



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

**Lenkiamų medinių sijų normalinio pjūvio stiprinimo metodai  
ir jų analizė**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Edmondas Vaškys**

Projekto autorius

**Dr. Nerijus Adamukaitis**

Vadovas

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

# **Lenkiamų medinių sijų normalinio pjūvio stiprinimo metodai ir jų analizė**

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

---

**Edmondas Vaškys**

Projekto autorius

**Dr. Nerijus Adamukaitis**

Vadovas

**Doc. prakt. Nerijus Meslinas**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

Edmondas Vaškys

## **Lenkiamų medinių sijų normalinio pjūvio stiprinimo metodai ir jų analizė**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Edmondas Vaškys

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Edm', is written over the printed name 'Edmondas Vaškys'.



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GAMINIŲ INŽINERIJA

Baigiamojo projekto tematika (lietuvių k.):  
LENKIAMŲ MEDINIŲ SIJŲ NORMALINIO PJŪVIO STIPRINIMO METODAI IR JŲ ANALIZĖ

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanu potvarkiu: 2023 m. lapkričio 30d. Nr. V25-09-28

(lietuvių k.):  
LENKIAMŲ MEDINIŲ SIJŲ NORMALINIO PJŪVIO STIPRINIMO METODAI IR JŲ ANALIZĖ

(anglų k.):  
NORMAL SECTION STRENGTHENING METHODS OF BENDABLE WOODEN BEAMS AND THEIR ANALYSIS

Pradiniai duomenys darbui:


Tyrimo objektas – medinių sijų stiprinimo metodika.

Baigiamojo projekto dalys:

	Atlikti
Įvadas	x
Literatūros apžvalga	x
Metodologija	x
Eksperimentiniai tyrimai	x
Analitiniai tyrimai	x
Skaitiniai tyrimai	
Ekonominė dalis	
Išvados	x

Kita informacija (pagal poreikį):


Vadovas:  
(indėlis 100 %)

Dr. Nerijus Adamukaitis   
*pareigos, vardas, pavardė*

Konsultantas:  
(indėlis \_\_\_\_\_ %)

*pareigos, vardas, pavardė*

Studentas:

Edmondas Vaškys   
*vardas, pavardė*

Vaškys, Edmondas. Lenkiamų medinių sijų normalinio pjūvio stiprinimo metodai ir jų analizė. Magistro studijų baigiamasis projektas / Dr. Nerijus Adamukaitis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Inžinerijos mokslai, Statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: medinių sijų stiprinimas, lenkiami medžio elementai, tempimo įtempiai, polimeriniai pluoštai, armuojančios medžiagos.

Kaunas, 2024. 89 p.

## **Santrauka**

Šio baigiamojo magistro darbo tikslas yra atliktus analitinius bei eksperimentinius tyrimus įvertinti medinių lenkiamų sijų laikomosios galios padidėjimą ir nustatyti tinkamiausią stiprinimo būdą, kai tempiama zona yra armuojama polimeriniais pluoštais, plienine juosta bei medžio tašu.

Literatūros apžvalgos metu analizuojami medžio elementų defektai, įvairūs stiprinimo būdai. Išnagrinėjamas aplinkos sąlygų, gaisro metu susidaranti aukštos temperatūros poveikis sustiprintam elementui. Pateikiamos polimerinėmis medžiagomis armuotų konstrukcijų apsaugos nuo gaisro poveikio priemonės.

Analitinių skaičiavimų metu nagrinėjamas armuojančių medžiagų poreikis, kai medžio sijų tempimo įtempiai sumažinami 30%. Palyginami skirtingai armuotų konstrukcijų šlyties jėgos, įlinkių rezultatai, kai tarp medžio elemento ir stiprinančio sluoksnio vyrauja pilnas sukibimas ir kai tarp jų nėra jokio sukibimo.

Atliekant eksperimentinius tyrimus, remtasi analitinių skaičiavimų metu gautais armuojančių medžiagų kiekiais, pagal kuriuos sustiprintos devynios medžio sijos. Bandymai atliekami statinio lenkimo mašinoje, tiriamus elementus atremiant galuose, o per vidurį veikiama koncentruota apkrova, kuri laipsniškai didinama iki visiško elementų suirimo. Tuo pačiu metu tiriant lekiamąją galią atliekami įlinkių matavimai. Gauti rezultatai tarpusavyje palyginami.

Tarpusavyje palyginus skirtingus armavimo būdus pagal atliktus tyrimus bei skaičiavimus, nustatomas efektyviausias stiprinimo būdas bei stiprinimo įtaką lemiantys aspektai.

Baigiamajame darbe naudojamos 29 lentelių, 67 paveikslai, 47 literatūros šaltiniai.

Vaškys, Edmondas. Normal Section Strengthening Methods of Bendable Wooden Beams and Their Analysis. Master's Final Degree Project / supervisor Dr. Nerijus Adamukaitis; Faculty of Civil Engineering and Architecture, .Kaunas University of Technology.

Field of study and field (group of study fields): Engineering Sciences, Civil Engineering (E05).

Keywords: strengthening wooden beams, bending timber element, tension stresses, carbon fiber, reinforcing material.

Kaunas, 2024. 89 pages.

### **Summary**

The aim of this Master Degree Project thesis is to evaluate, by analytical and experimental investigations, the increase in the load-bearing capacity of reinforced timber bending beams and to determine the most appropriate method of reinforcement for the tensile zone when timber elements are strengthened by polymer fibers, steel strapping and timber element.

The literature review analyses defects in wood elements and different strengthening methods. The effects of environmental conditions and high temperatures during fire on the reinforced element are examined. Measures to protect polymer-reinforced structures against the effects of fire are presented.

The analytical calculations examine the need for reinforcing materials when the tensile stresses of the timber beams are reduced by 30%. The shear forces and deflections of the differently reinforced structures are compared for full adhesion and no adhesion between two layers.

The experimental studies were based on the reinforcement quantities obtained from analytical calculations, which were used to reinforce nine timber beams. The tests are carried out in a static bending machine, with the test members supported at the ends and a concentrated load applied in the middle, which is progressively increased until the complete failure of the members. At the same time, deflection measurements were carried out. The results obtained are compared with each other.

The most effective reinforcement method and the aspects influencing the reinforcement are determined by comparing the different reinforcement methods according to the investigations and calculations which were performed.

In the Master's final project 29 tables, 67 pictures, 47 literature sources are used.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas .....</b>	<b>11</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>12</b>
<b>1. Literatūros analizė.....</b>	<b>13</b>
1.1. Konstrukcijų stiprinimo aktualumas.....	13
1.2. Konstrukcijų defektų vertinimas .....	13
1.3. Pagrindiniai medienos ir jos konstrukcijų defektai .....	14
1.4. Medinių konstrukcijų stiprinimo būdai .....	15
1.5. Lenkiamų elementų suirties klasifikavimas .....	15
1.6. Lenkiamų medinių sijų stiprinimas plienine/pluoštine armatūra .....	16
1.7. Lenkiamų medinių sijų stiprinimas plieniniais elementais .....	18
1.8. Lenkiamų medinių sijų stiprinimas polimeriniais pluoštais .....	20
1.9. Literatūros analizės išvados.....	28
<b>2. Metodologija .....</b>	<b>29</b>
2.1. Analitiniai skaičiavimai.....	29
2.1.1. Pradiniai duomenys .....	29
2.1.2. Nearmuotas lenkiamas skerspjūvis.....	31
2.1.3. Plienine juosta armuotas lenkiamas skerspjūvis (pilnas sukibimas).....	33
2.1.4. Papildomu medžio sluoksniu armuotas lenkiamas skerspjūvis (pilnas sukibimas) .....	38
2.1.5. Anglies pluoštu armuotas lenkiamas skerspjūvis (pilnas sukibimas).....	41
2.1.6. Bazalto pluoštu armuotas lenkiamas skerspjūvis (pilnas sukibimas).....	43
2.1.7. Plienine juosta armuotas lenkiamas skerspjūvis (nėra sukibimo) .....	46
2.1.8. Papildomu medžio sluoksniu armuotas lenkiamas skerspjūvis (nėra sukibimo) .....	50
2.1.9. Anglies pluoštu armuotas lenkiamas skerspjūvis (nėra sukibimo).....	52
2.1.10. Anglies pluoštu armuotas lenkiamas skerspjūvis (nėra sukibimo).....	54
2.2. Analitinių skaičiavimų rezultatai.....	56
2.2.1. Konstrukcijos armavimo medžiagų kiekio palyginimas .....	56
2.2.2. Tempiamos zonos įtempiai .....	57
2.2.3. Kompozitinės sijos įlinkis .....	58
2.2.4. Šlyties jėga tarp medžio sijos ir armuojančios medžiagos sluoksnio .....	59
2.3. Eksperimentiniai tyrimai .....	60
2.3.1. Tyrimams naudotos medžiagos ir įrenginiai .....	60
2.3.2. Bandinių paruošimas .....	60
2.3.3. Tyrimo metodas.....	64
2.3.4. Eksperimentinių tyrimų rezultatų palyginimas .....	80
2.4. Teorinių skaičiavimų pataisa .....	81
2.5. Analitinių skaičiavimų ir eksperimentinių tyrimų metu gautų rezultatų palyginimas .....	83
<b>Išvados .....</b>	<b>86</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>87</b>

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Bandinių tipai ir žymėjimai [15] .....	18
<b>2 lentelė.</b> Gautų rezultatų palyginimo lentelė [26].....	21
<b>3 lentelė.</b> Bandymams naudotų medžiagų charakteristikos ir sąlygos [35] .....	24
<b>4 lentelė.</b> Polimerinių pluoštinių medžiagų ir plieno mechaninės savybės [40].....	27
<b>5 lentelė.</b> Skaičiavimams naudojamų medžiagų mechaninės savybės.....	29
<b>6 lentelė.</b> Skaičiavimams naudojami simboliai ir jų paaiškinimai.....	30
<b>7 lentelė.</b> Nearmuotos medžio sijos parametrai ir įtempiai.....	56
<b>8 lentelė.</b> Armuotos konstrukcijos, sumažinant tempimo įtempius 30%, analitinių skaičiavimų rezultatai .....	56
<b>9 lentelė.</b> Medžiagų sąnaudos esant skirtingiems medžiagų kiekiams sumažinat įtempius sijoje 30% .....	57
<b>10 lentelė.</b> Tiriamų medžio bandinių matmenys .....	60
<b>11 lentelė.</b> Vidutiniai tiriamų medžio bandinių matmenys .....	61
<b>12 lentelė.</b> Armuojančių medžiagų matmenys .....	61
<b>13 lentelė.</b> Vidutiniai armuojančių medžiagų matmenys.....	61
<b>14 lentelė.</b> PENOSIL Premium Epoxy Fix&Coat 507 techniniai duomenys [45].....	61
<b>15 lentelė.</b> Lenkimo bandymo metu gauti duomenys .....	66
<b>16 lentelė.</b> Nearmuotos medžio sijos indikatorių ir apskaičiuotų įlinkių duomenys .....	68
<b>17 lentelė.</b> Armuotos sijos (II bandinio) indikatorių ir apskaičiuotų įlinkių duomenys .....	69
<b>18 lentelė.</b> Armuotos sijos (III bandinio) indikatorių ir apskaičiuotų įlinkių duomenys .....	70
<b>19 lentelė.</b> Armuotos sijos (IV bandinio) indikatorių ir apskaičiuotų įlinkių duomenys.....	71
<b>20 lentelė.</b> Armuotos sijos (V bandinio) indikatorių ir apskaičiuotų įlinkių duomenys .....	72
<b>21 lentelė.</b> Armuotos sijos (VI bandinio) indikatorių ir apskaičiuotų įlinkių duomenys.....	73
<b>22 lentelė.</b> Armuotos sijos (VII bandinio) indikatorių ir apskaičiuotų įlinkių duomenys .....	74
<b>23 lentelė.</b> Armuotos sijos (VIII bandinio) indikatorių ir apskaičiuotų įlinkių duomenys .....	75
<b>24 lentelė.</b> Armuotos sijos (IX bandinio) indikatorių ir apskaičiuotų įlinkių duomenys.....	76
<b>25 lentelė.</b> Armuotos sijos (X bandinio) indikatorių ir apskaičiuotų įlinkių duomenys .....	77
<b>26 lentelė.</b> Teorinių įlinkių skaičiavimams reikalingų dėmenų skaičiavimas.....	78
<b>27 lentelė.</b> Plienine juosta armuotos sijos tarpiniai teoriniai įlinkių skaičiavimai.....	82
<b>28 lentelė.</b> Papildomu medžio sluoksniu armuotos sijos tarpiniai teoriniai įlinkių skaičiavimai .....	82
<b>29 lentelė.</b> Anglies pluoštu armuotos sijos tarpiniai teoriniai įlinkių skaičiavimai .....	82



## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Natūralios medienos konstrukciniai defektai [3].....	14
<b>2 pav.</b> Lenkiamų elementų irimo pobūdžiai [8].....	15
<b>3 pav.</b> Principinė lenkimo deformacijų schema [10] .....	16
<b>4 pav.</b> Apkrovų priklausomybės kreivės nuo bandinio įlinkio; a) medija sija; b) medinė sija armuota plieniniais strypais [14] .....	17
<b>5 pav.</b> Skerspjūvio stiprinimas įterpiant plienines plokšteles [16].....	18
<b>6 pav.</b> Kompozitinės sijos bandinių tipai [16] .....	19
<b>7 pav.</b> Medinių sijų skerspjūvio stiprinimas įterpiant anglies pluošto juostas [22] .....	20
<b>8 pav.</b> Apkrovų ir įlinkių pasiskirstymo grafikas [24] .....	22
<b>9 pav.</b> FRP tvirtinimo konfigūracijos [28] .....	22
<b>10 pav.</b> Bandymo atlikimo schema [35] .....	24
11 pav. Polimerinių medžiagų stiprio priklausomybė nuo temperatūros [36] .....	25
<b>12 pav.</b> a)/b) IA metodas; c)UA metodas; d)I-UA metodas [37].....	26
<b>13 pav.</b> Medžiagų įtempių ir poslinkių kreivės [40] .....	27
<b>14 pav.</b> Bandomų sijų įlinkių priklausomybių grafikai nuo apkrovos [41] .....	28
<b>15 pav.</b> Skerspjūvio skaičiuojamoji schema 1- armuojančioji medžiaga, 2 – medžio sija .....	29
<b>16 pav.</b> Skersinės jėgos ir lenkimo momentų diagramos veikiant centriškai apkrautą dviatramę siją .....	31
<b>17 pav.</b> Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje .....	32
<b>18 pav.</b> Skerspjūvio transformavimas pagal 2 elementą.....	33
<b>19 pav.</b> Elemento įlinkio skaičiavimo schema, veikiant koncentruotai jėgai .....	35
<b>20 pav.</b> Šlyties jėgos veikiančios tarp sukibusių sluoksnių skaičiavimo schema .....	36
<b>21 pav.</b> Skerspjūvio transformavimas pagal 2 elementą.....	38
<b>22 pav.</b> Skerspjūvio transformavimas pagal 2 elementą.....	41
<b>23 pav.</b> Skerspjūvio transformavimas pagal 2 elementą.....	43
<b>24 pav.</b> Stiprinamo skerspjūvio vaizdas.....	46
<b>25 pav.</b> Šlyties jėgos veikiančios tarp nesukibusių sluoksnių skaičiavimo schema .....	48
<b>26 pav.</b> Stiprinamo skerspjūvio vaizdas.....	50
<b>27 pav.</b> Stiprinamo skerspjūvio vaizdas.....	52
<b>28 pav.</b> Stiprinamo skerspjūvio vaizdas.....	54
<b>29 pav.</b> Medžiagų kiekio sąnaudų palyginimas sumažinant įtempius sijoje 30% .....	57
<b>30 pav.</b> Įtempių priklausomybė nuo aukščio, kai $b_1 = \text{const}$ .....	57
<b>31 pav.</b> Įtempių priklausomybė nuo pločio, kai $h_1 = \text{const}$ .....	58
<b>32 pav.</b> Sijos įlinkio palyginimas stiprinant skirtingomis armavimo medžiagomis (esant pilnam sukibimui tarp sluoksnių) .....	58
<b>33 pav.</b> Sijos įlinkio palyginimas stiprinant skirtingomis armavimo medžiagomis (nesant pilnam sukibimui tarp sluoksnių) .....	59
<b>34 pav.</b> Šlyties jėgos priklausomybė sijos ilgyje, esant skirtingoms armavimo medžiagoms (pilnas sukibimas).....	59
<b>35 pav.</b> Bandinių matavimas .....	62
<b>36 pav.</b> Bandinių paviršių paruošimas .....	62
<b>37 pav.</b> Bandinių žymėjimas .....	63
<b>38 pav.</b> Bandinių klijavimas.....	63
<b>39 pav.</b> Statinio lenkimo mašina .....	64

<b>40 pav.</b> Kompozitinio elemento atrėmimas statinio lenkimo mašinoje .....	64
<b>41 pav.</b> Kompozitiniai bandiniai .....	65
<b>42 pav.</b> Šlyties (kirpimo) suirtis .....	65
<b>43 pav.</b> Lenkiamoji suirtis.....	65
<b>44 pav.</b> Priklijuotu anglies pluoštu armuotų sijų suirimas .....	66
<b>45 pav.</b> Priklijuotu medžio tašu armuotų sijų suirimas .....	66
<b>46 pav.</b> Priklijuota plienine juosta armuotų sijų suirimas .....	67
<b>47 pav.</b> Kraštuose savisriegiais suvaržytos plienine juosta armuotos sijos suirimas.....	67
<b>48 pav.</b> Indikatorių išdėstymo ir sijos atrėmimo schema; 1- armuojančios medžiagos sluoksnis; 2- medžio sija (80x120x1000 mm).....	67
<b>49 pav.</b> Deformacijas matuojančių indikatorių fiksavimas.....	68
<b>50 pav.</b> Eksperimentiškai gautų narm. sij. įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikas .....	69
<b>51 pav.</b> Eksperimentiškai gautų II bandinio įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikas .....	70
<b>52 pav.</b> Eksperimentiškai gautų III bandinio įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikas .....	71
<b>53 pav.</b> Eksperimentiškai gautų IV bandinio įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikas.....	72
<b>54 pav.</b> Eksperimentiškai gautų V bandinio įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikas .....	73
<b>55 pav.</b> Eksperimentiškai gautų VI bandinio įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikas.....	74
<b>56 pav.</b> Eksperimentiškai gautų VII bandinio įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikas .....	75
<b>57 pav.</b> Eksperimentiškai gautų VIII bandinio įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikas .....	76
<b>58 pav.</b> Eksperimentiškai gautų IX bandinio įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikas.....	77
<b>59 pav.</b> Eksperimentiškai gautų X bandinio įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikas .....	78
<b>60 pav.</b> Narmuoto elemento analitiškai ir eksperimentiškai gautų įlinkių priklausomybės nuo veikiančios apkrovos grafikų palyginimas .....	79
<b>61 pav.</b> Ištirtų bandinių ribinė (suirimo) apkrova lenkimo metu .....	80
<b>62 pav.</b> Vidutinių, skirtingai armuotų sijų įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikų palyginimai .....	81
<b>63 pav.</b> Skirtingai armuotų skerspjūvių vidutiniai sijos vidurio įlinkiai veikiant 21,0 kN apkrovai	81
<b>64 pav.</b> Teoriškai apskaičiuotų, skirtingai armuotų sijų įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikai .....	83
<b>65 pav.</b> Plienine juosta armuoto elemento analitiškai ir eksperimentiškai gautų įlinkių priklausomybės nuo veikiančios apkrovos grafikų palyginimas.....	84
<b>66 pav.</b> Medžio tašu armuoto elemento analitiškai ir eksperimentiškai gautų įlinkių priklausomybės nuo veikiančios apkrovos grafikų palyginimas .....	84
<b>67 pav.</b> Anglies pluoštu armuoto elemento analitiškai ir eksperimentiškai gautų įlinkių priklausomybės nuo veikiančios apkrovos grafikų palyginimas.....	84

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

CFRP – anglies polimerinis pluoštas;

GFRP – stiklo polimerinis pluoštas;

AFRP – aramidinis polimerinis pluoštas;

BFRP – bazaltinis polimerinis pluoštas;

FRP – polimerinis pluoštas;

HFRP – hibridinis lino-stiklo polimerinis pluoštas;

NSM – konstrukcijų stiprinimo metodika, kai elemento apačioje išgremžiami grioveliai, įdedama armatūra ir užpildoma jungiančiąja mastika;

N.B – tyrimų metu pritaikytas žymėjimas, skirtas nearmuotai sijai;

PL.B.V - tyrimų metu pritaikytas žymėjimas skirtas, plienine juosta su keturiais medsraigčiais armuotai sijai;

PL.B - tyrimų metu pritaikytas žymėjimas skirtas, plienine juosta priklijuota klėjais armuotai sijai;

M.M.B - tyrimų metu pritaikytas žymėjimas skirtas, medžio tašu priklijuotu klėjais armuotai sijai;

A.P.B - tyrimų metu pritaikytas žymėjimas skirtas, anglies pluoštu priklijuotu klėjais armuotai sijai;

## Įvadas

**Magistro baigiamojo projekto tikslas.** Analitiniu ir eksperimentiniu būdu įvertinti medinių sijų laikomosios galios padidėjimą lenkiant, tempiamą zoną stiprinant polimeriniais pluoštais, plienine juosta bei medžio tašu.

### Projekto uždaviniai:

1. atlikti mokslinės literatūros analizę, ieškant informacijos apie pjautinės medienos defektų tipus, vertinimą bei medinių sijų stiprinimo būdus;
2. išnagrinėti įvairius sijų normalinio pjūvio stiprinimo būdus, atliekant mokslinių tyrimų/bandymų analizę bei su šia tema susijusius analitinius skaičiavimus;
3. eksperimentiškai įvertinti sijų laikomosios galios padidėjimą lenkiant, kai tempiama zona armuojama anglies pluoštu/ plienine juosta/ medžio bei palyginti gautus rezultatus su analitiniais;
4. nustatyti efektyviausią medinių sijų stiprinimo būdą, vertinant skirtingų medžiagų sąnaudas ir mechaninį stiprį;
5. gaisriniu požiūriu įvertinti stiprinimo pluoštais tinkamumą;
6. suformuluoti galutinės projekto išvadas.

**Darbo aktualumas.** Šiuo metu statybų rinkoje, mediena tampa vis paklausesnė medžiaga, dėl savo plataus panaudojimo bei draugiškumo aplinkai. Mediena nėra ilgaamžė, ji paveiki temperatūros pokyčiams, biologiniams veiksniams, drėgmei bei kitiems poveikiams. Bėgant laikui, visos laikančiosios konstrukcijos, praranda savo pirminę laikomąją gebą, todėl pasiekus kritinę ribą privalu jas keisti naujomis arba stiprinti. Racionalesnis sprendimas – armavimas įvairiais polimeriniais pluoštais, stiprinant plieninėmis plokštelėmis, strypais ar kitais metodais. Tai ne tik sumažina rekonstrukcijos darbų kaštus, bet ir palengvina šių darbų atlikimą, lyginant su esamos konstrukcijos keitimu nauja.

**Mokslinis naujumas ir praktinė vertė.** Kompozitinės konstrukcijos pasižymi geresnėmis mechaninėmis bei fizikinėmis savybėmis, kas leidžia išlengvinti pastato konstruktyvą bei naudoti aplinkai draugiškesnes medžiagas. Pagrindinė šių konstrukcijų neigiama pusė – aukšta kompozitinių medžiagų kaina. Šiame darbe bus ieškomas ekonomiškiausias bei geriausiomis mechaninėmis savybėmis pasižymintis medinių lenkiamų elementų stiprinimo metodas.

## 1. Literatūros analizė

### 1.1. Konstrukcijų stiprinimo aktualumas

Šiomis dienomis, oro taršos problema vis labiau kvestionuojama, stengiamasi rasti sprendimus, mažinančius šiltnamio efektą sukeliančių dujų išsiskyrimą. Siekdami užtikrinti tvarios ekonomikos augimo strategiją, Europos komisija 2019 metais patvirtinimo dokumentą „The European Green Deal“ [1]. Jame patvirtinti tikslai – ES paversti sąžininga ir klestinčia visuomene, turinčia modernią, efektyviai išteklius naudojančią bei konkurencingą ekonomiką, kurioje iki 2050 metų nebeliktų šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos bei ekonomikos augimas būtų paremtas išteklių naudojimo atsisakymu [1]. ES komisijos sprendimas sietinas su dideliais pokyčiais statybų sektoriuje. Siekiant užtikrinti tvarumą, padaugės renovacinių, rekonstrukcinių projektų, kurių metu bus stengiamasi išsaugoti kuo daugiau esamų statinio konstrukcijų ar jo elementų. Aplinkos sąlygų paveiktos konstrukcijos, kurios prarado dalį savo mechaninių bei fizikinių savybių bus stiprinamos. Dabartinės statybinės medžiagos naudojamos naujų statinių statyboje bus pakeistos ekologiškesnėmis, paliekančios mažesnę CO<sub>2</sub> emisijos pėdsaką.

Dauguma atveju, kai laikančiosiose konstrukcijose atsiranda defektų, mažinančių jų laikomąją galią, dėl netinkamų eksploatacinių sąlygų nesilaikymo, padidėjusių apkrovų bei kitų priežasčių, statinio elementai yra stiprinami. Šis sprendimas ekonominiu požiūriu vienas iš priimtinausių, nes konstrukcija nėra visiškai pašalinama. Priešingu atveju, demontuojant elementą turi būti imtasi daugybės saugumo priemonių, atsižvelgta į apkrovų pasiskirstymą, naudojamus mechanizmus, kas padidina darbų išlaidas.

### 1.2. Konstrukcijų defektų vertinimas

Konstrukcijų silpnėjimas, irimas įvyksta dėl dviejų poveikių [2]:

- išoriniai – biologiniai veiksniai, agresyvi aplinka, kritulių įtaka, oro masių srautai, radiacija, medžiagų plėtimasis jas veikiant neigiama temperatūra;
- vidiniai – temperatūra, drėgmė bei jų kitimas, nuolatinės ir kintamos statinio apkrovos.

Statinio eksploatacijos metu šie poveikiai neišvengiami. Jie sukelia konstrukcijų senėjimo procesą, taip sutrumpindami jų naudojimo laikotarpį. Tik tinkama statinio techninė priežiūra bei projektinių apkrovų paisymas gali sulėtinti fizinių nusidėvėjimą, iki leistinos ne didesnės kaip 40% ribos, kuomet būklė tampa nepriimtina ir turi avarinės būklės požymių [2].

Defektai nagrinėjami atsižvelgiant į jų pavojingumą, atsiradimo priežastį, eliminavimo pobūdį bei tolimesnį plitimą. Siekiant užtikrinti analizuojamų elementų saugos ribinį būvį bei patikimumą, vertinimas pavojingumo požiūriu skirstomas į keturias kategorijas [2] :

- pirmoji – pavojaus nekeliantys, neplintantys bei pasižymintys estetiniais trūkumais;
- antroji – darantys įtaką konstrukcijų laikomajai galiai, plyšių atsiradimui, standumui. Atsiradę defektai plinta, deformacijos iš dalies gali viršyti projektavimo metu nustatytas ribines vertes;
- trečioji – pažaidos kelia pavojų, pastebimas konstrukcijų laikomosios galios sumažėjimas, būklė nepatenkinama, tačiau konstrukcijas leidžiama eksploatuoti;
- ketvirtoji – defektų dydis laikomas neleistinu, pastebimi avarinės būklės požymiai.

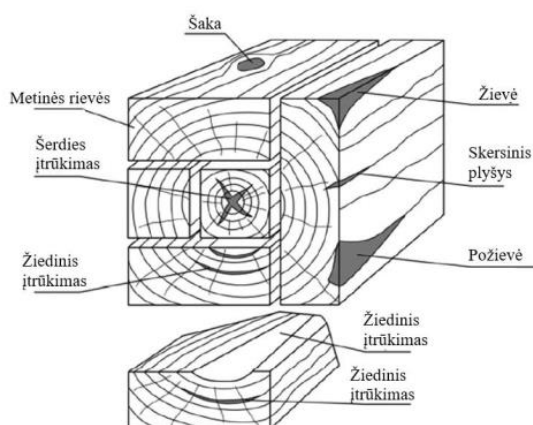
Aptiktas pažaidas galima nagrinėti atsižvelgiant į konstrukcijos svarbą, panaudotas statybines medžiagas, aplinkos agresyvumo klasę ir kt. [2]. Nuoseklumas daugeliu atveju priklauso nuo nagrinėjamos situacijos.

### 1.3. Pagrindiniai medienos ir jos konstrukcijų defektai

Mediena, tai medžiaga, kurioje dėl aplinkos sąlygų vyksta susitraukimo bei brinkimo procesai. Šios deformacijos atsiranda tik tuo atveju, kai kapiliaruose esanti drėgmė nepasiekia didesnio nei 30% prisotinimo laipsnio. Žemiau šios ribos chemiškai nesurištas vanduo sukelia džiūvimo procesą, tuo pačiu didindamas medienos stiprumą [3].

Pagrindiniai pjautinės medienos konstrukciniai defektai (žr. 1 pav.) pagal kuriuos vertinama medienos kokybė bei stiprumas [3]:

- šakotumas – šakų kiekio pasiskirstymas pjautos medienos ruože, kuris įvertinamas atsižvelgiant į dydį, vietą ir skaičių. Išanalizuota, jog pasitaikius didesnei šakai skerspjūvyje, tikėtinas didesnis stiprumo sumažėjimas. Taip pat pastebėta, jog didesnis šakotumas elemento kraštuose susilpnina konstrukciją labiau nei jų pasiskirstymas centre;
- plyšiai – medienos įtrūkimai išilgai pluošto, atsirandantys skirtingose skerspjūvio dalyse, pablogina jos fizikines bei mechanines savybes. Žiediniai įtrūkimai pasireiškia, dėl per didelių įtempių, veikiančių medžio augimo ar jo kirtimo metu. Dažnu atveju jie lokalizuojasi ties metinėmis medžio augimo rievėmis, kas gali paveikti stiprumą dėl šlyties.



