Būvsertifikāts Nr. 20-6997)

Tiltu inženieris:

*MSc.Ing.*, E. Pariss (Būvsertifikāts Nr. 20-5028)

Tehniskā asistenta pienākumus veica SIA "Meža un koksnes produktu pētniecības un attīstības institūta" pārstāvis:

*Mg.sc.Ing.*, E. Rudzītis

Projekta administratīvais koordinators SIA "Meža un koksnes produktu pētniecības un attīstības institūta" pārstāvis:

*Mg.sc.ing.*, Andrejs Domkins

## Saturs

1. Ievads .....	4
2. Eksperimentālā paraugobjekta ģeogrāfiskais novietojums un konstruktīvie varianti 6	
3. Eksperimentālā paraugobjekta konstruktīvie parametri.....	10
4. Eksperimentālā paraugobjekta projekta normatīvā bāze .....	12
5. Līmētās koksnes materiālu ražošana, būvelementu izgatavošana un montāža rūpnīcā.....	13
6. Koksnes būvelementu elastīgo īpašību pārbaudes .....	17
7. Paraugobjekta statiskā slogošana rūpnieciskos apstākļos.....	22
7.1 Slogošanas process un secība .....	23
7.2 Mērījumu pozīcijas un mērinstrumenti .....	25
7.3 Mērījumu rezultāti.....	26
8. Eksperimentālā parauga transportēšana un montāža uz paraugobjektu.....	32
9. Dinamikas testi parauglaukumā .....	35
10. Konstrukcijas ģeometrijas monitorings .....	39
10.1 Vertikālo pārvietojumu noteikšana konstrukcijas laiduma vidū .....	41
11. Līmētās koksnes būvelementu mitruma monitorings .....	43
12. Secinājumi.....	49
13. Rekomendācijas līmēta koka tilta konstrukciju veikspējas uzlabošanai .....	49

## 1. Ievads

Līmētās koksnes konstrukciju tehnoloģiju adaptēšana Latvijas mērogā nozīmīgām būvēm ceļu infrastruktūras vajadzībām līdz šim nav sistemātiski realizēta. Salīdzinot ar citām Eiropas valstīm kā Vācija, Zviedrija un Somija Latvijā ir tikai daži ceļu infrastruktūras objekti, kuros pielietota līmētā koksne. Tā, piemēram, 2006.gada uzbūvēts gājēju pārvads pār K.Ulmaņa gatvi Rīgā ar kopējo līmētās koksnes konstrukcijas garumu 180m. Taču šī pārvada līmētās koksnes elementi tika izgatavoti Lietuvā, jo Latvijā līdz šim nebija pieejama nepieciešamā tehnoloģiskā kapacitāte.

Līdz ar eksperimentālu lielizmēra līmētas koksnes konstrukciju pētniecības centra atvēršanu 2015.gadā (IKTK, Jelgava) ir nodrošināta pētnieciski industriāla iespēja līmētu koka konstrukciju potenciāla novērtēšanai arī Latvijā, realizējot pilna cikla izpētes programmu. Šīs programmas amplitūda ietver gan līmētās koksnes ražošanas aspektu izvērtēšanu, gan pilnizmēra paraugobjekta konstrukcijas izstrādi, testēšanu un monitoringu reālos slodžu un vides apstākļos.

### Pētījuma hipotēze, objekts, priekšmets mērķis un uzdevumi

Pētījums balstās uz **hipotēzi**, ka Latvijā izgatavotu inovatīvu līmēta koka konstrukciju veikspēja reālos slodžu apstākļos ir atbilstoša mūsdienu ražošanas un būvniecības industrijas vispārpieņemtām tehniskajām iespējām un prasībām.

Pētījuma **objekts** ir līmētās koksnes konstrukcija, bet pētījuma **priekšmets** – gājēju pārvada pilna mēroga paraugobjekts, kura nesošās konstrukcijas ir izgatavotas no lielizmēra līmētās koksnes būvelementiem.

No hipotēzes izrietošais **pētījuma mērķis** ir izpētīt Latvijā izgatavotu lielizmēra līmētas koksnes konstrukcijas veikspēju un funkcionalitāti dabiskos slodžu un vides apstākļos. Pētījuma mērķa sasniegšanai tiek izvirzīti pieci galvenie pētnieciskie uzdevumi:

- 1) Izstrādāt lielizmēra eksperimentālā parauga projektu – gājēju tiltu ar laidumu vismaz 30m, kura nesošā konstrukcija ir izgatavota pēc līmētās koksnes tehnoloģijas. Projektā paredzēt eksperimentālo konstrukcijas paraugu (gājēju pārvadu) izvietot parauglaukumā ar dabiskiem vides un transporta apstākļiem.
- 2) Veikt atsevišķu parauga komponentu īpašību testēšanu pirms to montāžas paraugobjektā.
- 3) Veikt parauga konstrukcijas statisku slodžu iedarbību.
- 4) Veikt parauga konstrukcijas veikspējas novērtēšanu dinamisko slodžu iedarbībā.
- 5) Izstrādāt konstrukcijas ilgtermiņa monitoringa plānu aprīkojot paraugobjektu ar mērinstrumentiem un veicot sākotnējos mērījumus.

### Pētījuma tautsaimnieciskā nozīme

#### Pētījuma novitātes:

1. Līmēto koka konstrukciju pielietošana ir aktuāla gan Eiropā, gan pasaulē kopumā un tas ir saistīts gan ar līmētās koksnes tehnoloģiju attīstību, gan ilgtspējīgas attīstības principu aktualizēšanos un juridiskajām saistībām būvniecības nozarē.



2. Latvijas rūpnieciskajos apstākļos līdz šim nav izgatavota neviena tilta konstrukcija no līmētās koksnes ar laiduma garumu virs 30m. 2005.gadā Rīgā ir uzbūvēts gājēju pārvads pār K.Ulmaņa gatvi ar līmētas koksnes laidumu, taču šī objekta būvelementi ir izgatavoti Lietuvā un pārvada nestpējas nodrošināšanai ir pielietoti tērauda piloni un vanšu sistēma.

#### **Zinātniskais nozīmīgums:**

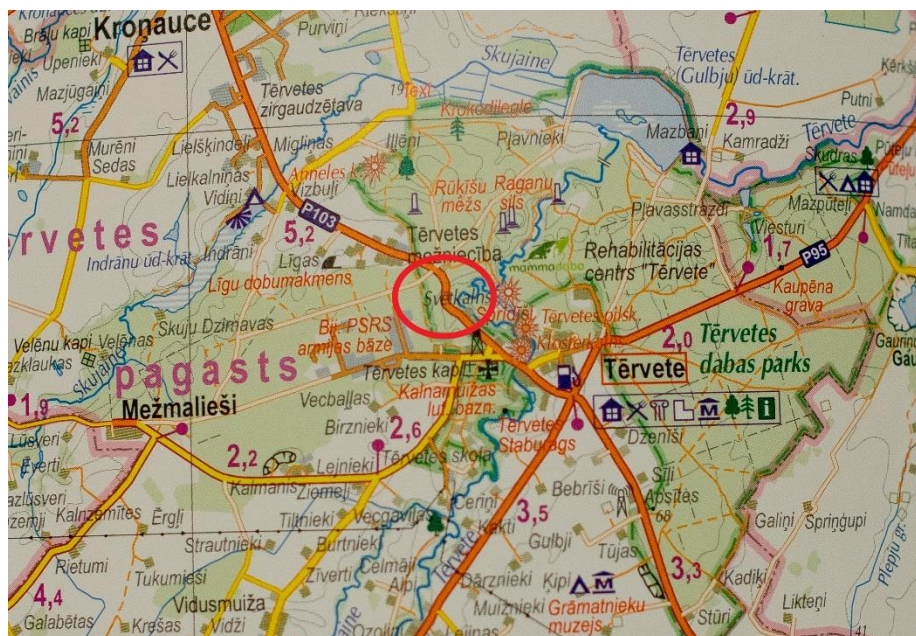
1. Dokumentēts līmēto konstrukciju būvtechniskais potenciāls mūsdienu transporta infrastruktūras izaicinošo prasību kontekstā.
2. Dokumentēta monitoringa tehnisko iespēju ietilpība būvju drošības un veiktspējas novērtēšanai īstermiņā un ilgtermiņā.

#### **Tautsaimnieciskais nozīmīgums:**

1. Koksnes būvmateriālu konkurētspējas globāla uzlabošana salīdzinot ar citiem tradicionālajiem būvmateriāliem kā betons un tērauds.
2. Koksnes kā lokāla būvresursa izmantošanas potenciāls, t.sk. lokālā darbaspēka iesaiste dažādās izstrādes, transporta un apstrādes fāzēs.
3. Līmētās koksnes izmantošana nodrošina ātrāku būvdarbu veikšanu valsts un pašvaldību ceļu tīklos, jo rūpnieciski ražoti koka būvelementi un montāžai gatavas konstrukcijas ļauj būtiski ietaupīt laiku būvobjektā, kā arī uzlabo satiksmes drošību un komfortu.
4. Līmēto konstrukciju salīdzinoši nelielais pašsvars un izgatavošanai nepieciešamais energopatēriņš ļauj būtiski samazināt ar transporta un izgatavošanu saistītās būvnozares izmaksas. Tādējādi līmētās koksnes konstrukcijas tiek padarītas pievilcīgākas satiksmes infrastruktūras uzlabošanas darbos.
5. Līmētu koka konstrukciju izgatavošana notiek slēgtos rūpnieciskos apstākļos, kas ļauj uzlabot darba vides un darba drošības apstākļus.
6. Arhitektoniski pārdomātas līmētās koksnes konstrukcijas dabiski papildina un uzlabo apkārtējās vides estētiskās īpašības.

## 2. Eksperimentālā paraugobjekta ģeogrāfiskais novietojums un konstruktīvie varianti

Saskaņā ar izstrādāto tehnisko projektu eksperimentālais paraugs – gājēju pārvads atrodas Tērvetes novadā pie Tērvetes dabas parka ( $56^{\circ}29'13''\text{Z}$ ,  $23^{\circ}22'20''\text{A}$ ). Pārveda funkcijās ietilpst gājēju satiksmes nodrošināšana pār autoceļu P103 un tam jāsavieno Tērvetes dabas parka autostāvvietu ar parka galveno administratīvo ēku (attēli 2.1 un 2.2). Dabas parks raksturojas ar regulāru apmeklētāju skaitu, kas attiecīgi nodrošina eksperimentālā objekta regulāru pakļaušanu gājēju slodzēm.



2.1. att. Eksperimentālā parauga – gājēju pārvada novietojums.



2.2. att. Eksperimentālā parauga dislokācija.

Izvēlēta pārejas vieta ir raksturojama kā ainaviski nozīmīga, jo atrodas ceļa ierakumā ar garenkritumu un trases rādus. Abpus šī ceļa ir saglabāta un uzturēta priežu meža audze, kā arī dotais objekts ir būtisks pieturas punkts lokālā tūrisma kartē. Parauglaukuma un eksperimentālās konstrukcijas pirms un pēc montāžas ir parādītas attēlos 2.3 un 2.4.





**2.3. att. Parauglaukums pirms eksperimentālās konstrukcijas montāžas.**



**2.4. att. Parauglaukums un eksperimentālā konstrukcija ekspluatācijas režīmā.**



**2.5. att. Paraugobjekts izbūves stadijā - skats no esošās gājēju pārejas.**

Paraugobjekta plānošanas un projektēšanas gaitā tika izvērtēti četri dažādi līmētās koksnes konstrukciju varianti, kas raksturotu tiltu sektorā biežāk pielietotās statiskās shēmas. Ģenerālvariants, t.i. kopne ar paralēlām joslām, tika izvēlēts tehniski-ekonomiskās analīzes rezultātā, kā arī ņemot vērā arhitektoniskās nostādnes. Galvenā kopnes priekšrocība salīdzinot ar pārējiem variantiem (skatīt attēlu 2.6) ir pārsedzoša jumta izmantošana, kas nodrošina efektīvu parauga nesošo konstrukciju aizsardzību pret nokrišņiem un attiecīgi kalpošanas ilgmūžību.



a) loka laiduma konstrukcija  
ar ietvi pa vidu



b) plātnes laiduma konstrukcija  
ar slīpiem statiem





c) loka laiduma konstrukcija  
ar ietvi pa augšu



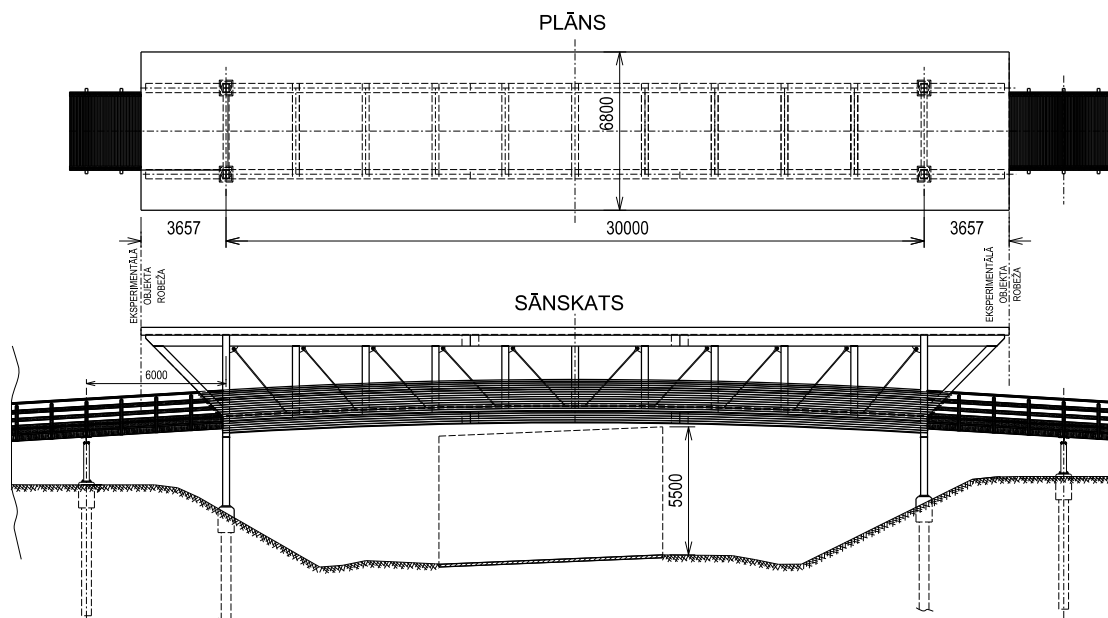
d) kopnes laiduma  
konstrukcija ar pārsedzošu  
juntu

**2.6. att. Paraugobjekta statiskās shēmas projekta plānošanas stadijā.**

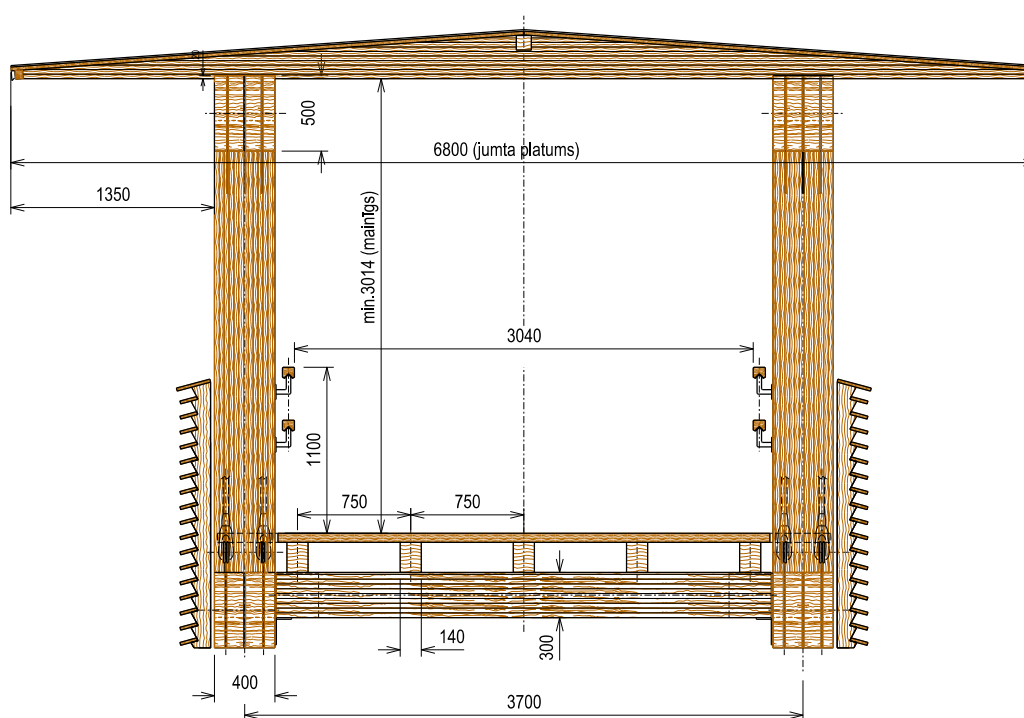
2.6.attēlā iekļautās skices raksturo statisko shēmu daudzveidību, ko iespējams īstenot ar līmētās koksnes tehnoloģiju palīdzību ceļu un transporta infrastruktūras sektorā.

### 3. Eksperimentālā paraugobjekta konstruktīvie parametri

Paraugobjekta izvēlētais ģenerālvariants ir veidots pēc divjoslu kopnes statiskās shēmas (*Pratt sistēma*). Kopnes statu un galveno joslu savienojumi veidoti kā daļēji stingri elementi, kur izmantotas metāla plātnes ar gludiem tērauda stienīšiem. Pie minētajām plātnēm pievienoti arī diagonālie kopnes elementi, kas ir industriāli ražoti stieņi ar regulējamu garumu. Kopne ir simetriska gan šķērsvirzienā, gan garenvirzienā, skatīt attēlus 3.1 un 3.2, kā arī pārvada tehnisko projekta dokumentāciju.