1 pav. Natūralios medienos konstrukciniai defektai [3]

Aplinkos poveikių veikiamose medinėse konstrukcijose gali atsirasti pažaidų dėl:

- puvinio – medienos irimo, kurį sukelia heterotrofinių organizmų (grybų) veikla [2]. Hifų plitimas priklauso nuo temperatūros, organinių medžiagų kiekio bei oro drėgnumo. Paskutiniam veiksmui pasiekus 28% ribą, grybas pradeda augti. Esant nuolatinės drėgmės, netinkamo vėdinimo sąlygoms, jo plitimas suintensyvėja. Šiam organizmui gyvuojant, dėl enzymų išskyrimo medienos ląstelės praranda savo struktūrą [4]. Pagrindiniai šią medžiagą sudarantys komponentai tokie kaip: celiuliozė, hemiceliuliozė bei ligninas yra depolirizuojami [5].
- UV spinduliuotės – elektromagnetinių bangų, kurios pasižymi dideliu cheminiu ir biologiniu efektyvumu, veikiančiu medienos struktūrą sudarančius komponentus. Deguonies radikalai veikia medienos ląstelės sienelėje esančius polimerinius junginius. Jautriausias šiam poveikiui

yra ligninas, kuris virsta radikalų pavidalu depolirizuodamas celiuliozės ir hemiceliuliozės struktūrą. UV poveikis yra ganėtinai lėtas procesas, tačiau gali pabloginti medienos paviršiaus sukibimą bei sukelti netoleruotinus išvaizdos pokyčius [5];

- vabzdžių įtakos – kenkėjai išgrauždami įvairaus diametro bei gylio angas labiausiai pažeidžia medienos paviršių. Šis poveikis pavojingas, dėl spartaus plitimo tempo bei plataus pasklidimo konstrukciniame elemente. Vabzdžių sukeltos deformacijos išsidėsto tiek išilgine, tiek skersine kryptimis, taip padidinant elemente veikiančius įtempius, kurie gali viršyti ribines vertes [6].

#### 1.4. Medinių konstrukcijų stiprinimo būdai

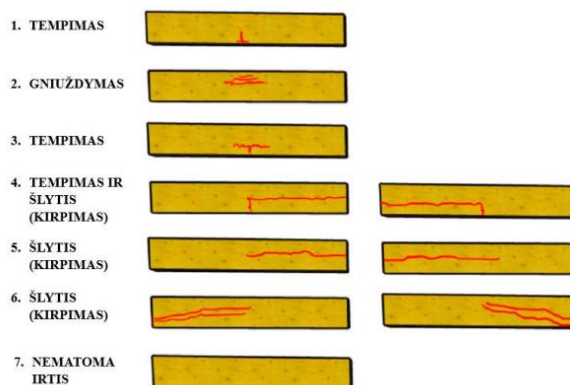
Kintant dabartinėms projektavimo normoms, reikalavimams, kurios taikomos daugumoje Europos valstybių, anksčiau suprojektuotos medinės konstrukcijos nebetenkina tuo metu vertintų apkrovų. Atsižvelgiant į tai šiems elementams taikomi įvairūs stiprinimo būdai. Priešingu atveju tokios konstrukcijos netenkina saugumo ir pastovumo reikalavimų, todėl demontuojamos [7]. Mediena yra organinė medžiaga, kurioje dėl aplinkos poveikių gali atsirasti pažeidimų, mažinančių jos laikomąją galią. Esant tokioms aplinkybėms, konstrukcijos taip pat yra sutvirtinamos atitinkamais būdais.

Konstrukcijas galima stiprinti:

- sumažinant joms tenkančias apkrovas. Panaudojant lengvesnes medžiagas ar perduodant joms tenkančias įrašas kitoms laikančiosioms konstrukcijoms [8];
- didinant elementų skerspjūvį. Taip padidėja inercijos momentas, praplečiantis konstrukcijos ribines vertes bei sumažinantis deformacijas [9];
- apgaubiant metalinėmis plokštelėmis, įvairiais polimeriniais bei kitais pluoštais, kurie dedami tempiamose ar gniuždomose konstrukcijų zonose [7];
- panaudojant išankstinį įtempimą tose zonose, kuriose tikėtinas maksimalus įtempis dėl išorinių apkrovų poveikio [9].

#### 1.5. Lenkiamų elementų suirties klasifikavimas

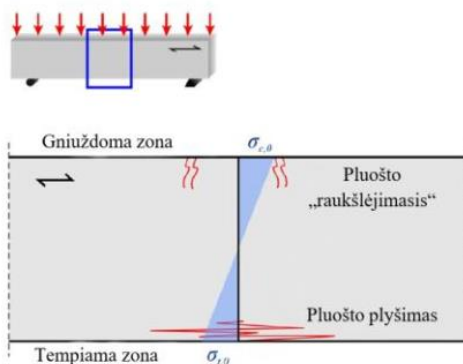
Bandymu metu, kuomet analizuojama lenkiamų elementų laikomoji galia, įlinkiai bei atsirandantys įtempiai, pagal sijoje atsiradusius plyšius nustatomas elementų irimo pobūdis (žr.2pav.). Išskiriami septyni tipai: suirimas dėl tempimo, gniuždymo, tempimo ir šlyties (kirpimo), šlyties ir nepastebima suirtis [8].



2 pav. Lenkiamų elementų irimo pobūdžiai [8]

## 1.6. Lenkiamų medinių sijų stiprinimas plienine/pluoštine armatūra

Lenkimo metu, viršutiniai elemento sluoksniai patiria gniuždymo, o apatiniai tempimo įtempius. Šioms vidinėms įrąžoms viršijant ribines reikšmes, elemente pasireiškia deformacijos. Tempiamoje zonoje medienos pluoštai pradeda plyšti, o gniuždomoje zonoje vienas kitą spausti, sukeldami „raukšles“ bei įtrūkimus (žr.2pav.). Mediena yra organinė medžiaga, kurioje galima aptikti natūraliai susiformavusius defektus tokius kaip šakos. Priklausomai nuo jų kiekio, lenkiamo elemento stipris tempiant gniuždymo stiprio atžvilgiu mažėja [10].



3 pav. Principinė lenkimo deformacijų schema [10]

Pasireiškus sijų deformacijoms vienas iš stiprinimo būdų - tempiamą zoną armuojant plienine arba pluoštine armatūra. Šiam metodui taikoma „NSM technika“, kai apatinėje elemento dalyje, išilgai pluošto, išpjaunami grioveliai, pripildomi klijais ir įplukdomi armatūros strypai. Tyrimai ir daugiametė patirtis rodo, kad šio metodo taikymas padidina sijų lenkiamąją galią bei standumą [11].

Bandymai rodo, jog sijoje išpjauti apvalaus skerspjūvio grioveliai padidina elemento standumą bei atitolina kritinio lenkimo momento vertę lyginant su kvadratinio skerspjūvio grioveliais. Išnagrinėta, jog armatūros santykis taip pat turi įtakos elemento stipriui lenkiant. Tyrimų metu ištirta, jog esant 0,27-0,82% armatūros santykiui elemento stiprumas padidėjo 18-46%, o panaudojus vieną strypą arba mažą armatūros kiekį, standumas nepakito [11].

Siekiant nustatyti bazaltinės pluoštinės armatūros įtaką bendrajam sijos lenkiamajam stipriui, Gand A.K. ir kiti atliko tyrimus [12]. Bandymams naudotos pjautinės medienos sijos, kuriose buvo išpjauti apvalaus skerspjūvio grioveliai. Jie ir bazaltiniai strypai buvo padengti metilintu spiritu, siekiant tinkamai nuvalyti paviršius t.y. pašalinti nuo jų dulkes ir alyvą. Tada grioveliai pripildyti klijais ir į juos įplukdyta armatūra. Šios konstrukcijos buvo paliktos džiūti 72 valandas, 20 C° temperatūroje. Toks terminas pasirinktas siekiant sulaukti visiško epoksidinių klijų sukietėjimo. Tyrimams atlikti naudotas trijų taškų lenkimo stiprumo testas. Nustatyti, kad visos tirtos sijos pasižymėjo linijinėmis elastingomis deformacijomis. Tirtų sustiprintų elementų maksimali laikomoji galia vidutiniškai padidėjo 16%, o standumas išaugo 30%. Pastebėta, jog daugelyje išbandytų elementų, bazaltinė armatūra suirus sijai nesideformavo t.y. išlaikė bendrą sukibimą su medine sija [12]. Galima teigti, jog sijos lenkiamasis stiprumas priklauso nuo esamos medienos stiprumo, įklijuotų bazaltinių strypų tarpusavio sankibumo su sija bei aplinkos sąlygų. Tikėtina, jog esant blogesnėmis atmosferinėmis sąlygomis klijai nesustings tinkamai ir kompozitinės medžiagos stiprumas gali būti mažesnis nei nustatytas laboratorinėmis sąlygomis.

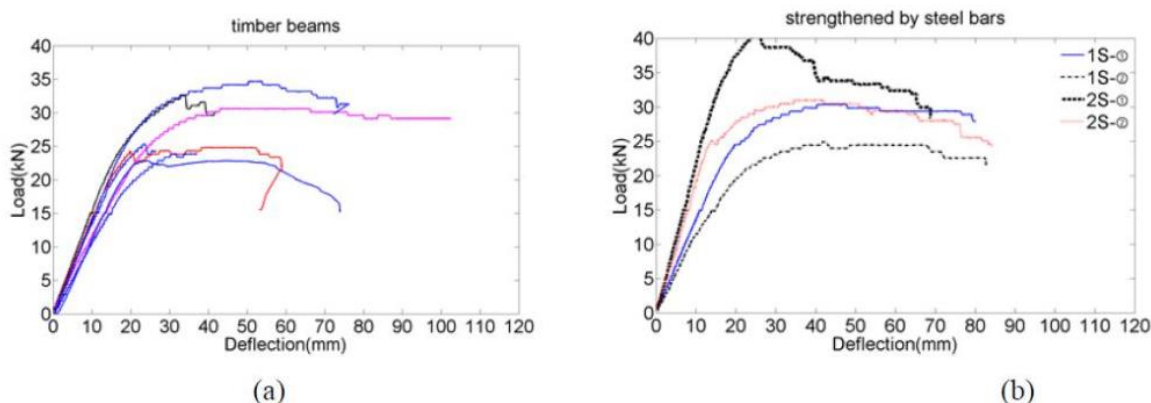


## Pluoštinės ir plieninės armatūros panaudojimo skirtumai

Lyginant pluoštinę polimerinę medžiagą (FRP) su plieniu, galima teigti, jog pastarosios atsižvelgiant į svorio ir stiprio santykį bei korozijos poveikį yra daug pranašesnės [11]. Stiklo pluošto ir bazalto strypai pasižymi dukart didesniu tempiamuoju stipriu, yra dukart patvaresni bei atsparūs šarmams bei rūgštims [13].

Buvo atlikti bandymai, kurių metu buvo analizuojamas sijų stiprumas armuojant skirtingais (FRP) strypais. Pastebėta, kad bazaltinė armatūra padidino elemento laikomąją galią 31,12%, standumą 9,91%, o stiklo pluošto armatūra pagerino elemento laikomąją galią 29,04%, standumą 9,70% [13].

Siekiant ištirti plieninės armatūros poveikį mediniai konstrukcijai stiprinimo metu, buvo atlikti tyrimai naudojant 10 mm skersmens armatūra. Toks diametras pasirinktas dėl savo plataus panaudojimo statybų sektoriuje bei savo gerų plastinių bei stiprumo savybių. Atlikus bandymus, kuomet sija buvo armuota vienu arba dviem strypais nustatyta, kad medžio dalis paveikta deformacijų grįžo į savo pradinę padėtį, tačiau strypai negalėjo atkurti savo pradinės būsenos. Iš įlinkių diagramos (žr.3 pav.). galima išvelgti skirtumus tarp armuotų ir nearmuotų sijų. Sustiprintuose elementuose, plastinės deformacijos išaugo tik vėlesniuose etapuose didinant apkrovą. Iš to galima spręsti, jog armavimas padidino elemento standumą [14].



4 pav. Apkrovų priklausomybės kreivės nuo bandinio įlinkio; a) medija sija; b) medinė sija armuota plieniniais strypais [14]

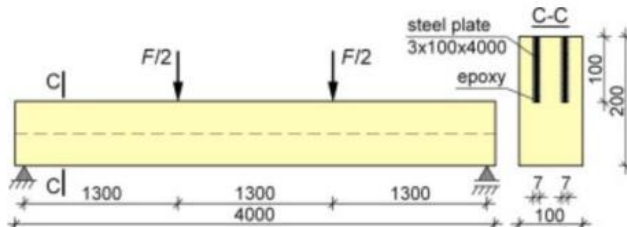
## Armavimo klėjai strypų įtvirtinimui

Ši medžiaga pasižymi tokiomis savybėmis, kaip atsparumu rūgštims ir šarmams, karščiui bei žemoms temperatūroms, vandens poveikiui, ilgaamžiškumu drėgnoje aplinkoje, kai yra veikiami įvairių vidinių jėgų [14]. Šis užpildas atsakingas už šlyties įtempių perdavimą iš medinės sijos į naudojamą armatūrą. Praktikoje dažniausiai pasitelkiami dviejų komponentų epoksidiniai klėjai, kurių pagrindą sudaro epoksidinė derva ir kietiklis klijų sankibumas su medžiaga priklauso nuo jų klampumo, pačios medžiagos kietėjimo bei sluoksnio storio [11]. Šie klėjai laikomi tikotropiniais<sup>1</sup>, nes skersinės jėgos veikiami pasižymi takumu, tačiau pašalinus jiems tenkančią apkrovą jie išlieka statiški. Šios medžiagos kerpamasis stipris 2-3 kartus didesnis nei pjautinės medienos [12].

<sup>1</sup> Tikotropija – chem. gelio struktūros izoterminis grįžtamasis suirimas dėl mechaninio poveikio [46]

## 1.7. Lenkiamų medinių sijų stiprinimas plieniniais elementais

Atliekant restauracijos darbus senuose pastatuose, kai norima išsaugoti kuo didesnę autentiškumą, susiduriama su problema, jog laikančiosios konstrukcijos negali būti stiprinamos išoriškai t.y. armuojant papildomu sluoksniu ant esamos konstrukcijos. Vienintelė išeitis – skerspjūvio stiprinimas plienine plokštele (žr. 5 pav.) [15].



5 pav. Skerspjūvio stiprinimas įterpiant plienines plokšteles [16]

JASIEŅKO, J ir kiti.) [15] atliko bandymus siekdami nustatyti priimtinausią lenkiamojo elemento stiprinimo būdą armuojant plieninėmis plokštelėmis. Bandinių tipai ir žymėjimai pateikiami 1 lentelėje. Bandymai atlikti naudojant 4 taškų lenkimo testą, veikimo apkrovos pridėtos 1/3 ir 2/3 sijos ilgio taškuose.

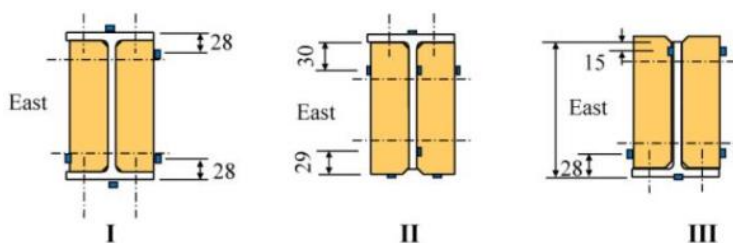
1 lentelė. Bandinių tipai ir žymėjimai [15]

Sijos serija	Apibūdinimas	Žymėjimas	
		Nauja mediena	Sena mediena
A	Nearmuotos sijos	A-NW	A-OW
B	Sijos su epoksidine derva įterpta sijos skerspjūvyje	B-NW	B-OW
C	Sijos su dviem plieno plokštelėmis įterptomis sijos skerspjūvyje	C-NW	C-OW
D	Sijos dviem plieno plokštelėmis apgaubiančiomis didesnę nei pusę sijos dalies išorinio paviršiaus	D-NW	D-OW
E	Sijos su dviem plieno plokštelėmis apgaubiančiomis visą išorinį paviršių	E-NW	E-OW
F	Sijos su viena plieno plokštele armuojančia sijos viršų	F-NW	F-OW
G	Sijos su viena plieno plokštele armuojančia sijos apačią	G-NW	G-OW

Nustatyta, jog OW sijų, kuriose buvo įterpta epoksidinė derva laikomoji galia pasiekė NW nearmuotų sijų. Vidutinis laikomosios galios padidėjimas atsižvelgiant į B stiprinimo būdą – 36%. C metodas sijų laikomąją galią padidino 69%, D ir E metodas padidino – 91%, D ir E metodas - 58%. Šių bandymų metu taip buvo nustatinėjamas epoksidinis plieno plokštelės ir medienos jungties stiprumas. Gauti rezultatai rodo, jog medienos drėgmės kiekiui padidėjus nuo 6-25%, jungties kerpamasis stiprumas sumažėjo 63% išilgai pluošto ir 71% skersai pluošto. Pateikti skaičiai negali būti priimti, kaip pilnai patikimi, nes kiekvieno stiprinimo tipui ištirti naudoti tik du bandiniai.

Straipsnyje teigiama, jog priimtinausias metodas, siekiant išvengti išorinio paviršiaus stiprinimo, įterpiant dvi plieno plokšteles į sijos skerspjūvį. Toks metodas sumažina tikimybę, jog medienos ir plieno plokštelės tarpusavio jungtis praras standumą. Toks stiprinimo sprendimas taip pat padidins kompozitinės konstrukcijos atsparumą ugniai [15]. Atsižvelgiant į gautus rezultatus

pastebėta, jog lenkiamų elementų standumas gaunamas mažesnis, lyginant su FRP armuotomis konstrukcijomis. Ekonominiu požiūriu vertinant plieninių plokštelių stiprinimo būdus bei armavimą pluoštais, kainos santykiu pranašesnis stiprinimas plieniu, tačiau įvertinant ilgaamžiškumą bei darbų atlikimą – pranašesnis stiprinimas FRP pluoštais. Plienas ir mediena yra dvi medžiagos pasižyminčios skirtingomis mechaninėmis, šiluminėmis bei fizikinėmis savybėmis. Šis medžiagų derinys tarpusavyje gali būti suderinamas sudarant patvarią kompozitinę konstrukciją, pasižyminčia didesne laikomąja galia. Dažnu atveju projektuojamos sijos iš dviejų medžio elementų apspaudžiančių plieninį lakštą. Ši kompozitinė konstrukcija nagrinėjama straipsnyje [16], kuriame teigiama jog mediena ir plienas proporcingai perima konstrukcijai tenkančias apkrovas. Taip pat mediena veikia kaip atrama plieniniam lakštui, neleidžianti jam klupti. Siekiant įvertinti tokios konstrukcijos laikomąją galią, suformuoti trijų tipų bandiniai (žr.6 pav.) [16].



**6 pav.** Kompozitinės sijos bandinių tipai [16]

Atliekant keturių taškų lenkimo testą, nustatyta, jog I atveju medienos elementų indėlis bendrajam stipriui nežymus t.y. ribinė tokios hibridinės sijos apkrova padidėjo tik 3%. II ir III bandinio rezultatai rodo, jog pridėjus medines sijas, plieninės sijos standumas padidėjo 20%. Mediniai elementai padidino sijos atsparumą šoniam sukimui ir lenkimui [16].

Medinės sijos taip pat gali būti stiprinamos apatinę elemento dalį armuojant plienine plokštele. YORESTA, F.S. ir kt. atliko tyrimus [17] siekdami nustatyti plokštelės ilgio įtaką lenkiamajam bandinio stipriui. Plieniniai elementai su sija buvo suvaržyti vidurinėje dalyje, bandymams pasitelktas trijų taškų lenkimo metodas. Gauti rezultatai atskleidė sijų laikomoji padidėjo nuo 15,4 iki 71,2%, o pačio elemento standumas išaugo 40%. Nustatyta, jog sijos armuotos su ilgesnėmis plieninėmis plokštelėmis arba didesniu plokštelių kiekiu pagerina lenkiamo elemento mechanines savybes [17].

Straipsnyje [18] rašoma apie atliktus bandymus, kurių metu siekta nustatyti klijuotų sijų iš medienos ir plieno lakštų mechanines savybes (žr.6pav.). Pastebėta, jog didesniu standumu pasižymėjo tos sijos, kurių apatiniams sluoksniams (išoriniams) buvo panaudotos medžiagos pasižyminčios geresnėmis mechaninėmis savybėmis. Teigiama, jog jei sija armuojama simetriškai, pravartu naudoti plieną, kurio mažas tamprumo modulis, tačiau įvairaus tamprumo ribose [18].

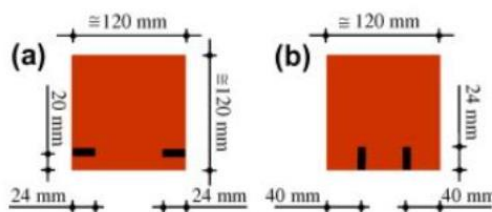
IGNÁCIO L.G. ir kiti [19] siekdami nustatyti medinių sijų laikomosios galios padidėjimą, plieninę plokštelę armuojant elemento apatinę dalį ir ją suveržiant varžtais, atliko tyrimus. Jų metu buvo bandomos skirtingų klasės medienų rūšys armuotos plienine plokštele bei rezultatų palyginimui keli bandiniai buvo atlikti armuojant anglies pluoštu. Nustatyta, jog didesnę standumą pasiekė žemesnės medienos klasės bandiniai armuoti plienine plokštele, o armuojant anglies pluoštu aukštesnės klasės medienos gaminiai. Iš gautų rezultatų pastebėta, jog varžtų skaičiaus padidėjimas suteikia sijai didesnę standumą iki 42% (lyginant su 3 varžtais ir 1 varžtų kiekvienoje sijos pusėje). Taip pat straipsnyje teigiama, jog varžto diametro padidėjimas nedaro reikšmingos įtakos bandinių standumui [19].

## 1.8. Lenkiamų medinių sijų stiprinimas polimeriniais pluoštais

Pjautinė mediena yra anizotropinė medžiaga, todėl pasižymi pakankamu atsparumu gniuždant ir tempiant. Stiprinant sijas stengiamasi padidinti jų standumą, mažinant elementų įlinkius. Tai ne tik leidžia padidinti konstrukcijų apkrovas, bet ir sumažinti naudojamus skerspjūvius [20].

Atliekant lenkimo bandymus, vienas iš ribinės sijos laikomosios galios sumažėjimo ženklų yra atsirandantys įtrūkimai elemente. Šios deformacijos pasireiškia, dėl mažo atstumo nuo atrėmimo kraštų, apkrovos perkrovimo statmenai medienos pluošto ir kt. priežasčių. Nustatyta, jog stiprinant naujas ar senas medines sijas įvairaus tipo polimeriniais pluoštais, elementų standumas gerokai išauga. Stiprinimui panaudojus pluoštą, o ne pluoštinį lakštą (lameles), ši medžiaga pasižymėjo geresniu lankstumu bei stabilesnėmis mechaninėmis savybėmis [21].

Norint nustatyti anglies pluoštų sustiprintų medinių sijų laikomąją galią  $D'AMBRISI$  ir kiti [22] atliko bandymus su 6 naujomis ir 6 senomis sijomis (demontuotomis iš seno pastato perdangos). Abiem atvejais elementai buvo stiprinami išpjaunant siaurą griovelį apatinėje sijos dalyje ir įterpiant anglies pluošto juostas (žr. 7 pav.).



7 pav. Medinių sijų skerspjūvio stiprinimas įterpiant anglies pluošto juostas [22]

Nustatyta, jog naujų sijų įlinkių kreivės linkusios artėti link didžiausiu stiprumu pasižymėjusio kontrolinio elemento. Taip yra todėl, nes anglies pluoštu sustiprintos konstrukcijos yra mažiau jautrios medienos defektams (džiūvimo plyšiams, šakoms). Armuojantis pluoštas sujungia esamus elemento įtrūkimus ir leidžia pasiekti kokybiškiausios medienos stiprumą. Nuspręsta, jog toks stiprinimo būdas (įterpiant anglies pluošto juostas) nėra efektyvus su naujomis medinėmis sijomis. Taip pat bandymų metu tirtos jau lenkimo deformacijas patyrusios sijos, kurios buvo sustiprintos ir vėl išbandytos. Rezultatai rodo, jog šis stiprinimas anglies pluoštu yra tinkamas su senomis ar jau deformacijas patyrusiomis sijomis, nes lenkiamoji geba padidinama 12-150% priklausomai nuo defektų dydžio. Galima teigti, jog anglies pluoštas leidžia atitaisyti konstrukciją iki leidžiamos eksploatacinės ribos [22].

Siekiant nustatyti anglies pluošto armavimo efektyvumą, atlikti bandymai stiprinant iš faneros lakštų suformuotas sijas. Rezultatai rodo, jog tokiu būdu armuoti elementai pasižymėjo didesne lenkiamąją galia t.y. jų mechaninės savybės pagerėjo 3 kartus. Taip pat smūginio bandymo metu gauti duomenys rodo, jog tokiu būdu sustiprintiems elementams reikia 40-60 kartus didesnės energijos pasiekti ribinę laikomosios galios reikšmę. Straipsnyje teigiama, toks armavimas pateisina lūkesčius, tačiau nėra tinkamas dėl savo aukštos kainos ir neigiamo poveikio aplinkai [23].

Atsiradus medieną silpninantiems plyšiams, vienas iš galimų variantų - armavimas įvairiais polimeriniais pluoštais. KHELIFA, M. ir kt. [24] ištyrė, jog sijų stiprumą lenkiant galima padidinti iki 100% stiprinant vien tik apatinę skerspjūvio dalį. Visą tai priklauso nuo panaudoto pluošto storio bei jo charakteristikų [24].

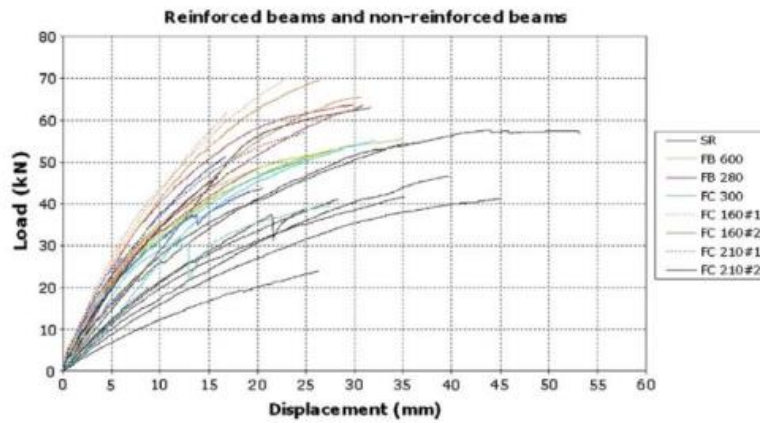
Bandymu metu iširta, jog sijos sustiprintos bazalto ir anglies pluoštais labiausiai padidina elementų standumą bei laikomąją galią [25].

ŚLIWA-WIECZOREK ir kt. [26] atliko tyrimus, siekdami išsiaiškinti armuojamų anglies pluoštų skaičiaus įtaką lenkiamajam sijų stiprumui. Nustatyta (žr.4pav.), kad armuojant siją vienu pluošto sluoksniu elemento laikomoji galia padidėjo 41,07%. Tai patvirtina teiginį, jog CFRP sustiprintos sijos efektyvumas didesnis nei įprasto elemento. Padidinus sluoksnių skaičių iki trijų, gauti rezultatai rodo jog laikomoji galia padidėjo tik 28,46%, tačiau sumažėjo lyginant su vienu sluoksnio storio padengtomis sijomis. Ištyrus penkiais sluoksniais armuotas sijas sužinota, jog rezultatai ne daug skiriasi nuo prieš tai gautų t.y. laikomoji galia padidėjo 31,29%. Pastebėta, jog esant didesniam sluoksnių skaičiui sijų lenkiamoji galia nepadidėjo. Pagal gautus duomenis buvo nuspręsta, jog pluošto sluoksnių skaičius (storiui siekiant tarp 2 - 6mm) nedaro įtakos reikšmingam elemento standumo padidėjimui [26].

**2 lentelė.** Gautų rezultatų palyginimo lentelė [26]

Lyginami parametrai	Matavimo vienetai	CFRP armuojančių sluoksnių skaičius			
		Be armuojančių sluoksnių (7 bandiniai)	1 armuojantis sluoksnis (7 bandiniai)	3 armuojantys sluoksniai (7 bandiniai)	5 armuojantys sluoksniai (8 bandiniai)
Didžiausia kiekvieną bandinį veikusi jėga	[kN]	17,99	25,38	23,11	23,62
Standartinis nuokrypis	[kN]	0,45	0,96	1,24	4,45
Variacijos koeficientas	[%]	2,52	3,76	5,35	8,84
Didžiausias kiekvieną bandinį veikęs lenkimo momentas	[kNm]	2,04	2,88	2,62	2,68
Vidutinė laikomosios galios padidėjimo vertė armuojant CFRP	[%]	-	41,07	28,46	31,29

Siekiant įvertinti elementų stiprumą, pasirinkti skirtingų tankių, orientacijos bazalto ir anglies pluoštai, kuriais „U“ forma buvo padengta apatinė sijų dalis. Bandiniams naudoti 1m ilgio medžio gaminiai, kurie buvo lenkiami veikiant koncentruota apkrova ties jų centru. Rezultatai parodė (žr.5 pav.), jog armuojant dviem anglies pluoštais austais skirtingomis kryptimis, duomenys nedaug skiriasi nuo armavimo vienu sluoksniu. Taip pat palyginus diagramos duomenis galima teigti, jog dvikryptis pluoštas yra pranašesnis už vienkryptį, net ir naudojant mažesnę medžiagos tankumą. Išsiaiškinta, jog naudojant tankesnę pluoštą gaunamas didesnis gniuždomasis stipris bei mažesni tempimo įtempiai. Taip pat nustatyta, jog bazaltiniu pluoštu armuotų sijų stiprumas buvo didesnis nei anglies pluoštu [24]. Tai svarbus aspektas, nes anglies pluošto kaina rinkoje aukštesnė nei bazalto, kas šią medžiagą padaro konkurencingesne.



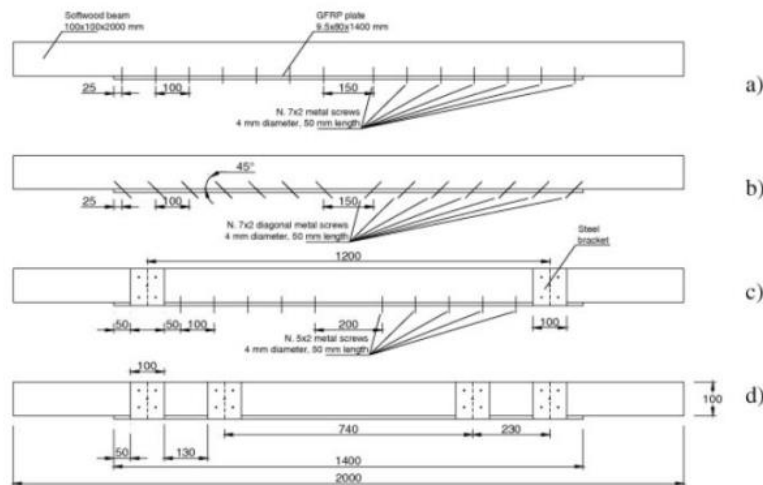
8 pav. Apkrovų ir įlinkių pasiskirstymo grafikas [24]

### Polimeriniais pluoštais armuotų kompozitinių medžio konstrukcijų patvarumas

Siekiant įvertinti medžio ir polimerinių pluoštų kompozitinės konstrukcijos patvarumą buvo atlikti tyrimai. Teigiama, jog dažnu atveju FRP armuotų medienos konstrukcijų mechaninės savybės blogėja, kai yra veikiamos atšiaurių sąlygų, tokių kaip: drėgmė, aukšta temperatūra, rūgštinių ar šarminių medžiagų poveikis. Iš gautų bandymų rezultatų nustatyta, jog drėgmė viena iš pavojingiausių sąlygų galinti pabloginti ilgalaikį kompozitinių konstrukcijų patvarumą. Šarminiai, rūgštiniai bei jūros vandens tirpalai taip pat mažina konstrukcijų eksploatacijos trukmę. Taip pat teigiama, jog dvikomponenčiai PUR klijai dėl savo didelio klampumo nėra tinkami stiklo pluošto klijavimui. Pabrėžiama, jog prieš naudojant įvairaus tipo kljus skirtus FRP armavimui, pravartu detaliau panagrinėti jų tinkamumą [27].

### Medinių sijų armavimas FRP pluoštu, jį tvirtinant varžtais

Dauguma šaltinių teigiama, jog armavimo kljai naudojami konstrukcijų stiprinimui nėra tvarūs. CORRADI, M. ir kiti [28] atlikdami bandymus stengėsi išspręsti šią problemą, kljus pakeičiant varžtais, kurie FRP pluoštus prispaudė prie apatinės sijos dalies. Buvo iširtos keturios tvirtinimo konfigūracijos (žr. 9 pav.).



9 pav. FRP tvirtinimo konfigūracijos [28]

Siekiant sumažinti įtempių koncentraciją šalia jungties, buvo padidintas varžtų/detalių skaičius ir skersmuo. Tokiu būdu pasiektas lenkiamoji stiprio padidėjimas iki 58,9%, o lenkiamasis standumas iki 98,9%. Dažnu atveju suirimas vyko dėl tvirtinimo detalių tarpusavio medžiagų ryšio silpnumo t.y. GFRP pluošto ir medienos prasislinkimo. Teigiama, jog geriausias tvirtinimo būdas d) metodas, kai pluoštas prispaudžiamas 4 plieniniais laikikliais [28].

### **Medinių sijų armavimas HFRP pluoštu**

Siekiant sukurti naują, konkurencingą pluoštą mokslininkai atliko tyrimus su hibridiniu lino – stiklo FRP. Bandydams naudotos klijuotos faneros sijos, kurių paviršius buvo sutvirtintas šiuo pluoštu. Straipsnyje HUANG, S., YAN, L ir kiti [28] teigia, jog stipris lenkiant išaugo 25,5-30,7% , tačiau siekiant ištirti medžiagos patvarumą buvo taikytas hidroterminis ir atmosferinis poveikis. Tai gerokai sumažino tokiu būdu armuotu sijų stiprumą lenkiant 19-40%, maksimalią galimą apkrovą 11,4-32,2% [29]. Galima teigti, jog toks pluoštas nėra tinkamas elementų stiprinimui, nes yra paveikęs atmosferiniams poveikiams.

### **FRP ir statybinės medienos ryšio stiprumas**

Norėdami įvertinti medienos ir FRP pluošto tarpusavio sukibimą, VAHEDIAN, A ir kiti [30] atlikimo tyrimus, kurių metu prie šių medžiagų buvo pritvirtinti įtempių matuokliai registruojantys reikalingus duomenis. Tiksliai įvertinti sankibumą yra sudėtinga, dėl daugybės jį veikiančių kintamųjų. Žinoma, jog suirimas gali įvykti keliais būdais: medienos atsiskyrimas nuo pluošto, FRP klijų atsiskyrimas, FRP plyšimas, FRP atsiluoksniavimas. Kritinis suirimo būdas laikomas, kai klijai atsiskiria nuo medienos paviršiaus. Teigiama, kad pagrindo (medienos) savybės tiesiogiai veikia sukibimo efektyvumą. Pastebėta, jog FRP ir medienos pločio santykis bei ilgis daro didelę įtaką sukibimo stiprumui [30]. Taikant tris skirtingus metodus (EBR, HNSM, VNSM) patvirtina anksčiau minėtame straipsnyje pateikiama teiginį, jog medžiagų sankabumas priklauso nuo tarpusavio ryšio ilgio [31]. Medienos ir polimerinio tarpusavio ryšys gali susilpnėti dėl ekstremalių aplinkos poveikių tokių kaip: paros temperatūros pokyčiai, šarminiai, rūgštiniai tirpalai, ultravioletinė spinduliuotė ir kt. pagrindinis susilpnėjimo veiksnys laikomas drėgmės užsilaikymu konstrukcijoje [32]. Padidėjus konstrukciją veikiančiai temperatūrai, tai gali paspartinti drėgmės pasiskirstymą elemente, dėl to dalis klijų gali pakeisti savo būseną, taip sumažinant sukibimo jėgą [33].

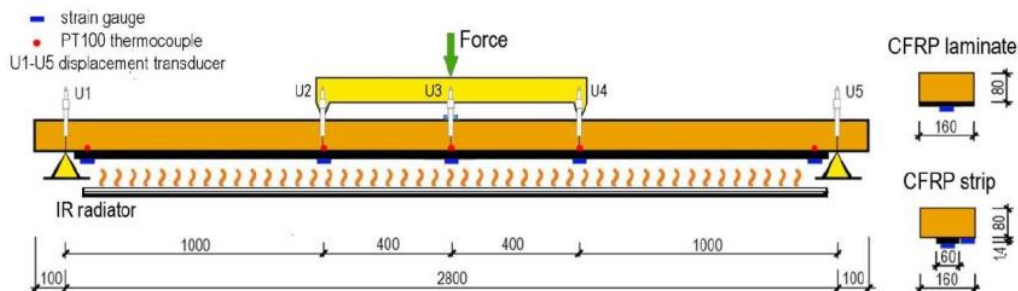
### **Aukštos temperatūros poveikis FRP pluoštams**

Šią medžiagą veikiant aukšta temperatūra pastebimi standumo bei stiprumo sumažėjimai, atsirandantys dėl mechaninio vientisumo pokyčių polimerinėje matricoje. Stiprinant konstrukcijas, armavimo pluoštas prie elemento stipriai priglunda, sudarydamas vientisą medžiagą. Taip šiluma lengvai perduodama pagrindinei konstrukcijai, kas gaisro metu pablogina medienos ir pluošto tarpusavio sankibą, lemiančia kompozitinio elemento stiprumą. Bandydama metu, kuomet buvo tiriamas šis reiškinys nustatyta, jog pluoštui esant gilesniuose medienos sluoksniuose armavimo atsparumas karščiui pasižymėjo 44% geresniais rezultatais nei armavimas išoriniuose sluoksniuose [34].

Norint gauti tikslesnius duomenis apie šilumos poveikį, lenkiamoms anglies pluoštu sustiprintoms sijoms, KRZYWON, R. [35] atliko eksperimentą. Jo metu išbandytos 10 sijų iš kurių 4 armuotos anglies pluošto lamele, 4 anglies pluošto juosta ir viena plieno pluošto juosta. Bandydas atliktas keturių taškų lenkimo metodu, o šiluma buvo spinduliuojama pasitelkiant infraraudonųjų



spindulių radiatorių. Siekiant išvengti sukamojo klupumo, sijos išlenktos mažesnio inercijos momento kryptimi. Įlinkiai, suirimo stadija bei įtempiai buvo fiksuojami linijiniais poslinkių keitikliais išdėstytais išilgai tiriamos sijos (žr. 10pav.) [35].



10 pav. Bandymo atlikimo schema [35]

Tyrimams naudotų medžiagų charakteristikos pateiktos 1 lentelėje.

3 lentelė. Bandymams naudotų medžiagų charakteristikos ir sąlygos [35]

Žymėjimas	Sustiprinimo tipas	Pjūvio išmatavimai	Maksimali šildymo temperatūra, C°	Bandymų metu, bandinius veikiama temperatūra, C°
BB	Nesustiprinta	160x80	20	20
BCLT20	CFRP S&P lamelė C pluoštas 240, tipas 400g/m <sup>2</sup>	158x80	20	20
BCLT50		160x81	75	56→42
BCLT62		159x81	89	65→62
BCLT65		160x80	89	68→64
BCST20	CFRP S&P juosta CFK 200/2000, tipas 60x1,4mm	158x78	19	19
BCST70		159x80	72	70→60
BCST80		162x80	80	80→68
BCST90		160x80	89	88→77
BSRT75	SRP juosta 3x2-20	160x78	80	75→65

Bandymų metu nustatyta, jog sijos sustiprintos CFRP lamelėmis prarado savo laikomąją galią dėl gniuždymo įtempių atsiradimo pluošte arba jų suirimo. Atliekant lenkimo bandymą tik 1 iš keturių CFRP juosta sustiprintų sijų suiro tinkamai t.y. BCST90, kuri buvo veikiama aukščiausia 90 C° temperatūra. BSRT75 tyrimo objekto, kuris buvo sustiprintas plieno pluošto juosta, bandymo prietaisas negalėjo sulaužyti, todėl gauti rezultatai priskirti netinkamai.

Išsiaiškinta, jog kuo didesne temperatūra yra veikiami anglies pluoštu sustiprinti elementai, tuo armavimo efektyvumas mažina savo vertę. Šis teiginys pagrindžiamas įlinkių ir deformacijų rezultatais. Tyrimų metu BCLT50 pasižymėjo 26%, o BCLT65 31% didesniais įlinkiais nei įprastoje kambario temperatūroje tirtu bandiniu. Epoksidiniai klijai aukštoje temperatūroje pereina į „stiklėjimo“<sup>2</sup> būseną, kas sumažina jų lipnumo savybes darančias įtaką elementų stiprinimui.

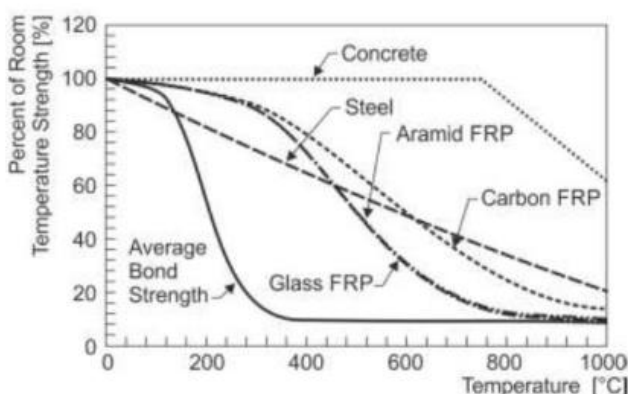
<sup>2</sup> Stiklėjimas – skystčio (lydalo) virtimas kieta stikliškosios (amorfines) būsenos medžiaga [47]



Mokslinio straipsnio išvadose teigiama, jog pasiekus aukštesnei nei 50 C<sup>o</sup> temperatūrai, klijų kimbamosios savybės mažėja. Stiprinimas anglies pluošto lamelėmis yra efektyvesnis, nes gaunamas didesnis sukibimo plotas, kas padidina ribinius tempimo įtempius. Platus klijų pasiskirstymas lemia stabilesnę dervų struktūrą esant aukštai temperatūrai [35].

### Polimeriniais pluoštais sustiprintų konstrukcijų apsauga nuo gaisro poveikio

Dažnu atveju norint sustiprinti elementų tempiamąją zoną, polimeriniai pluoštai klijuojami prie išorinio paviršiaus, kas juos gaisro atveju padaro pažeidžiamais. Straipsnyje pateikiamas grafikas (žr.11 pav.), kuriame atsispindi įvairių medžiagų stiprio priklausomybė nuo temperatūros. Anglies pluoštas vienas iš patikimiausių gaisro atveju, nes savo stiprumą praranda vėliausiai. Galima teigti, jog be apsaugos polimerinės medžiagos praranda sukibimą su konstrukcija, gali užsidegti bei leisti liepsnai plisti toliau [36].



11 pav. Polimerinių medžiagų stiprio priklausomybė nuo temperatūros [36]

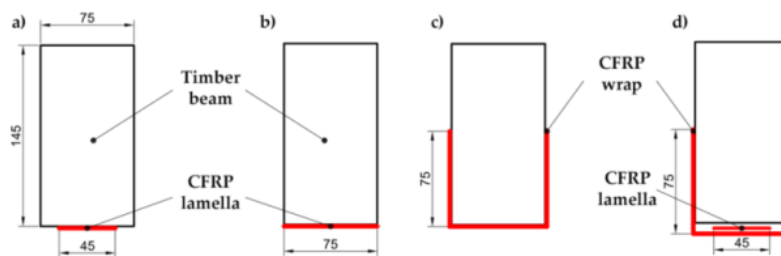
Vienas iš būdų apsaugoti polimerinę medžiagą, ją įterpiant į konstrukciją (NSM metodika). Taip pluoštas išlieka ilgiau nepažeistas atviros liepsnos. Tyrimai atskleidė, jog papildomas medienos sluoksnis, kurio storis 25 mm gali užtikrinti FRP temperatūrą žemiau 100C<sup>o</sup> apie 15 min. Dangos storį padidinus iki 40 mm, apsaugą nuo gaisro galima padidinti iki 30 min. Kita metodika - armavimą uždengiant mineraliniu pluoštu arba ugniai atspariais tinkais [36].

### Elementų padengimo FRP pluoštais metodika

Atliekant elementų stiprinimą, pluošto uždėjimo technika daro įtaką konstrukcijų laikomosios galios didinimui. Medines sijas armuojant vienu pluošto sluoksniu taikomas „dry lay-up“ metodas. Šiuo būdu epoksidinė derva sustiprina konstrukcijos paviršių ir impregnuoja pluoštą. Pirmiausia, medienos paviršius stiprinimo vietose, naudojant teptuką, padengiamas klijų sluoksniu. Tada pagal matmenis supjaustomas pluoštas ir pasitelkiant volelį išilgine medžio plaušų kryptimi įspaudžiamas į epoksidiniais klijais padengtą paviršių. Tada vizualiai patikrinamas armuotas paviršius. Pastebėjus oro tarpus, dar kartą paviršius išlyginamas voleliu, taip pašalinant susidariusį orą. Tokiu atveju, kai norima armuoti elementus keletą pluošto sluoksnių, pasitelkiamas „wet on wet“ metodas. Jo taikymas skiriasi tik tuo, kad prieš tai uždėta pluošto danga padengiama klijų sluoksniu ir ant jos voleliu prispaudžiama kita. Taip sukuriamas vientisas ir tinkamai priglundęs sluoksnis užtikrinantis savo paskirtį [8].

## Polimerinių pluoštų (FRP) išdėstymo įtaka stiprumui

Siekiant ištirti pluošto įtaką lenkiamajam elemento stiprumui, buvo atlikti bandymai, kurių metu pasirinktos trys armavimo sluoksnio pridėjimo padėtys (žr.12pav.). Išilginis armavimas (IA) – pluoštą priklijuojant iš apačios, medžio plaušų kryptimi; „U“ formos armavimas (UA)- pluoštu padengiant pusę sijos apatinės dalies; kombinuotas armavimas (I-UA) – pluoštu padengiant elementą išilgai konstrukcijos ir papildomai apklijuojant „U“ formos polimeriniu sluoksniu. Pjautinės medienos sijų armavimui naudotas gerai žinomų gamintojų „SIKA“ ir „DRIZORO“ anglies pluoštai [37].



12 pav. a)/b) IA metodas; c)UA metodas; d)I-UA metodas [37]

Mediena yra nevienalytė medžiaga, turinti šakų, vabzdžių defektų bei nelygumų, todėl išilgai pluošto esantis sijų skerspjūvių tankis gali būti nevienodas. Tai daro įtaką lenkiamų elementų laikomosios galios rezultatams. Siekiant tinkamo duomenų palyginimo, naudojant skirtingas armavimo metodikas, buvo įvestas įtempių pataisos faktorius DC [37].

$$DC = \frac{\rho_m}{\rho_{beam}} \quad (1.8.1)$$

čia:  $\rho_m$  – vidutinis visų tirtų bandinių tankis;  $\rho_{beam}$  – bandomos sijos tankis

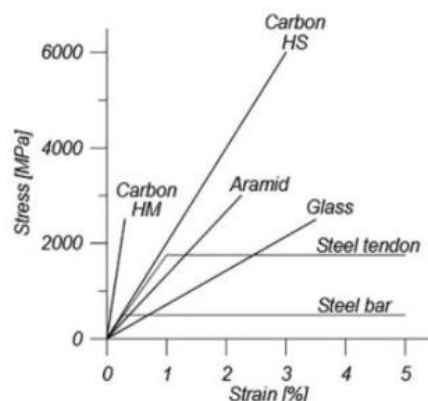
Išanalizavus bandymo metu gautus duomenis (žr.12pav.) pastebėta, kad IA būdu armuotų sijų stiprumas keičiant pluošto plotį nedaro didelės įtakos sijos laikomajai galiai. Pastebėta, jog tokiam stiprinimo tipui būdinga problema – delaminacija. Sijas padengiant UA metodika sijų stiprumas padidėja lyginant su IA būdu. Didžiausiu stiprumo pasižymėjo sijos armuotos I-UA padengimu su dvikrypčiu pluoštu. Visais anglies pluoštu priklijavimo būdais sustiprintos sijos pasižymėjo didesne lenkiamąją galia, lyginant su nearmuotomis. Kitą vertus armuojant UA būdu kaina išauga 90%, taikant I-UA stiprinimą 230%, lyginant su IA armavimu. Atsižvelgus į atliktą tyrimą, ekonominiu požiūriu galima teigti jog tik labai silpnas sijas, kurias konstrukciškai sudėtinga išmontuoti verta stiprinti I-UA būdu [37].

BAKALARZ, M.M ir kiti [38] tyrė medinių lenkiamų elementų stiprinimo pluoštais metodikos efektyvumą. Bandymų metu nustatyta, jog didžiausia lenkiamoji geba pasiekama panaudojus anglies pluoštą. Didžiausias sijos plastiškumas pasiektas armuojant U formos metodika. Straipsnyje teigiama, jog kuo didesnis armuojamos medžiagos standumo modulis panaudojamas stiprinimui, tuo lenkiamasis elemento standumas gaunamas didesnis. Taip pat užsimenama, jog esant didesniam pluošto tempiamajam stipriui, gaunama didesnė sijos laikomoji galia [38]. Viename iš ANDRÉ, A. [39] straipsnių buvo analizuojamas klijuotų medinių sijų stiprinimas anksčiau paminėtomis metodikomis. Nustatyta, jog geriausia stiprinimo pluoštais konfigūracija – apgaubiant sijos tempiamąją zoną bei jos šonus aukščiau neutralios ašies iš abiejų pusių (U tipas). Toks stiprinimo

būdas padidino sijos lenkiamąją galią iki 69%. Ši metodika ne tik pagerina sijos lenkiamąsias savybes bet ir padidina atsparumą kirpimui [39].

### Polimerinių pluoštų (FRP) savybės

Polimeriniai pluoštai veikia, kaip išorinėje konstrukcijos dalyje surišta armatūra, skirta sustvirtinti bet kokio tipo konstrukciją. Polimeriniai pluoštai pasižymi aukštais tamprumo moduliais, kurie daugeliu atveju didesni nei įprastų statyboje naudojamų medžiagų. Įtempių ir poslinkių kreivių išsidėstymą su skirtingomis pluoštinėmis medžiagomis (žr.13 pav.). Iš jų pasiskirstymo grafike galima teigti, jog visos pateiktos pluoštinės medžiagos pasižymi didesniu stipriu tempiant nei įprasto plieno. Polimerinių pluoštinių medžiagų ir plieno mechaninės savybės žr. 4 lentelė [40].



13 pav. Medžiagų įtempių ir poslinkių kreivės [40]

4 lentelė. Polimerinių pluoštinių medžiagų ir plieno mechaninės savybės [40]

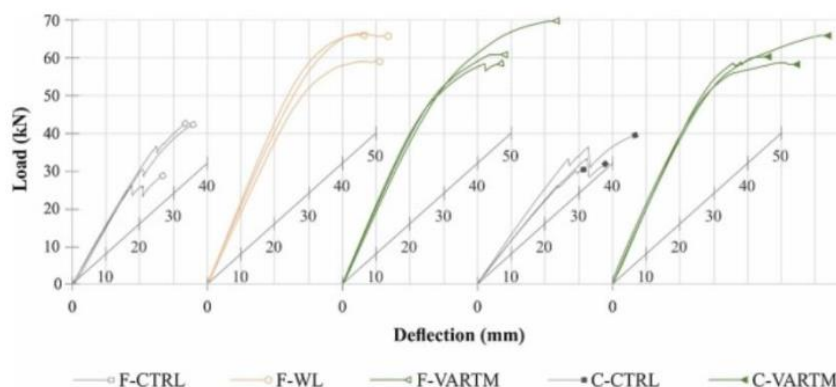
Savybė	Medžiagos tipas				
	CFRP (anglies pluoštas)	GFRP (stiklo pluoštas)	AFRP (aramidinis pluoštas)	BFRP (bazaltinis pluoštas)	Plienas
Tankis (gm/cm <sup>3</sup> )	1,5-2,10	1,25-2,5	1,25-1,45	1,9-2,1	7,85
Tempiamasis stipris (MPa)	600-3920	483-4580	1720-3620	600-1500	483-690
Jungo modulis (GPa)	37-784	35-86	41-175	50-65	200
Pailgėjimas (%)	0,5-1,8	1,2-5,0	1,4-4,4	1,2-2,6	6,0-12,0
Linijinio plėtimosi koeficientas (10 <sup>-6</sup> /OC)	-9,0-0,0	6,0-10,0	-6,2-2,0	9,0-12,0	11,7

FRP matricą sudaro ne tik polimerinė medžiaga bet ir dervos, užpildai bei kiti priedai. Dažnu atveju gaminant pluoštus naudojamas termoreaktingos dervos, kurioms sukietėjus negalima pašildžius iš naujo suformuoti gaminio. Pagrindinė matricos užduotis išlaikyti pluoštus tinkamoje padėtyje, perduoti jiems apkrovas, bei apsaugoti pluoštus nuo išorinio poveikio. Straipsnyje teigiama, jog polimerinės medžiagos pasižymi dideliu stipriu tempiant išilgine pluošto kryptimi, kas jas padaro be galo vertingas statybų sektoriuje. Galima daryti išvada, jog aramidinis pluoštas nėra plačiai naudojamas, dėl mažo gniuždymo stiprio ir savo kainos. Anglies pluoštas pasižymi dideliu stiprumu bei atsparumu nuovargiui, todėl rinkoje jo kaina išlieka viena didžiausių. Stiklo pluoštas naudojamas

daugelyje pramonės sričių dėl savo pigios kainos, tačiau jo tempiamasis stipris išlieka mažiausias lyginant MPa/g santykį [40].

### Sijų stiprinimas armuojant išilgai gofruotą paviršių

Dažnu atveju, sijos lenkimo metu, kai apatinėje sijos dalyje atsiranda didžiuliai įtempiai, elementas praranda savo laikomąją galia, įvykus armuoto sluoksnio delaminacijai. Žinoma, jog padidinus įtempių veikiamą plotą, reikalinga didesnė jėga paskatinanti armuoto sluoksnio atsiskyrimą nuo konstrukcijos. Bandytųjų metu buvo ištirti 5 variantai: F-CTRL – plokščia nearmuota sija; F-WL anglies pluoštu padengta sija; F-VARTM – sija padengta anglies pluoštu, pasitelkiant VARTM metodiką; C-CTRL- sija gofruotu paviršiumi; C-VARTM - sija gofruotu paviršiumi padengta anglies pluoštu pasitelkiant VARTM metodiką. VARTM metodas – dervos paskirstymas pasitelkiant vakuumą [41].



14 pav. Bandytųjų sijų įlinkių priklausomybių grafikai nuo apkrovos [41]

Bandyto rezultatai (žr.14pav.) rodo, kad lygaus anglies pluoštu suarmuoto paviršiaus įlinkis veikiant tai pačiai jėgai buvo panašus su gofruoto paviršiaus armavimu anglies pluoštu. Iš šių duomenų galima spręsti, jog paviršiaus forma sijos lenkiamai galiai įtakos neturi. Straipsnyje nagrinėjant kirpimo (šlyties) jėgos stiprį pastebėta, jog gofruoto paviršiaus su anglies pluoštu stipris gaunamas didesnis nei lygaus armuoto paviršiaus. Šis reiškinys paaiškinamas pluošto pločio ilgiu, jam padidėjus išaugo skerspjuvio atsparumas šlyčiai [41].

### 1.9. Literatūros analizės išvados

- Racionaliausias sprendimas stiprinant konstrukcijas, pasirinkti armavimą polimeriniais pluoštais. Tokiu būdu stiprinimo darbai atliekami greičiausiai;
- Ekonominiu požiūriu įvertinus konstrukcijų armavimą, bazalto pluoštas pigesnis bei pasižymi didesniu efektyvumu stiprinant nei naudojant anglies pluoštą;
- Stiprinimo pluoštais tipas priklauso nuo elemente esančių pažaidų pobūdžio, vienais atvejais tinkamesnis brangesnis IU-R (U) metodas, o tais atvejais kai nereikalingas kerpamoji stiprio didinimas taikytinas IR (armavimas išilgai medienos pluošto) metodas;
- FRP pluoštai nėra atsparūs aukštos temperatūros poveikiui, jų stipris tempiant mažėja kylant temperatūrai. Didėjant temperatūrai anglies pluoštas stiprumą praranda vėliausiai, tačiau siekiant didesnio ugnies atsparumo, pravartu kompozitines konstrukcijas padengti papildomu medžio sluoksniu, mineralinėmis medžiagomis arba ugniai atspariais tinkais;
- Kompozitinių konstrukcijų stipris mažėja didėjant drėgmės poveikiui, todėl jų eksploatavimas/ stiprinimas veikiant tokiam poveikiui nėra racionalus.

## 2. Metodologija

### 2.1. Analitiniai skaičiavimai

Skaičiavimuose analizuojamas medinių sijų normalinio pjūvio stiprinimo uždavinys, kai šių elementų tempiama zona armuojama plienine juosta, anglies pluoštu, bazalto pluoštu bei mediniu tašu. Sustiprintos sijos skaičiuojamos, kaip kompozitiniai elementai pagal knygoje „Design of Structural Timber“ [42] pateiktą skaičiavimo metodiką bei teorinės mechanikos skaičiavimo principus. Atliekami dviejų tipų skaičiavimai: kai tarp sluoksnių vyrauja pilnas sukibimas ir kai tarp sluoksnių nėra sukibimo. Siekiant įvertinti kompozitinių sijų laikomosios galios padidėjimą, skaičiuojami tempimo įtempiai armuotos sijos sluoksniuose ir palyginami su nearmuoto elemento įtempiais veikiant vienodai apkrovai. Taip pat atliekami įlinkio, šlyties jėgos skaičiavimai. Gauti rezultatai tarpusavyje palyginami.