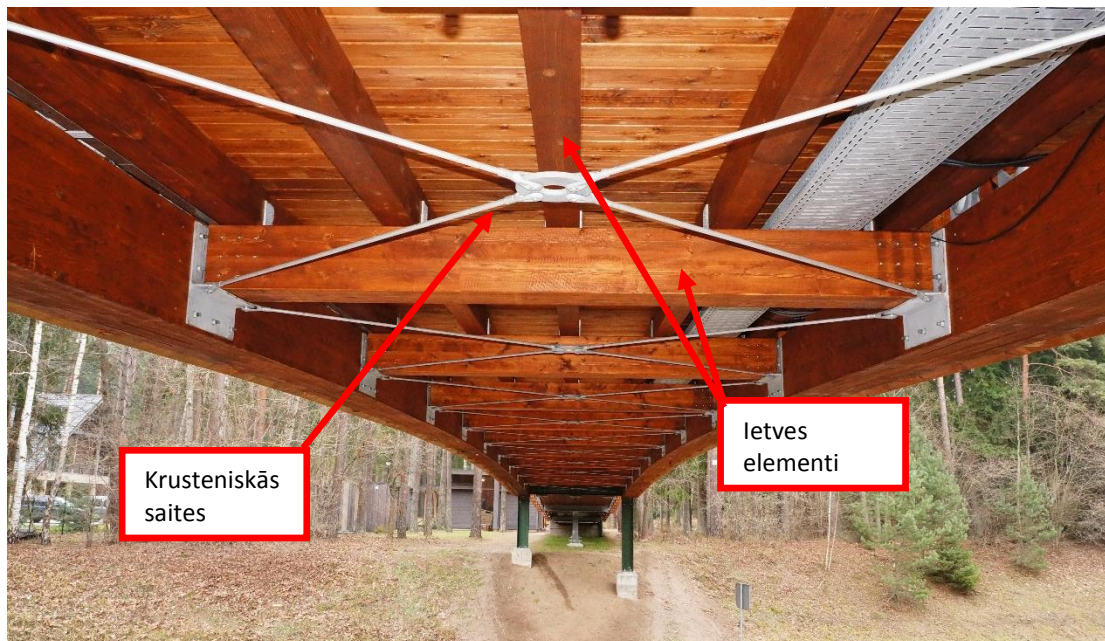


3.1. att. Paraugobjekta plāna un garenvirziena konfigurācija.



3.2. att. Paraugobjekta šķērsvirziena konfigurācija.

Kopnes noturību šķērsvirzienā augšējās joslas līmenī nodrošina jumta konstrukcija, savukārt apakšējā līmenī izvietoti masīvi līmētās koksnes ietves elementi ar papildus krusteniskām metāla saitēm (3.3.attēls).



**3.3. att. Apakšējās joslas stinguma elementi ekspluatācijas stadijā.**

Nesošo līmētās koksnes elementu klase saskaņā ar projekta prasībām ir GL28h šādiem parametriem:

- raksturīgā lieces pretestība  $f_{m,g,k}=28 \text{ N/mm}^2$
- raksturīgā spiedes pretestība paralēli šķiedrām  $f_{c,0,g,k}=26,5 \text{ N/mm}^2$
- raksturīgā spiedes pretestība perpendikulāri šķiedrām  $f_{c,0,g,k}=3,0 \text{ N/mm}^2$
- elastības modulis (vidējā vērtība)  $E_{0,g,\text{mean}}=12,6 \text{ kN/mm}^2$

Kopumā paraugobjekta izgatavošanai nepieciešamais nominālais līkoknses daudzums ir  $50,1 \text{ m}^3$ .

Kopnes diagonālsavilcēm un horizontālajām krusteniskajām saitēm izmantotais tērauds ir ar klasi S350-S, attiecīgais stieņu izmērs ir M36 un M16.

#### 4. Eksperimentālā paraugobjekta projekta normatīvā bāze

Tā kā pētījuma paraugobjekta gabarīti neatbilst tradicionāliem laboratoriskiem izmēriem un tam saskaņā ar pētījuma mērķi ir jābūt novietotam reālā satiksmes infrastruktūrā un apkārtējos vides/slodžu apstākļos, tad projekta izstrādē ir ņemta vērā virkne saistošo būvniecības jomas normatīvu. Eksperimentālā parauga projektēšana balstīta uz šādiem Latvijas un Eiro Būvnormatīviem:

- Būvniecības likums;
- Vispārējie būvnoteikumi;
- Būvnoteikumi darbam autoceļu tīklā;
- Ceļu specifikācijas 2014
- LVS 190-4 "Ceļu projektēšanas noteikumi - 4.daļa: Vairāklīmeņu ceļumezgli".
- LVS EN 1995:1 „ 5. Eirokodekss. Koka konstrukciju projektēšana. 1-1. daļa: Vispārīgi. Kopīgie noteikumi un noteikumi būvēm”.
- LVS EN 1995:2 „ 5. Eirokodekss. Koka konstrukciju projektēšana. 2. daļa: Tilti”
- LVS EN 1991-2 „1.Eirokodekss: Iedarbes uz konstrukcijām - 2.daļa: Satiksmes slodzes tiltiem”.
- Betona konstrukcijas – LVS EN 1992-1 “2. Eirokodekss: Betona konstrukciju projektēšana - 1-1.daļa: Vispārīgie noteikumi un noteikumi ēkām”;
- Tērauda konstrukcijas – LVS EN 1993-1 “3. Eirokodekss. Tērauda konstrukciju projektēšana. 1-1. daļa: Vispārīgie noteikumi un noteikumi ēkām”
- LVS EN 10080 “Tērauds betona stiegrojumam. Metināms stiegrojuma tērauds. Vispārīgi”.
- Betons – LVS EN 206 “Betons. Tehniskie noteikumi, darbu izpildījums, ražošana un atbilstība”.
- Betona konstrukciju izgatavošana – LVS ENV 13670 “Betona konstrukciju izgatavošana”.
- Pārveda gabarīti – LVS 190-2 „Ceļu projektēšanas noteikumi. Normālprofili”.

Pārvals projektēts saskaņā ar LVS EN 1991 “1.Eirokodekss: Iedarbes uz konstrukcijām - 2.daļa: Satiksmes slodzes tiltiem” prasībām ( $\alpha=1,0$ ) gājēju tiltiem ( $q_g=5 \text{ kN/m}^2$  un apkalpes transportlīdzeklim ar masu līdz 120 kN).



## 5. Līmētās koksnes materiālu ražošana, būvelementu izgatavošana un montāža rūpnīcā

Līmētās koksnes ražošana lielizmēra konstrukcijām ir tehnoloģiski ietilpīgs process, kurā būtisku lomu ieņem gan kokmateriālu izejmateriāli (šķiroti dēļi ar atbilstošu kvalitātes klasi), saistvielas īpašības un dozēšanas mehānisms, ka arī koksnes elementu ģeometrijas kontrole un ierobežojumi, ko nosaka līmēšanas preses gabarīti.

Paraugobjekta izgatavošanas sākuma stadijā tiek izmantots automatizēts dēļu pagarināšanas stends, kas veido regulāru sazobi dēļu galos un zem spiediena ar līmes palīdzību tiek savienots ar nākamo dēli (5.1.attēls). Tādā veidā dēļu sortimenta ierobežojumi tiek atrisināti konkrētā projekta ģeometriskajām vajadzībām.



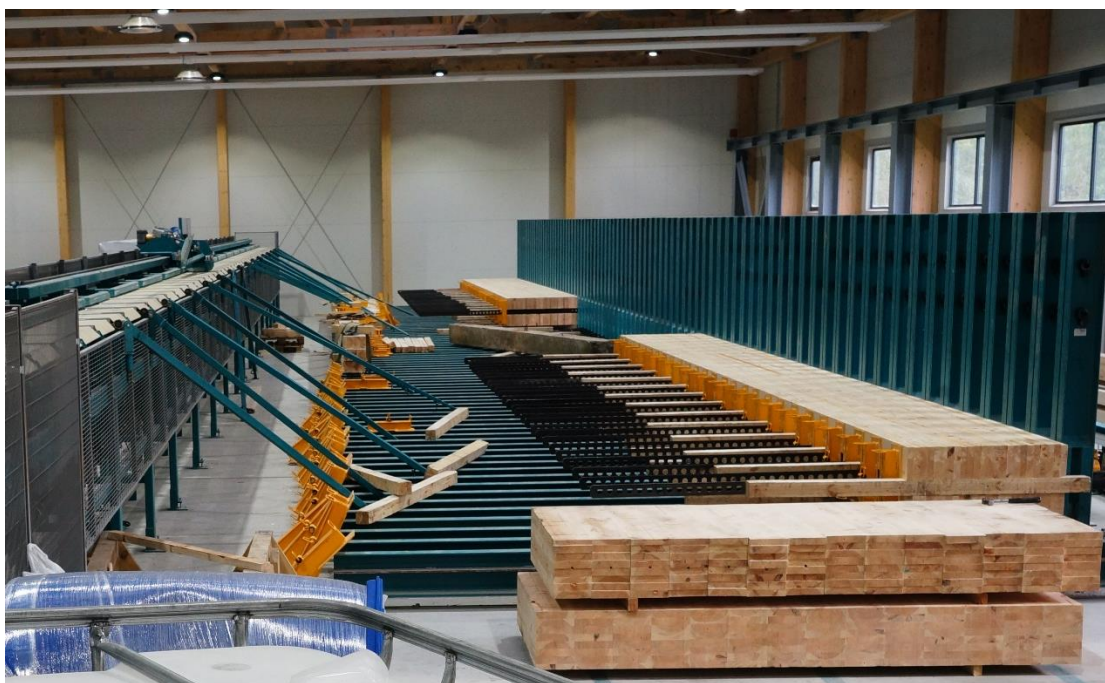
**5.1. att. Dēļu pagarināšanas tehnoloģiskā līnija.**

Vajadzīgā garuma dēļi tālāk tiek dozēti apstrādāti ar līmi (5.2.attēls) un ievietoti presē (5.3.attēls), kuras liekuma profilu iespējams regulēt ņemot vērā projektā definēto būvelementu ģeometriju.

Pētījuma paraugobjektam izmanto gan taisnus būvelementus (kopnes augšējā josla, ietves daļas šķērselementi), gan liektus (kopnes apakšējās joslas nesošie elementi). Pēc izturēšanas presē, elements tiek atveidnots un pakļauts tālākai apstrādei, kurā ietilpst neregulāro malu frēzēšana, iezāģējumu un urbumu veikšana pēc iepriekš sagatavotiem šabloniem, kā arī apstrāde ar aizsardzības pārklājumiem. 5.4. attēlā parādīti paraugobjekta nesošie elementi divās dažādās apstrādes pakāpēs.

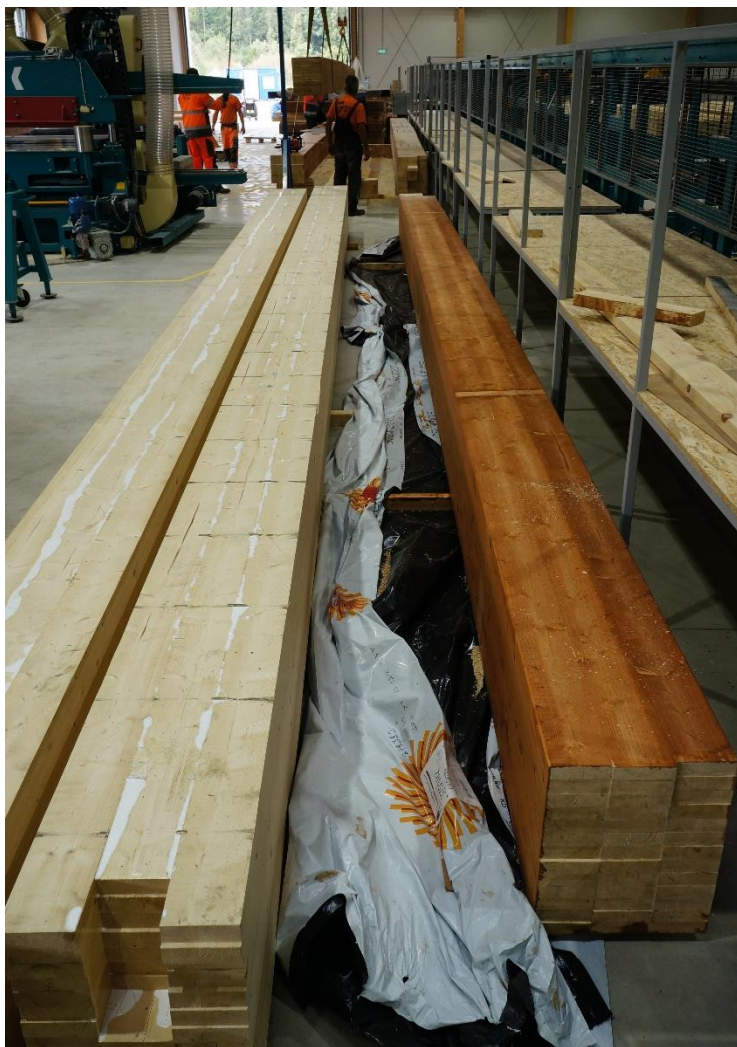


5.2. att. Līmes dozācijas iekārta.



5.3. att. Mainīga profila preses stands.





**5.4. att. Kopnes joslu  
elementi (pa kreisi  
neapstrādāts, pa labi  
apstrādāts).**



Urbumi tapu  
ievietošanai

**5.5. att. Kopnes joslas savienojuma mezgls.**





**5.6. att. Tērauda elementu iestrāde kopnes mezglos.**



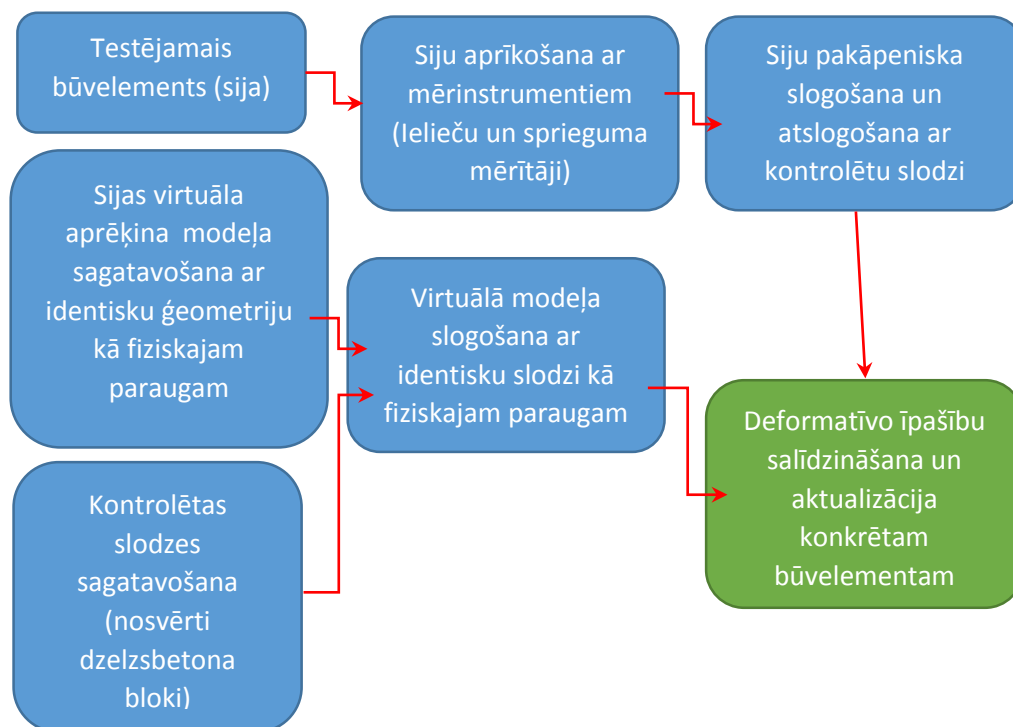
**5.7. att. Tērauda elementu iestrāde kopnes mezglos.**

## 6. Koksnes būvelementu elastīgo īpašību pārbaudes

Kopnes elementu izgatavošanas process ir saistīts ar vairāku veida nenoteiktībām, kas var ietekmēt paraugobjekta veiktspēju un pētījuma rezultātu interpretāciju. Viena no būtiskākajām nenoteiktībām ir saistīta ar koksni kā anizotropu materiālu. Ņemot vērā koksnes iespējami plašo ģeogrāfisko izcelsmi, augšanas apstākļus, defektu izkliedi materiālā un šķirošanas kvalitāti, tad gala produkcijas, t.i. būvelementu deformatīvās un stiprības īpašības var savā starpā atšķirties. Līmēšanas process veicina koksnes defektu nesistemātisku izklienēšanos pa visu būvelementa tilpumu, attiecīgi normalizējot prognozētās koksnes īpašības. Neskatoties uz to pētījuma ietvaros tika plānots pārbaudīt vai galveno kopnes būvelementu koksnes posmi atbilst standartos definētajām prasībām un attiecīgi vai paraugobjekta projektēšanas pieņēmumi ir korekti. Par vienu no nozīmīgākajiem līmkoksnes parametriem ir jāpiemin elastības modulis  $E$ , kurš raksturo materiāla deformatīvās īpašības ārējo spēku iedarbībā. Jo augstāka ir šī moduļa vērtība, jo mazākas ir paredzamās materiāla deformācijas.