#### 2.1.1. Pradiniai duomenys

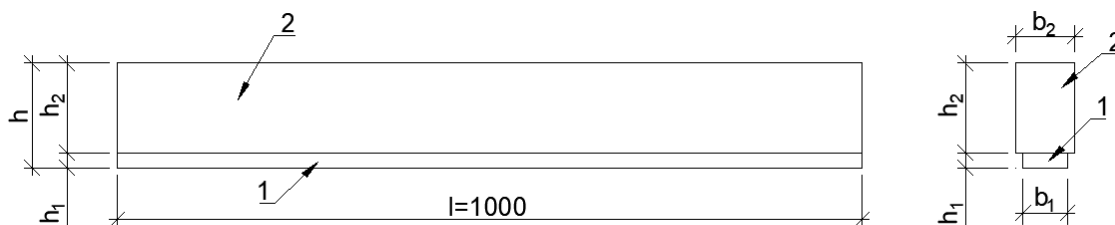
Skaičiavimams naudojama 1-o metro ilgio, stačiakampio skerspjūvio (80x120 mm) medinė sija, kurios tempiama zona armuojama skirtingomis medžiagomis. Mechanines savybes (žr. 5 lentelė). Visais skaičiavimo atvejais elementas apkraunamas 10 kN koncentruota apkrova.

**5 lentelė.** Skaičiavimams naudojamų medžiagų mechaninės savybės

Medžiaga	Tamprumo modulis E, GPa	Mažiausias stipris tempiant $f_t$ , MPa
Mediena (C24) LST EN 1995-2:2005. Eurokodas 5	11	14,5
Plieninė juosta (S235) LST EN 1993-1-1:2005. Eurokodas 3	210	235
Anglies pluoštas (CFRP) [43]	216 (vidutinė reikšmė)	3267 (vidutinė reikšmė)
Bazalto pluoštas (BFRP) [44]	45 (vidutinė reikšmė)	1239 (vidutinė reikšmė)

**Pagrindinis uždavinys** – žinant nearmuotame skerspjūvyje (medžio sijoje) atsirandančius tempimo įtempius, papildomai armuojant skirtingomis medžiagomis, juos sumažinti 30%. Atsižvelgiant į tai palyginami panaudotų medžiagų kiekiai bei nusakomas sijos stiprinimo efektyvumas.

Skerspjūvio skaičiuojamoji schema (žr. 15 pav.).



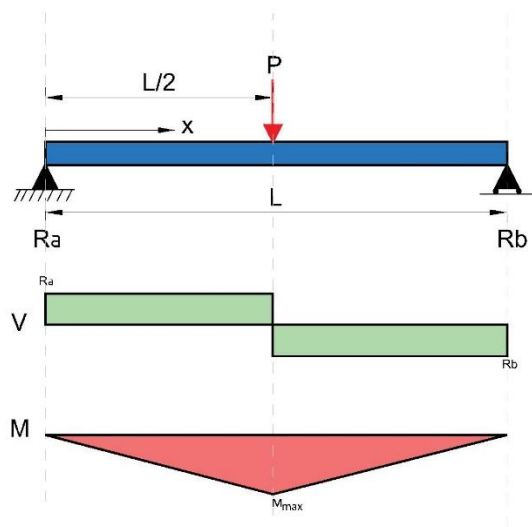
**15 pav.** Skerspjūvio skaičiuojamoji schema 1- armuojančioji medžiaga, 2 – medžio sija

**6 lentelė.** Skaičiavimams naudojami simboliai ir jų paaiškinimai

<b>Simbolis</b>	<b>Apibūdinimas</b>
$F_x; F_y$	X ir Y ašyse elementą veikiančios jėgos
$R_1; R_2$	Atraminės reakcijos ties elemento atrėmimo vieta
$M_v; M_u;$	Maksimalus elementą veikiantis lenkimo momentas
$\sigma_{w,c}$	Gniuždymo zonos įtempiai
$\sigma_{w,t}$	Tempiamos zonos įtempiai
$y_c$	Atstumas nuo neutralios ašies iki gniuždomos zonos
$y_t$	Atstumas nuo neutralios ašies iki tempiamos zonos
$b_2$	Nearmuoto medžio elemento plotis
$h_2$	Nearmuoto medžio elemento aukštis
$f_{m,d}$	Skaičiuotinis lenkiamos medienos stipris
$f_{m,k}$	Charakteristinis lenkiamos medienos stipris
$n$	Elementų tamprumo modulių santykis
$E_i$	Elemento tamprumo modulis
$b_{1,t}$	Transformuoto skerspjūvio plotis
$A_i$	Elemento plotas
$\bar{y}$	Transformuoto kompozitinio elemento neutralios ašies padėtis
$I_{eff}$	Efektyvus inercijos momentas
$f_{y,d}$	Skaičiuotinis plieno stipris tempiant
$f_y$	Charakteristinis plieno stipris tempiant
$\gamma_{M2}$	Tempiamosios irties laikomosios galios dalinis koeficientas
$d_{f,max}$	Maksimalus elemento įlinkis
$\epsilon_{1.1}$	Papildomo sluoksnio apatinio krašto deformacija
$\epsilon_{1.2}$	Papildomo sluoksnio viršutinio krašto deformacija
$\epsilon_{2.1}$	Stiprinamo sluoksnio apatinio krašto deformacija
$\epsilon_{2.2}$	Stiprinamo sluoksnio viršutinio krašto deformacija
$I_i$	Elemento inercijos momentas
$W_i$	Elemento atsparumo momentas
$T$	Tarp sluoksnių veikianti šlyties jėga

### 2.1.2. Nearmuotas lenkiamas skerspjūvis

Dviatramę (nearmuotą),  $L=1$  m ilgio siją apkrovus koncentruota  $P=10$  kN apkrova, pagal pusiausvyros lygtis ieškome didžiausio elemente veikiančio lenkimo momento (žr. 16pav.).



16 pav. Skersinės jėgos ir lenkimo momentų diagramos veikiant centriškai apkrautą dviatramę siją

$$\sum F_x = 0$$

$$\sum M_2 = 0$$

$$P \cdot 0,5 - R_2 \cdot 1,0 = 0$$

$$R_2 = P \cdot 0,5 = 10 \cdot 0,5 = 5 \text{ kN} \quad (2.1.2.1)$$

$$\sum F_y = 0$$

$$R_a + R_b - F = 0$$

$$R_a = P - R_b = 10 - 5 = 5 \text{ kN}$$

$$\sum M_1 = 0$$

$$R_b \cdot 1,0 - P \cdot 0,5 = 0$$

$$M_1 = 5 \cdot 1,0 - 10 \cdot 0,5 = 0 \text{ kNm} \quad (2.1.2.2)$$

$$\sum M_v = 0$$

$$R_b \cdot 0,5 = 0$$

$$M_v = 5 \cdot 0,5 = 2,5 \text{ kNm} \quad (2.1.2.3)$$

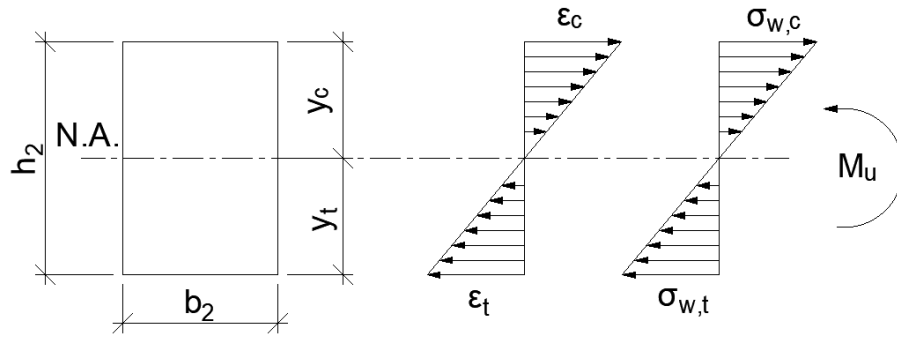
$$\sum M_2 = 0$$

$$R_a \cdot 1,0 - P \cdot 0,5 = 0$$

$$M_2 = 5 \cdot 1,0 - 10 \cdot 0,5 = 0 \text{ kNm} \quad (2.1.2.4)$$

Gauname, jog didžiausias lenkimo momentas veikia ties koncentruotos jėgos veikimo tašku ir lygus 2,5 kNm.

Medžio siją veikiant koncentruota apkrova, elementas yra lenkiamas. Apatinė sijos dalis veikiama tempimo, o viršutinė sijos dalis gniuždymo įtempių. Šių vidinių jėgų pasiskirstymą skerspjūvyje (žr.17 pav.) . Pagal pusiausvyros lygtis ieškomi maksimalūs tempimo įtempiai  $\sigma_{w,t}$ .



17 pav. Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje

Sprendžiama lygčių sistema, išsireiškiant  $\sigma_{w,c}$  dydį:

$$\sum F = 0$$

$$\frac{1}{2} \cdot \sigma_{w,c} \cdot b_2 \cdot y_c - \frac{1}{2} \cdot \sigma_{w,t} \cdot b_2 \cdot y_t = 0 \quad (2.1.2.5)$$

$$\frac{1}{2} \cdot \sigma_{w,c} \cdot b_2 \cdot y_c = \frac{1}{2} \cdot \sigma_{w,t} \cdot b_2 \cdot y_t$$

$$\sigma_{w,c} = \frac{\sigma_{w,t} \cdot b_2 \cdot y_t}{b \cdot y_c} \quad (2.1.2.6)$$

Žinoma, jog neutrali ašis yra skerspjūvio centre, todėl atstumai nuo N.A. iki gniuždomos ir tempiamos zonos lygūs:

$$y_c = y_t = \frac{h_2}{2} \quad (2.1.2.7)$$

Sprendžiama lygčių sistema išsireiškiant  $\sigma_{w,t}$  dydį:

$$\sum M = 0$$

$$\frac{1}{2} \cdot \sigma_{w,c} \cdot b_2 \cdot y_c \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot y_c\right) + \frac{1}{2} \cdot \sigma_{w,t} \cdot b_2 \cdot y_t \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot y_t\right) = M_u \quad (2.1.2.8)$$

Įstatome į 2.1.2.8 lygtį 2.1.2.6 išraišką ir susiprastiname:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_{w,t} \cdot b_2 \cdot y_t}{b \cdot y_c} \cdot b \cdot y_c \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot y_c\right) + \frac{1}{2} \cdot \sigma_{w,t} \cdot b_2 \cdot y_t \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot y_t\right) = M_u$$

$$\frac{1}{2} \cdot \sigma_{w,t} \cdot b_2 \cdot y_t \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot y_c\right) + \frac{1}{2} \cdot \sigma_{w,t} \cdot b_2 \cdot y_t \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot y_t\right) = M_u \quad (2.1.2.9)$$

Įstatome į 2.1.2.9 lygtį 2.1.2.7 išraišką:

$$\frac{1}{2} \cdot \sigma_{w,t} \cdot b_2 \cdot y_t \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot y_t\right) + \frac{1}{2} \cdot \sigma_{w,t} \cdot b_2 \cdot y_t \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot y_t\right) = M_u$$

$$\sigma_{w,t} \cdot \left( \left( \frac{1}{2} \cdot b_2 \cdot y_t \cdot \left( \frac{1}{3} \cdot y_t \right) \right) + \left( \frac{1}{2} \cdot b_2 \cdot y_t \cdot \left( \frac{1}{3} \cdot y_t \right) \right) \right) = M_u$$

$$\sigma_{w,t} \cdot \left( \left( \frac{1}{2} \cdot b_2 \cdot \left( \frac{1}{3} \cdot y_t^2 \right) \right) + \left( \frac{1}{2} \cdot b_2 \cdot \left( \frac{1}{3} \cdot y_t^2 \right) \right) \right) = M_u$$



$$\sigma_{w,t} = \frac{M_u}{\left(\frac{1}{2} \cdot b_2 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot y_t^2\right)\right) + \left(\frac{1}{2} \cdot b_2 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot y_t^2\right)\right)} \quad (2.1.2.10)$$

Suprastiname 2.1.2.10 išraišką įstačius 2.1.2.7:

$$\sigma_{w,t} = \frac{M_u}{b \cdot \frac{h_2^2}{6}} \quad (2.1.2.11)$$

Skerspjuvyje veikiant maksimaliam lenkimo momentui  $M_u = 2,5 \text{ kNm}$  gaunami didžiausi medžio sijos tempimo įtempiai:

$$\sigma_{w,t} = \frac{M_u}{b \cdot \frac{h_2^2}{6}} = \frac{2,5 \cdot 10^6}{80 \cdot \frac{120^2}{6}} = 13,02 \text{ MPa} \quad (2.1.2.12)$$

Pagal LST EN 1995-2:2005. Eurokodas 5 ir LST EN 338:2016 skaičiuotinis lenkiamos medienos stipris, kai C24 klasės mediena apskaičiuojamas:

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,k} \cdot k_m}{\gamma_M} = \frac{24 \cdot 0,7}{1,3} = 12,69 \text{ MPa} \quad (2.1.2.13)$$

$\gamma_M$  – laikomosios galios dalinis koeficientas, masyviai medienai 1,3;  $k_m$  – koeficientas, vientsiai stačiakampio skerspjuvio medienai 0,7

Tikrinama sąlyga pagal LST EN 1995-2:2005. Eurokodas 5:

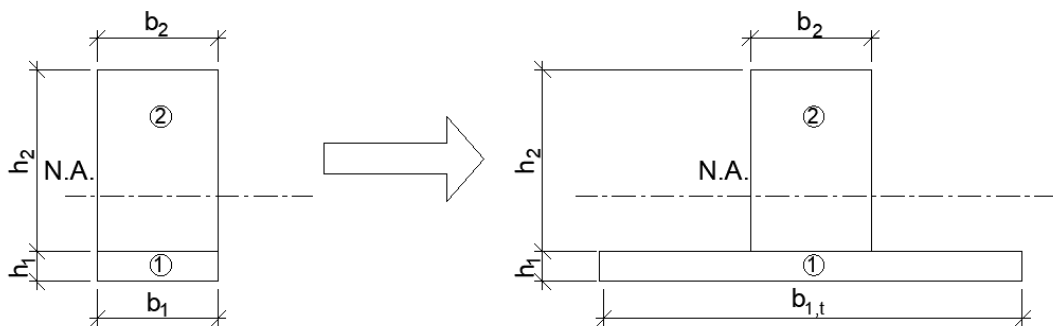
$$\sigma_{w,t} \leq f_{m,d} \quad (2.1.2.14)$$

$13,02 \text{ MPa} \leq 12,69 \text{ MPa}$  (Sąlyga tenkinama)

### 2.1.3. Plienine juosta armuotas lenkiamas skerspjuvis (pilnas sukibimas)

#### 2.1.3.1. Elementuose veikiančių įtempių $\sigma_{w,t1}$ ir $\sigma_{st,t}$ radimas

Skaičiavimai atliekami taikant „Transformed section“ metodiką, pateiktą knygoje „Design of Structural Timber“ [42]. Skaičiuojant sluoksniuotą konstrukciją, pasirenkamas vienas iš elementų pagal kurį transformuojamas skerspjuvis. Pasirinkta kompozitinę siją skaičiuoti, atsižvelgiant pagal 2 elementą (žr. 18 pav.).



18 pav. Skerspjuvio transformavimas pagal 2 elementą

Apskaičiuojamas elementų tamprumo modulio santykis  $n$ , pagal kurį transformuojamas skerspjuvis:

$$n = \frac{E_{st}}{E_w} = \frac{210}{11} = 19,09 \quad (2.1.3.1.1)$$

$$b_{1,t} = n \cdot b_1 = 19,09 \cdot 26 = 496 \text{ mm} \quad (2.1.3.1.2)$$

Skaičiuojama transformuoto kompozito neutralios ašies padėtis  $\bar{y}$ :

$$\bar{y} = \frac{\sum A_i \cdot \bar{y}_i}{\sum A_i} = \frac{A_1 \cdot \frac{h_1}{2} + A_2 \cdot \left(\frac{h_2}{2} + h_1\right)}{A_1 + A_2} = \frac{(496 \cdot 2) \cdot \frac{2}{2} + (80 \cdot 120) \cdot \left(\frac{120}{2} + 2\right)}{(496 \cdot 2) + (80 \cdot 120)} = 56,28 \text{ mm}$$

Skaičiuojamas efektyvusis skerspjūvio inercijos momentas  $I$ :

$$I_1 = \frac{b_{1,t} \cdot h_1^3}{12} = \frac{496 \cdot 2^3}{12} = 330,91 \text{ mm}^4 \quad (2.1.3.1.3)$$

$$I_2 = \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} = \frac{80 \cdot 120^3}{12} = 115,2 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 \quad (2.1.3.1.4)$$

$$\begin{aligned} I_{eff} &= \sum I_i + A_i \cdot d_i = I_1 + A_1 \cdot \left(\bar{y} - \frac{h_1}{2}\right) + I_2 + A_2 \cdot \left(\bar{y} - \frac{h_2}{2} + h_1\right) \quad (2.1.3.1.5) \\ &= 330,91 + (496 \cdot 2) \cdot \left(56,28 - \frac{2}{2}\right) + 115,2 \cdot 10^5 + (80 \cdot 120) \\ &\quad \cdot \left(56,28 - \frac{120}{2} + 10\right) = 148,68 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Skaičiuojami maksimalūs įtempiai medyje  $\sigma_{w,t}$ :

$$\sigma_{w,t1} = \frac{M \cdot (\bar{y} - h_1)}{I_{eff}} = \frac{2,5 \cdot 10^6 \cdot (56,28 - 2)}{148,68 \cdot 10^5} = 9,13 \text{ MPa} \quad (2.1.3.1.6)$$

Tikrinama sąlyga pagal LST EN 1995-2:2005. Eurokodas 5:

$$\sigma_{w,t1} \leq f_{m,d}(C24) \quad (2.1.3.1.7)$$

$$9,13 \text{ MPa} \leq 18,46 \text{ MPa} \text{ (Sąlyga tenkinama)}$$

Skaičiuojami transformuoto 1 elemento (plieno juostos) įtempiai  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{M \cdot \bar{y}}{I_{eff}} = \frac{2,5 \cdot 10^6 \cdot 56,28}{148,68 \cdot 10^5} = 9,45 \text{ MPa} \quad (2.1.3.1.8)$$

Gautų įtempių pataisa į tikruosius plieno juostos įtempius  $\sigma_{st,t}$ :

$$\sigma_{st,t} = n \cdot \sigma = 19,09 \cdot 9,45 = 180,67 \text{ MPa} \quad (2.1.3.1.9)$$

Pagal LST EN 1993-1-1:2005. Eurokodas 3, skaičiuotinis plieno stipris tempiant, esant S235 (žr.5 lentelė) klasės plienui apskaičiuojamas:

$$f_{y,d} = \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{235}{1,25} = 188 \text{ MPa} \quad (2.1.3.1.10)$$

$\gamma_{M2}$  – tempiamosios irties laikomosios galios dalinis koeficientas 1,25

Tikrinama sąlyga pagal LST EN 1993-1-1:2005. Eurokodas:

$$\sigma_{st,t} \leq f_{y,d} \quad (2.1.3.1.11)$$

$$180,67 \text{ MPa} \leq 188 \text{ MPa} \text{ (Sąlyga tenkinama)}$$

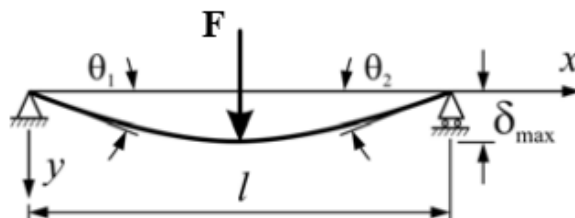
Tikrinama išsikelto uždavinio sąlyga, medžio sijoje įtempius sumažinti 30%:

$$\frac{\sigma_{w,t1}}{\sigma_{w,t(n)}} \approx 0,7 \quad (2.1.3.1.12)$$

$$\frac{9,13}{13,02} = 0,7 \text{ (Sąlyga tenkinama)}$$

### 2.1.3.2. Kompozitinės sijos įlinkio skaičiavimas, kai pilnas sukibimas

Skaičiavimai atliekami taikant išvestines ir pagrindinius matematikos principus.



**19 pav.** Elemento įlinkio skaičiavimo schema, veikiant koncentruotai jėgai

Pagal atliktus skaičiavimus 2.1.2. punkte žinome  $M(x)=F/2x$ , šią išraišką įsistatome:

$$EI \frac{d^2U}{dx^2} = M(x) \rightarrow EI \frac{d^2U}{dx^2} = \frac{F}{2}x \quad (2.1.3.2.1)$$

$$EI \frac{dU}{dx} = \frac{F}{4}x^2 + C1$$

$$EI U = \frac{F}{12}x^3 + C1x + C2$$

Užsiduodamos ribinės sąlygos:

$$\frac{dU}{dx} = 0, \text{ kai } x = \frac{l}{2} \quad (2.1.3.2.2)$$

$$U = 0, \text{ kai } x = 0$$

Įsistatome duomenis:

$$0 = \frac{F}{4} \frac{l^2}{2} + C1 \rightarrow C1 = -\frac{Fl^2}{16} \quad (2.1.3.2.3)$$

$$0 = \frac{F}{12} 0^3 + C1 \cdot 0 + C2 \rightarrow 0 + 0 + C2 \rightarrow C2 = 0$$

Skaičiuojamas įlinkis  $d_f$ , kai  $x=0$ :

$$\frac{dU}{dx} = \frac{F}{16EI} (4x^2 - l^2) \quad (2.1.3.2.4)$$

$$d_f(x=0) = \frac{dU}{dx} = -\frac{F}{16EI} l^2$$

Skaičiuojamas įlinkis  $d_{f,max}$ , kai  $x = \frac{l}{2}$ :

$$U = \frac{F}{48EI} (4x^3 - 3l^2x) \quad (2.1.3.2.5)$$

$$d_{f,max} \left( x = \frac{l}{2} \right) = -\frac{Fl^3}{48EI}$$

Perskaičiuojame kreivį  $\left(\frac{1}{r}\right)$  su  $M = \frac{F \cdot l}{4}$  dedamąja:

$$\left(\frac{1}{r}\right) = \frac{M}{E_2 \cdot I_{eff}} = \frac{F \cdot l}{4E_2 \cdot I_{eff}} \quad (2.1.3.2.6)$$

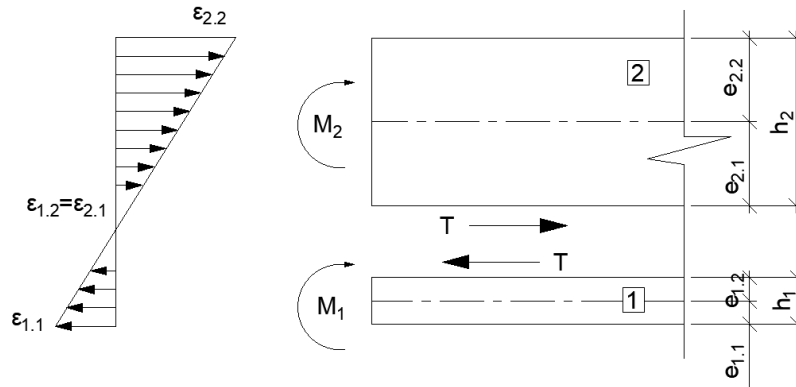
Išsireiškiame įlinkio  $d_{f,max}$  išraišką su kreivio dedamąja:

$$d_{f,max} = \left(\frac{1}{r}\right) \cdot \frac{l^2}{12} \quad (2.1.3.2.7)$$

Apskaičiuojamas kompozitinės sijos įlinkis:

$$d_{f1,max} = \left(\frac{1}{r}\right) \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{M}{E_2 \cdot I_{eff}} \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{2,5 \cdot 10^6}{11000 \cdot 148,68 \cdot 10^5} \cdot \frac{1000^2}{12} = 1,274 \text{ mm}$$

### 2.1.3.3. Kompozitinėje sijoje veikiančios šlyties jėgos skaičiavimas, kai tarp sluoksnių pilnas sukibimas



20 pav. Šlyties jėgos veikiančios tarp sukibusių sluoksnių skaičiavimo schema

Norint surasti tarp sluoksnių veikiančią šlyties jėgą, skerspjuvį aprašome penkių lygčių sistema, kurią sudaro penki nežinomieji. Sluoksnių sujungimo vietoje, kai tarp jų nėra praslydimo, deformacijos lygios, įvertinus tai įvedama lygybė.

Pagal (žr. 20 pav.) žinome:

$$e_{1,2} = \frac{h_1}{2}; e_{2,1} = \frac{h_2}{2} \quad (2.1.3.3.1)$$

Sudaroma penkių lygčių sistema:

$$(1) \quad \varepsilon_{1,2} = \frac{M_2}{E_2 \cdot W_2} - \frac{T}{E_2 \cdot A_2} - \frac{T \cdot e_{1,2}}{E_2 \cdot W_2} \quad (2.1.3.3.2)$$

$$(2) \quad \varepsilon_{2,1} = -\frac{M_1}{E_1 \cdot W_1} + \frac{T}{E_1 \cdot A_1} + \frac{T \cdot e_{2,1}}{E_1 \cdot W_1} \quad (2.1.3.3.3)$$

$$(3) \quad M = M_1 + M_2 \quad (2.1.3.3.4)$$

$$(4) \quad \left(\frac{1}{r}\right) = \frac{M}{E_2 \cdot I_{eff}} = \left(\frac{1}{r}\right)_1 = \frac{M_1 - T \cdot e_{1,2}}{E_1 \cdot I_1} = \left(\frac{1}{r}\right)_2 = \frac{M_2 - T \cdot e_{2,1}}{E_2 \cdot I_2} \quad (2.1.3.3.5)$$

$$(5) \quad \varepsilon_{1,2} = \varepsilon_{2,1} \quad (2.1.3.3.6)$$

Sprendžiama lygčių sistema (1) lygtį prilyginant (2) lygčiai:

$$\frac{M_2}{E_2 \cdot W_2} - \frac{T}{E_2 \cdot A_2} - \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_2 \cdot W_2} = -\frac{M_1}{E_1 \cdot W_1} + \frac{T}{E_1 \cdot A_1} + \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_1 \cdot W_1} \quad (2.1.3.3.7)$$

$$\frac{M_2}{E_2 \cdot W_2} - \frac{T}{E_2 \cdot A_2} - \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_2 \cdot W_2} + \frac{M_1}{E_1 \cdot W_1} - \frac{T}{E_1 \cdot A_1} - \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_1 \cdot W_1} = 0$$

Į lygtį statome  $M_1$  išraišką:

$$M_1 = M - M_2 \quad (2.1.3.3.8)$$

$$\frac{M_2}{E_2 \cdot W_2} - \frac{T}{E_2 \cdot A_2} - \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_2 \cdot W_2} + \frac{M - M_2}{E_1 \cdot W_1} - \frac{T}{E_1 \cdot A_1} - \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_1 \cdot W_1} = 0 \quad (2.1.3.3.9)$$

$$\frac{M_2}{E_2 \cdot W_2} - \frac{T}{E_2 \cdot A_2} - \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_2 \cdot W_2} + \frac{M}{E_1 \cdot W_1} - \frac{M_2}{E_1 \cdot W_1} - \frac{T}{E_1 \cdot A_1} - \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_1 \cdot W_1} = 0$$

$$\frac{M_2}{E_2 \cdot W_2} - \frac{M_2}{E_1 \cdot W_1} + \frac{M}{E_1 \cdot W_1} - T \cdot \left( \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} + \frac{e_{2.1}}{E_1 \cdot W_1} + \frac{e_{1.2}}{E_2 \cdot W_2} \right) = 0$$

Įvedamas papildomas žymėjimas  $k_t$  lygties supaprastinimui:

$$k_t = \left( \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} + \frac{e_{2.1}}{E_1 \cdot W_1} + \frac{e_{1.2}}{E_2 \cdot W_2} \right) \quad (2.1.3.3.10)$$

$$\frac{M_2}{E_2 \cdot W_2} - \frac{M_2}{E_1 \cdot W_1} + \frac{M}{E_1 \cdot W_1} - T \cdot k_t = 0 \quad (2.1.3.3.11)$$

Iš (4) lygties išsireiškiamas  $T$  dydis suprastinant:

$$\frac{M}{I_{eff}} = \frac{M_2 - T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot I_2} \quad (2.1.3.3.12)$$

$$\frac{M \cdot I_2}{I_{eff}} = M_2 - T \cdot e_{2.1}$$

$$T \cdot e_{2.1} = M_2 - \frac{M \cdot I_2}{I_{eff}}$$

$$T = \frac{M_2}{e_{2.1}} - \frac{M \cdot I_2}{I_{eff} \cdot e_{2.1}}; \quad (2.1.3.3.13)$$

$$\frac{M_2}{E_2 \cdot W_2} + \frac{M}{E_1 \cdot W_1} - \frac{M_2}{E_1 \cdot W_1} - \left( \frac{M_2}{e_{2.1}} - \frac{M \cdot I_2}{I_{eff} \cdot e_{2.1}} \right) \cdot k_t = 0$$

Iš gautos lygties išsireiškiamas lenkimo momentas  $M_2$ :

$$\frac{M_2}{E_2 \cdot W_2} + \frac{M}{E_1 \cdot W_1} - \frac{M_2}{E_1 \cdot W_1} - \frac{M_2 \cdot k_t}{e_{2.1}} + \frac{M \cdot I_2 \cdot k_t}{I_{eff} \cdot e_{2.1}} = 0 \quad (2.1.3.3.14)$$

$$\frac{M_2}{E_2 \cdot W_2} - \frac{M_2}{E_1 \cdot W_1} - \frac{M_2 \cdot k_t}{e_{2.1}} = -\frac{M}{E_1 \cdot W_1} - \frac{M \cdot I_2 \cdot k_t}{I_{eff} \cdot e_{2.1}}$$

$$M_2 \cdot \left( \frac{1}{E_2 \cdot W_2} - \frac{1}{E_1 \cdot W_1} - \frac{k_t}{e_{2.1}} \right) = -M \cdot \left( \frac{1}{E_1 \cdot W_1} + \frac{I_2 \cdot k_t}{I_{eff} \cdot e_{2.1}} \right)$$

$$M_2 = \frac{M \cdot \left( \frac{1}{E_1 \cdot W_1} - \frac{I_2 \cdot k_t}{I_{eff} \cdot e_{2.1}} \right)}{\left( \frac{k_t}{e_{2.1}} - \frac{1}{E_2 \cdot W_2} + \frac{1}{E_1 \cdot W_1} \right)} \quad (2.1.3.3.15)$$