Pastāv vairākas standartizētas elastības noteikšanas metodes, taču tās nav piemērojamas šajā pētniecības stadijā paraugu dimensionālo īpatnību dēļ. Mērķis ir noskaidrot elastības moduļa vērtību konkrētam būvelementam, kas ir iestrādāts tieši šajā konstrukcijā. Šāda specifiska un individualizēta informācija var palīdzēt objektīvāku vērtējumu sniegšanā pētniecības tālākās stadijās, piemēram, aktualizējot aprēķina modeļus un vērtējot konstrukcijas jūtīgumu uz dažādu parametru izmaiņām.

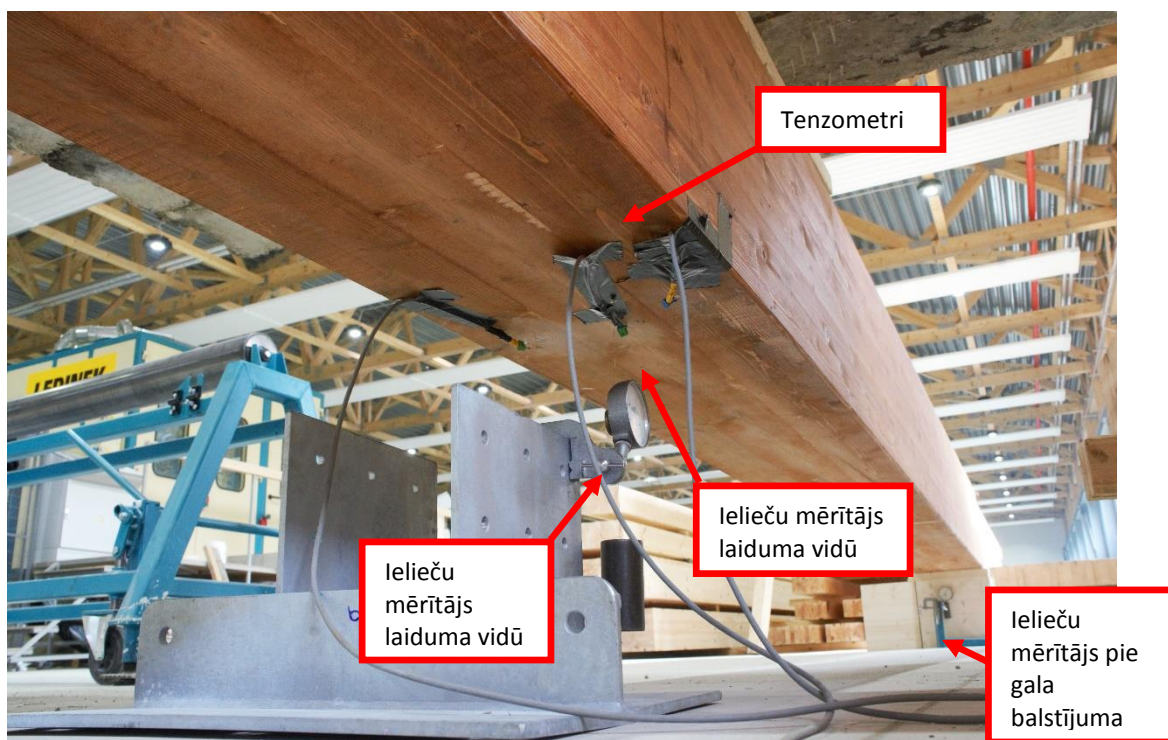
Elastības moduļa noteikšanas princips, kas piemērots šī projekta ietvaros ir attēlots 6.1.attēlā.



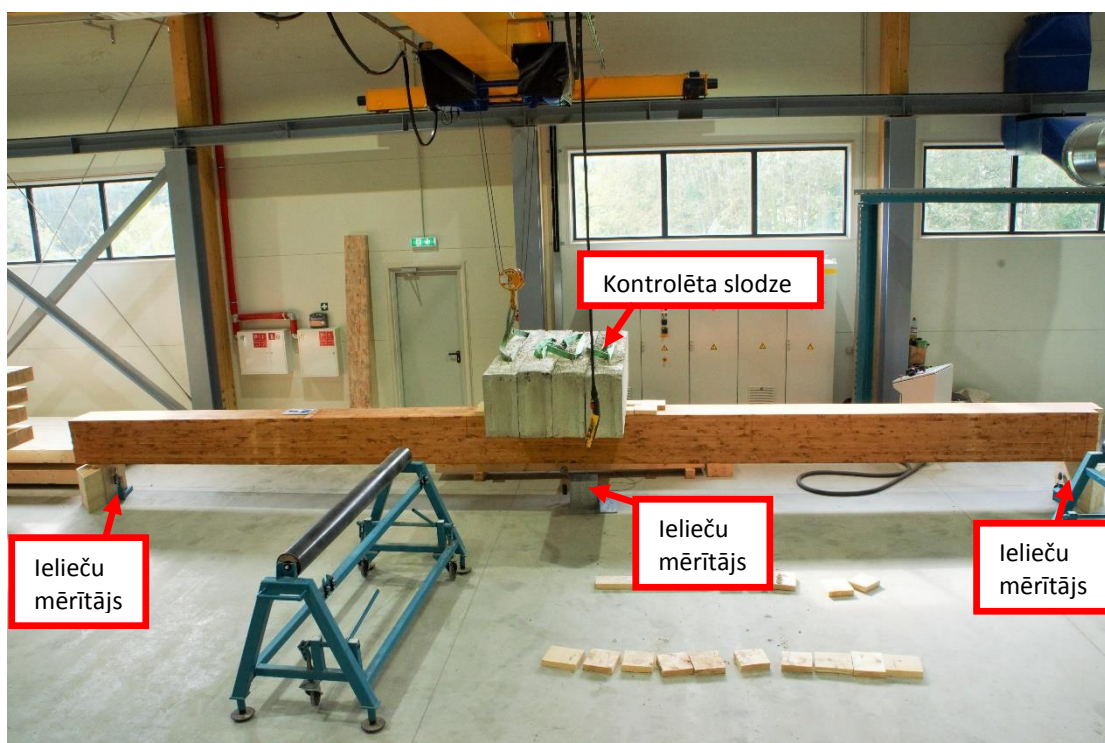
6.1. att. Līmkoksnes deformatīvo īpašību noteikšanas shēma.



Attēlos 6.2 un 6.3 parādīts siju slogošanas process un mērinstrumentu izvietojums. Ielieču mērītāji jeb deflektometri ir izvietoti trīs vietās, t.i. laiduma vidū un balstu vietās. Blatu vietu mērījumi nepieciešami sēšanās un balstu apspiešanās fiksēšanai. Ielieču mērītāju nominālā precizitāte ir 0,01mm.



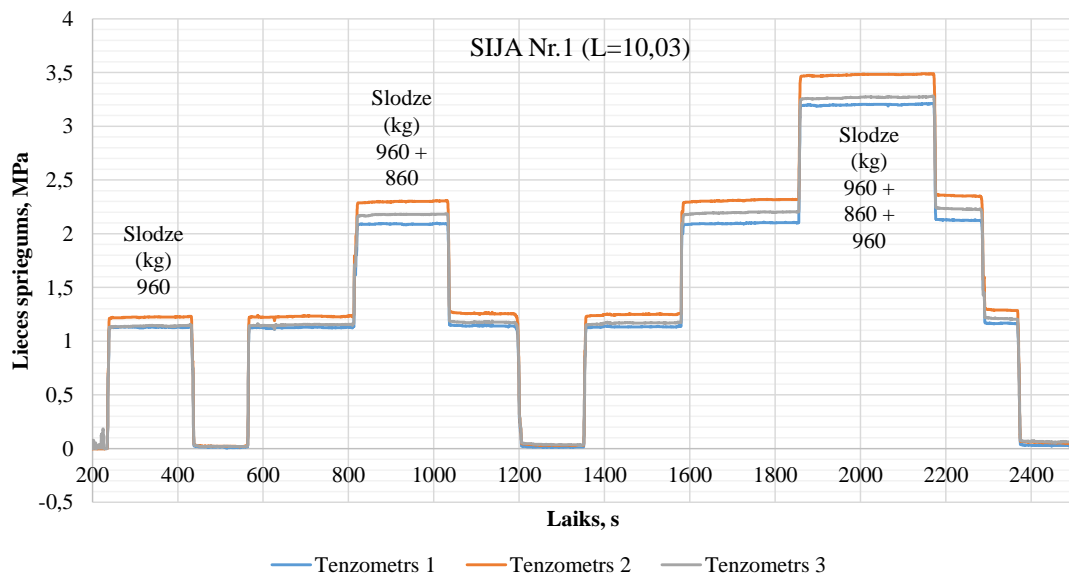
6.2. att. Līmētās koka sijas mērinstrumentu aprīkojums.



6.3. att. Kopnes elementa lieces tests maksimālajā noslogojumā (3780 kg laiduma vidū)

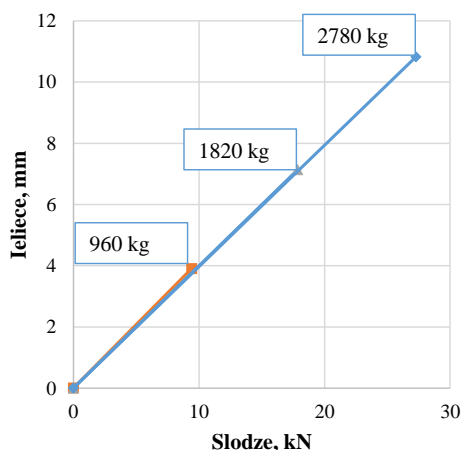
Paralēli deformāciju mērījumiem tika veikti arī koksnes lieces/stiepes spriegumu mērījumi ar tenzometru un HBM Spider 8 sistēmas palīdzību. Katra sijas aprīkojumā ietilpa trīs tenzometri, jo šo mērījumu rezultāti nereti ir atkarīgi no lokālas spriegumu koncentrācijas koka anizotropijas dēļ.

Lai fiksētu paliekošo deformāciju raksturu, slodze uz sijām tika likta pakāpeniski, t.i. ar katru nākamo soli, sija tika pilnībā atbrīvota no iepriekšējās slodzes, kas uzskatāmi ir parādīts spriegumu laika grafikā (6.4.attēls). Kopējais testējamo siju skaits šajā eksperimentā ir trīs vienības ar brīvā laiduma garumiem 10,034m (sija Nr.1), 10,164m (sija Nr.2) un 9,049m (Sija nr.3). Šķērsgriezuma laukums visām testējamām sijām ir vienāds, t.i. augstums  $h = 500\text{mm}$  un platums  $b = 400\text{mm}$ .

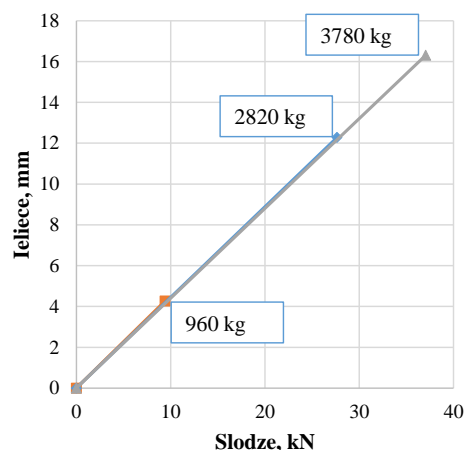


6.4. att. Būvelementa lieces spriegumu pieraksts laikā.

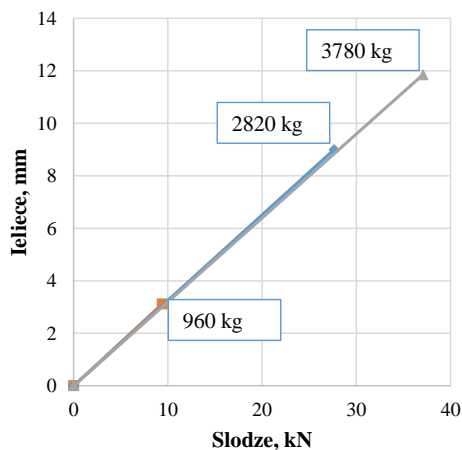
6.5 – 6.7.attēlos ir fiksētas siju deformatīvās īpašības pie dažāda apjoma slodzes laiduma vidū. Deformāciju raksturs ir lineārs un tas nozīmē, ka siju slodzes režīms atrodas lineāri elastīgajā fāzē un šo informāciju var izmantot būvelementa faktiskā elastības moduļa  $E$  noteikšanai.



6.5. att. Sijas Nr.1 slodzes-deformāciju grafiks.

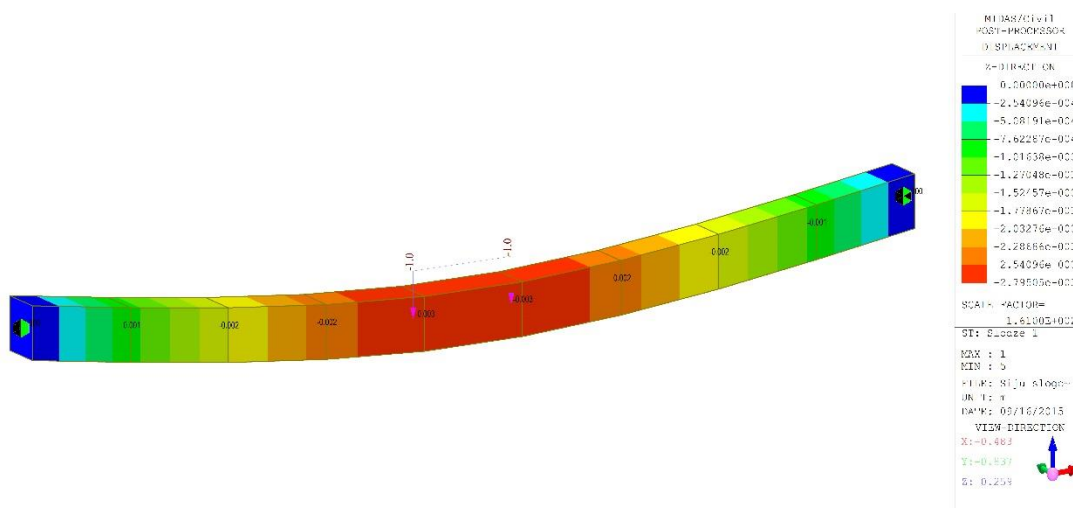


6.6. att. Sijas Nr.2 slodzes-deformāciju grafiks.



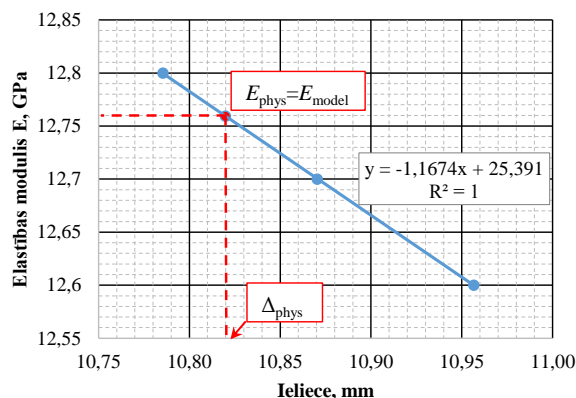
6.7. att. Sijas Nr.3 slodzes-deformāciju grafiks.

Uzliekot virtuāli modelētajam sijām identisku slodzi kā fiziski testētajām sijām tiek iegūtas teorētiskās deformācijas, kuru atšķirība no fiziski testēto siju deformācijām ir tieši atkarīga no modelī pieņemtā elastības moduļa  $E_{\text{model}}$ . Deformācijas fiziskajos testos ( $\Delta_{\text{phys}}$ ) un virtuālajā modelī ( $\Delta_{\text{model}}$ ) būs vienādas, ja abu šo testu pamatā ir vienādi elastības moduļi, t.i.  $E_{\text{phys}} = E_{\text{model}}$ . Attiecīgi, ja modeļa ģeometrijas parametri ir atbilstoši fiziski testējamam objektam, tad variējot ar  $E_{\text{model}}$  vērtībām var noskaidrot faktisko būvelementa elastības moduļa vērtību  $E_{\text{phys}}$ , skatīt attēlus 6.8 un 6.9, kā arī tabulu 1, kurā dots kopsavilkums par katru no trim testējamiem būvelementiem.



6.8. att. Modelētā būvelementa deformācijas.





6.9. att. Būvelementa faktiskā elastības moduļa noteikšana.

Tabula 1

## Būvelementu elastīgo īpašību pārbaudes kopsavilkums

Sija/ laidums	Maksimālā slodze laiduma vidū, kg /kN	Maksimālā deformācija, mm	Deformācija pie nominālā $E_{0,g,mean}=12,6\text{GPa}$	Aprēķinātās $E_{phys}$ vērtības, GPa
Nr.1/ 10,034m	2780 / 27,26	10,82	10,96	12,76
Nr.2/ 10,164m	3780 / 37,07	16,31	15,48	11,92
Nr.3/ 9,049m	3780 / 37,07	11,85	10,93	11,63

Būvelementu pārbaudes rezultāti parāda, ka to elastīgās īpašības ir tuvu nominālajām koksnes elastības īpašībām. Projektā paredzētajai līmkoksnes klasei GL28h ir definētas elastības moduļa vidējā vērtība  $E_{0,g,mean}=12,6\text{GPa}$  un 5% raksturīgā vērtība  $E_{0,g,05}=10,2\text{GPa}$ . Attiecīgi visi testētie būvelementi uzrāda labākas elastīgās īpašības par standartā definēto  $E_{0,g,05}$  un sijas Nr.1 elastības modulis pat ir nedaudz lielāks (1,2%) par šādas klases koksnei definēto vidējo vērtību  $E_{0,g,mean}=12,6\text{GPa}$ . Sijas Nr.2 un Nr.3 elastības modulis ir attiecīgi par 5,4% un 7,7% mazāks kā  $E_{0,g,mean}$ .