Įstatome į lygtis turimus duomenis, ieškant  $k_t$ ,  $M_2$  ir  $T$  reikšmių:

$$W_1 = \frac{b_1 \cdot h_1^2}{6} = \frac{26 \cdot 2^2}{6} = 17,333 \text{ mm}^3 \quad (2.1.3.3.16)$$

$$W_2 = \frac{b_2 \cdot h_2^2}{6} = \frac{80 \cdot 120^2}{6} = 192000 \text{ mm}^3 \quad (2.1.3.3.17)$$

$$k_t = \left( \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} + \frac{e_{2.1}}{E_1 \cdot W_1} + \frac{e_{1.2}}{E_2 \cdot W_2} \right) \quad (2.1.3.3.18)$$

$$= \left( \frac{1}{11000 \cdot 9600} + \frac{1}{210000 \cdot 52} + \frac{60}{210000 \cdot 17,333} + \frac{1}{11000 \cdot 192000} \right)$$

$$= 1,659 \cdot 10^{-5}$$

$$M_2 = \frac{M \cdot \left( \frac{1}{E_1 \cdot W_1} - \frac{I_2 \cdot k_t}{I_{eff} \cdot e_{2.1}} \right)}{\left( \frac{k_t}{e_{2.1}} - \frac{1}{E_2 \cdot W_2} + \frac{1}{E_1 \cdot W_1} \right)} = \frac{2,5 \cdot 10^6 \cdot \left( \frac{1}{210000 \cdot 17,333} - \frac{115,2 \cdot 10^5 \cdot 1,659 \cdot 10^{-5}}{148,68 \cdot 10^5 \cdot 60} \right)}{\left( \frac{1,659 \cdot 10^{-5}}{60} - \frac{1}{11000 \cdot 192000} + \frac{1}{210000 \cdot 17,333} \right)}$$

$$= 0,275 \text{ kNm}$$

$$T = \frac{M_2}{e_{2.1}} - \frac{M \cdot I_2}{I_{eff} \cdot e_{2.1}} = \frac{274591}{60} - \frac{2,5 \cdot 10^6 \cdot 115,2 \cdot 10^5}{148,68 \cdot 10^5 \cdot 60} = -27,707 \text{ kN} \quad (2.1.3.3.19)$$

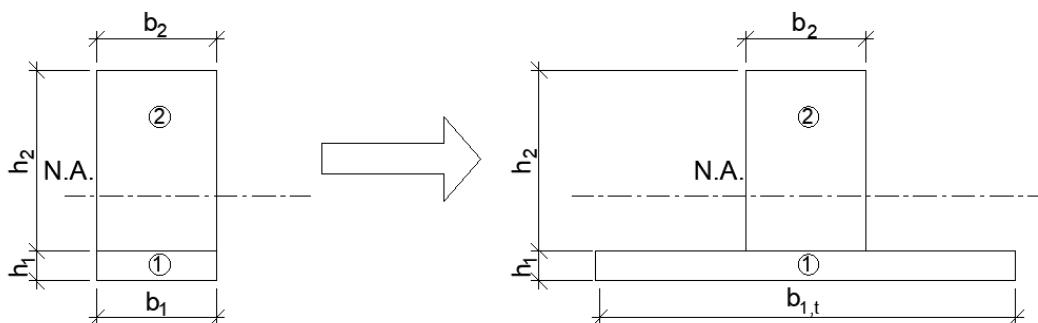
#### 2.1.3.4. Išvados

- Siekiant medžio lenkiamame elemente (80x120mm) 30% sumažinti tempimo įtempius, apatinė elemento dalis turi būti armuojama 26x2(h) mm matmenų plienine juosta;
- Gauname, jog medžio apatinis sluoksnis patiria  $\sigma_{w,t1} = 9,13 \text{ MPa}$  įtempius; apatinis plieno juostos sluoksnis patiria  $\sigma_{st,t} = 180,67 \text{ MPa}$  įtempius; tarp suklijuotų sluoksnių veikia šlyties  $T = 27,707 \text{ kN}$  jėga.
- Kompozitinės sijos įlinkis  $d_{f1,max} = 1,274 \text{ mm}$

#### 2.1.4. Papildomu medžio sluoksniu armuotas lenkiamas skerspjūvis (pilnas sukibimas)

##### 2.1.4.1. Elementuose veikiančių įtempių $\sigma_{w,t1(2)}$ ir $\sigma_{w,t2}$ radimas

Skaičiavimai atliekami taikant „Transformed section“ metodiką, pateiktą knygoje „Design of Structural Timber“ [42]. Skaičiuojant sluoksniuotą konstrukciją, pasirenkamas vienas iš elementų pagal kurį transformuojamas skerspjūvis. Pasirinkta kompozitinę siją skaičiuoti, atsižvelgiant pagal 2 elementą (žr. 21 pav.).



21 pav. Skerspjūvio transformavimas pagal 2 elementą

Apskaičiuojamas elementų tamprumo modulio santykis  $n$ , pagal kurį transformuojamas skerspjūvis:

$$n = \frac{E_{w2}}{E_w} = \frac{11}{11} = 1,0 \quad (2.1.4.1.1)$$

$$b_{1,t} = n \cdot b_1 = 1,0 \cdot 39 = 39 \text{ mm} \quad (2.1.4.1.2)$$

Skaičiuojama transformuoto kompozito neutralios ašies padėtis  $\bar{y}$ :

$$\bar{y} = \frac{\sum A_i \cdot \bar{y}_i}{\sum A_i} = \frac{A_1 \cdot \frac{h_1}{2} + A_2 \cdot \left(\frac{h_2}{2} + h_1\right)}{A_1 + A_2} = \frac{(39 \cdot 20) \cdot \frac{20}{2} + (80 \cdot 120) \cdot \left(\frac{120}{2} + 20\right)}{(39 \cdot 20) + (80 \cdot 120)} = 74,74 \text{ mm}$$

Skaičiuojamas efektyvusis skerspjūvio inercijos momentas  $I$ :

$$I_1 = \frac{b_{1,t} \cdot h_1^3}{12} = \frac{39 \cdot 20^3}{12} = 26000 \text{ mm}^4 \quad (2.1.4.1.3)$$

$$I_2 = \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} = \frac{80 \cdot 120^3}{12} = 115,2 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 \quad (2.1.4.1.4)$$

$$\begin{aligned} I_{eff} &= \sum I_i + A_i \cdot d_i = I_1 + A_1 \cdot \left(\bar{y} - \frac{h_1}{2}\right) + I_2 + A_2 \cdot \left(\bar{y} - \frac{h_2}{2} + h_1\right) \\ &= 26000 + (39 \cdot 20) \cdot \left(74,74 - \frac{20}{2}\right) + 115,2 \cdot 10^5 + (80 \cdot 120) \\ &\quad \cdot \left(74,74 - \frac{120}{2} + 20\right) = 150,808 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 \end{aligned} \quad (2.1.4.1.5)$$

Skaičiuojami maksimalūs įtempiai medyje  $\sigma_{w,t}$ :

$$\sigma_{w,t1(2)} = \frac{M \cdot (\bar{y} - h_1)}{I_{eff}} = \frac{2,5 \cdot 10^6 \cdot (74,74 - 20)}{150,808 \cdot 10^5} = 9,07 \text{ MPa} \quad (2.1.4.1.6)$$

Tikrinama sąlyga pagal LST EN 1995-2:2005. Eurokodas 5:

$$\sigma_{w,t1(2)} \leq f_{m,d}(C24) \quad (2.1.4.1.7)$$

$9,07 \text{ MPa} \leq 18,46 \text{ MPa}$  (Sąlyga tenkinama)

Skaičiuojami transformuoto 1 elemento (papildomo medžio sluoksnio) įtempiai  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{M \cdot \bar{y}}{I_{eff}} = \frac{2,5 \cdot 10^6 \cdot 74,74}{150,808 \cdot 10^5} = 12,39 \text{ MPa} \quad (2.1.4.1.8)$$

Gautų įtempių pataisa į tikruosius papildomo medžio sluoksnio įtempius  $\sigma_{w,t2}$ :

$$\sigma_{w,t2} = n \cdot \sigma = 1,0 \cdot 12,39 = 12,39 \text{ MPa} \quad (2.1.4.1.9)$$

Tikrinama sąlyga pagal LST EN 1995-2:2005. Eurokodas 5, leistini įtempiai imami iš (žr. 5 lentelė):

$$\sigma_{w,t1} \leq f_{t,d} \quad (2.1.4.1.10)$$

$12,39 \text{ MPa} \leq 14,5 \text{ MPa}$  (Sąlyga tenkinama)

Tikrinama išsikelto uždavinio sąlyga, medžio sijoje įtempius sumažinti 30%:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{w,t1(2)}}{\sigma_{w,t(n)}} &\approx 0,7 \\ \frac{9,07}{13,02} &= 0,697 \text{ (Sąlyga tenkinama)} \end{aligned} \quad (2.1.4.1.11)$$

### 2.1.4.2. Kompozitinės sijos įlinkio skaičiavimas, kai pilnas sukibimas

Sijos įlinkis skaičiuojamas pagal 2.1.3.2. skyriuje išreikštą formulę.

Apskaičiuojamas kompozitinės sijos įlinkis:

$$d_{f2,max} = \left(\frac{1}{r}\right) \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{M}{E_2 \cdot I_{eff}} \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{2,5 \cdot 10^6}{11000 \cdot 150,808 \cdot 10^5} \cdot \frac{1000^2}{12} = 1,256 \text{ mm} \quad (2.1.4.2.1)$$

### 2.1.4.3. Kompozitinėje sijoje veikiančios šlyties jėgos skaičiavimas, kai tarp sluoksnių pilnas sukibimas

Šlyties jėga apskaičiuojama pagal 2.1.3.3. skyriuje išreikštas formules.

$$e_{1.2} = \frac{h_1}{2} = \frac{20}{2} = 10 \text{ mm} \quad (2.1.4.3.1)$$

$$e_{2.1} = \frac{h_2}{2} = \frac{120}{2} = 60 \text{ mm} \quad (2.1.4.3.2)$$

$$W_1 = \frac{b_1 \cdot h_1^2}{6} = \frac{39 \cdot 20^2}{6} = 2600 \text{ mm}^3 \quad (2.1.4.3.3)$$

$$W_2 = \frac{b_2 \cdot h_2^2}{6} = \frac{80 \cdot 120^2}{6} = 192000 \text{ mm}^3 \quad (2.1.4.3.4)$$

$$k_t = \left( \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} + \frac{e_{2.1}}{E_1 \cdot W_1} + \frac{e_{1.2}}{E_2 \cdot W_2} \right) \quad (2.1.4.3.5)$$
$$= \left( \frac{1}{11000 \cdot 9600} + \frac{1}{11000 \cdot 780} + \frac{60}{11000 \cdot 2600} + \frac{10}{11000 \cdot 192000} \right) = 2,23 \cdot 10^{-6}$$

$$M_2 = \frac{M \cdot \left( \frac{1}{E_1 \cdot W_1} - \frac{I_2 \cdot k_t}{I_{eff} \cdot e_{2.1}} \right)}{\left( \frac{k_t}{e_{2.1}} - \frac{1}{E_2 \cdot W_2} + \frac{1}{E_1 \cdot W_1} \right)} = \frac{2,5 \cdot 10^6 \cdot \left( \frac{1}{11000 \cdot 2600} - \frac{115,2 \cdot 10^5 \cdot 2,23 \cdot 10^{-6}}{150,808 \cdot 10^5 \cdot 60} \right)}{\left( \frac{2,23 \cdot 10^{-6}}{60} - \frac{1}{11000 \cdot 192000} + \frac{1}{11000 \cdot 2600} \right)}$$
$$= 0,229 \text{ kNm}$$

$$T = \frac{M_2}{e_{2.1}} - \frac{M \cdot I_2}{I_{eff} \cdot e_{2.1}} = \frac{229352}{60} - \frac{2,5 \cdot 10^6 \cdot 115,2 \cdot 10^5}{150,808 \cdot 10^5 \cdot 60} = -28,006 \text{ kN} \quad (2.1.4.3.6)$$

### 2.1.4.4. Išvados

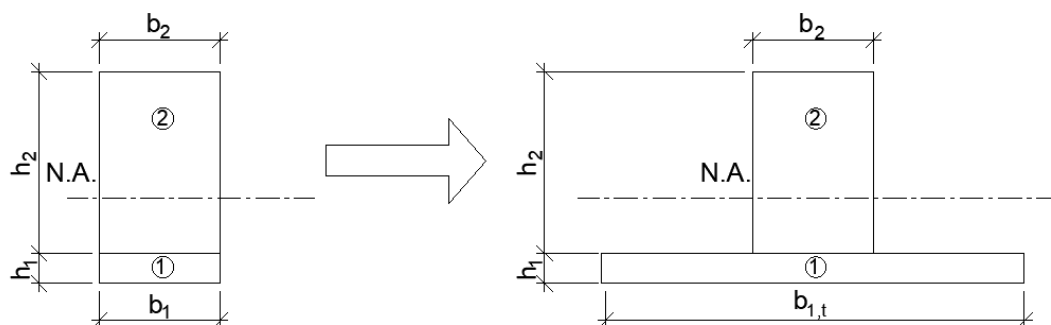
- Siekiant medžio lenkiamame elemente (80x120mm) 30% sumažinti tempimo įtempius, apatinė elemento dalis turi būti armuojama 39x20(h) mm matmenų medienos sluoksniu;
- Gauname, jog medžio apatinis sluoksnis patiria  $\sigma_{w,t1(2)} = 9,07 \text{ MPa}$  įtempius; apatinis medžio sluoksnis patiria  $\sigma_{w,t2} = 12,39 \text{ MPa}$  įtempius; tarp suklijuotų sluoksnių veikia šlyties  $T = 28,006 \text{ kN}$  jėga.
- Kompozitinės sijos įlinkis  $d_{f2,max} = 1,256 \text{ mm}$



## 2.1.5. Anglies pluoštu armuotas lenkiamas skerspjūvis (pilnas sukibimas)

### 2.1.5.1. Elementuose veikiančių įtempių $\sigma_{w,t1(3)}$ ir $\sigma_{angl.pl.t}$ radimas

Skaičiavimai atliekami taikant „Transformed section“ metodiką, pateiktą knygoje „Design of Structural Timber“ [42]. Skaičiuojant sluoksniuotą konstrukciją, pasirenkamas vienas iš elementų pagal kurį transformuojamas skerspjūvis. Pasirinkta kompozitinę siją skaičiuoti, atsižvelgiant pagal 2 elementą (žr. 22 pav.).



22 pav. Skerspjūvio transformavimas pagal 2 elementą

Apskaičiuojamas elementų tamprumo modulio santykis  $n$ , pagal kurį transformuojamas skerspjūvis:

$$n = \frac{E_{angl.pl.}}{E_w} = \frac{216}{11} = 19,64 \quad (2.1.5.1.1)$$

$$b_{1,t} = n \cdot b_1 = 19,64 \cdot 65 = 1276 \text{ mm} \quad (2.1.5.1.2)$$

Skaičiuojama transformuoto kompozito neutralios ašies padėtis  $\bar{y}$ :

$$\bar{y} = \frac{\sum A_i \cdot \bar{y}_i}{\sum A_i} = \frac{A_1 \cdot \frac{h_1}{2} + A_2 \cdot \left(\frac{h_2}{2} + h_1\right)}{A_1 + A_2} = \frac{(65 \cdot 0,8) \cdot \frac{0,8}{2} + (80 \cdot 120) \cdot \left(\frac{120}{2} + 0,8\right)}{(65 \cdot 0,8) + (80 \cdot 120)} = 54,99 \text{ mm}$$

Skaičiuojamas efektyvusis skerspjūvio inercijos momentas  $I$ :

$$I_1 = \frac{b_{1,t} \cdot h_1^3}{12} = \frac{1276 \cdot 0,8^3}{12} = 54,46 \text{ mm}^4 \quad (2.1.5.1.3)$$

$$I_2 = \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} = \frac{80 \cdot 120^3}{12} = 115,2 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 \quad (2.1.5.1.4)$$

$$I_{eff} = \sum I_i + A_i \cdot d_i = I_1 + A_1 \cdot \left(\bar{y} - \frac{h_1}{2}\right) + I_2 + A_2 \cdot \left(\bar{y} - \frac{h_2}{2} + h_1\right) \quad (2.1.5.1.5)$$

$$= 54,46 + (65 \cdot 0,8) \cdot \left(54,99 - \frac{0,8}{2}\right) + 115,2 \cdot 10^5 + (80 \cdot 120) \cdot \left(54,99 - \frac{120}{2} + 0,8\right) = 148,870 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

Skaičiuojami maksimalūs įtempiai medyje  $\sigma_{w,t}$ :

$$\sigma_{w,t1(3)} = \frac{M \cdot (\bar{y} - h_1)}{I_{eff}} = \frac{2,5 \cdot 10^6 \cdot (54,46 - 0,8)}{148,870 \cdot 10^5} = 9,10 \text{ MPa} \quad (2.1.5.1.6)$$

Tikrinama sąlyga pagal LST EN 1995-2:2005. Eurokodas 5:

$$\sigma_{w,t1(3)} \leq f_{m,d}(C24) \quad (2.1.5.1.7)$$

$$9,10 \text{ MPa} \leq 18,46 \text{ MPa} \text{ (Sąlyga tenkinama)}$$

Skaičiuojami transformuoto 1 elemento (anglies pluošto) įtempiai  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{M \cdot \bar{y}}{I_{eff}} = \frac{2,5 \cdot 10^6 \cdot 54,46}{148,870 \cdot 10^5} = 9,24 \text{ MPa} \quad (2.1.5.1.8)$$

Gautų įtempių pataisa į tikruosius papildomo medžio sluoksnio įtempius  $\sigma_{angl.pl.t}$ :

$$\sigma_{angl.pl.t} = n \cdot \sigma = 19,64 \cdot 9,24 = 181,47 \text{ MPa} \quad (2.1.5.1.9)$$

Skaičiuotinis anglies pluošto stipris tempiant, (žr.5 lentelė) apskaičiuojamas:

$$f_{angl.pl.,d} = \frac{f_{angl.pl.}}{\gamma_{M2}} = \frac{3267}{1,3} = 2513 \text{ MPa} \quad (2.1.5.1.10)$$

$\gamma_{M2}$  – laikomosios galios dalinis koeficientas 1,3

Tikrinama sąlyga, leistini įtempiai imami iš (žr. 5 lentelė):

$$\sigma_{angl.pl.t} \leq f_{angl.pl.,d} \quad (2.1.5.1.11)$$

$$181,47 \text{ MPa} \leq 2513 \text{ MPa} \text{ (Sąlyga tenkinama)}$$

Tikrinama išsikelto uždavinio sąlyga, medžio sijoje įtempius sumažinti 30%:

$$\frac{\sigma_{w,t1(3)}}{\sigma_{w,t(n)}} \approx 0,7 \quad (2.1.5.1.12)$$

$$\frac{9,10}{13,02} = 0,699 \text{ (Sąlyga tenkinama)}$$

### 2.1.5.2. Kompozitinės sijos įlinkio skaičiavimas, kai pilnas sukibimas

Sijos įlinkis skaičiuojamas pagal 2.1.3.2. skyriuje išreikštą formulę.

Apskaičiuojamas kompozitinės sijos įlinkis:

$$d_{f3,max} = \left(\frac{1}{r}\right) \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{M}{E_2 \cdot I_{eff}} \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{2,5 \cdot 10^6}{11000 \cdot 148,870 \cdot 10^5} \cdot \frac{1000^2}{12} = 1,272 \text{ mm} \quad (2.1.5.2.1)$$

### 2.1.5.3. Kompozitinėje sijoje veikiančios šlyties jėgos skaičiavimas, kai tarp sluoksnių pilnas sukibimas

Šlyties jėga apskaičiuojama pagal 2.1.3.3. skyriuje išreikštas formules.

$$e_{1.2} = \frac{h_1}{2} = \frac{0,8}{2} = 0,4 \text{ mm} \quad (2.1.5.3.1)$$

$$e_{2.1} = \frac{h_2}{2} = \frac{120}{2} = 60 \text{ mm} \quad (2.1.5.3.2)$$

$$W_1 = \frac{b_1 \cdot h_1^2}{6} = \frac{65 \cdot 0,8^2}{6} = 6,933 \text{ mm}^3 \quad (2.1.5.3.3)$$

$$W_2 = \frac{b_2 \cdot h_2^2}{6} = \frac{80 \cdot 120^2}{6} = 192000 \text{ mm}^3 \quad (2.1.5.3.4)$$

$$k_t = \left( \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_{angl.pl.} \cdot A_1} + \frac{e_{2.1}}{E_{angl.pl.} \cdot W_1} + \frac{e_{1.2}}{E_2 \cdot W_2} \right) \quad (2.1.5.3.5)$$

$$= \left( \frac{1}{11000 \cdot 9600} + \frac{1}{216000 \cdot 52} + \frac{60}{216000 \cdot 6,933} + \frac{0,4}{11000 \cdot 192000} \right)$$

$$= 4,016 \cdot 10^{-5}$$

$$M_2 = \frac{M \cdot \left( \frac{1}{E_{angl.pl.} \cdot W_1} - \frac{I_2 \cdot k_t}{I_{eff} \cdot e_{2.1}} \right)}{\left( \frac{k_t}{e_{2.1}} - \frac{1}{E_2 \cdot W_2} + \frac{1}{E_{angl.pl.} \cdot W_1} \right)} = \frac{2,5 \cdot 10^6 \cdot \left( \frac{1}{216000 \cdot 6,933} - \frac{115,2 \cdot 10^5 \cdot 4,016 \cdot 10^{-5}}{148,870 \cdot 10^5 \cdot 60} \right)}{\left( \frac{4,016 \cdot 10^{-5}}{60} - \frac{1}{11000 \cdot 192000} + \frac{1}{216000 \cdot 6,933} \right)}$$

$$= 0,280 \text{ kNm}$$

$$T = \frac{M_2}{e_{2.1}} - \frac{M \cdot I_2}{I_{eff} \cdot e_{2.1}} = \frac{280215}{60} - \frac{2,5 \cdot 10^6 \cdot 115,2 \cdot 10^5}{148,870 \cdot 10^5 \cdot 60} = -27,57 \text{ kN} \quad (2.1.5.3.6)$$

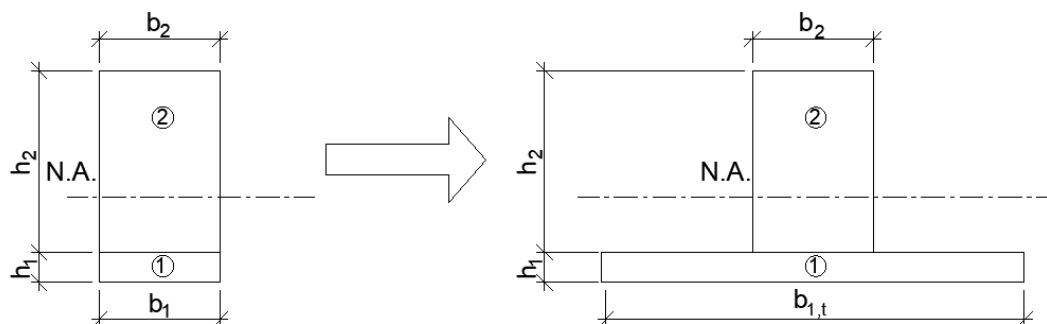
#### 2.1.5.4. Išvados

- Siekiant medžio lenkiamame elemente (80x120mm) 30% sumažinti tempimo įtempimus, apatinė elemento dalis turi būti armuojama 65x0,8(h) mm matmenų anglies pluošto sluoksniu;
- Gauname, jog medžio apatinis sluoksnis patiria  $\sigma_{w,t1(3)} = 9,10 \text{ MPa}$  įtempimus; apatinis anglies pluošto sluoksnis patiria  $\sigma_{angl.pl.t} = 181,47 \text{ MPa}$  įtempimus; tarp suklijuotų sluoksnių veikia šlyties  $T = 27,57 \text{ kN}$  jėga.
- Kompozitinės sijos įlinkis  $d_{f3,max} = 1,272 \text{ mm}$

#### 2.1.6. Bazalto pluoštu armuotas lenkiamas skerspjūvis (pilnas sukibimas)

##### 2.1.6.1. Elementuose veikiančių įtempių $\sigma_{w,t1(4)}$ ir $\sigma_{baz.pl.t}$ radimas

Skaičiavimai atliekami taikant „Transformed section“ metodiką, pateiktą knygoje „Design of Structural Timber“ [42]. Skaičiuojant sluoksniuotą konstrukciją, pasirenkamas vienas iš elementų pagal kurį transformuojamas skerspjūvis. Pasirinkta kompozitinę siją skaičiuoti, atsižvelgiant pagal 2 elementą (žr. 23 pav.).



23 pav. Skerspjūvio transformavimas pagal 2 elementą

Apskaičiuojamas elementų tamprumo modulio santykis  $n$ , pagal kurį transformuojamas skerspjūvis:

$$n = \frac{E_{baz.pl.}}{E_w} = \frac{45}{11} = 4,09 \quad (2.1.6.1.1)$$

$$b_{1,t} = n \cdot b_1 = 4,09 \cdot 65 = 1276 \text{ mm} \quad (2.1.6.1.2)$$

Skaičiuojama transformuoto kompozito neutralios ašies padėtis  $\bar{y}$ :

$$\bar{y} = \frac{\sum A_i \cdot \bar{y}_i}{\sum A_i} = \frac{A_1 \cdot \frac{h_1}{2} + A_2 \cdot \left(\frac{h_2}{2} + h_1\right)}{A_1 + A_2} = \frac{(80 \cdot 3) \cdot \frac{3}{2} + (80 \cdot 120) \cdot \left(\frac{120}{2} + 3\right)}{(80 \cdot 3) + (80 \cdot 120)} = 57,29 \text{ mm}$$

Skaičiuojamas efektyvusis skerspjūvio inercijos momentas  $I$ :

$$I_1 = \frac{b_{1,t} \cdot h_1^3}{12} = \frac{327 \cdot 3,0^3}{12} = 736,36 \text{ mm}^4 \quad (2.1.6.1.3)$$

$$I_2 = \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} = \frac{80 \cdot 120^3}{12} = 115,2 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 \quad (2.1.6.1.4)$$

$$\begin{aligned} I_{eff} &= \sum I_i + A_i \cdot d_i = I_1 + A_1 \cdot \left(\bar{y} - \frac{h_1}{2}\right) + I_2 + A_2 \cdot \left(\bar{y} - \frac{h_2}{2} + h_1\right) \\ &= 736,36 + (80 \cdot 3) \cdot \left(57,29 - \frac{3}{2}\right) + 115,2 \cdot 10^5 + (80 \cdot 120) \\ &\quad \cdot \left(57,29 - \frac{120}{2} + 3\right) = 148,90 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 \end{aligned} \quad (2.1.6.1.5)$$

Skaičiuojami maksimalūs įtempiai medyje  $\sigma_{w,t}$ :

$$\sigma_{w,t1(4)} = \frac{M \cdot (\bar{y} - h_1)}{I_{eff}} = \frac{2,5 \cdot 10^6 \cdot (57,29 - 3)}{148,90 \cdot 10^5} = 9,12 \text{ MPa} \quad (2.1.6.1.6)$$

Tikrinama sąlyga pagal LST EN 1995-2:2005. Eurokodas 5:

$$\sigma_{w,t1(4)} \leq f_{m,d}(C24) \quad (2.1.6.1.7)$$

$$9,12 \text{ MPa} \leq 18,46 \text{ MPa} \text{ (Sąlyga tenkinama)}$$

Skaičiuojami transformuoto 1 elemento (bazalto pluošto) įtempiai  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{M \cdot \bar{y}}{I_{eff}} = \frac{2,5 \cdot 10^6 \cdot 57,29}{148,90 \cdot 10^5} = 9,62 \text{ MPa} \quad (2.1.6.1.8)$$

Gautų įtempių pataisa į tikruosius papildomo medžio sluoksnio įtempius  $\sigma_{baz.pl.t}$ :

$$\sigma_{baz.pl.t} = n \cdot \sigma = 4,09 \cdot 9,62 = 39,35 \text{ MPa} \quad (2.1.6.1.9)$$

Skaičiuotinis anglies pluošto stipris tempiant, (žr.5 lentelė) apskaičiuojamas:

$$f_{baz.pl,d} = \frac{f_{baz.pl.}}{\gamma_{M2}} = \frac{1239}{1,3} = 953 \text{ MPa} \quad (2.1.6.1.10)$$

$\gamma_{M2}$  – laikomosios galios dalinis koeficientas 1,3

Tikrinama sąlyga, leistini įtempiai imami iš (žr. 5 lentelė):

$$\sigma_{baz.pl.t} \leq f_{baz.pl,d} \quad (2.1.6.1.11)$$

$$39,35 \text{ MPa} \leq 953 \text{ MPa} \text{ (Sąlyga tenkinama)}$$

Tikrinama išsikelto uždavinio sąlyga, medžio sijoje įtempius sumažinti 30%:

$$\frac{\sigma_{w,t1(4)}}{\sigma_{w,t(n)}} \approx 0,7 \quad (2.1.6.1.12)$$

$$\frac{9,12}{13,02} = 0,700 \text{ (Sąlyga tenkinama)}$$

### 2.1.6.2. Kompozitinės sijos įlinkio skaičiavimas, kai pilnas sukibimas

Sijos įlinkis skaičiuojamas pagal 2.1.3.2. skyriuje išreikštą formulę.

Apskaičiuojamas kompozitinės sijos įlinkis:

$$d_{f4,max} = \left(\frac{1}{r}\right) \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{M}{E_2 \cdot I_{eff}} \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{2,5 \cdot 10^6}{11000 \cdot 148,90 \cdot 10^5} \cdot \frac{1000^2}{12} = 1,272 \text{ mm} \quad (2.1.6.2.1)$$

### 2.1.6.3. Kompozitinėje sijoje veikiančios šlyties jėgos skaičiavimas, kai tarp sluoksnių pilnas sukibimas

Šlyties jėga apskaičiuojama pagal 2.1.3.3. skyriuje išreikštas formules.

$$e_{1.2} = \frac{h_1}{2} = \frac{3}{2} = 1,5 \text{ mm} \quad (2.1.6.3.1)$$

$$e_{2.1} = \frac{h_2}{2} = \frac{120}{2} = 60 \text{ mm} \quad (2.1.6.3.2)$$

$$W_1 = \frac{b_1 \cdot h_1^2}{6} = \frac{80 \cdot 3^2}{6} = 120 \text{ mm}^3 \quad (2.1.6.3.4)$$

$$W_2 = \frac{b_2 \cdot h_2^2}{6} = \frac{80 \cdot 120^2}{6} = 192000 \text{ mm}^3 \quad (2.1.6.3.5)$$

$$k_t = \left( \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_{baz.pl.} \cdot A_1} + \frac{e_{2.1}}{E_{baz.pl.} \cdot W_1} + \frac{e_{1.2}}{E_2 \cdot W_2} \right) \quad (2.1.6.3.6)$$

$$= \left( \frac{1}{11000 \cdot 9600} + \frac{1}{45000 \cdot 240} + \frac{60}{45000 \cdot 120} + \frac{1,5}{11000 \cdot 192000} \right) = 1,121 \cdot 10^{-5}$$

$$M_2 = \frac{M \cdot \left( \frac{1}{E_{baz.pl.} \cdot W_1} - \frac{I_2 \cdot k_t}{I_{eff} \cdot e_{2.1}} \right)}{\left( \frac{k_t}{e_{2.1}} - \frac{1}{E_2 \cdot W_2} + \frac{1}{E_{baz.pl.} \cdot W_1} \right)} = \frac{2,5 \cdot 10^6 \cdot \left( \frac{1}{45000 \cdot 120} - \frac{115,2 \cdot 10^5 \cdot 1,121 \cdot 10^{-5}}{148,90 \cdot 10^5 \cdot 60} \right)}{\left( \frac{1,121 \cdot 10^{-5}}{60} - \frac{1}{11000 \cdot 192000} + \frac{1}{45000 \cdot 120} \right)}$$

$$= 0,273 \text{ kNm}$$

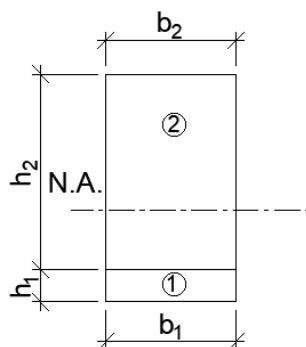
$$T = \frac{M_2}{e_{2.1}} - \frac{M \cdot I_2}{I_{eff} \cdot e_{2.1}} = \frac{273433}{60} - \frac{2,5 \cdot 10^6 \cdot 115,2 \cdot 10^5}{148,90 \cdot 10^5 \cdot 60} = -27,68 \text{ kN} \quad (2.1.6.3.7)$$

### 2.1.6.4. Išvados

- Siekiant medžio lenkiamame elemente (80x120mm) 30% sumažinti tempimo įtempius, apatinė elemento dalis turi būti armuojama 80x3,0(h) mm matmenų bazalto pluošto sluoksniu;
- Gauname, jog medžio apatinis sluoksnis patiria  $\sigma_{w,t1(4)} = 9,12 \text{ MPa}$  įtempius; apatinis anglies pluošto sluoksnis patiria  $\sigma_{baz.pl.t} = 39,35 \text{ MPa}$  įtempius; tarp suklijuotų sluoksnių veikia šlyties  $T = 27,68 \text{ kN}$  jėga.
- Kompozitinės sijos įlinkis  $d_{f4,max} = 1,272 \text{ mm}$

## 2.1.7. Plienine juosta armuotas lenkiamas skerspjūvis (nėra sukibimo)

### 2.1.7.1. Elementuose veikiančių įtempių $\sigma_{w,t(5)}$ ir $\sigma_{st,t2}$ radimas



24 pav. Stiprinamo skerspjūvio vaizdas

Tarp sluoksnių nesant sukibimui, elementai dirba atskirai. Linkstant elementams jų kreiviai yra lygūs, o juos veikiantis lenkimo momentas pasiskirsto abiejuose elementuose. Iš šios priklausomybės rašoma dviejų lygčių sistema:

$$(1) M = M_1 + M_2 \quad (2.1.7.1.1)$$

$$(2) \left(\frac{1}{r}\right)_1 = \frac{M_1}{E_1 \cdot I_1} = \left(\frac{1}{r}\right)_2 = \frac{M_2}{E_2 \cdot I_2} \quad (2.1.7.1.2)$$

Sprendžiama lygčių sistema išsireiškiant  $M_2$  dydį ir ir įstatant į (2) lygtį:

$$M_2 = M - M_1 \quad (2.1.7.1.3)$$

$$\frac{M_1}{E_1 \cdot I_1} = \frac{M - M_1}{E_2 \cdot I_2} \quad (2.1.7.1.4)$$

Iš gautos lygties išsireiškiamas dydis  $M_1$ :

$$\frac{M_1}{E_1 \cdot I_1} = \frac{M}{E_2 \cdot I_2} - \frac{M_1}{E_2 \cdot I_2} \quad (2.1.7.1.5)$$

$$\frac{M}{E_2 \cdot I_2} = \frac{M_1}{E_1 \cdot I_1} + \frac{M_1}{E_2 \cdot I_2}$$

$$\frac{M}{E_2 \cdot I_2} = \frac{M_1 \cdot E_2 \cdot I_2 + M_1 \cdot E_1 \cdot I_1}{E_1 \cdot I_1 \cdot E_2 \cdot I_2}$$

$$\frac{M}{E_2 \cdot I_2} = \frac{M_1 \cdot (E_2 \cdot I_2 + E_1 \cdot I_1)}{E_1 \cdot I_1 \cdot E_2 \cdot I_2}$$

$$M_1 = \frac{M \cdot E_1 \cdot I_1}{E_2 \cdot I_2 + E_1 \cdot I_1} \quad (2.1.7.1.6)$$

Skaičiuojami atskirų elementų inercijos momentai:

$$I_1 = \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} = \frac{79 \cdot 34^3}{12} = 258,751 \cdot 10^3 \text{ mm}^4 \quad (2.1.7.1.7)$$

$$I_2 = \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} = \frac{80 \cdot 120^3}{12} = 115,2 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 \quad (2.1.7.1.8)$$

Skaičiuojami lenkimo momentai  $M_1$  ir  $M_2$  įstatant žinomus elemento geometrinius parametrus:

$$M_1 = \frac{M \cdot E_1 \cdot I_1}{E_2 \cdot I_2 + E_1 \cdot I_1} = \frac{2,5 \cdot 10^6 \cdot 210000 \cdot 258,751 \cdot 10^3}{11000 \cdot 115,2 \cdot 10^5 + 210000 \cdot 258,751 \cdot 10^3} = 0,75 \text{ kNm} \quad (2.1.7.1.9)$$

$$M_2 = M - M_1 = 2,5 - 0,75 = 1,75 \text{ kNm} \quad (2.1.7.1.10)$$

Skaičiuojami maksimalūs įtempiai medyje  $\sigma_{w,t}$ :

$$\sigma_{w,t5} = \frac{M_2 \cdot \left(\frac{h_2}{2}\right)}{I_2} = \frac{1,75 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{120}{2}\right)}{115,2 \cdot 10^5} = 9,11 \text{ MPa} \quad (2.1.7.1.11)$$

Tikrinama sąlyga pagal LST EN 1995-2:2005. Eurokodas 5:

$$\sigma_{w,t5} \leq f_{m,d}(C24) \quad (2.1.7.1.12)$$

$$9,11 \text{ MPa} \leq 18,46 \text{ MPa} \text{ (Sąlyga tenkinama)}$$

Skaičiuojami maksimalūs įtempiai plieno juostoje  $\sigma_{st,t}$ :

$$\sigma_{st,t(2)} = \frac{M_1 \cdot \left(\frac{h_1}{2}\right)}{I_1} = \frac{0,75 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{34}{2}\right)}{258,751 \cdot 10^3} = 49,28 \text{ MPa} \quad (2.1.7.1.13)$$

Pagal LST EN 1993-1-1:2005. Eurokodas 3, skaičiuotinis plieno stipris tempiant, esant S235 (žr.5 lentelė) klasės plienui apskaičiuojamas:

$$f_{y,d} = \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{235}{1,25} = 188 \text{ MPa} \quad (2.1.7.1.14)$$

$\gamma_{M2}$  – tempiamosios irties laikomosios galios dalinis koeficientas 1,25

Tikrinama sąlyga pagal LST EN 1993-1-1:2005. Eurokodas:

$$\sigma_{st,t(2)} \leq f_{y,d} \quad (2.1.7.1.15)$$

$$49,28 \text{ MPa} \leq 188 \text{ MPa} \text{ (Sąlyga tenkinama)}$$

Tikrinama išsikelto uždavinio sąlyga, medžio sijoje įtempius sumažinti 30%:

$$\frac{\sigma_{w,t5}}{\sigma_{w,t(n)}} \approx 0,7 \quad (2.1.7.1.16)$$

$$\frac{9,11}{13,02} = 0,700 \text{ (Sąlyga tenkinama)}$$

### 2.1.7.2. Kompozitinės sijos įlinkio skaičiavimas, kai tarp sluoksnių sukibimo nėra

Sijos įlinkis skaičiuojamas pagal 2.1.3.2. skyriuje išreikštą formulę.

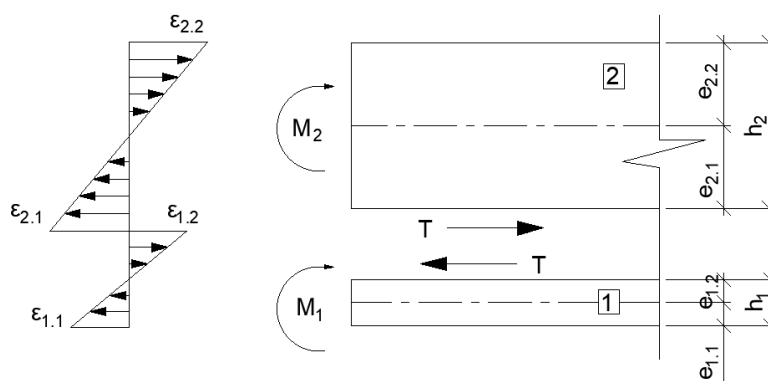
Apskaičiuojamas kompozitinės sijos įlinkis:

$$d_{f5,\max(1)} = \left(\frac{1}{r}\right) \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{M_1}{E_1 \cdot I_1} \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{0,75 \cdot 10^6}{210000 \cdot 258,751 \cdot 10^3} \cdot \frac{1000^2}{12} = 1,15 \text{ mm} \quad (2.1.7.2.1)$$

$$d_{f5,\max(2)} = \left(\frac{1}{r}\right) \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{M_2}{E_2 \cdot I_2} \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{1,75 \cdot 10^6}{11000 \cdot 115,2 \cdot 10^5} \cdot \frac{1000^2}{12} = 1,15 \text{ mm} \quad (2.1.7.2.2)$$

$$d_{f5,\max} = d_{f5,\max(1)} + d_{f5,\max(2)} = 2,30 \text{ mm} \quad (2.1.7.2.3)$$

### 2.1.7.3. Kompozitinėje sijoje veikiančios šlyties jėgos skaičiavimas, kai tarp sluoksnių sukibimo nėra



25 pav. Šlyties jėgos veikiančios tarp nesukibusių sluoksnių skaičiavimo schema

Siekiant surasti tarp sluoksnių veikiančią maksimalią deformaciją, naudojami 2.1.7.1 punkte gauti kiekvieną sluoksnį atskirai veikiančys lenkimo momentai  $M_1$  ir  $M_2$ , kuriuos įstačius į lygtis gaunamos deformacijos:

$$\varepsilon_{2,1} = \frac{M_1}{E_1 \cdot W_1} \quad (2.1.7.3.1)$$

$$\varepsilon_{1,2} = -\frac{M_2}{E_2 \cdot W_2} \quad (2.1.7.3.2)$$

Skaičiuojami elementų atsparumo momentai:

$$W_1 = \frac{b_1 \cdot h_1^2}{6} = \frac{79 \cdot 34^2}{6} = 15220,67 \text{ mm}^3 \quad (2.1.7.3.3)$$

$$W_2 = \frac{b_2 \cdot h_2^2}{6} = \frac{80 \cdot 120^2}{6} = 192000 \text{ mm}^3 \quad (2.1.7.3.4)$$

Į lygtis įsistatomi turimi dydžiai:

$$\varepsilon_{2,1} = \frac{M_1}{E_1 \cdot W_1} = \frac{0,75 \cdot 10^6}{210000 \cdot 15220,67} = 2,346 \cdot 10^{-4} \text{ mm} \quad (2.1.7.3.5)$$

$$\varepsilon_{1,2} = -\frac{M_2}{E_2 \cdot W_2} = \frac{1,75 \cdot 10^6}{11000 \cdot 192000} = -8,286 \cdot 10^{-4} \text{ mm} \quad (2.1.7.3.6)$$

Maksimali deformacija tarp sluoksnių:

$$\varepsilon_{slip,max} = \varepsilon_{2,1} - \varepsilon_{1,2} = 2,346 \cdot 10^{-4} - (-8,286 \cdot 10^{-4}) = 1,0632 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \quad (2.1.7.3.7)$$

Siekiant rasti tarp sluoksnių veikiančią šlyties jėgą, sudaroma keturių lygčių sistema:

$$(1) \varepsilon_{slip,max} = \frac{M_1}{E_1 \cdot W_1} + \frac{M_2}{E_2 \cdot W_2} \quad (2.1.7.3.8)$$

$$(2) \varepsilon_{2,1} - \varepsilon_{1,2} = \varepsilon_{slip,max} \quad (2.1.7.3.9)$$

$$(3) \varepsilon_{2,1} = \frac{T}{E_2 \cdot A_2} + \frac{T \cdot h_2}{2E_2 \cdot W_2} - \frac{M_2}{E_2 \cdot W_2} \quad (2.1.7.3.10)$$

$$(4) \varepsilon_{1,2} = \frac{M_1}{E_1 \cdot W_1} - \frac{T}{E_1 \cdot A_1} - \frac{T \cdot h_1}{2E_1 \cdot W_1} \quad (2.1.7.3.11)$$



Sprendžiama lygčių sistema (3) ir (4) lygtis įstatome į (2):

$$T \cdot \left( \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{h_2}{2E_2 \cdot W_2} \right) - \frac{M_2}{E_2 \cdot W_2} - \left( T \cdot \left( -\frac{h_1}{2E_1 \cdot W_1} - \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \right) + \frac{M_1}{E_1 \cdot W_1} \right) = \varepsilon_{slip,max}$$

$$T \cdot \left( \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{h_2}{2E_2 \cdot W_2} + \frac{h_1}{2E_1 \cdot W_1} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \right) - \frac{M_2}{E_2 \cdot W_2} - \frac{M_1}{E_1 \cdot W_1} - \varepsilon_{slip,max} = 0 \quad (2.1.7.3.12)$$

Įsivedamas papildomas žymėjimas  $k_t$ , lygties supaprastinimui:

$$k_t = \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{h_2}{2E_2 \cdot W_2} + \frac{h_1}{2E_1 \cdot W_1} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \quad (2.1.7.3.13)$$

Įstatome į gautą lygtį  $k_t$  išraišką ir lygybę  $M_2 = M - M_1$ :

$$T \cdot k_t - \frac{M - M_1}{E_2 \cdot W_2} - \frac{M_1}{E_1 \cdot W_1} - \varepsilon_{slip,max} = 0 \quad (2.1.7.3.14)$$

$$T \cdot k_t - \frac{M}{E_2 \cdot W_2} + M_1 \cdot \left( \frac{1}{E_2 \cdot W_2} - \frac{1}{E_1 \cdot W_1} \right) + \varepsilon_{slip,max} = 0$$

$$T \cdot k_t = \frac{M}{E_2 \cdot W_2} - M_1 \cdot \left( \frac{1}{E_2 \cdot W_2} - \frac{1}{E_1 \cdot W_1} \right) - \varepsilon_{slip,max}$$

$$T = \frac{\frac{M}{E_2 \cdot W_2} - M_1 \cdot \left( \frac{1}{E_2 \cdot W_2} - \frac{1}{E_1 \cdot W_1} \right) - \varepsilon_{slip,max}}{k_t} \quad (2.1.7.3.15)$$

Įsistatome išreikštas lygtis:

$$T = \frac{\frac{M}{E_2 \cdot W_2} - M_1 \cdot \left( \frac{1}{E_2 \cdot W_2} - \frac{1}{E_1 \cdot W_1} \right) - \varepsilon_{slip,max}}{\frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{h_2}{2E_2 \cdot W_2} + \frac{h_1}{2E_1 \cdot W_1} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1}} \quad (2.1.7.3.16)$$

Įsistatome į lygtį turimus duomenis ir išraiškas:

$$T = \frac{\frac{M}{E_2 \cdot W_2} - M_1 \cdot \left( \frac{1}{E_2 \cdot W_2} - \frac{1}{E_1 \cdot W_1} \right) + \frac{M_1}{E_1 \cdot W_1} + \frac{M_2}{E_2 \cdot W_2}}{\frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{h_2}{2E_2 \cdot W_2} + \frac{h_1}{2E_1 \cdot W_1} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1}} \quad (2.1.7.3.17)$$

$$= \frac{\frac{2,5 \cdot 10^6}{11000 \cdot 192000} - 0,75 \cdot 10^6 \cdot \left( \frac{1}{11000 \cdot 192000} - \frac{1}{210000 \cdot 15220,67} \right) - \frac{0,75 \cdot 10^6}{210000 \cdot 15220,67} + \frac{1,75 \cdot 10^6}{11000 \cdot 192000}}{\frac{1}{11000 \cdot 9600} + \frac{2 \cdot 11000 \cdot 192000}{80} + \frac{2 \cdot 210000 \cdot 15220,67}{34} + \frac{1}{210000 \cdot 2686}}$$

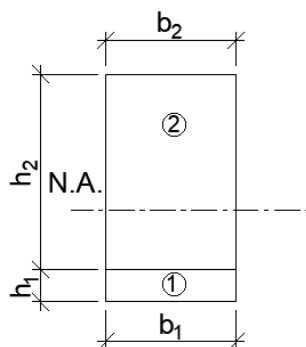
$$= 0 \text{ kN}$$

#### 2.1.7.4. Išvados

- Nesant sukibimui, tačiau siekiant medžio lenkiamame elemente (80x120mm) 30% sumažinti tempimo įtempius, apatinė elemento dalis turi būti armuojama 79x34(h) mm matmenų plienine juosta;
- Gauname, jog medžio apatinis sluoksnis patiria  $\sigma_{w,t5} = 9,11 \text{ MPa}$  įtempius; apatinis plieno juostos sluoksnis patiria  $\sigma_{st,t(2)} = 49,28 \text{ MPa}$  įtempius; tarp suklijuotų sluoksnių neveikia šlyties jėga  $T = 0 \text{ kN}$ .
- Kompozitinės sijos įlinkis  $d_{f5,max} = 2,3 \text{ mm}$

## 2.1.8. Papildomu medžio sluoksniu armuotas lenkiamas skerspjūvis (nėra sukibimo)

### 2.1.8.1. Elementuose veikiančių įtempių $\sigma_{w,t(6)}$ ir $\sigma_{w,t2}$ radimas



26 pav. Stiprinamo skerspjūvio vaizdas

Tarp sluoksnių nesant sukibimui, elementai dirba atskirai. Elementams linkstant, bendras sąjį veikiantis lenkimo momentas pasiskirto abiem sluoksniams. Pagal 2.1.7.1 punkte išreikštą formulę apskaičiuojami lenkimo momentai  $M_1$  ir  $M_2$ .

$$I_1 = \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} = \frac{80 \cdot 91^3}{12} = 502,38 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 \quad (2.1.8.1.1)$$

$$I_2 = \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} = \frac{80 \cdot 120^3}{12} = 115,2 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 \quad (2.1.8.1.2)$$

$$M_1 = \frac{M \cdot E_1 \cdot I_1}{E_2 \cdot I_2 + E_1 \cdot I_1} = \frac{2,5 \cdot 10^6 \cdot 11000 \cdot 502,38 \cdot 10^4}{11000 \cdot 115,2 \cdot 10^5 + 11000 \cdot 502,38 \cdot 10^4} = 0,759 \text{ kNm} \quad (2.1.8.1.3)$$

$$M_2 = M - M_1 = 2,5 - 0,759 = 1,741 \text{ kNm} \quad (2.1.8.1.4)$$

Skaičiuojami maksimalūs įtempiai medyje  $\sigma_{w,t}$ :

$$\sigma_{w,t(6)} = \frac{M_2 \cdot \left(\frac{h_2}{2}\right)}{I_2} = \frac{1,741 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{120}{2}\right)}{115,2 \cdot 10^5} = 9,06 \text{ MPa} \quad (2.1.8.1.5)$$

Tikrinama sąlyga pagal LST EN 1995-2:2005. Eurokodas 5:

$$\sigma_{w,t(6)} \leq f_{m,d}(C24) \quad (2.1.8.1.6)$$

$$9,06 \text{ MPa} \leq 18,46 \text{ MPa} \text{ (Sąlyga tenkinama)}$$

Skaičiuojami maksimalūs įtempiai papildomai armuotame medžio sluoksnyje  $\sigma_{w,t(2)}$ :

$$\sigma_{w,t(2)} = \frac{M_1 \cdot \left(\frac{h_1}{2}\right)}{I_1} = \frac{0,759 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{91}{2}\right)}{502,38 \cdot 10^4} = 6,87 \text{ MPa} \quad (2.1.8.1.7)$$

Tikrinama sąlyga pagal LST EN 1995-2:2005. Eurokodas 5, leistini įtempiai imami iš (žr. 5 lentelė):

$$\sigma_{w,t(2)} \leq f_{t,d} \quad (2.1.8.1.8)$$

$$6,87 \text{ MPa} \leq 14,5 \text{ MPa} \text{ (Sąlyga tenkinama)}$$

Tikrinama išsikelto uždavinio sąlyga, medžio sijoje įtempius sumažinti 30%:

$$\frac{\sigma_{w,t(6)}}{\sigma_{w,t(n)}} \approx 0,7 \quad (2.1.8.1.9)$$

$$\frac{9,06}{13,02} = 0,696 \text{ (Sąlyga tenkinama)}$$

### 2.1.8.2. Kompozitinės sijos įlinkio skaičiavimas, kai tarp sluoksnių sukibimo nėra

Sijos įlinkis skaičiuojamas pagal 2.1.3.2. skyriuje išreikštą formulę.

Apskaičiuojamas kompozitinės sijos įlinkis:

$$d_{f6,max(1)} = \left(\frac{1}{r}\right) \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{M_1}{E_1 \cdot I_1} \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{0,759 \cdot 10^6}{11000 \cdot 502,38 \cdot 10^4} \cdot \frac{1000^2}{12} = 1,14 \text{ mm} \quad (2.1.8.2.1)$$

$$d_{f6,max(2)} = \left(\frac{1}{r}\right) \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{M_2}{E_2 \cdot I_2} \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{1,741 \cdot 10^6}{11000 \cdot 115,2 \cdot 10^5} \cdot \frac{1000^2}{12} = 1,14 \text{ mm} \quad (2.1.8.2.2)$$

$$d_{f6,max} = d_{f6,max(1)} + d_{f6,max(2)} = 2,28 \text{ mm} \quad (2.1.8.2.3)$$

### 2.1.8.3. Kompozitinėje sijoje veikiančios šlyties jėgos skaičiavimas, kai tarp sluoksnių sukibimo nėra

Tarp sluoksnių veikianti šlyties jėga surandama pagal 2.1.7.3 punkte išreikštą formulę:

$$W_1 = \frac{b_1 \cdot h_1^2}{6} = \frac{80 \cdot 91^2}{6} = 110413 \text{ mm}^3 \quad (2.1.8.3.1)$$

$$W_2 = \frac{b_2 \cdot h_2^2}{6} = \frac{80 \cdot 120^2}{6} = 192000 \text{ mm}^3 \quad (2.1.8.3.2)$$

$$T = \frac{M}{E_2 \cdot W_2} - M_1 \cdot \left( \frac{1}{E_2 \cdot W_2} - \frac{1}{E_1 \cdot W_1} \right) - \frac{M_1}{E_1 \cdot W_1} + \frac{M_2}{E_2 \cdot W_2} \quad (2.1.8.3.3)$$

$$= \frac{2,5 \cdot 10^6}{11000 \cdot 192000} - 0,759 \cdot 10^6 \cdot \left( \frac{1}{11000 \cdot 192000} - \frac{1}{11000 \cdot 110413} \right) - \frac{0,759 \cdot 10^6}{11000 \cdot 110413} + \frac{1,741 \cdot 10^6}{11000 \cdot 192000}$$

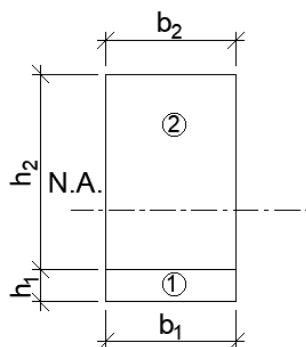
$$= 0 \text{ kN}$$

### 2.1.8.4. Išvados

- Nesant sukibimui, tačiau siekiant medžio lenkiamame elemente (80x120mm) 30% sumažinti tempimo įtempius, apatinė elemento dalis turi būti armuojama 80x91(h) mm matmenų papildomu medžio sluoksniu;
- Gauname, jog medžio apatinis sluoksnis patiria  $\sigma_{w,t6} = 9,06 \text{ MPa}$  įtempius; apatinis papildomas medžio sluoksnis patiria  $\sigma_{w,t(2)} = 6,87 \text{ MPa}$  įtempius; tarp suklijuotų sluoksnių neveikia šlyties jėga  $T = 0 \text{ kN}$ .
- Kompozitinės sijos įlinkis  $d_{f6,max} = 2,28 \text{ mm}$

## 2.1.9. Anglies pluoštu armuotas lenkiamas skerspjūvis (nėra sukibimo)

### 2.1.9.1. Elementuose veikiančių įtempių $\sigma_{w,t(7)}$ ir $\sigma_{angl.pl.t(2)}$ radimas



27 pav. Stiprinamo skerspjūvio vaizdas

Tarp sluoksnių nesant sukibimui, elementai dirba atskirai. Elementams linkstant, bendras sąją veikiantis lenkimo momentas pasiskirto abiem sluoksniams. Pagal 2.1.7.1 punkte išreikštą formulę apskaičiuojami lenkimo momentai  $M_1$  ir  $M_2$ .

$$I_1 = \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} = \frac{78 \cdot 34^3}{12} = 255,476 \cdot 10^3 \text{ mm}^4 \quad (2.1.9.1.1)$$

$$I_2 = \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} = \frac{80 \cdot 120^3}{12} = 115,2 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 \quad (2.1.9.1.2)$$

$$M_1 = \frac{M \cdot E_1 \cdot I_1}{E_2 \cdot I_2 + E_1 \cdot I_1} = \frac{2,5 \cdot 10^6 \cdot 216000 \cdot 255,476 \cdot 10^3}{11000 \cdot 115,2 \cdot 10^5 + 216000 \cdot 255,476 \cdot 10^3} = 0,758 \text{ kNm}$$

$$M_2 = M - M_1 = 2,5 - 0,758 = 1,742 \text{ kNm} \quad (2.1.9.1.3)$$

Skaičiuojami maksimalūs įtempiai medyje  $\sigma_{w,t}$ :

$$\sigma_{w,t(7)} = \frac{M_2 \cdot \left(\frac{h_2}{2}\right)}{I_2} = \frac{1,742 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{120}{2}\right)}{115,2 \cdot 10^5} = 9,07 \text{ MPa} \quad (2.1.9.1.4)$$

Tikrinama sąlyga pagal LST EN 1995-2:2005. Eurokodas 5:

$$\sigma_{w,t(7)} \leq f_{m,d}(C24) \quad (2.1.9.1.5)$$

$$9,07 \text{ MPa} \leq 18,46 \text{ MPa} \text{ (Sąlyga tenkinama)}$$

Skaičiuojami maksimalūs įtempiai anglies pluošte  $\sigma_{angl.pl.t(2)}$ :

$$\sigma_{angl.pl.t(2)} = \frac{M_1 \cdot \left(\frac{h_1}{2}\right)}{I_1} = \frac{0,758 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{34}{2}\right)}{255,476 \cdot 10^3} = 50,44 \text{ MPa} \quad (2.1.9.1.6)$$

Skaičiuotinis anglies pluošto stipris tempiant, (žr.5 lentelė) apskaičiuojamas:

$$f_{angl.pl.,d} = \frac{f_{angl.pl.}}{\gamma_{M2}} = \frac{3267}{1,3} = 2513 \text{ MPa} \quad (2.1.9.1.7)$$

$\gamma_{M2}$  – laikomosios galios dalinis koeficientas 1,3

Tikrinama sąlyga, leistini įtempiai imami iš (žr. 5 lentelė):

$$\sigma_{angl.pl.t} \leq f_{angl.pl,d} \quad (2.1.9.1.8)$$

$$50,44 \text{ MPa} \leq 2513 \text{ MPa} \text{ (Sąlyga tenkinama)}$$

Tikrinama išsikelto uždavinio sąlyga, medžio sijoje įtempius sumažinti 30%:

$$\frac{\sigma_{w,t(7)}}{\sigma_{w,t(n)}} \approx 0,7 \quad (2.1.9.1.9)$$

$$\frac{9,07}{13,02} = 0,697 \text{ (Sąlyga tenkinama)}$$

### 2.1.9.2. Kompozitinės sijos įlinkio skaičiavimas, kai tarp sluoksnių sukibimo nėra

Sijos įlinkis skaičiuojamas pagal 2.1.3.2. skyriuje išreikštą formulę.