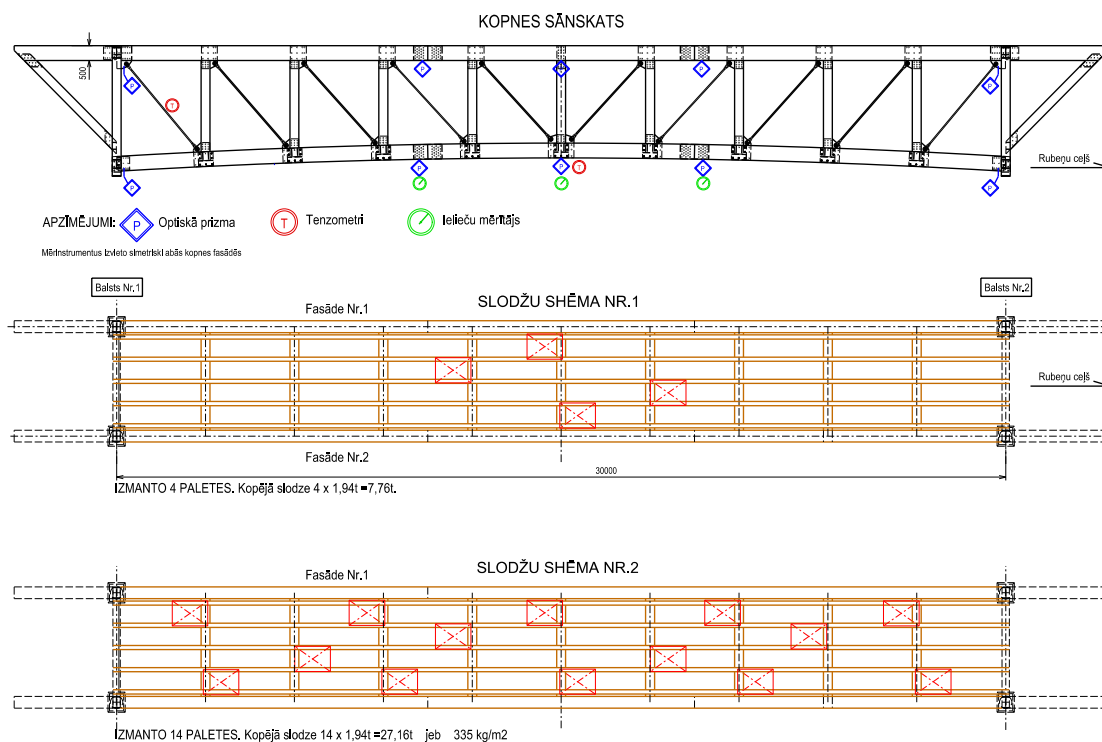
Šāda veida testi uzskatāmi parāda koksnes kā anizotropa materiāla mainīgās īpašības. Lai arī visas izejvielas un ražošanas procesi ir optimizēti noteiktas būvkoksnes klases iegūšanai, pirms testu veikšanas nebija precīzas informācijas par paraugobjektā pielietoto būvkoksni. Attiecīgi testos iegūtā informācija dokumentē būtiskas paraugobjekta elementu īpašības, kas ir nepieciešamas objekta tālākai novērtēšanai monitoringa kontekstā.

## 7. Paraugobjekta statiskā slogošana rūpnieciskos apstākļos

Eksperimentālā paraugobjekta konstrukcija veidota no daudziem telpiskiem mezgliem, kuru kopdarbības novērtējumu var gūt slogojot konstrukciju ar kontrolētu slodzi un paralēli fiksējot konstrukcijas reakciju ar mērījumu palīdzību. Slogošana ir arī uzticams veids, lai pārlicinātos par konstrukcijas drošību un piemērotību paredzētajiem lietošanas apstākļiem. Slogošanas plānošanas stadijā ir jāņem vērā projekta aprēķina slodzes kādām dotā konstrukcija ir projektēta. Attiecīgi slodzei jābūt racionāli izvietotai, piemēram, lai tā netiktu pārlieku koncentrēta vienā vietā, bet pēc iespējas tuvinātos aprēķinu stadijā pieņemtajiem slodzes modeļiem. Dominējošās slodzes dotajam paraugobjektam ir pašsvars un kustīgā gājēju slodze, kuru normatīvā aprēķina vērtība ir 5kN/m<sup>2</sup> jeb ap 500kg/m<sup>2</sup>. Tā kā paraugobjekta ietves klājs ir veidots kā režģota konstrukcija, tad slogošanas vajadzībām tika izstrādāts speciāls slodzes izvietojuma plāns, kas nodrošina vajadzīgo slodzes efektu, bet tajā pašā laikā nepārslogo konstrukcijas mezglus lokālā mērogā. Saskaņā ar konstrukciju pārbaudes standartu LVS 190-11 „Tilta inspekcija un pārbaude ar slodzi” slodzes apjomam jābūt tādām, lai piepūles (spēki, momenti), kuras rodas konstrukcijas elementos no pārbaudes slodzes, nebūtu mazākas par:

- a) piepūli, kuru rada maksimāli lielākā iespējamā slodze, kas, saskaņā ar satiksmes vai speciāliem noteikumiem, var tikt transportēta pār konstrukciju.
- b) 70% no piepūles, kuru rada projektā paredzētā vertikālā īslaicīgā kustīgā slodze, ņemot vērā slodzes drošības koeficientu  $\gamma_t = 1,0$  un pilnu dinamiskā koeficienta vērtību.

Ņemot vērā augstākminētās nostādnes konstrukcijas slogošanā tika paredzēts izmantot bruģa paletes ar nominālo svaru 1,94t, kuras izvieto uz ietves klāja noteiktā secībā. Attiecīgās pārbaudē piemērotās slodzes shēmas un aprīkojums ar mērinstrumentiem ir parādīts attēlā 7.1.



**7.1. att. Paraugobjekta slodžošanas shēmas un mērinstrumentu aprīkojums.**

### 7.1 Slodžošanas process un secība

Eksperimentālā konstrukcija tika samontēta uz turu pamatnes, kas nepieciešamas kopnes ģeometrijas nodrošināšanai. Slodžošanas procesa sākotnējais etaps pēc kopnes visu mezglu montāžas ir pakāpeniska turu atbrīvošana no laiduma tā, lai konstrukcija balstās tikai uz projektā paredzētajām četrām balstījuma vietām. Darba drošības nolūkos turas netika pilnībā noņemtas atstājot telpu kopnes deformāciju realizācijai slodžošanai ar mainīgo slodzi pēc 7.1.attēlā dotajām shēmām. Šādā veidā atbrīvojot turas ir iespējams konstatēt paraugobjekta sākotnējās deformācijas un mezglu apspiešanos, ko izraisa pašsvars.



**7.2.att. Paraugobjekta novietojums montāžas stāvoklī pirms slodžošanas.**

Pēc turu atbrīvošanas 10-20cm augstumā no kopnes abiem ar celtņu palīdzību tika realizēta 1.slodzes shēma, kurā kopnes centrālajā daļā izklaidēti novietoja bruģa paletes ar kopējo svaru 7,8t (7.3.attēls).



**7.3.att. Slodzes shēmas Nr.1 realizācija.**

Slodzes shēma Nr.1 tika izturēta 10 minūtes pēc kurām tika veikti atkārtotie deformāciju mērījumi. Pēc mērījumu nolasīšanas slodze tika pilnībā noņemta un veikti kopnes paliekošo deformāciju mērījumi.

Slodzes shēmu Nr.2 īstenoja liekot bruģa paletes no kopnes galiem uz vidu. Mērījumi tika veikti identiski ka 1.slodzes shēmā, t.i. divas reizes slodzes gaitā un vienreiz pēc pilnīgas slodzes noņemšanas. Kopējais slodzes apjoms šajā shēmā ir  $14 \times 1,94 = 27,2t$  (7.4.attēls).





**7.4.att. Slodzes shēmas Nr.2 realizācija.**

## 7.2 Mērījumu pozīcijas un mērinstrumenti

Paraugobjekts slogošanas gaitā tika aprīkots ar trīs sistēmu mērinstrumentiem (skatīt kopā ar 7.1.attēlu):

- 1) Optiskā tahimetrijas sistēma Trimble (nominālā izšķirtspēja 1mm), kurā ietilpst datortahimētrs, optiskās prizmas un bezvadu vadības bloks, kā arī datorprogramma datu apstrādei (7.5.att.). Sistēma paredzēta globālo konstrukcijas pārvietojumu mērījumiem, kas tiek veikti ar raksturīgajos punktos izvietotu optisko prizmu palīdzību. Prizmas izvietotas abās kopnes fasādēs un abās kopnes joslās, t.i. augšā un apakšā, lai gūtu maksimālu priekšstatu pārvietojumu procesiem slogošanas gaitā.



**7.5.att. Tahimētra sistēma pārvietojumu mērījumiem.**

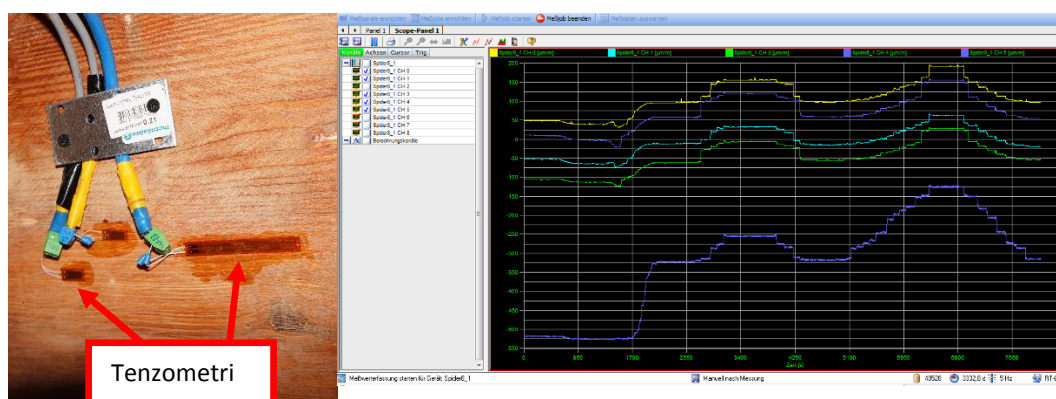
- 2) Mehānisko ielieču jeb deflektometru sistēma, kas daļēji dublē optisko tahimētra mērījumus. Kopā pielietoti seši ielieču mērītāji un tie novietoti apakšējās joslas

laiduma vidū un kopnes galvenajos savienojuma mezglos. Deflektometru nominālā precizitāte ir 0,1mm (Максимов ПМ-3).



**7.6.att. Mehānisko deflektometru sistēma.**

- 3) Tenzometru sistēma ar kuru tiek mērīts materiāla pagarinājums lokālā mērogā atkarībā no pielietotā tenzometra garuma. Zinot materiāla elastīgās īpašības (skatīt 6.nodaļu) ir iespējams noteikt slodzes izraisītos spriegumus. Sistēmas priekšrocība ir tāda, ka mērījumus var nepārtraukt un atspoguļot tos grafiski uzreiz slodzes gaitā (7.7.attēls).

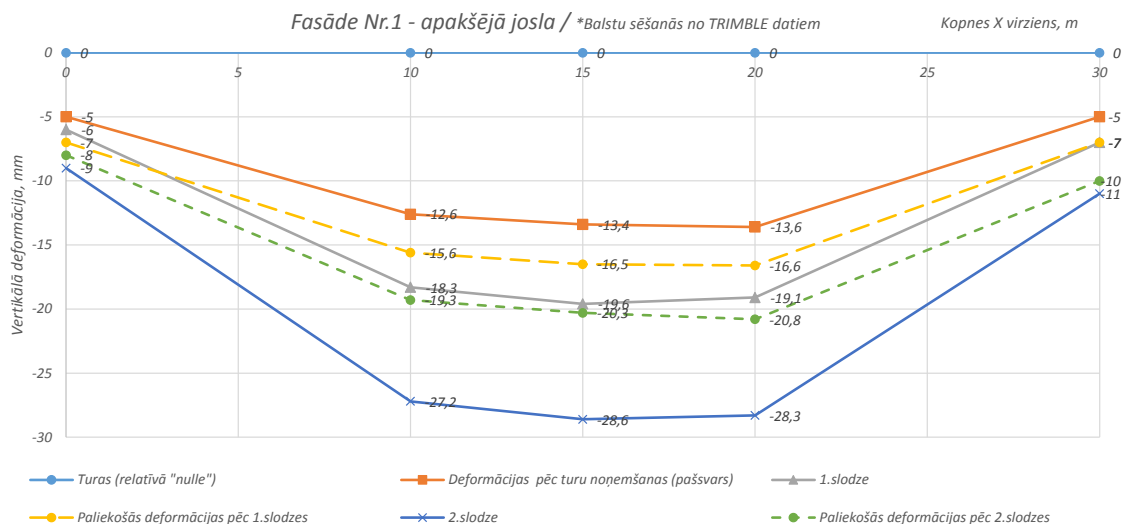


**7.7.att. Tenzometru sistēma.**

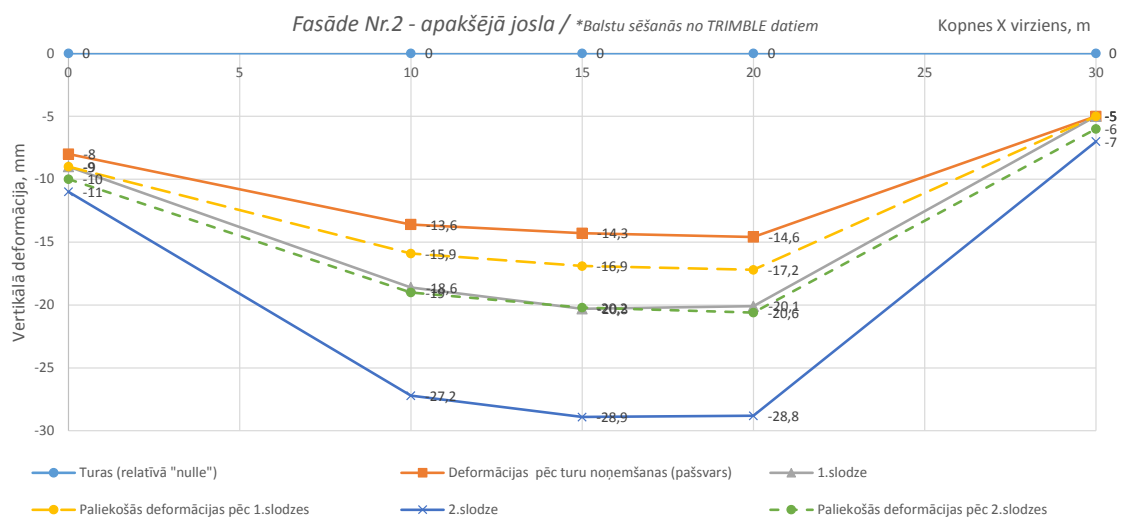
Tenzometri tika izvietoti laiduma vidū galveno kopnes joslu apakšējās virsmās.

### 7.3 Mērījumu rezultāti

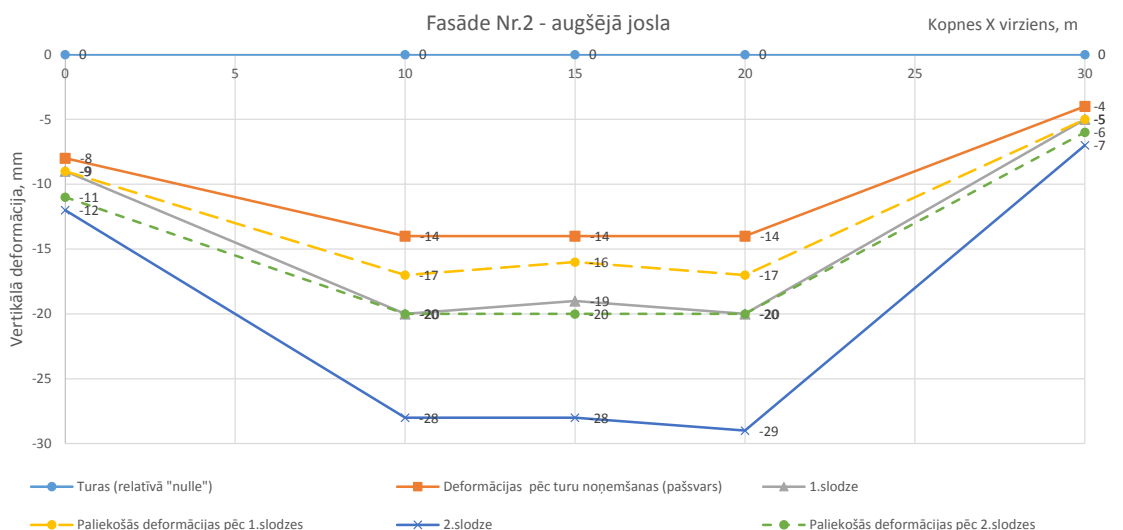
Galvenie mērījumu rezultāti, kas attiecināmi uz deformācijām ir apkopoti attēlos 7.8-7.11 un Tabulā 2.