Apskaičiuojamas kompozitinės sijos įlinkis:

$$d_{f7,max(1)} = \left(\frac{1}{r}\right) \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{M_1}{E_1 \cdot I_1} \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{0,758 \cdot 10^6}{216000 \cdot 255,476 \cdot 10^3} \cdot \frac{1000^2}{12} = 1,15 \text{ mm} \quad (2.1.9.2.1)$$

$$d_{f7,max(2)} = \left(\frac{1}{r}\right) \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{M_2}{E_2 \cdot I_2} \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{1,742 \cdot 10^6}{11000 \cdot 115,2 \cdot 10^5} \cdot \frac{1000^2}{12} = 1,15 \text{ mm} \quad (2.1.9.2.2)$$

$$d_{f7,max} = d_{f7,max(1)} + d_{f7,max(2)} = 2,30 \text{ mm} \quad (2.1.9.2.3)$$

### 2.1.9.3. Kompozitinėje sijoje veikiančios šlyties jėgos skaičiavimas, kai tarp sluoksnių sukibimo nėra

Tarp sluoksnių veikianti šlyties jėga surandama pagal 2.1.7.3 punkte išreikštą formulę:

$$W_1 = \frac{b_1 \cdot h_1^2}{6} = \frac{78 \cdot 34^2}{6} = 15028 \text{ mm}^3 \quad (2.1.9.3.1)$$

$$W_2 = \frac{b_2 \cdot h_2^2}{6} = \frac{80 \cdot 120^2}{6} = 192000 \text{ mm}^3 \quad (2.1.9.3.2)$$

$$T = \frac{M}{E_2 \cdot W_2} - M_1 \cdot \left( \frac{1}{E_2 \cdot W_2} - \frac{1}{E_1 \cdot W_1} \right) - \frac{M_1}{E_1 \cdot W_1} + \frac{M_2}{E_2 \cdot W_2} \quad (2.1.9.3.3)$$

$$= \frac{2,5 \cdot 10^6}{11000 \cdot 192000} - 0,758 \cdot 10^6 \cdot \left( \frac{1}{11000 \cdot 192000} - \frac{1}{216000 \cdot 15028} \right) - \frac{0,758 \cdot 10^6}{216000 \cdot 15028} + \frac{1,742 \cdot 10^6}{11000 \cdot 192000}$$

$$= \frac{1}{11000 \cdot 9600} + \frac{80}{2 \cdot 11000 \cdot 192000} + \frac{34}{2 \cdot 216000 \cdot 15028} + \frac{1}{216000 \cdot 2886}$$

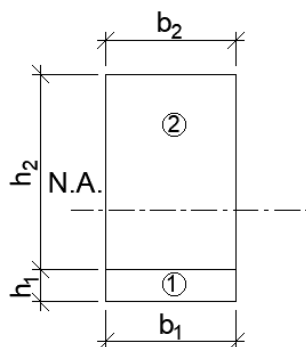
$$= 0 \text{ kN}$$

### 2.1.9.4. Išvados

- Nesant sukibimui, tačiau siekiant medžio lenkiamame elemente (80x120mm) 30% sumažinti tempimo įtempius, apatinė elemento dalis turi būti armuojama 78x34(h) mm matmenų anglies pluošto sluoksniu;
- Gauname, jog medžio apatinis sluoksnis patiria  $\sigma_{w,t7} = 9,07 \text{ MPa}$  įtempius; apatinis papildomas medžio sluoksnis patiria  $\sigma_{angl.pl.t(2)} = 50,44 \text{ MPa}$  įtempius; tarp suklijuotų sluoksnių neveikia šlyties jėga  $T = 0 \text{ kN}$ .
- Kompozitinės sijos įlinkis  $d_{f7,max} = 2,30 \text{ mm}$

## 2.1.10. Anglies pluoštu armuotas lenkiamas skerspjūvis (nėra sukibimo)

### 2.1.10.1. Elementuose veikiančių įtempių $\sigma_{w,t(8)}$ ir $\sigma_{bazalt.pl.t(2)}$ radimas



28 pav. Stiprinamo skerspjūvio vaizdas

Tarp sluoksnių nesant sukibimui, elementai dirba atskirai. Elementams linkstant, bendras sąją veikiantis lenkimo momentas pasiskirto abiem sluoksniams. Pagal 2.1.7.1 punkte išreikštą formulę apskaičiuojami lenkimo momentai  $M_1$  ir  $M_2$ .

$$I_1 = \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} = \frac{79 \cdot 57^3}{12} = 121,92 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 \quad (2.1.10.1.1)$$

$$I_2 = \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} = \frac{80 \cdot 120^3}{12} = 115,2 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 \quad (2.1.10.1.2)$$

$$M_1 = \frac{M \cdot E_1 \cdot I_1}{E_2 \cdot I_2 + E_1 \cdot I_1} = \frac{2,5 \cdot 10^6 \cdot 45000 \cdot 121,92 \cdot 10^4}{11000 \cdot 115,2 \cdot 10^5 + 45000 \cdot 121,92 \cdot 10^4} = 0,755 \text{ kNm} \quad (2.1.10.1.3)$$

$$M_2 = M - M_1 = 2,5 - 0,755 = 1,745 \text{ kNm} \quad (2.1.10.1.4)$$

Skaičiuojami maksimalūs įtempiai medyje  $\sigma_{w,t}$ :

$$\sigma_{w,t(8)} = \frac{M_2 \cdot \left(\frac{h_2}{2}\right)}{I_2} = \frac{1,745 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{120}{2}\right)}{115,2 \cdot 10^5} = 9,09 \text{ MPa} \quad (2.1.10.1.5)$$

Tikrinama sąlyga pagal LST EN 1995-2:2005. Eurokodas 5:

$$\sigma_{w,t(8)} \leq f_{m,d}(C24) \quad (2.1.10.1.6)$$

$$9,09 \text{ MPa} \leq 18,46 \text{ MPa} \text{ (Sąlyga tenkinama)}$$

Skaičiuojami maksimalūs įtempiai anglies pluošte  $\sigma_{bazalt.pl.t(2)}$ :

$$\sigma_{bazalt.pl.t(2)} = \frac{M_1 \cdot \left(\frac{h_1}{2}\right)}{I_1} = \frac{0,755 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{57}{2}\right)}{121,92 \cdot 10^4} = 17,65 \text{ MPa} \quad (2.1.10.1.7)$$

Skaičiuotinis anglies pluošto stipris tempiant, (žr.5 lentelė) apskaičiuojamas:

$$f_{bazalt.pl.,d} = \frac{f_{bazalt.pl.}}{\gamma_{M2}} = \frac{1239}{1,3} = 953 \text{ MPa} \quad (2.1.10.1.8)$$

$\gamma_{M2}$  – laikomosios galios dalinis koeficientas 1,3

Tikrinama sąlyga, leistini įtempiai imami iš (žr. 5 lentelė):

$$\sigma_{angl.pl.t} \leq f_{angl.pl,d} \quad (2.1.10.1.9)$$

$$17,65 \text{ MPa} \leq 953 \text{ MPa} \text{ (Sąlyga tenkinama)}$$

Tikrinama išsikelto uždavinio sąlyga, medžio sijoje įtempius sumažinti 30%:

$$\frac{\sigma_{w,t(8)}}{\sigma_{w,t(n)}} \approx 0,7 \quad (2.1.10.1.10)$$

$$\frac{9,09}{13,02} = 0,698 \text{ (Sąlyga tenkinama)}$$

### 2.1.10.2. Kompozitinės sijos įlinkio skaičiavimas, kai tarp sluoksnių sukibimo nėra

Sijos įlinkis skaičiuojamas pagal 2.1.3.2. skyriuje išreikštą formulę.

Apskaičiuojamas kompozitinės sijos įlinkis:

$$d_{f8,max(1)} = \left(\frac{1}{r}\right) \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{M_1}{E_1 \cdot I_1} \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{0,755 \cdot 10^6}{45000 \cdot 121,92 \cdot 10^4} \cdot \frac{1000^2}{12} = 1,15 \text{ mm} \quad (2.1.10.2.1)$$

$$d_{f8,max(2)} = \left(\frac{1}{r}\right) \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{M_2}{E_2 \cdot I_2} \cdot \frac{l^2}{12} = \frac{1,745 \cdot 10^6}{11000 \cdot 115,2 \cdot 10^5} \cdot \frac{1000^2}{12} = 1,15 \text{ mm} \quad (2.1.10.2.2)$$

$$d_{f8,max} = d_{f8,max(1)} + d_{f8,max(2)} = 2,30 \text{ mm} \quad (2.1.10.2.3)$$

### 2.1.10.3. Kompozitinėje sijoje veikiančios šlyties jėgos skaičiavimas, kai tarp sluoksnių sukibimo nėra

Tarp sluoksnių veikianti šlyties jėga surandama pagal 2.1.7.3 punkte išreikštą formulę:

$$W_1 = \frac{b_1 \cdot h_1^2}{6} = \frac{79 \cdot 57^2}{6} = 42778,5 \text{ mm}^3 \quad (2.1.10.3.1)$$

$$W_2 = \frac{b_2 \cdot h_2^2}{6} = \frac{80 \cdot 120^2}{6} = 192000 \text{ mm}^3 \quad (2.1.10.3.2)$$

$$T = \frac{M}{E_2 \cdot W_2} - M_1 \cdot \left( \frac{1}{E_2 \cdot W_2} - \frac{1}{E_1 \cdot W_1} \right) - \frac{M_1}{E_1 \cdot W_1} + \frac{M_2}{E_2 \cdot W_2} \quad (2.1.10.3.3)$$

$$= \frac{2,5 \cdot 10^6}{11000 \cdot 192000} - 0,755 \cdot 10^6 \cdot \left( \frac{1}{11000 \cdot 192000} - \frac{1}{45000 \cdot 42778,5} \right) - \frac{0,755 \cdot 10^6}{45000 \cdot 42778,5} + \frac{1,745 \cdot 10^6}{11000 \cdot 192000}$$

$$= \frac{1}{11000 \cdot 9600} + \frac{80}{2 \cdot 11000 \cdot 192000} + \frac{57}{2 \cdot 45000 \cdot 42778,5} + \frac{1}{45000 \cdot 4503}$$

$$= 0 \text{ kN}$$

### 2.1.10.4. Išvados

- Nesant sukibimui, tačiau siekiant medžio lenkiamame elemente (80x120mm) 30% sumažinti tempimo įtempius, apatinė elemento dalis turi būti armuojama 79x57(h) mm matmenų bazalto pluošto sluoksniu;
- Gauname, jog medžio apatinis sluoksnis patiria  $\sigma_{w,t8} = 9,09 \text{ MPa}$  įtempius; apatinis papildomas medžio sluoksnis patiria  $\sigma_{bazalt.pl.t(2)} = 17,65 \text{ MPa}$  įtempius; tarp suklijuotų sluoksnių neveikia šlyties jėga  $T = 0 \text{ kN}$ .
- Kompozitinės sijos įlinkis  $d_{f8,max} = 2,30 \text{ mm}$

## 2.2. Analitinių skaičiavimų rezultatai

Siekiant nustatyti efektyviausią, lenkiamo medžio elemento stiprinimo būdą, aprašyti nearmuotos sijos parametrai ir nustatyti įtempiai šį elementą lenkiant (žr. 7 lentelė). Medinės sijos tempimo zona armuojama skirtingomis medžiagomis, tempimo įtempius sumažinant 30%. Gauti rezultatai pateikiami 8 lentelėje.

**7 lentelė.** Nearmuotos medžio sijos parametrai ir įtempiai

Simbolis	Matmenys		Tampromo modulis $E$ , GPa	Lenkimo momentas $M_0$ , kNm	Tempimo įtempiai $\sigma_{w,t}$ , MPa	Sijos įlinkis $d_{f,max}$ , mm
	$h_2$ , mm	$b_2$ , mm				
Reikšmė	120	80	11,0	2,5	13,02	1,64

**8 lentelė.** Armuotos konstrukcijos, sumažinant tempimo įtempius 30%, analitinių skaičiavimų rezultatai

Konstr. tipas	Arm.sl. tampromo modulis $E$ , GPa	Sukibties tipas	Matmenys		Tempimo įtempiai medžio sijoje $\sigma_{w,t}$ , MPa	Tempimo įtempiai armavimo sl. $\sigma_{w,t}$ , MPa	Šlyties jėga $T$ , kN	Kompozito įlinkis $d_{f,max}$ , mm
			$b_l$ , mm	$h_l$ , mm				
Konstrukcija armuota plienine juosta	210	Pilnas sukibimas	26	2	9,13	180,67	27,71	1,274
		Nėra sukibimo	79	34	9,11	49,28	0	2,30
Konstrukcija armuota papildomu medžio sluoksniu	11	Pilnas sukibimas	39	20	9,07	12,39	28,01	1,256
		Nėra sukibimo	80	91	9,06	6,87	0	2,28
Konstrukcija armuota anglies pluoštu	210	Pilnas sukibimas	65	0,8	9,10	181,47	27,57	1,272
		Nėra sukibimo	79	34	9,07	50,44	0	2,30
Konstrukcija armuota bazalto pluoštu	11	Pilnas sukibimas	80	3	9,12	39,35	27,68	1,272
		Nėra sukibimo	79	57	9,09	17,65	0	2,30

Atsižvelgiant į gautus skaičiavimų rezultatus sudaromos diagramos pagal, kurias palyginami duomenys ir pateikiami jų paaiškinimai.

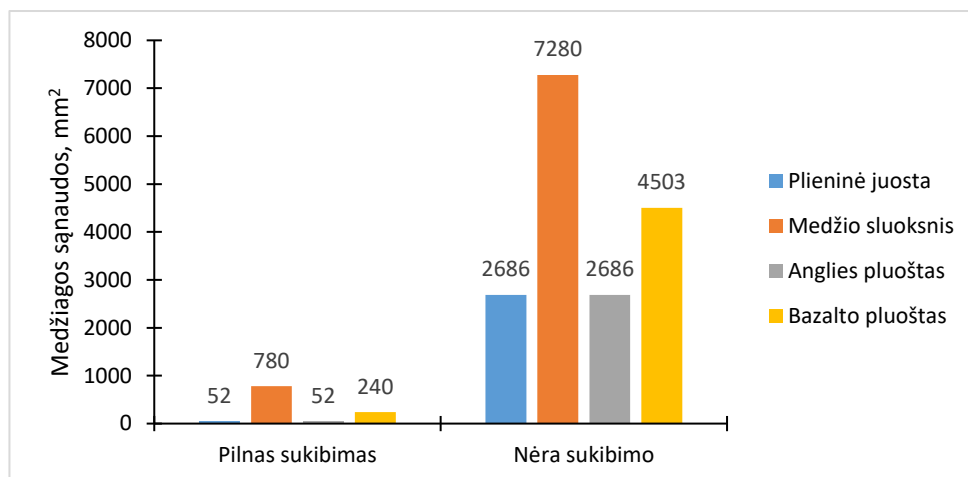
### 2.2.1. Konstrukcijos armavimo medžiagų kiekio palyginimas

Siekiant lenkiamame elemente 30% sumažinti tempimo įtempius, tempiamai zonai armuoti sunaudotas skirtingas medžiagų kiekis. Jų sąnaudų palyginimas (žr. 9 lentelė) priklausomai nuo sukibimo ir medžiagos tipo pateiktas 29 pav.



**9 lentelė.** Medžiagų sąnaudos esant skirtingiems medžiagų kiekiams sumažinat įtempius sijoje 30%

Medžiaga	Medžiagos sąnaudos esant pilnam sukibimui, mm <sup>2</sup>	Medžiagos sąnaudos nesant sukibimui, mm <sup>2</sup>
Plieninė juosta	52	2686
Medžio sluoksnis	780	7280
Anglies pluoštas	52	2686
Bazalto pluoštas	240	4503

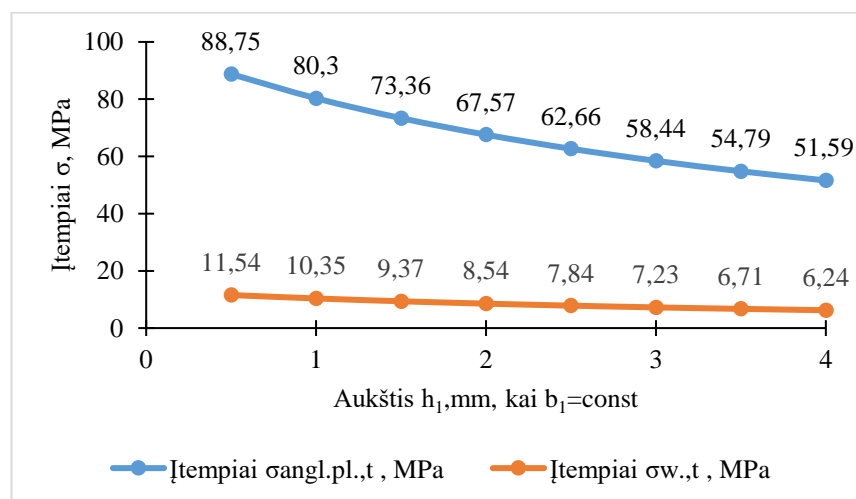


**29 pav.** Medžiagų kiekio sąnaudų palyginimas sumažinant įtempius sijoje 30%

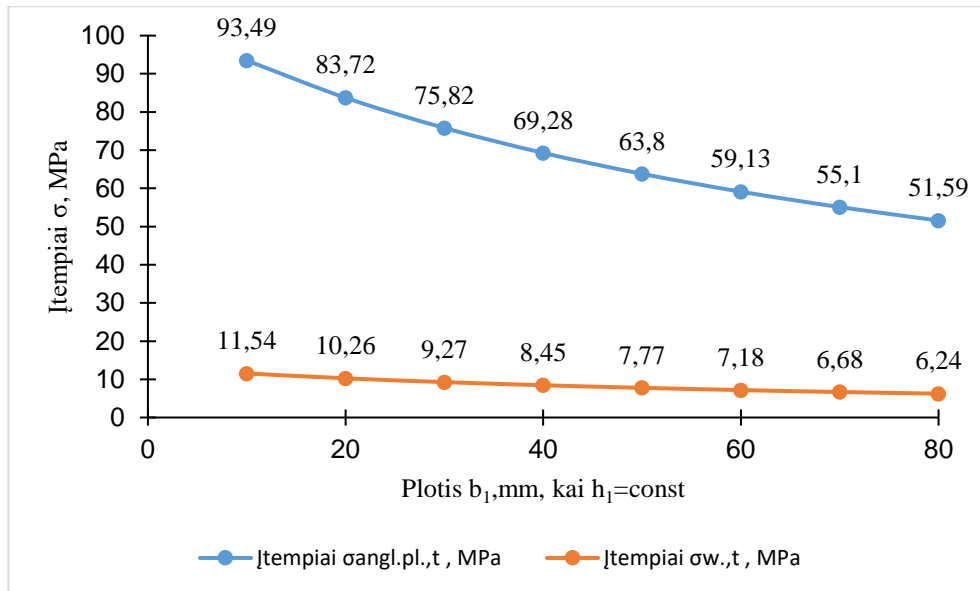
Iš diagramos galima matyti, jog tarp sluoksnių nesant sukibimui reikalingas didesnis armuojančios medžiagos kiekis. Šis skirtumas pastebimas, dėl sukibimo efektyvumo. Nesant sukibimui kiekvienas armuotos sijos sluoksnis įtempius perima atskirai ir nedirba kartu kaip kompozitinis elementas. Taip pat galima teigti, jog tik tinkamai tarpusavyje sukibus sluoksniams stiprinimas yra efektyvus, priešingu atveju norint pasiekti tą patį rezultatą sunaudojama 9 – 50 kartų didesnis medžiagos kiekis.

### 2.2.2. Tempiamos zonos įtempiai

Norint sužinoti armuojančio sluoksnio įtempių priklausomybę nuo aukščio ir pločio, pasirenkama tuos pačius parametrus turinti medžiaga ir keičiamas vienas iš matmenų kitam esam konstantai. Gauti rezultatai pateikiami 30 pav. ir 31 pav.



**30 pav.** Įtempių priklausomybė nuo aukščio, kai  $b_1 = \text{const}$ .

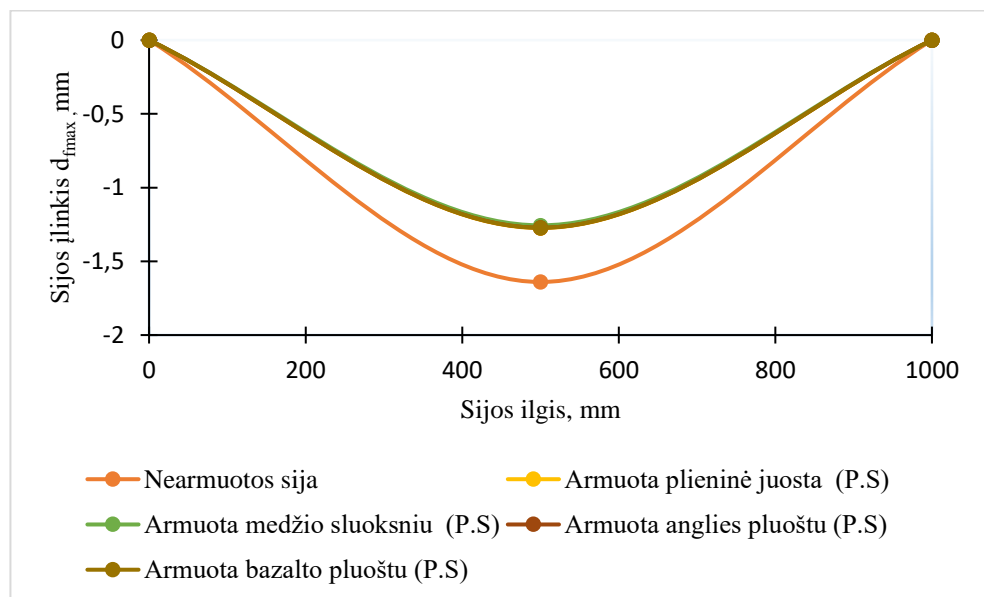


**31 pav.** Įtempių priklausomybė nuo pločio, kai  $h_1 = \text{const}$ .

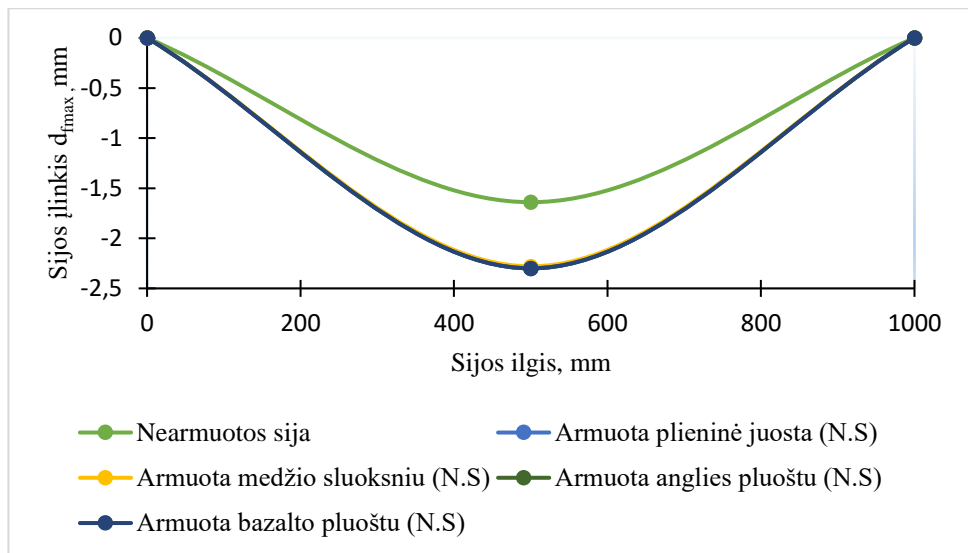
Palyginus 30 pav. ir 31 pav. diagramas galima teigti, jog keičiant armuojančio sluoksnio plotį  $b_1$  medžiaga perima 0,5 - 4% didesnius tempimo įtempius nei keičiant aukštį  $h_1$ . Kintant stiprinančio sluoksnio pločiui  $b_1$ , sija perima 0,4 - 8% mažesnius tempimo įtempius nei keičiant aukštį  $h_1$ . Remiantis gautais rezultatais galima teigti, jog racionalu didinti pločio parametrus, nes tokiu būdu didesnis armuojamosios medžiagos plotas perima tempimą, sumažindamas atsirandančius įtempius medienoje.

### 2.2.3. Kompozitinės sijos įlinkis

Nearmuotos sijos įlinkis palyginamas su kompozitinės konstrukcijos įlinkiu, kai stiprinamas sluoksnis pilnai sukibęs su sija arba tarp jų nėra sukibimo (žr. 32 pav. ir 33 pav.).



**32 pav.** Sijos įlinkio palyginimas stiprinant skirtingomis armavimo medžiagomis (esant pilnam sukibimui tarp sluoksnių)

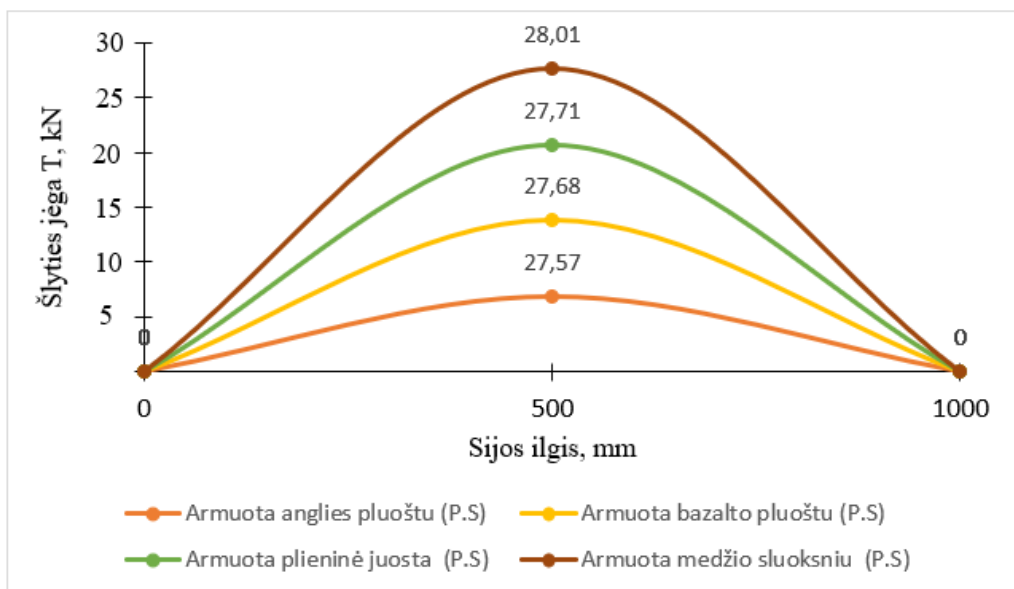


**33 pav.** Sijos įlinkio palyginimas stiprinant skirtingomis armavimo medžiagomis (nesant pilnam sukibimui tarp sluoksnių)

Sijos tempiamos zonos armavimas skirtingomis medžiagomis elemento įlinkį sumažina 28 – 30%, kai tarp sluoksnių vyrauja pilnas sukibimas. Medžio sijai netinkamai sukibus su stiprinamuoju sluoksniu, bendras kompozitinės sijos įlinkis padidėja 39 – 40%, nes kiekvienas sluoksnis linksta atskirai, tačiau tokiu pačiu dydžiu. Abiem atvejais mažiausiu įlinkiu pasižymi papildomu medžio sluoksniu armuota sija.

#### 2.2.4. Šlyties jėga tarp medžio sijos ir armuojančios medžiagos sluoksniu

Šlyties jėgos pasiskirstymas kompozitinės konstrukcijos ilgyje, armuojant skirtingomis medžiagomis, kai vyrauja tarp sluoksnių pilnas sukibimas (žr. 34 pav.). Šlyties jėgos pasiskirstymas, kai tarp sluoksnių praslydimas maksimalus, nevaizduojamas, nes šlyties jėga išilgai sijos lygi 0.



**34 pav.** Šlyties jėgos priklausomybė sijos ilgyje, esant skirtingoms armavimo medžiagoms (pilnas sukibimas)

Iš diagramos galima pastebėti, jog didžiausia šlyties jėga veikia ties maksimalios lenkimo momento įrašos formavimosi vieta. Taip pat matoma, jog kuo geresnis sukibimas, tuo šlyties jėga tarp sluoksnių gaunama didesnė.