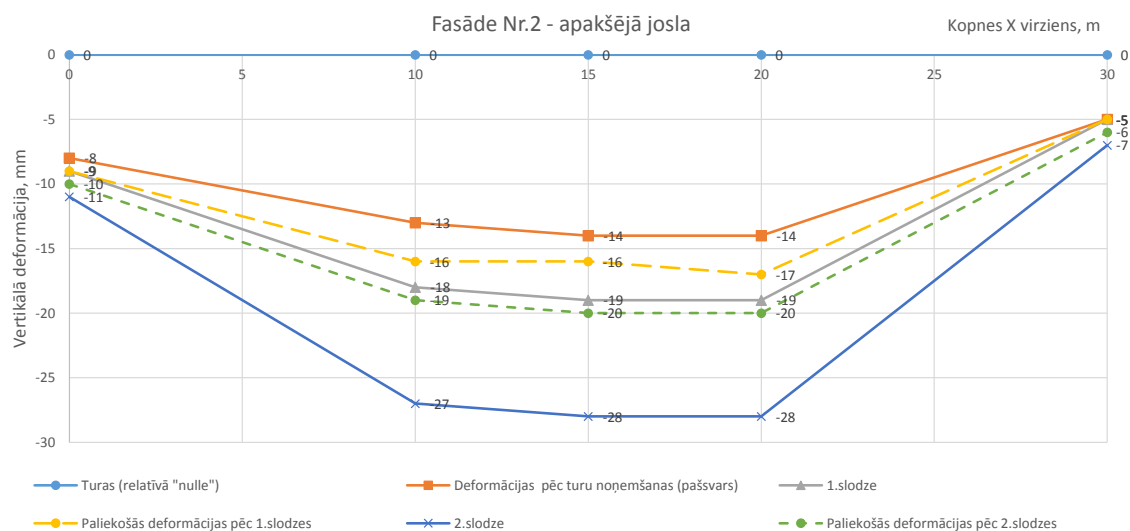
7.7.att. Fasāde Nr.1 - ielieču mērītāju rezultāti.



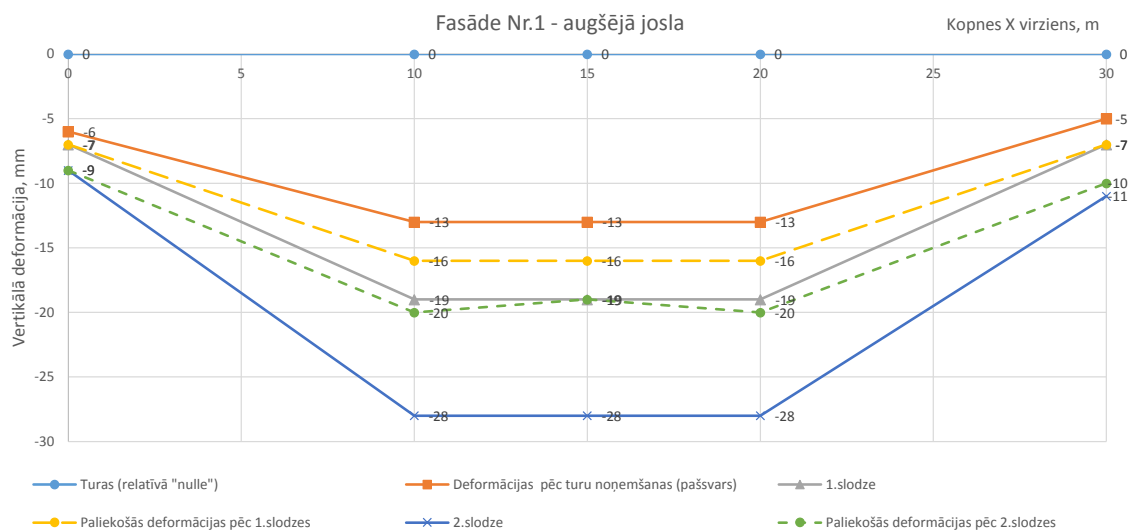
7.8.att. Fasāde Nr.2 - ielieču mērītāju rezultāti.



7.9.att. Fasāde Nr.2 (augšējā josla) – tahimetra sistēmas rezultāti.



7.10.att. Fasāde Nr.2 (apakšējā josla) – tahimetra sistēmas rezultāti.



7.11.att. Fasāde Nr.1 (augšējā josla) – tahimetra sistēmas rezultāti.



Tabula 2

## Statiskās slogošanas ielieču kopsavilkums.

### Ielieču mērītāju sistēma

FASĀDE 1 - Apakšējā josla	Deformācija laiduma vidū	Neatgriezeniskās deformācijas (%)	1/x laiduma
Deformācijas pēc turu noņemšanas (pašsvars)	8,4		
1.slodze	4,7		6383
Paliekošās deformācijas pēc 1.slodzes	1,1	23,4	
2.slodze	10,2		2941
Paliekošās deformācijas pēc 2.slodzes	2,9	28,4	
	* Vērtība pēc turu noņemšanas		

Kopā paliekošās deformācijas pēc  
slogošanas (mm)

11,3

### Trimble sistēma

FASĀDE 1 - Augšējā josla	Deformācija laiduma vidū	Neatgriezeniskās deformācijas (%)	1/x laiduma
Deformācijas pēc turu noņemšanas (pašsvars)	7,5		
1.slodze	4,5		6667
Paliekošās deformācijas pēc 1.slodzes	1,5	33,3	
2.slodze	10,5		2857
Paliekošās deformācijas pēc 2.slodzes	2	19,0	
	* Vērtība pēc turu noņemšanas		

Kopā paliekošās deformācijas pēc  
slogošanas (mm)

9,5

FASĀDE 2 - Augšējā josla	Deformācija laiduma vidū	Neatgriezeniskās deformācijas (%)	1/x laiduma
Deformācijas pēc turu noņemšanas (pašsvars)	8		
1.slodze	4		7500
Paliekošās deformācijas pēc 1.slodzes	1	25	
2.slodze	10,5		2857
Paliekošās deformācijas pēc 2.slodzes	3,5	33,3	
	* Vērtība pēc turu noņemšanas		

Kopā paliekošās deformācijas pēc  
slogošanas (mm)

11,5

FASĀDE 2 - Apakšējā josla	Deformācija laiduma vidū	Neatgriezeniskās deformācijas (%)	1/x laiduma
Deformācijas pēc turu noņemšanas (pašsvars)	7,8		
1.slodze	5,5		5455
Paliekošās deformācijas pēc 1.slodzes	2,1	38,2	
2.slodze	12,1		2479
Paliekošās deformācijas pēc 2.slodzes	4,4	36,4	
	* Vērtība pēc turu noņemšanas		

Kopā paliekošās deformācijas pēc  
slogošanas (mm)

12,2

FASĀDE 2 - Apakšējā josla	Deformācija laiduma vidū	Neatgriezeniskās deformācijas (%)	1/x laiduma
Deformācijas pēc turu noņemšanas (pašsvars)	7,5		
1.slodze	4,5		6667
Paliekošās deformācijas pēc 1.slodzes	1,5	33,3	
2.slodze	11,5		2609
Paliekošās deformācijas pēc 2.slodzes	4,5	39,1	
	* Vērtība pēc turu noņemšanas		

Kopā paliekošās deformācijas pēc  
slogošanas (mm)

12,0

Pēc turu atbrīvošanas pašsvara ietekmē laiduma konstrukcija deformējās vertikālā virzienā par 7,5-8,4mm atkarība no mērījuma vietas un pielietotās mērījumu sistēmas. Šajās deformācijās ietverta konstrukcijas sākotnējā mezglu apspiešanās un elementu

savstarpējā pielāgošanās, kurā pārdalās lokāli spriegumi. Tā kā visi mezgli veidoti ar tērauda plāksņu un tapu/skrūvju palīdzību, tad daļa deformāciju norisinās tapu un koksnes kontakta virsmās. Slodzes izraisītie spēki tālāk tiek pārdalīti starp tērauda slīpajām saitēm un nesošajām līmkoksnes garsijām par ko liecina paliekošie spriegumi šajos elementos pēc turu noņemšanas.

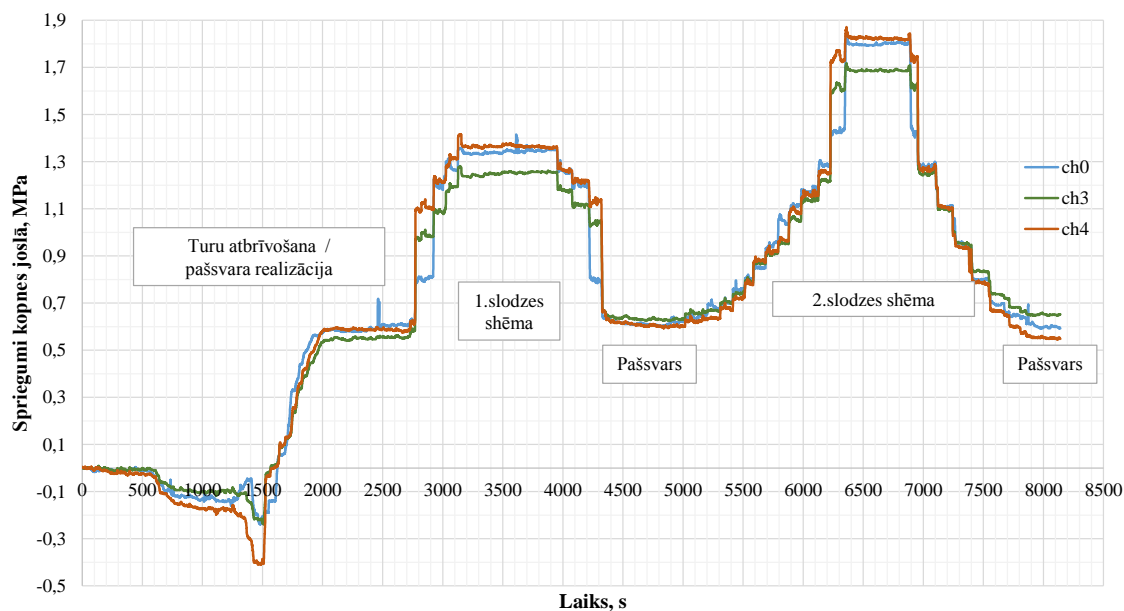
Deformāciju apjoms dažādās mērījuma vietās ir atšķirīgs gan pēc absolūtajam vērtībām, gan pēc paliekošo deformāciju sadalījuma. Tas nozīmē, ka pastāv gan darbu izpildes kvalitātes variācija, dažādas pakāpes saspriegums tērauda slīpajos stieņos, gan arī nenoteiktība attiecībā uz mērījuma rezultātiem.

Maksimālā ieliece 2.slodzes shēmā konstatēta apjomā, kas līdzinās 2479 daļai no laiduma garuma. 5.Eiropas kodeksa lietojamības limitējošā vērtība nozīmīgām būvēm ir 1/500 daļa no laiduma, attiecīgi globālās konstrukcijas deformāciju prasības tiek pilnībā nodrošinātas.

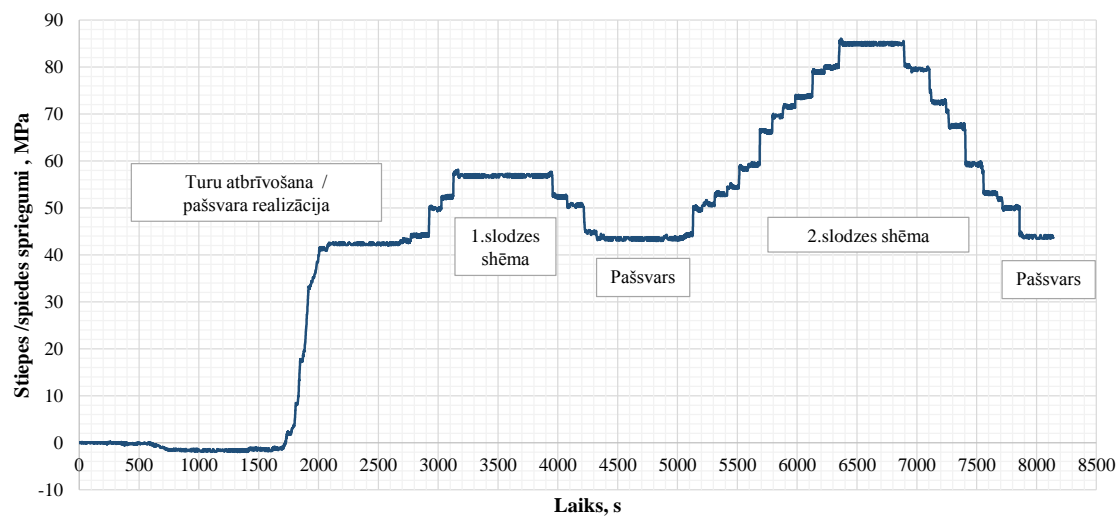
Paliekošo deformāciju apjoms pēc 1.un 2.slodzes shēmas realizācijas laiduma vidū svārstās no 19% līdz 39% atkarībā no konstruktīvās mērījuma vietas. Šādu neatgriezenisko deformāciju apjomu var izskaidrot ar koksnes lokālu apspiešanos mezglos, kur slodžu pārnese realizējas ar tapu un koksnes kontaktvirsmu palīdzību. Jo precīzāk ir iestrādātas tapas koksne un metāla plāksnēs, jo lielāka kontaktvirsmas tiek nodrošināta slodžu pārdalei un attiecīgi mazāk iespēju lokālām plastiskām deformācijām.

Projekta izstrādes gaitā konstrukcijām tika paredzēts konstruktīvais pacēlums (20mm), kas pilnībā kompensē vizuāli estētiskās paliekošo deformāciju efektu.

Mezglu izpildes kvalitātes nozīmi apstiprina arī statiskās slogošanas spriegumu mērījumu rezultāti, kas grafiski apkopoti attēlos 7.12 un 7.13. Apakšējās joslas ārējo šķiedru spriegumi laiduma vidū ir salīdzinoši mazi un pie maksimālās slodzes nepārsniedz pat 1,9MPa. Zemais spriegumu līmenis izskaidrojams ar kopnes galveno joslu robusto šķērsgriezumu, kas veidots kā taisnstūris 500x400mm. Mezglos, savukārt, spēku pārnese sākotnēji notiek tikai ar tapu kontaktvirsmu palīdzību, attiecīgi kopnes ass spēki pirms pārdalīšanās visā koksnes masīvā koncentrējas uz mazāku laukuma vienību. Šis princips uzskatāmi parādīts arī savilces spriegumu grafikā (7.13.att.), kur maksimālais stiepes spriegums ir sasniedzis 85MPa. Aptuveni puse šī apjoma ir veidota no pašsvara ietekmes.



7.12.att. Statiskā slodzošana. Spriegumi kopnes apakšējā joslā (laiduma vidus).



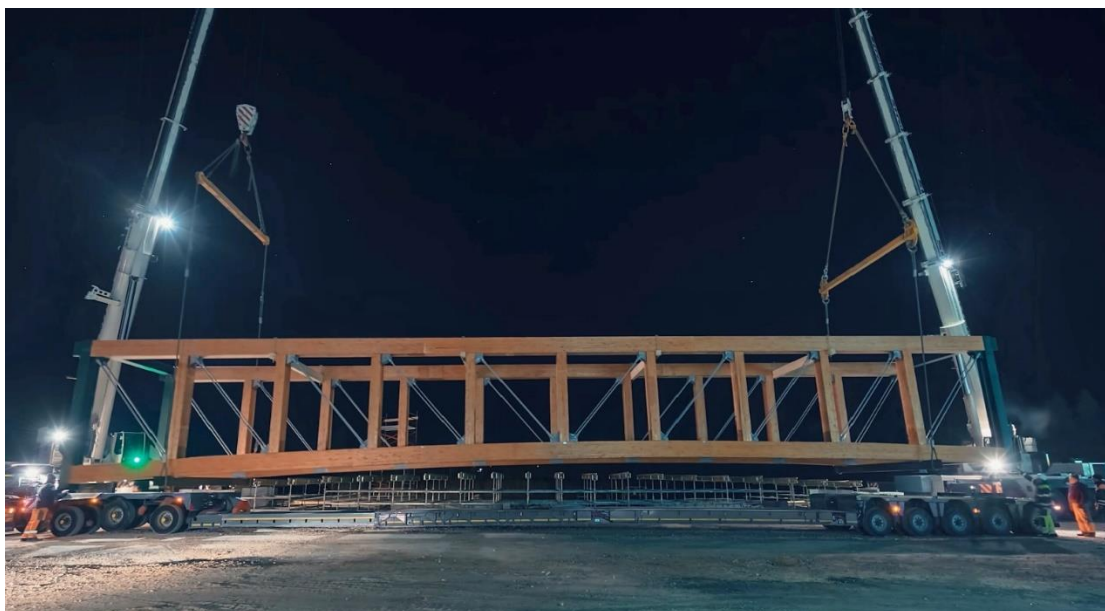
7.13.att. Statiskā slodzošana. Spriegumi tērauda savilcē pie gala portāla.

Dotā grafiskā informācija, kas attiecināma uz spriegumu vērtībām ir iegūta izmantojot šādas abu materiālu elastīgās īpašības:

- Koksnei  $E_{0,g}$  jeb  $E_{phys}$  = 12,1GPa, kas ir vidējā vērtība no 6.nodaļā iegūtajām testēto materiālu vērtībām;
- Tēraudam  $E_{steel}$  = 210GPa.

## 8. Eksperimentālā parauga transportēšana un montāža uz paraugobjektu

Tā kā eksperimentālā objekta statiskā slogošana risinājās līmētās koksnes rūpnīcas teritorijā, tad jau pārbaudītu konstrukciju nedemontētā stāvoklī bija paredzēts nogādāt parauglaukumā Tērvetē. Transportēšana tika īstenota izmantojot speciālu lielgabarīta transporta piekabi; konstrukcijas celšanas un novietošanas funkcijas nodrošināja divi celtņi. Darbi risinājās naktī un krava visā ceļā garumā tika pavadīta ar policijas ekipāžām. Atsevišķu ceļa posmu fizisko ierobežojumu dēļ tika ieplānota un saskaņota arī lokālas satiksmes organizācijas izmaiņas.



**8.1.att. Eksperimentālā paraugobjekta iecelšana transporta piekabē.**



**8.2.att. Eksperimentālā paraugobjekta piegāde parauglaukumā Tērvetē.**



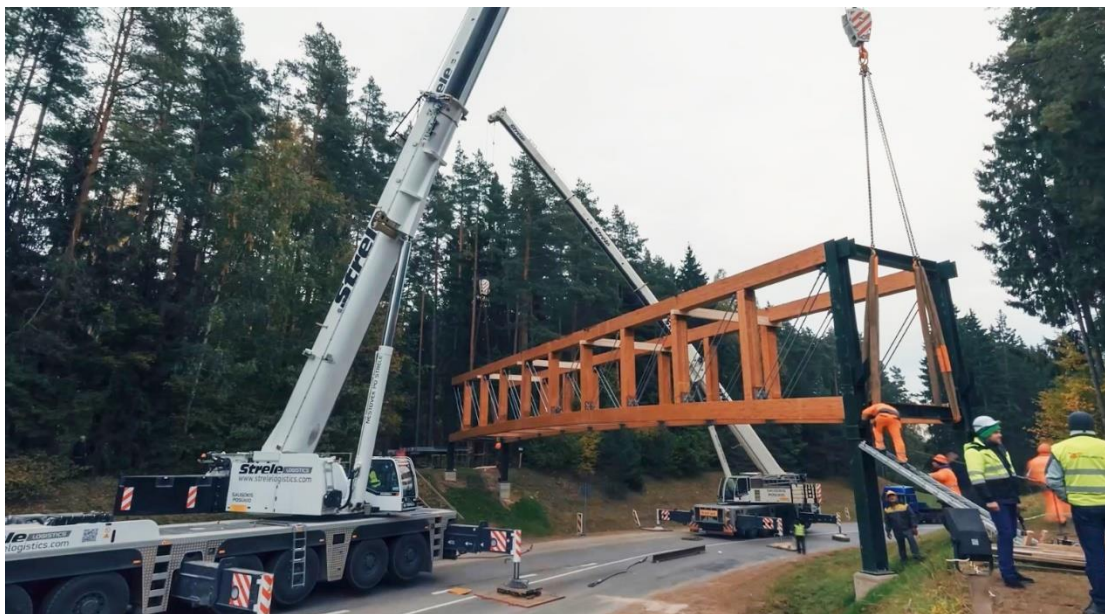


**8.3.att. Konstrukcijas izcelšana no transporta piekabes.**



**8.4.att. Konstrukcijas iecelšana laidumā.**





**8.5.att. Konstrukcijas novietošana uz pamatu balstu statiem.**



**8.6.att. Konstrukcijas fiksāža projektā paredzētajā vietā.**

Konstrukcijas transportēšana un montāža parauglaukumā tika realizēta nepilnu 24 stundu laikā. Šis aspekts uzskatāmi parāda koka konstrukciju efektivitāti no būvniecības organizācijas viedokļa, kā arī priekšrocības salīdzinot, piemēram, ar monolītām dzelzsbetona būvēm, kas nereti izraisa nozīmīgus satiksmes ierobežojumus ceļu tīklā vairāku mēnešu garumā un pakļauj iesaistītās puses papildus satiksmes un darba drošības riskiem.

## 9. Dinamikas testi parauglaukumā

Konstrukcijas dinamiskā pārbaude ir jāveic jau pilnībā gatavai konstrukcijai, kas atrodas tai paredzētajos ekspluatācijas būvaprakšos. Tas nozīmē, ka būvei jābūt arī pilnībā aprīkotai un šajā gadījumā dinamiskie testi tika veikti tikai tad, kad ir pilnībā pabeigts jumts, margas u.c. komponentes. Visi šie elementi zināmā mērā ietekmē konstrukcijas masu, stinguma sadalījumu un dinamiskās svārstības, ko ierosina pārvada dominējošā slodze, t.i. gājēji.

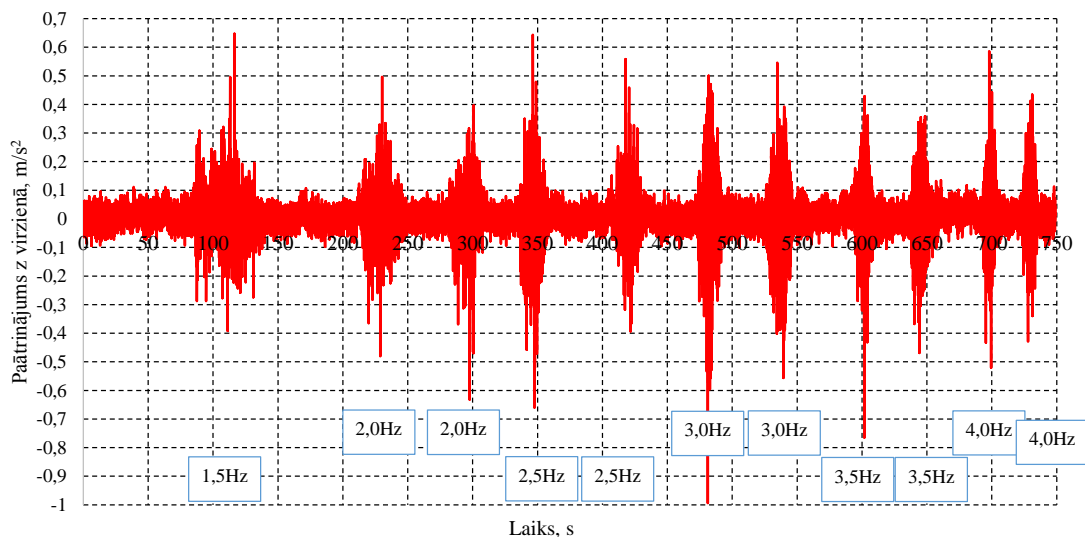
Gājēju slodze pēc sava rakstura var būt gan statiska, gan dinamiska un attiecīgi gājēju pārvietošanās pa konstrukcijas ietvi izraisa uzspiestās svārstības. Dinamikas testu mērķis ir noskaidrot konstrukcijas reakciju uz tipiskām gājēju izraisītām svārstībām un novērtēt to pēc lietojamības un gājēju komforta kritērijiem. Šādi testi sevišķi būtiski ir vieglām konstrukcijām ar salīdzinoši lieliem laidumiem.

Paraugobjekta konstrukcijas dinamiskās īpašības tika noteiktas ar fizisku testu palīdzību izmantojot kontrolētas uzspiestās svārstības. Svārstību kvantitatīvās īpašības tika fiksētas ar trīs asu akselerometriem, kas fiksē konstrukcijas kustības paātrinājumu izmaiņas laikā. Konstrukcijas paātrinājumi ir viens komfortu definējošiem lielumiem, ko pielieto būvju novērtēšanā. Veicot paātrinājumu datu apstrādi ar matemātisku algoritmu palīdzību, šajā gadījumā, Furjē (*Fourier*) analīzi, iespējams iegūt konstrukcijas pašsvārstību frekvenču datus, kas raksturo konstrukcijas elementu stingumu un masas sadalījuma kopproduktu.

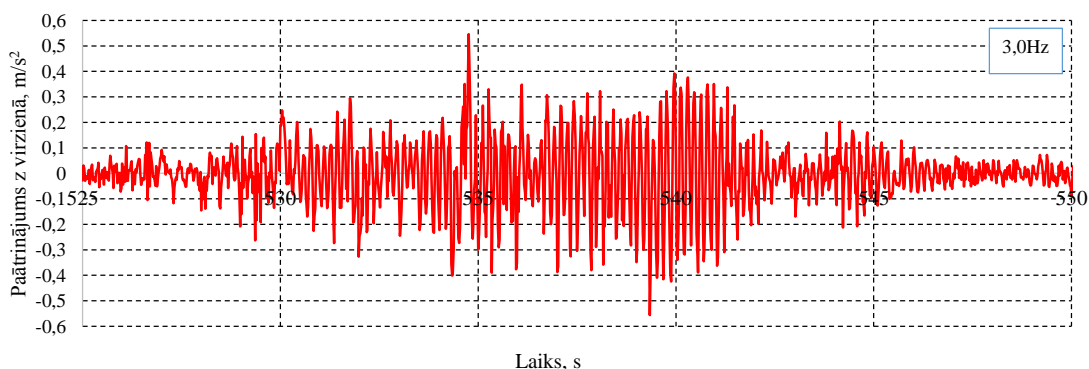
Tipiska gājēju pārvietošanās soļu frekvence ir 1,5Hz (lēns solis) līdz 4Hz (skriešana). Ja pārvietošanās notiek sinhronā solī un konstrukcijas pašsvārstību frekvence atrodas šajā pārvietošanās frekvences diapazonā, tad iespējama svārstību pastiprināšanās jeb rezonanse. Rezonanses iespaidā būtiski pieaug gan ielieču amplitūda, gan spriegumi konstrukcijā salīdzinot ar tādu pašu gājēju slodzi statiskā režīmā.

Kā uzspiesto svārstību signāls šajos dinamikas testos tika izmantota cilvēku pārvietošanās sinhronā solī minētajās riska frekvencēs (1,5-4Hz). Pārvietošanās organizēta pa klāja garenvirziena siju trajektoriju; cilvēku grupa veidota no trim cilvēkiem ar kopējo svaru 270kg un tie bija izvietoti viens otram blakus pa visu pārvada šķērsvirzienu. Pēc katra eksperimenta grupas pārvietošanās frekvence tika mainīta ar intervālu 0,5Hz, skatīt attēlus 9.1 un 9.2.

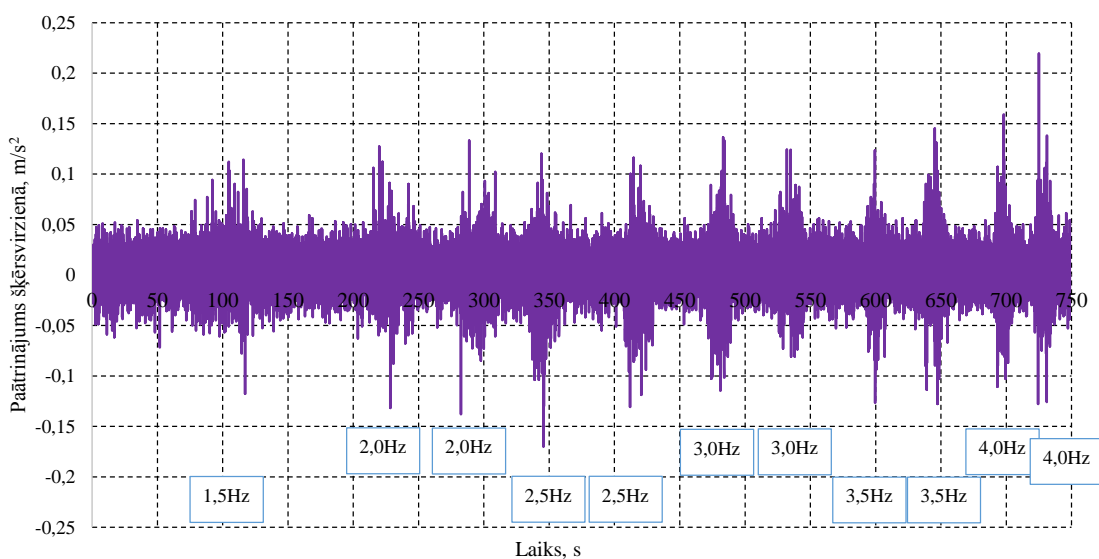
Otrs izmantotais testa veids ir konstrukcijas reakcija uz jeb punktveida ierosinājumu, t.i. signāls tiek pielikts tikai vienu reizi un tas netiek uzturēts laikā. Tādā veidā ļauj svārstībām dabiski nodzist (attēls 9.4) un tas ļauj noteikt konstrukcijas iekšējās dzišanas raksturojumu un fundamentālo pašsvārstību frekvenci. Arī šāda veida eksperimentā mērījumi tiek veikti ar akselerometriem, kas nostiprināti laiduma vidū.



**9.1.att. Dinamika. Vertikālie paātrinājumi. Svārstību avots - cilvēku grupas sinhrona parvietošanās.**



**9.2.att. Dinamika (fragments). Paātrinājumi. Cilvēku grupas sinhrona parvietošanās ar 3Hz frekvenci.**



**9.3.att. Dinamika. Šķēsvirziena paātrinājumi. Svārstību avots - cilvēku grupas sinhrona parvietošanās.**

Sinhronas pārvietošanās testu maksimālās paātrinājumu vērtības ir apkopotas tabulā 3. Kritiski izvērtējot šīs vērtības un salīdzinot tās ar rekomendētajiem komforta robežlielumiem, jāsecina, ka gājēju komforta līmenis atbilst klasei CL2 un tas atbilst



vidējam vai pat tuvu maksimālajam komforta līmenim gan pēc vertikālā, gan horizontālā paātrinājuma kritērijiem (skatīt tabulu 4).

Tabula 3

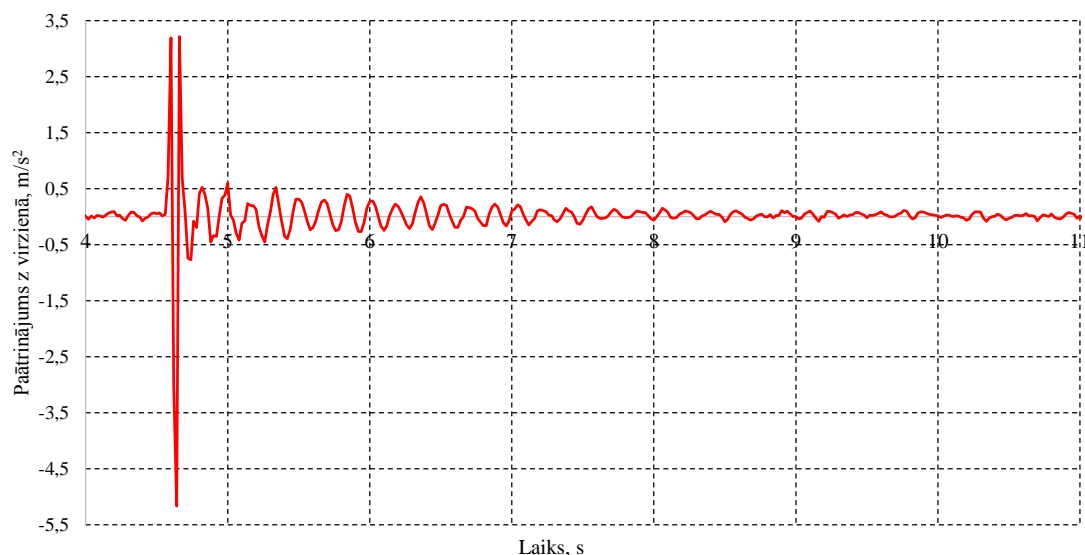
**Dinamikas testi. Cilvēku grupas sinhrona pārvietošanās maksimālie paātrinājumi**

Maksimālie paātrinājumi, $m/s^2$	1,5Hz		2,0Hz		2,5Hz		3,0Hz		3,5Hz		4,0Hz	
	1.sērija		1.sērija	2.sērija	1.sērija	2.sērija	1.sērija	2.sērija	1.sērija	2.sērija	1.sērija	2.sērija
<b>X (Šķērsvirziens)</b>	-0,12	-	-0,13	-0,14	-0,17	-0,13	0,14	0,12	-0,13	0,15	0,16	0,22
<b>Z (Vertikāli)</b>	0,65	-	0,5	-0,63	0,66	0,56	-0,99	0,56	-0,76	-0,47	0,59	0,43

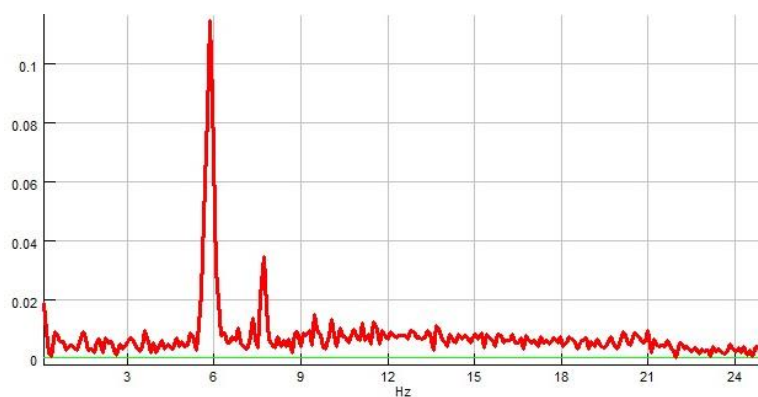
Tabula 4

**Gājēju komforta vērtēšanas sistēma**

Komforta klase	Komforta līmenis	Vertikālo paātrinājumu limits [ $m/s^2$ ]	Horizontālo paātrinājumu limits [ $m/s^2$ ]
CL 1	Maksimāls	< 0,50	< 0,10
CL 2	Vidējs	0,50 - 1,00	0,10 – 0,30
CL 3	Minimāls	1,00 – 2,50	0,30 – 0,80
CL 4	Nepieņemams	> 2,50	> 0,80


**9.4.att. Punktteida impulss. Vertikālā virziena paātrinājumi.**

Pēc punktteida dinamiskā ierosinājuma konstrukcija praktiski uzreiz noslāpē lielo amplitūdas svārstības. Svārstību pilnīga izdzišana notiek aptuveni 4,5 sekunžu laikā. Vienas sekundes intervālā ir aptuveni sešas pilna cikla svārstības, tātad konstrukcijas vertikālā pašsvārstību fundamentālā frekvence ir aptuveni 6Hz. Precīzāku pašsvārstības rādītāju var iegūt dekomponējot signālu pēc Furjē algoritma, skatīt attēlu 9.5, kā rezultātā konstatēts, ka pirmā pašsvārstību frekvence ir 5,9Hz, taču neliela aktivitāte norisinās arī pie 7,7Hz frekvences.



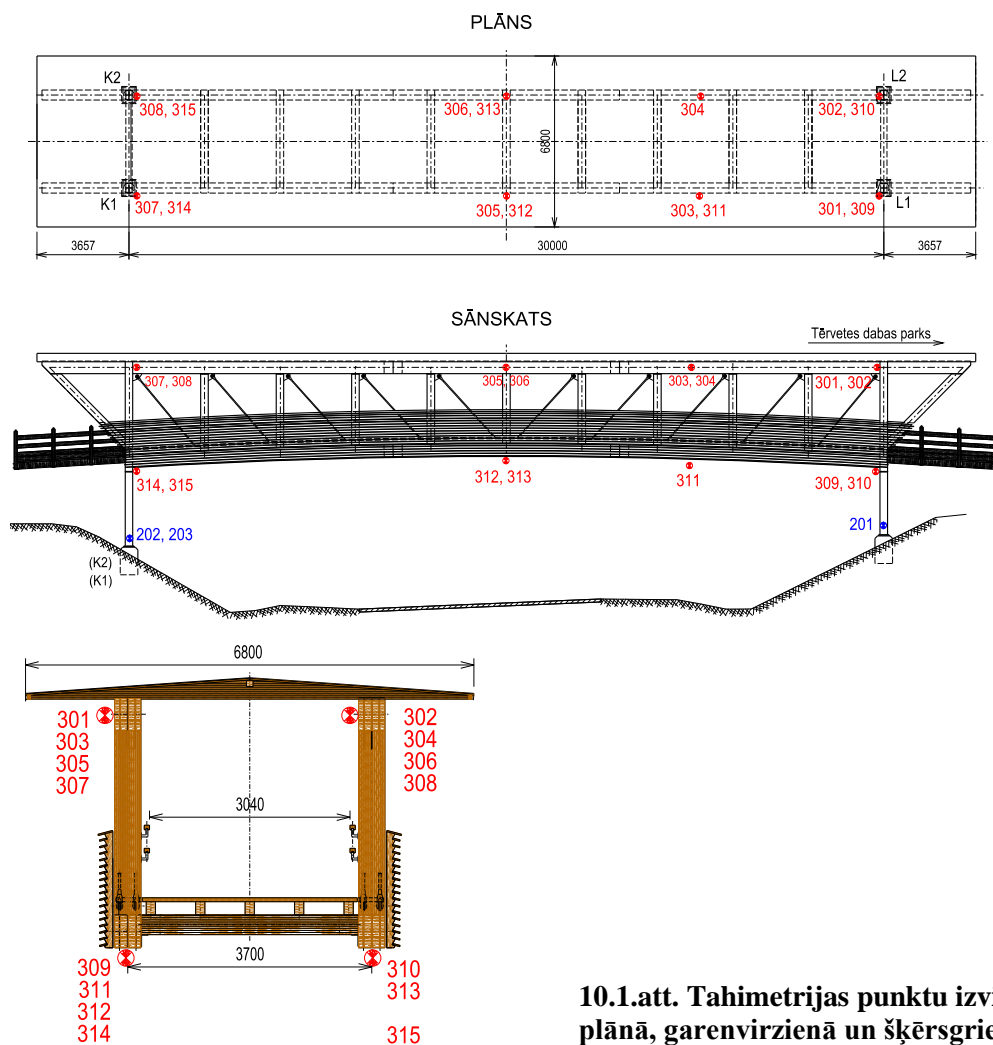
**9.5.att. Konstrukcijas vertikālo (z virziena) svārstību spektrogramma.**

Konstatētās pašsvārstību frekvences ir ārpus kritiskajām robežām, ko nosaka Eirokodeksa normatīvs ( $f_0 < 5\text{Hz}$ ). Tas nozīmē, ka nepastāv riski attiecībā uz konstrukcijas rezonansi no gājēju slodzes. Salīdzinoši augstās pašsvārstību frekvenču vērtības ir izskaidrojamas ar konstrukcijas stingumu, kas raksturīgs daudziem kopnes tipa tiltiem. Šajā gadījumā kopni veido masīvi koksnes būvelementi, kas apvienoti vienā noslēgtā telpiskā konstrukcijā ar salīdzinoši lielu augstuma attiecību pret kopējo garumu.

## 10. Konstrukcijas ģeometrijas monitorings

Jebkurai jaunbūvei vai konstrukcijai ir nepieciešams zināms laika daudzums, lai adaptētos klimatiskajos vai mainīgu slodžu apstākļos. Nereti arī būvmateriālam kā tādām ir raksturīgi savi formēšanās procesi tieši izbūves sākuma stadijā. Koka konstrukcijām piedēvē, piemēram, šļūdes īpašības, kas saistītas ar deformāciju pieaugumu konstantā pieliktās slodzes režīmā (pašsvars). Tam paralēli var notikt arī mezglu elementu lokāla adaptēšanās apkārtējās vides apstākļiem. Koksnes spiedes pretestība, kā zināms, ir tieši atkarīga no mitruma satura materiālā. Lai veiktu konstrukcijas veiktspējas novērtēšanu ilgtermiņā, ir nepieciešams organizēt sistemātisku uzraudzību jeb monitoringu, kuros tiek fiksēti būtiskākie konstruktīvie parametri un to izmaiņas laikā. Šim nolūkam paraugobjekts ir aprīkots ar tahimetrijas elementiem, kas kalpo kā konstrukcijas ģeometrijas raksturīgie punkti un ir iekļauti paraugobjekta vertikālo pārvietojumu uzraudzībai ilgākā laika periodā (trīs un vairāk gadi). Uzraudzība paredz pārvada sākuma ekspluatācijas stadijā vienu reizi mēnesī veikt tahimetrijas mērījumus ar mērķi izsekot konstrukcijas deformācijām laikā.

Tahimetrijas punktu izvietojums garenvirzienā, plānā un šķērsgrīzumā parādīts attēlā 10.1. Kopumā uzstādīti 15 tahimetrijas punkti – 301 – 315. Punkti 201 – 203 – atbalsta tīkls. Tahimetrijas punktu nolasīšanu veica ar firmas “Trimble” tahimetru S8 ar leņķisko precizitāti 1”.



10.1.att. Tahimetrijas punktu izvietojums plānā, garenvirzienā un šķērsgrīzumā.



Pēc pārvada nodošanas ekspluatācijā ir veikti divi mērījumu cikli. Pirmais mērījumu cikls kalpo kā atskaites punkts visiem pārējiem mērījumiem. Nolasījumu rezultāti apkopoti tabulā 5.

Tabula 5

**Tahimetrijas nolasījumi**

1. nolasījumu cikls				2. nolasījumu cikls			
Tahimetrijas punkts	Nolasījumi, m			Tahimetrijas punkts	Nolasījumi, m		
	x	y	z		x	y	z
201	32,048	0,000	4,162	201	32,268	0,000	4,201
202	36,706	29,556	4,588	202	36,683	29,593	4,626
203	40,379	29,027	3,695	203	40,316	29,093	3,733
301	32,173	0,672	10,392	301	32,387	0,672	10,433
302	35,901	-0,960	10,884	302	36,127	-0,930	10,924
303	33,148	7,350	10,470	303	33,307	7,357	10,515
304	36,999	7,028	10,864	304	37,160	7,068	10,906
305	34,222	14,710	10,504	305	34,319	14,727	10,546
306	38,033	14,139	10,853	306	38,136	14,186	10,896
307	36,295	29,226	10,388	307	36,275	29,259	10,428
308	40,032	28,119	10,857	308	40,021	28,184	10,898
309	32,346	0,283	6,478	309	32,563	0,284	6,519
310	36,084	-0,368	6,461	310	36,307	-0,336	6,503
311	33,454	7,545	6,782	311	33,611	7,555	6,824
312	34,541	14,559	6,892	312	34,642	14,578	6,935
313	38,149	14,251	6,887	313	38,251	14,300	6,930
314	36,609	29,427	6,442	314	36,588	29,463	6,483
315	40,306	28,852	6,440	315	40,288	28,918	6,481

Tahimetrijas process ietver atbalsta tīkla kontroli, kuras mērķis ir izolēt kļūdas, kas var rasties atbalsta punktu neparedzētas pārvietošanas rezultātā. Atbalsta tīkla pārbaude apkopota tabulās 6 un 7, kā arī attēlā 10.2.

Tabula 6

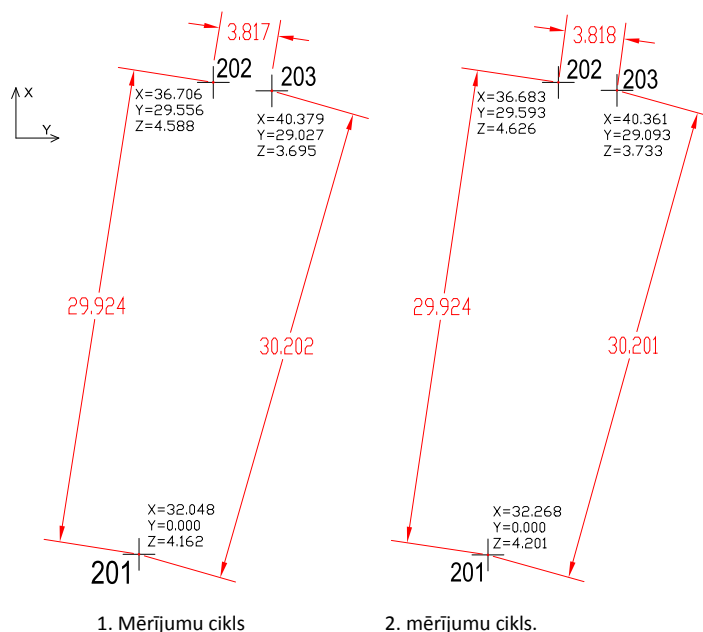
**Atbalsta punktu pārbaude**

Mērījums	Savstarpējie attālumi (10.2. att.), mm		Starpība, mm
	1. nolasījumu cikls	2. nolasījumu cikls	
201 - 202	29924	29924	0
201 - 203	30202	30201	1
202 - 203	3817	30818	1

Tabula 7

**Atbalsta punktu augstumu starp mērījumu cikliem pārbaude**

Atbalsta punkts	Atbalsta punkta augstums (10.2. att.), mm		Starpība, mm
	1. nolasījumu cikls	2. nolasījumu cikls	
201	4162	4201	39
202	4588	4626	38
203	3695	3733	38
	Novirze		1mm


**10.2. att. Atbalsta punktu pārbaudes mērījumi (izmēri doti metros).**

Nemot vērā augstāk minēto mērījumu rezultātus, kur novirzes svārstās 1mm robežās, tad par objektīvo instrumentu precizitāti tiek noteikts +/-1mm.

### 10.1 Vertikālo pārvietojumu noteikšana konstrukcijas laiduma vidū

Izmantojot iegūtos datus no diviem mērījumu cikliem, ir aprēķināti laiduma vidus vertikālie pārvietojumi – ielieces. Rezultāti apkopoti tabulās 8 un 9.


**10.3. att. Trimble sistēmas izvietojums.**

Tabula 8

**Laiduma vidus vertikālie pārvietojumi – ielieces. Kopne Tērvetes pusē**

Tahimetrijas punkta apraksts	Punkta Nr.	Izmērītais punkta augstums (Z), m		L/2 augstumi attiecībā pret balstījuma vietām, mm		laiduma vidus ielieces, mm
		1. m. cikls	2. m. cikls	1. m. cikls	2. m. cikls	
1	2	3	4	5	6	7
Augšējā josla virs balsta	301	10,392	10,433			
Augšējā josla laiduma vidū	305	10,504	10,546	114	115	2 ↑
Augšējā josla virs balsta	307	10,388	10,428			
Apakšējā josla virs balsta	309	6,478	6,519			
Augšējā josla laiduma vidū	312	6,892	6,935	432	434	2 ↑
Apakšējā josla virs balsta	314	6,442	6,483			

Tabula 9

**Laiduma vidus vertikālie pārvietojumi – ielieces. Kopne Dobeles pusē**

Tahimetrijas punkta apraksts	Punkta Nr.	Izmērītais punkta augstums (Z), m		L/2 augstumi attiecībā pret balstījuma vietām, mm		laiduma vidus ielieces, mm
		1. m. cikls	2. m. cikls	1. m. cikls	2. m. cikls	
1	2	3	4	5	6	7
Augšējā josla virs balsta	302	10,884	10,924			
Augšējā josla laiduma vidū	306	10,853	10,896	-18	-15	3 ↑
Augšējā josla virs balsta	308	10,857	10,898			
Apakšējā josla virs balsta	310	6,461	6,503			
Augšējā josla laiduma vidū	313	6,887	6,930	437	438	2 ↑
Apakšējā josla virs balsta	315	6,440	6,481			

Saskaņā ar tabulas 8 un 9 datiem laiduma vidus vertikālie pārvietojumi svārstās robežās no 2-3mm. Pārvietojuma virziens uz augšu. Šobrīd, pēc diviem mērījumu cikliem, jāsecina, ka laiduma konstrukcijas pārvietojumi ir nebūtiski un atrodas tuvu mērījumu precizitātes robežai. Lai kontrolētu laiduma deformāciju izmaiņas ilgākā laikā, nepieciešams veikt regulārus mērījumus vismaz vienu reizi mēnesī. Tas ļaus detalizētāk interpretēt konstrukcijas reakciju uz mainīgajiem slodžu un vides apstākļiem, it sevišķi iestājoties ziemai kam raksturīga papildus sniega slodze uz gājēju pārvada jumtu.



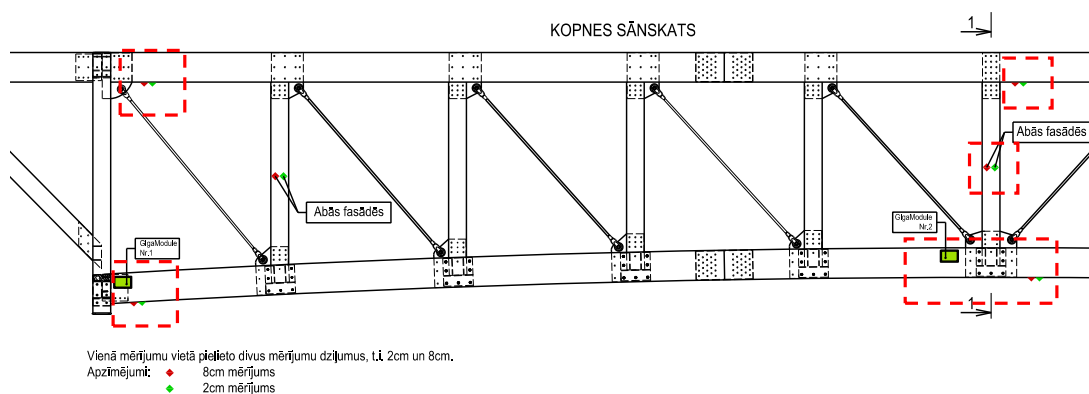
## 11. Līmētās koksnes būvelementu mitruma monitorings

Koksnes veiktspēja un ilgmūžība ir tieši atkarīga no mitruma iedarbes un to izmaiņām laikā. Eksperimentālā gājēju pārvada konstrukcijā ir paredzēta daudzpakāpju aizsardzība pret mitruma tiešu ietekmi (lietus un sniegs). Šim nolūkam ir izbūvēts gan jumts, paredzēta fasādes aizsardzība ar sekundāro dēļu režģi (žalūzijas), gan arī koksnes virsmas ir pārklātas ar hidrofobu koksnes pārklājumu.

Kvantitatīvai mitruma satura izmaiņu kontrolei un aizsardzības pasākumu efektivitātes novērtēšanai ir izstrādāta mitruma monitoringa plāns. Plānā paredzēti nepārtraukti mitruma un attiecīgie temperatūras mērījumi (2h stundu intervāls) ar autonomas monitoringa iekārtas palīdzību. Kopā konstrukcija tiek novērota 16 stacionāros punktos. Punkti izvietoti tā, lai aptvertu pēc iespējas dažādas mitruma ietekmes zonas, piemēram:

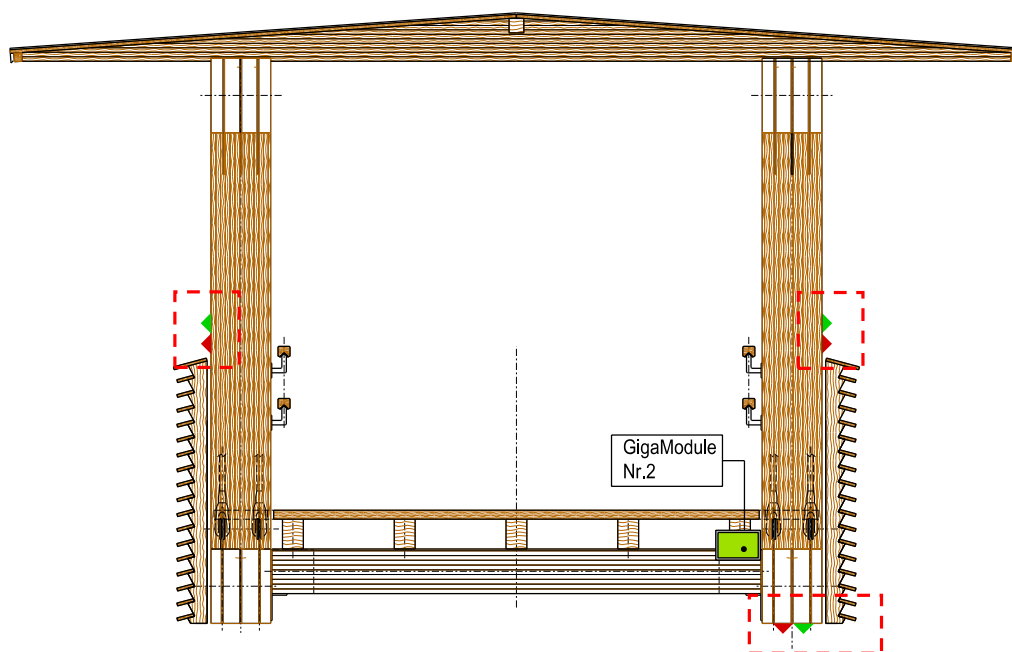
- Virs brauktuves (automašīnu/autoceļa radītie mitruma tvaika ietekme);
- Fasādes daļā starp jumtu un dēļu žalūzijām;
- Mezglos zem jumta (laiduma vidū un pie balsta).

Katrā mērījuma postenī izvietoti divu dažādu dziļuma indikatori (7cm un 2cm)



**11.1. att. Mitruma mērīšanas punktu izvietojums.**

GRIEZUMS 1-1

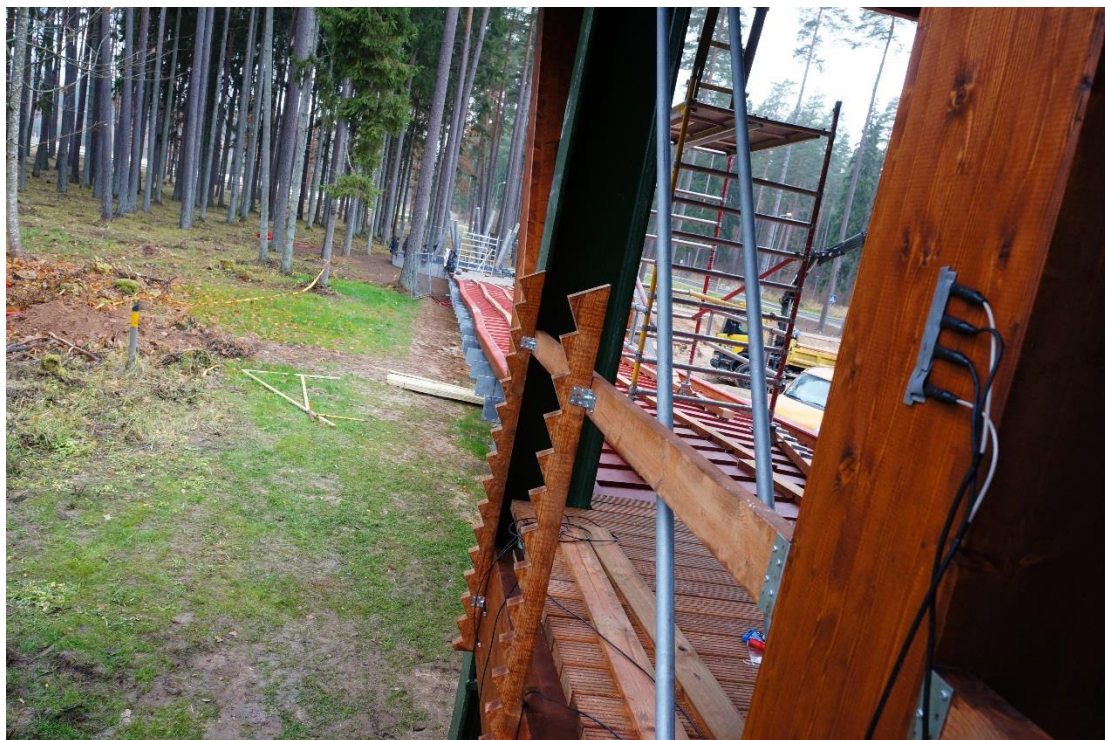


11.2. att. Mitruma mērīšanas punktu izvietojums.



11.3. att. Mitruma mērīšanas punkti laiduma vidū fasādē.



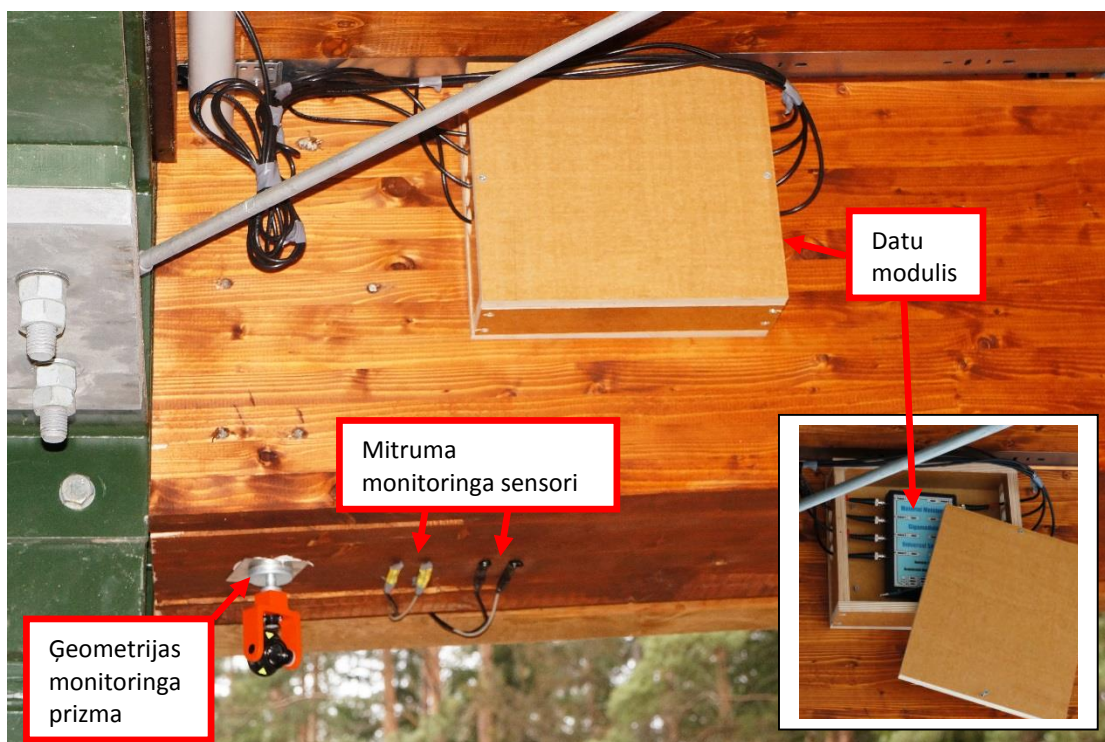


**11.4. att. Mitruma mērīšanas punkti pie balsta fasādes atklātajā daļā.**

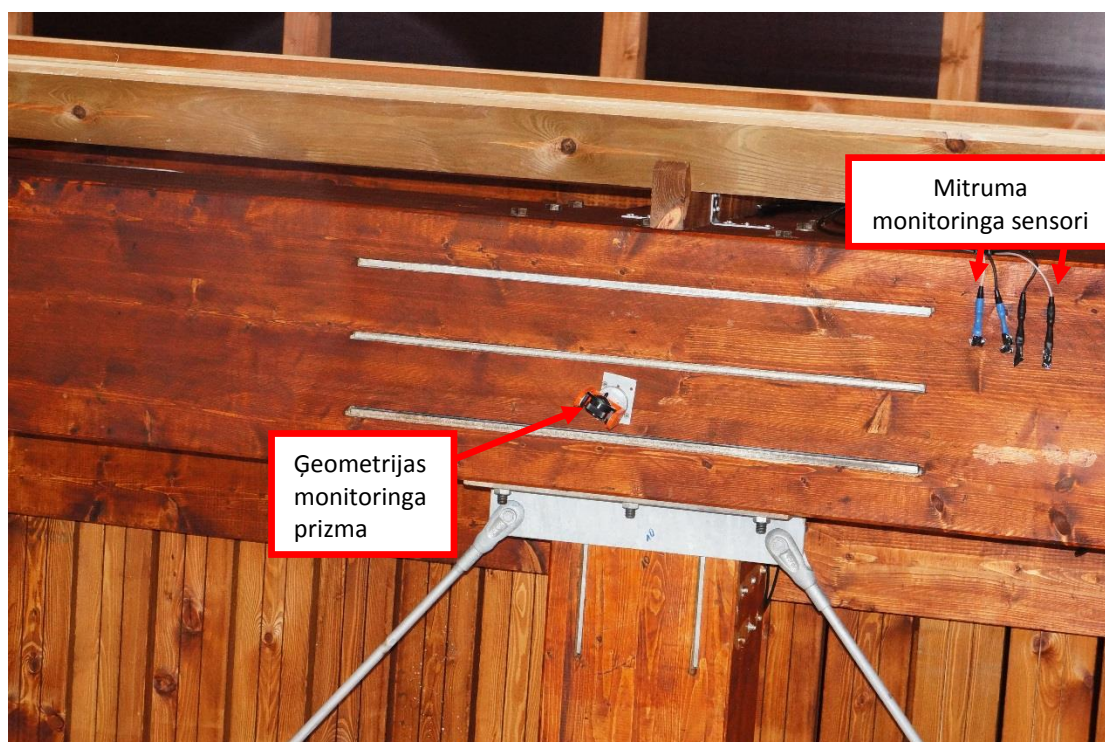


**11.5. att. Mitruma mērīšanas punkti pie balsta mezglā zem jumta.**





11.6. att. Mitruma mērījumu datu uzkrāšanas punkts Nr.1.



11.7. att. Mitruma mērīšanas punkti tieši virs brauktuves laiduma vidū (skats no ceļa uz augšu).

Visi mitruma indikatori ir izolēti no apkārtējās vides mitruma tā, lai mērījumi raksturotu tikai koksnes mitruma stāvokli bez jebkādas citas ārējas ietekmes. Dažāda dziļuma mērījumi vienā un tajā pašā vietā līdz ar datu uzkrāšanu ļaus spriest par konstrukcijas aizsardzības efektivitāti un koksnes inertumu attiecībā uz mitruma transportu.





Šī pētījuma beigu pēdējā posmā ir izdevies ievākt sākotnējos mitruma datus (attēls 11.8), taču tikai ar ilgtermiņa mērījumu palīdzību ir iespējams noteikt galvenās tendences un interpretēt datus kontekstā ar konstrukcijas aizsardzības pakāpi un laika apstākļiem. Uz doto brīdi neviens no mitruma indikātoriem neuzrāda lielāku mitruma saturu kā 20%. Tas nozīmē, ka paraugobjekta aizsardzība pašlaik funkcionē apmierinoši un saskaņā ar 5.Eirokeksu tiek nodrošināta 2.servisa klase. Šāda klase ir atbilstoša attiecīgās būves tipam, taču pagaidām mērījumu apjoms ir ļoti ierobežots un nepieciešams tos turpināt, lai gūtu visaptverošu informāciju par citiem gada un laika apstākļiem.

## 12. Secinājumi

Pētnieciskā darba ietvaros dokumentēta līmētās koksnes pielietošana inovatīvu konstrukciju izstrādē transporta infrastruktūras vajadzībām. Darba gaitā tika izstrādāta būvnormatīviem atbilstoša eksperimentālā būve – gājēju pārvads, kas pētniecības nolūkiem izvietots Tērvetes pagastā dabiskos transporta slodžu un apkārtējās vides apstākļos (1.pētnieciskais uzdevums).

Pirms paraugobjekta montāžas tā galvenie līmētās koksnes būvelementi tika testēti ar mainīgu slodzi, kā rezultātā tika iegūtas ar mērījumiem pamatotas materiālu elastīgās īpašības (2.pētnieciskais uzdevums).

Pēc eksperimentālās konstrukcijas nesošo elementu montāžas projekta stāvoklī, tā tika testēta ar kontrolētu statisku slodzi. Maksimālā slodze, kam tika pakļauta konstrukcija ir 27,2t jeb  $335\text{kg/m}^2$ . Slogošanas gaitā fiksētās laiduma konstrukcijas ielieces nepārsniedza 1/2479 daļu no laiduma garuma, kas pilnībā apmierina būvnormatīvu lietojamības prasības (limits 1/500 daļa) (3.pētnieciskais uzdevums).

Eksperimentālās konstrukcijas dinamiskā testēšana parauglaukumā uzrāda labu gājēju pārvada veiktspēju. Eksperimentāli izmērītā pirmā pašsvārstību frekvence ir ārpus rezonanses riska zonas ( $f_0=5,9\text{Hz} > 5\text{Hz}$ ) un arī gājēju komforta līmenis, kas noteikts pēc limitējošiem svārstību paātrinājumiem ir atbilstošs dotās būves publiskajam statusam (komforta klase CL2 – vidējs) un attiecīgo lietojamības intensitāti (4.pētnieciskais uzdevums).

Pēc paraugobjekta nodošanas ekspluatācijā, tas tika aprīkots ar ģeometrijas kontroles un koksnes mitruma/vides parametru monitoringa iekārtām. Sākotnējie mērījumi uzrāda konstrukcijas normālu funkcionalitāti, taču pilnvērtīgai analīzei nepieciešams veikt ilgāka laika novērojumus (5.pētnieciskais uzdevums).

## 13. Rekomendācijas līmēta koka tilta konstrukciju veiktspējas uzlabošanai

- 1) Līmēto konstrukciju būvelementi savā starpā visbiežāk tiek savienoti ar mehānisku līdzekļu palīdzību (tērauda tapas, skrūves u.c.). Lai nodrošinātu līmēto konstrukciju veiktspēju ilgtermiņā ražošanas procesā ir jāparedz detalizēta ražošanas kontrole. Tās ietvaros jādefinē mehāniskās apstrādes precizitāte un pielaides, ko nosaka saskaņā ar pieejamo ražošanas tehniku.
- 2) Būtiska loma mezglu sagatavošanā ir arī tehnoloģiskajam procesam. Tērauda ieliekamo plātņu savietojamībai ar urbumiem koksne ir jāveic ar urbšanu vienā paņēmienā, t.i., koksni un plāksnes caururbj nevis pēc šablona katram materiālam atsevišķi, bet vienlaicīgi tad, kad tērauda plāksnes ir ievietotas koksne. Uzreiz pēc urbuma veikšanas materiālus savieno ar tapu vai bultskrūvi. Šādā veidā izgatavoti mezgli nodrošina lielāku lokālu stingumu un mazākas konstrukcijas paliekošās deformācijas, jo mezgli un tapu kontakta virsmas apspiežas vienmērīgāk.

- 3) Aizsardzībai pret mitruma negatīvo ietekmi uz koksni izmanto gan mehāniskās aizsardzības paņēmienus, gan dažādus hidrofobizējošus aizsargpārklājumus. Mehāniskie aizsarglīdzekļi, kā šajā gadījumā, jumts un dēļu žalūzijas ir ļoti efektīvs veids kā pasargāt koksni. Jebkuras noslēgtas mitruma ligzdas veicina koksnes bojājumu attīstību (trupe, sēnīte u.c.), tajā skaitā stiprības zudumus. Attiecīgi līmēto konstrukciju uzturēšanas ietvaros ir jāparedz periodiska aizsargpārklājuma atjaunošana gan mezglos, gan būvelementu redzamajās virsmās.
- 4) Pielietojot hidrofobizējošus pārklājumus mezglos, tie ir jāuzklāj pēc mehāniskās apstrādes pabeigšanas gan urbumos, iefrēzējumos, gan tehnoloģiskajos atvērumos.
- 5) Izvēlētajam aizsargpārklājumam ir jānodrošina saderība ar pielietoto metāla elementu un tā aizsardzību (plāksnes, tapas, skrūves) tā, lai būtiski netiktu samazināta ķīmiskā noturība pret koroziju.
- 6) Mezglu tehnisko līdzekļu variantu apzināšanai ir jāveic sistemātiski pētījumi, kas noteiktu optimālu materiālu un to aizsardzības izvēli gan no uzturēšanas, gan būves ilglaiības viedokļa. Viens no uzmanības vērtiem risinājumiem ir nerūsējošā tērauda elementu izvēle. Lai arī šis materiāls nereti ir dārgāks par tradicionālo konstrukciju tēraudu, tas nav jāapstrādā ne ar cinkojumu, ne ar citiem aizsargpārklājumiem (krāsas). Pie tam nerūsējošā tērauda izvēle attaisnojās arī gadījumā, kad pēc mezglu sagatavošanas tērauda elementi netiek demontēti cinkošanas vajadzībām, bet tiek atstāti mezglos jau projekta galīgā izpildījumā.
- 7) Objektīvai un ilgākā termiņā pamatotākai konstrukcijas veiktspējas analīzei tiek rekomendēts turpināt pētījumā demonstrētos monitoringa pasākumus divu līdz trīs gadu laika posmā.

Konstrukcijas raksturīgo punktu pārvietojumu izmaiņas (deformācijas) ir jāveic vienu reizi mēnesī (12 reizes gadā), savukārt, mitruma mērījuma mērīšanas sistēma ir autonoma un tās darbība ir jāapseko arī ik mēnesi, lai ievāktu aktuālos mērījumu datus un pārbaudītu sistēmas funkcionalitāti (enerģijas avotu pietiekamība, vandālisms, aizsardzība u.c.).

- 8) Eksperimentālā objekta kopnes konstrukcija no dinamikas viedokļa uzrāda labus rādītājus. Kopnes pašsvārstību frekvence atrodas ārpus rezonanses riska intervāla, attiecīgi mezglu un būvelementu cikliskā bojājumu akumulēšanās dinamisko slodžu ietekmē ir potenciāli mazāka kā citām statiskajām shēmām ar mazāku konstruktīvo augstumu. Attiecīgi šo konstrukcijas tipu var rekomendēt arī citiem gājēju pārvadu un projektu risinājumiem. Kopnes sistēmas pielietošana gājēju tiltiem ir plaši dokumentēta arī starptautiskajā zinātnes un tehniskajā literatūrā. Optimizējot mezglu izstrādes tehnoloģijas un aprēķinu metodes, ir iespējams realizēt līdzīgas sistēmas konstrukcijas ar laidumiem līdz pat 80m garumā.