## 2.3. Eksperimentiniai tyrimai

Tyrimų metu standartinės sijos skerspjūvis 80x120(h) mm, stiprinimas tempiamą zoną armuojant plienine juosta, anglies pluoštu bei papildomu mediniu tašu. Armuojamasis sluoksnis prie konstrukcijos priklijuojamas dvikomponenčiais epoksidiniais klijais. Siekiant palyginti tvirtinimo įtaką, vienas iš bandinių, medinė sija armuota su plienine juosta, kraštuose pritvirtinama meddraigčiais. Bandymai atliekami statinio lenkimo mašinoje, kompozitinį elementą atremiant galuose, o per vidurį veikiant koncentruota apkrova. Pagal gautus įlinkių ir stiprumo nustatymo duomenis atliekami palyginimai ir formuluojamos išvados.

**Tyrimo tikslas:** remiantis analitiniais skaičiavimais, kurių metu buvo apskaičiuoti armuojančių sluoksnių skerspjūviai, nustatyti efektyviausią medinės sijos stiprinimo būdą, kai medžio sijoje įtempiai yra sumažinami 30%.

### 2.3.1. Tyrimams naudotos medžiagos ir įrenginiai

Naudotos medžiagos:

- 10 vnt. 80x120x1000 mm medinių sijų;
- 3 vnt. 40x20x800 mm mediniai tašai;
- 2 vnt. 40x2x800 mm perforuotos plieninės juostos, klasė S235;
- 6 vnt. 65x0.5x800 mm anglies pluošto juostos;
- PENOSIL Premium Epoxy Fix&Coat 507 dvikomponentė epoksidinė derva/ klijai;
- 4 vnt. 4,0x30 mm savigrėžiai;

Naudoti įrenginiai:

- Statinio lenkimo mašina;
- 3 vnt. įlinkio nustatymo indikatoriai (prietaisai)

### 2.3.2. Bandinių paruošimas

#### 2.3.2.1. Medžiagos

Armuotų lenkiamų medinių elementų stiprio nustatymui, pasirinkti 1 metro ilgio standartinės sijos skerspjūvio 80x120(h) mm bandiniai. Tyrimams naudota įprasta statybinė, dvigubo pjovimo, negraduota mediena. Tyrimo objektų matmenys pateikiami 10 lentelėje.

**10 lentelė.** Tiriamų medžio bandinių matmenys

Bandinio Nr.	Bandinio plotis <i>b</i> , mm	Bandinio aukštis <i>h</i> , mm	Bandinio ilgis <i>l</i> , mm
1	79	118	1000
2	78	118	1001
3	80	118	1000
4	79	120	1002
5	81	120	1003
6	80	121	1001
7	80	119	1000
8	80	120	999
9	79	119	1002
10	80	120	999

Vidutiniai tiriamų bandinių matmenys apskaičiuojami taikant matematine aritmetinio vidurkio 2.3.2.1 formulę. Rezultatai pateikiami 11 lentelėje.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.3.2.1)$$

**11 lentelė.** Vidutiniai tiriamų medžio bandinių matmenys

Vidutinis bandinio plotis $b$ , mm	Vidutinis bandinio aukštis $h$ , mm	Vidutinis bandinio ilgis $l$ , mm
79,6	119,3	1000,7

Medžio bandiniams armuoti naudojamos dvikrypčio audimo anglies pluošto juostos, plieninės perforuotos S235 plieno klasės juostos bei to paties medienos pjovimo kaip ir sijos, tašai. Šių armuojančių medžiagų matmenys pateikiami 12 lentelėje, vidutinės matmenų reikšmės 13 lentelėje.

**12 lentelė.** Armuojančių medžiagų matmenys

Nr.	Armuojančios medžiagos pavadinimas	Arm. medž. plotis $b$ , mm	Arm. medž. aukštis $h$ , mm	Arm. medž. ilgis $l$ , mm
1	Medžio tašas	39	19	802
2	Medžio tašas	40	20	802
3	Medžio tašas	40	19	801
4	Plieninė juosta	40	2	799
5	Plieninė juosta	40	2	796
6	Plieninė juosta	40	2	798
7	Anglies pluošto juosta	66	0,5	800
8	Anglies pluošto juosta	65	0,5	800
9	Anglies pluošto juosta	65	0,5	798
10	Anglies pluošto juosta	66	0,5	795
11	Anglies pluošto juosta	64	0,5	796
12	Anglies pluošto juosta	64	0,5	794

**13 lentelė.** Vidutiniai armuojančių medžiagų matmenys

Armuojančios medžiagos pavadinimas	Vidutinis arm. medž. plotis $b$ , mm	Vidutinis arm. medž. aukštis $h$ , mm	Vidutinis arm. medž. ilgis $l$ , mm
Medžio tašas	39,67	19,33	801,67
Plieninė juosta	40,0	2,0	797,67
Anglies pluošto juosta	65,0	0,5	797,17

Stiprinamo elemento ir armuojančios medžiagos klijavimui naudota PENOSIL Premium Epoxy Fix&Coat 507 epoksidinė derva, kuri skirta klijuoti įvairias kietas medžiagas: stiklą, keramiką, medieną, medieną, stiklo pluoštą ir kt. Sukietėję klijai atsparūs tirpikliams, šarmams, aliejui, silpnoms rūgštims, vandeniui [45]. Techniniai duomenys pateikiami 14 lentelėje.

**14 lentelė.** PENOSIL Premium Epoxy Fix&Coat 507 techniniai duomenys [45]

Savybės	Vienetai	Vertė
Tankis: bazinė medžiaga	g/cm <sup>3</sup>	1,16
Tankis: kietiklis	g/cm <sup>3</sup>	1,05
Maišymo santykis pagal tūrį	bazinė medžiaga/ kietiklis	2:1

#### 14 lentelės tęsinys

Savybės	Vienetai	Vertė
Patvarumo pasiekimas	po 24 valandų	3
Kietėjimo laikas	valandos	4
Cheminio atsparumo pasiekimas	po 24 valandų	7
Atsparumas temperatūros pokyčiams sukietėjus	C°	Nuo -40 iki +150
Stipris tempiant	MPa	-

Nežinomos tiriamų medžiagų mechaninės savybės nustatomas 2.3.3. punkto dalyje arba priimamos pagal moksliniuose straipsniuose pateiktus aprašymus bei gamintojų pateikiamas specifikacijas.

#### 2.3.2.2. Bandinių paruošimo darbų eiliškumas ir vykdymas

**1 etapas.** Medžio sijos bei armuojančiosios medžiagos išmatuojamos matavimo juosta (rulete). Matavimai atliekami ties bandinių galais ir viduriu priimant duomenų vidurkį, rezultatai pateikiami milimetrų tikslumu.



35 pav. Bandinių matavimas

**2 etapas.** Medienos bandinių paviršius sušiaušiamas šlifavimo popieriumi (grūdėtumas 40), pašalinamos didesnės medžio atplaišos. Susidariusi dulksė nuvaloma šluotele, įsitikinama jog ant bandinių nėra tepalų, alyvos ar vandens dėmių pabloginančių medžiagų sukibimą. Perforuotų plieninių juostų klijuojama pusė taip pat pašiuurkštinama.



36 pav. Bandinių paviršių paruošimas



**3 etapas.** Atliekamas bandinių žymėjimas, užrašant numeraciją bei naudojamos armuojančios medžiagos trumpinius. Ant kiekvienos iš medžio sijų apatinės dalies pažymimos: atrėmimo vietos (5 cm nuo galų), armuojančios medžiagos centravimui skirtos žymos (10 cm nuo galų). Sijų viršutinėje dalyje žymekliu atidedamas bandinio vidurys (50 cm nuo galų), žymintis koncentruotos jėgos pridėjimo tašką.



37 pav. Bandinių žymėjimas

**4 etapas.** Paruošus bandinių ir stiprinančių medžiagų paviršius atliekami klijavimo procesas. Darbai vykdomi esant nuo +15 C<sup>0</sup> iki +25 C<sup>0</sup> aplinkos temperatūrai. Atsižvelgiant į gamintojo pateiktas specifikacijas, bazinė medžiaga sumaišoma su kietikliu santykiu 2:1. Klijai teptuku tepami ant abiejų paviršių: medžio sijos ir armuojančios medžiagos. Elementai tarpusavyje suspaudžiami, klijų perteklius nuvalomas, bandinys papildomai apkraunamas 5 kg svoriu, užtikrinančiu dviejų medžiagų suspaudimą iki klijų sukietėjimo pabaigos.

Klijuojant du anglies pluošto sluoksnius, pirmasis sluoksnis išspaudžiamas į epoksidiniais klijais padengtą paviršių, braukiant mentele pašalinamas klijų perteklius ir susidaręs oras. Po 5 minučių plonu sluoksniu klijais padengiamas pirmasis polimerinio pluošto sluoksnis ir priklijuojamas antrasis pluoštas tinkamai prispaudžiant ir pašalinant susidariusius oro tarpus.



38 pav. Bandinių klijavimas

### 2.3.3. Tyrimo metodas

#### 2.3.3.1. Lenkimo bandymas

Lenkimo bandymas atliekas statinio lenkimo mašinoje (žr. 39 pav.), atremiant armuotą siją ties žymomis (5cm nuo sijos galų), ties viduriu veikiant koncentruota apkrova, kuri laipsniškai didinama iki kompozitinės konstrukcijos suirimo (žr. 40 pav.). Tokiu būdu imituojamas dviatramės sijos lenkimas. Ties atramos padedamos 150x150 mm plieno plokštelės sumažinančios ties atramomis atsirandančias gniuždymo jėgas, taip išvengiant netinkamo sijų suirimo. Šio bandymo metu prie standartų LST EN 408:2010+A1:2012, LST EN 384:2016+A2:2022, LST EN 338:2016 neprisirišama, o tik remiamasi jais. Toks bandymas atliekamas, siekiant iširti stiprinimo skirtingais pluoštais ir būdais efektyvumą, o ne patį medžiagos stiprumą.



39 pav. Statinio lenkimo mašina



40 pav. Kompozitinio elemento atrėmimas statinio lenkimo mašinoje





**41 pav.** Kompozitiniai bandiniai

Šio bandymo metu vizualiai nustatomas bandinio suirimo būdas bei gaunama didžiausia kompozitinės sijos laikomoji galia suirimo metu. Rezultatai priimami netinkamais, jeigu sija deformuojasi ne dėl lenkimo įtakos. Gauti duomenys surašomi 15 lentelėje.

Atlikus tyrimus, nustatyti du suirties būdai: šlyties (kirpimo) žr. 42 pav. ir lenkiamoji suirtis žr. 43 pav. Bandinių deformacija nusakoma pagal susiformavusio plyšio padėtį ir kryptį. Įtrūkimui atsivėrus įstrižai sijos, suirtis priskiriama šlyties (kirpimo) įtakai. Kitu atveju plyšiui formuojantis bandinio viduryje, traktuojama jog bandinys suiro dėl lenkimo įtakos.



**42 pav.** Šlyties (kirpimo) suirtis



**43 pav.** Lenkiamoji suirtis

**15 lentelė.** Lenkimo bandymo metu gauti duomenys

Bandinio Nr.	Bandinio žymėjimas	Tiriamas objektas	Suirties pobūdis	Maksimali apkrova, kN	Vidutinė maksimali apkrova, kN
1	N.B	Nearmuota sija	Lenkimas	22,3	22,30
2	PL1.B.V	Armuota sija - plieninė juosta pritvirtinta 4 medsr.	Lenkimas	24,6	24,60
3	PL2.B	Armuota sija - plieninė juosta pritvirtinta klįjais	Šlytis (kirpimas)	25,1	28,60
4	PL3.B	Armuota sija - plieninė juosta pritvirtinta klįjais	Lenkimas	28,6	
5	M.M.1.B	Armuota sija – medžio tašas pritvirtintas klįjais	Lenkimas	26,4	25,75
6	M.M.2.B	Armuota sija – medžio tašas pritvirtintas klįjais	Lenkimas	25,1	
7	M.M.3.B	Armuota sija – medžio tašas pritvirtintas klįjais	Šlytis (kirpimas)	24,9	
8	A.P.1.B	Armuota sija – anglies pluoštas pritvirtintas klįjais	Lenkimas	28,2	29,53
9	A.P.2.B	Armuota sija – anglies pluoštas pritvirtintas klįjais	Lenkimas	31,4	
10	A.P.3.B	Armuota sija – anglies pluoštas pritvirtintas klįjais	Lenkimas	29,0	

Bandinių suirimo vaizdai pateikiami 44-47 pav.



**44 pav.** Priklijuotu anglies pluoštu armuotų sijų suirimas



**45 pav.** Priklijuotu medžio tašu armuotų sijų suirimas



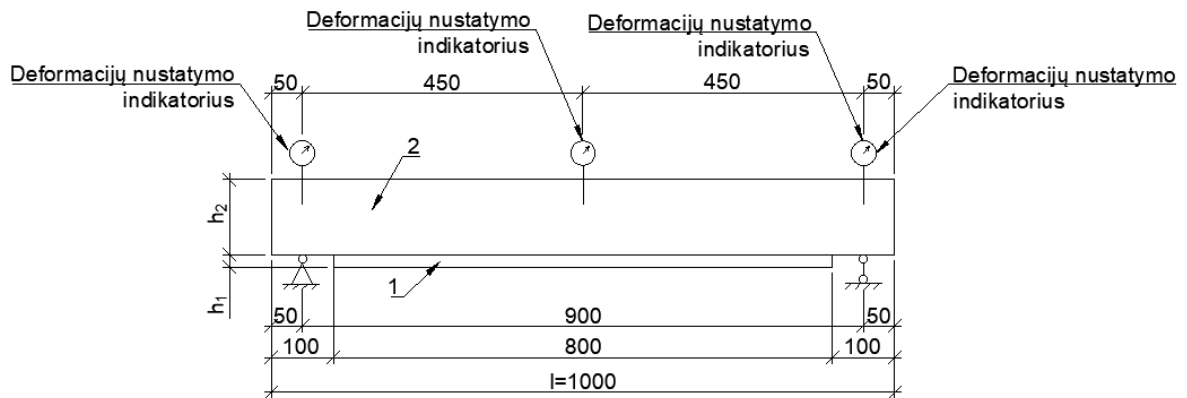
46 pav. Priklijuota plienine juosta armuotų sijų suirimas



47 pav. Kraštuose savisriegiais suvaržytos plienine juosta armuotos sijos suirimas

### 2.3.3.2. Bandinių įlinkių nustatymas

Lenkimo bandimo metu, taip pat atlikti įlinkių matavimai. Ištirtos visos dešimt sijų: viena nearmuota; viena armuota plienine juosta suvaržyta savisriegiais; dvi armuotos priklijuota plienine juosta; trys armuotos prikliuotu anglies pluoštu. Įlinkių gavimui, trijose sijos vietose (žr. 48 pav.) išdėstyti deformacijas fiksuojantys indikatoriai. Tiriama bandiniai apkraunami laipsniškai: apkrova didinama nuo 1 kN iki 21 kN. Apkrova didinama kas 3 kN, užrašant indikatoriuose fiksuojamus duomenis.



48 pav. Indikatorių išdėstymo ir sijos atrėmimo schema; 1- armuojančios medžiagos sluoksnis; 2- medžio sija (80x120x1000 mm)

**Indikatorių fiksavimas.** Indikatoriai priveržiami prie statinio lenkimo mašinos konstrukcijos, virš 48 pav. nurodytų vietų. Siūlas su svareliu apvyniojamas prietaiso atitinkamoje vietoje, įtempiamas ir svarelis pakeliamas į tokią poziciją, jog deformuojantis sijai jis niekur neatsiremtų. Padėtis fiksuojama pririšant siūlą prie sijoje įkaltos vinelės.



49 pav. Deformacijas matuojančių indikatorių fiksavimas

### 2.3.3.2.1. I bandinio (nearmuotos sijos) įlinkio nustatymas

Bandymai pradėti nuo nearmuotos medžio sijos, siekiant sužinoti šio elemento deformacijų (įlinkio) priklausomybę nuo apkrovimo. Nežinant tikslaus sijos tamprumo modulio, ribinių įtempių ar įlinkio reikšmių, apkrovimas didinamas kas 1,5 kN. Tokiu būdu gaunami tikslesni rezultatai žr. 16 lentelėje.

16 lentelė. Nearmuotos medžio sijos indikatorių ir apskaičiuotų įlinkių duomenys

Indikatorius Apkrova	I <sub>1</sub> (K.P.), mm	I <sub>2</sub> (V.), mm	I <sub>3</sub> (D.P.), mm	I <sub>1</sub> fiksuojamasis įlinkis, d <sub>1</sub> mm	I <sub>2</sub> fiksuojamasis įlinkis, d <sub>2</sub> mm	I <sub>3</sub> fiksuojamasis įlinkis, d <sub>3</sub> mm	Vidutinis įlinkis, d <sub>v</sub> mm
0 kN	78,25	86,21	10,40	0	0	0	0
1,5 kN	76,05	84,45	8,39	-2,2	-1,76	-2,01	-0,345
3,0 kN	75,39	84,09	7,76	-0,66	-0,36	-0,63	-0,63
4,5 kN	74,85	83,82	7,25	-0,54	-0,27	-0,51	-0,885
6,0 kN	74,34	83,58	6,70	-0,51	-0,24	-0,55	-1,175
7,5 kN	73,85	83,36	6,20	-0,49	-0,22	-0,5	-1,45
9,0 kN	73,26	83,15	5,63	-0,59	-0,21	-0,57	-1,82
10,5 kN	72,69	82,96	5,06	-0,57	-0,19	-0,57	-2,2
12,0 kN	72,15	82,75	4,50	-0,54	-0,21	-0,56	-2,54
13,5 kN	71,56	82,56	3,91	-0,59	-0,19	-0,59	-2,94
15,0 kN	70,9	82,33	3,24	-0,66	-0,23	-0,67	-3,375
16,5 kN	69,95	82,00	2,40	-0,95	-0,33	-0,84	-3,94
18,0 kN	68,95	81,54	1,30	-1,05	-0,46	-1,1	-4,555
19,5 kN	67,8	81,12	0,22	-1,1	-0,42	-1,08	-5,225
21,0 kN	66,84	80,35	19,97	-0,96	-0,77	-1,19	-5,53
22,3 kN (suirimas)	nematuota	nematuota	nematuota	-	-	-	-

Įlinkis iš pateiktų indikatoriaus duomenų apskaičiuojamas pagal formulę:

$$d = n_i - n_0$$

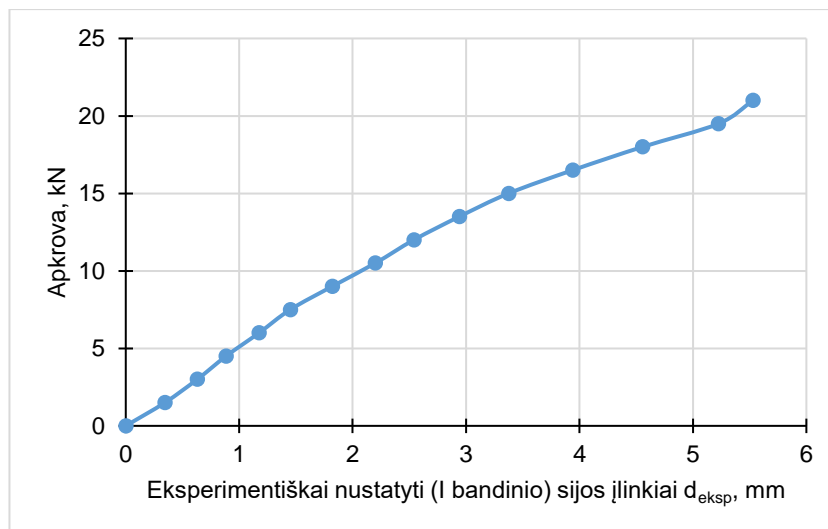
čia:

$$(2.3.3.2.1.1)$$



$n_i$  – indikatoriaus atskaita i-tuoju apkrovimu;  $n_0$  – pradinė indikatoriaus atskaita

Nustatyta, jog maksimalus nearmuoto elemento įlinkis jį veikiant koncentruota 21 kN apkrova – 5,53 mm.



50 pav. Eksperimentiškai gautų nearm. sij. įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikas

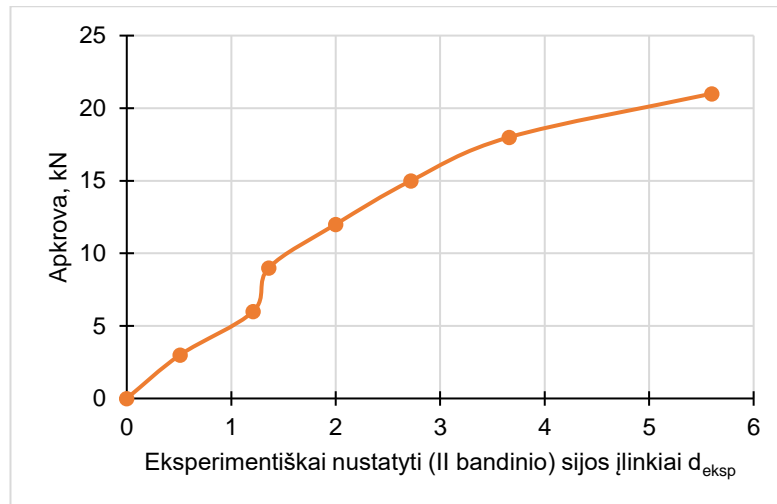
### 2.3.3.2.2. II bandinio (armuota sija) įlinkio nustatymas

Kompozitinio elemento, suvaržyto plienine juosta su medsraigčiais, įlinkis gaunamas pagal bandymų metu nustatytus matavimų rezultatus žr. 17 lentelė. Žinant ribinę nearmuoto elemento apkrovimo reikšmę, bandinį veikianti jėga didinama kas 3,0 kN iki 21,0 kN. Tolimesnis apkrovimas vykdomas iki visiško elemento suirimo, nuėmus tyrimams naudotus indikatorius.

17 lentelė. Armuotos sijos (II bandinio) indikatorių ir apskaičiuotų įlinkių duomenys

Indikatorius Apkrova	I <sub>1</sub> (K.P.), mm	I <sub>2</sub> (V.), mm	I <sub>3</sub> (D.P.), mm	I <sub>1</sub> fiksuojamasis įlinkis, $d_1$ mm	I <sub>2</sub> fiksuojamasis įlinkis, $d_2$ mm	I <sub>3</sub> fiksuojamasis įlinkis, $d_3$ mm	Vidutinis įlinkis, $d_v$ mm
0 kN	88,75	64,1	51,36	0	0	0	0
3,0 kN	84,46	60,56	47,55	-4,29	-3,54	-3,81	-0,51
6,0 kN	83,12	60,03	46,43	-1,34	-0,53	-1,12	-1,21
9,0 kN	82,86	59,51	45,35	-0,26	-0,52	-1,08	-1,36
12,0 kN	81,79	59,05	44,22	-1,07	-0,46	-1,13	-2
15,0 kN	80,49	58,45	42,88	-1,3	-0,6	-1,34	-2,72
18,0 kN	77,35	56,3	39,85	-3,14	-2,15	-3,03	-3,655
21,0 kN	73,6	54,9	36,92	-3,75	-1,4	-2,93	-5,595
24,6 kN (suirimas)	nematuota	nematuota	nematuota	-	-	-	-

Nustatyta, jog maksimalus armuoto elemento įlinkis jį veikiant koncentruota 21 kN apkrova – 5,6 mm. Šis įlinkis gautas panašus nei nearmuoto elemento, nes plieninė juosta tik dalinai išitraukė į bendrą darbą deformacijos metu.



51 pav. Eksperimentiškai gautų II bandinio įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikas

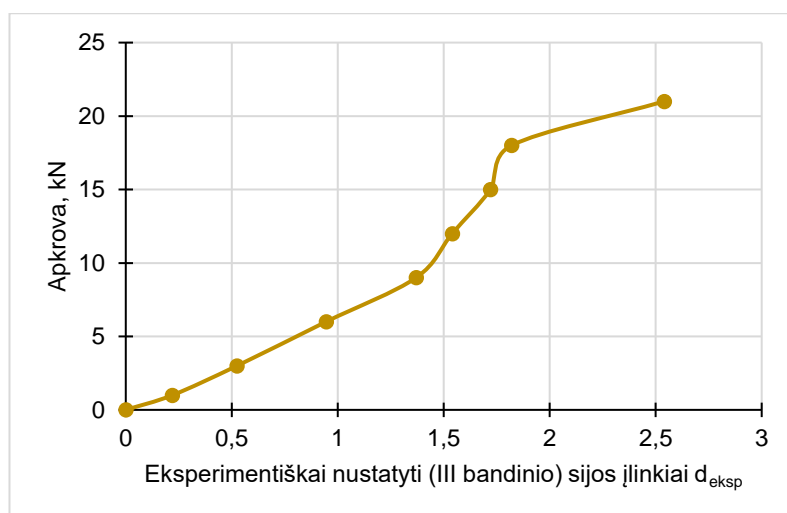
### 2.3.3.2.3. III bandinio (armuota sija) įlinkio nustatymas

Kompozitinio elemento, armuoto priklijuota plienine juosta, įlinkis gaunamas pagal bandymų metu nustatytus matavimų rezultatus žr. 18 lentelė. Žinant ribinę nearmuoto elemento apkrovimo reikšmę, bandinį veikianti jėga didinama kas 3,0 kN iki 21,0 kN. Tolimesnis apkrovimas vykdomas iki visiško elemento suirimo, nuėmus tyrimams naudotus indikatorius.

18 lentelė. Armuotos sijos (III bandinio) indikatorių ir apskaičiuotų įlinkių duomenys

Indikatorius Apkrova	I <sub>1</sub> (K.P.), mm	I <sub>2</sub> (V.), mm	I <sub>3</sub> (D.P.), mm	I <sub>1</sub> fiksuojamasis įlinkis, $d_1$ mm	I <sub>2</sub> fiksuojamasis įlinkis, $d_2$ mm	I <sub>3</sub> fiksuojamasis įlinkis, $d_3$ mm	Vidutinis įlinkis, $d_v$ mm
0 kN	27,69	40,85	70,56	0	0	0	0
1 kN	28,28	40,5	71,11	-0,59	-0,35	-0,55	-0,22
3,0 kN	28,92	40,2	71,68	-0,64	-0,3	-0,57	-0,525
6,0 kN	29,77	39,8	72,47	-0,85	-0,4	-0,79	-0,945
9,0 kN	30,57	39,42	73,28	-0,8	-0,38	-0,81	-1,37
12,0 kN	31,32	38,67	74,03	-0,75	-0,75	-0,75	-1,37
15,0 kN	32,28	37,73	74,86	-0,96	-0,94	-0,83	-1,325
18,0 kN	33,19	37,3	75,8	-0,91	-0,43	-0,94	-1,82
21,0 kN	34,37	36,73	77,2	-1,18	-0,57	-1,4	-2,54
25,1 kN (suirimas)	nematuota	nematuota	nematuota	-	-	-	-

Nustatyta, jog maksimalus armuoto elemento įlinkis jį veikiant koncentruota 21 kN apkrova – 2,54 mm.



52 pav. Eksperimentiškai gautų III bandinio įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikas

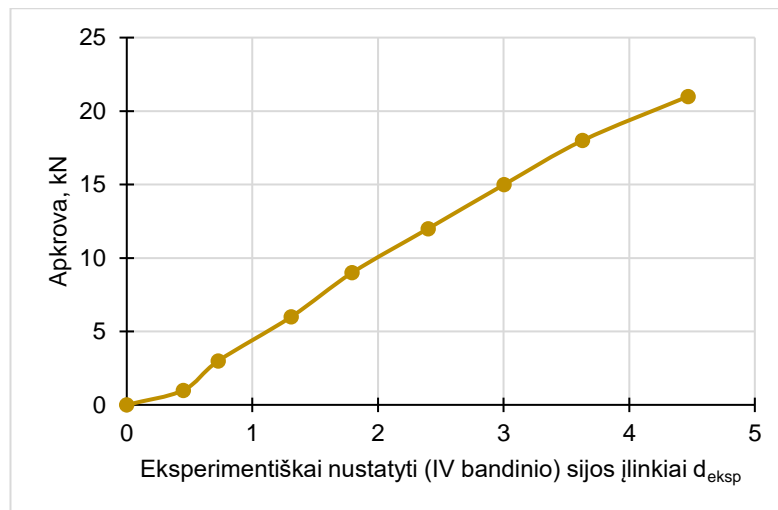
#### IV bandinio (armuota sija) įlinkio nustatymas

Kompozitinio elemento, armuoto priklijuota plienine juosta, įlinkis gaunamas pagal bandymų metu nustatytus matavimų rezultatus žr.19 lentelė. Žinant ribinę nearmuoto elemento apkrovimo reikšmę, bandinį veikianti jėga didinama kas 3,0 kN iki 21,0 kN. Tolimesnis apkrovimas vykdomas iki visiško elemento suirimo, nuėmus tyrimams naudotus indikatorius.

19 lentelė. Armuotos sijos (IV bandinio) indikatorių ir apskaičiuotų įlinkių duomenys

Indikatorius Apkrova	I <sub>1</sub> (K.P.), mm	I <sub>2</sub> (V.), mm	I <sub>3</sub> (D.P.), mm	I <sub>1</sub> fiksuojamasis įlinkis, $d_1$ mm	I <sub>2</sub> fiksuojamasis įlinkis, $d_2$ mm	I <sub>3</sub> fiksuojamasis įlinkis, $d_3$ mm	Vidutinis įlinkis, $d_v$ mm
0 kN	3,35	47,18	64,15	0	0	0	0
1 kN	5,12	46,08	65,48	-1,77	-1,1	-1,33	-0,45
3,0 kN	5,77	45,7	66,15	-0,65	-0,38	-0,67	-0,73
6,0 kN	6,68	45,4	67	-0,91	-0,3	-0,85	-1,31
9,0 kN	7,49	45,1	67,76	-0,81	-0,3	-0,76	-1,795
12,0 kN	8,33	44,89	68,55	-0,84	-0,21	-0,79	-2,4
15,0 kN	9,19	44,69	69,3	-0,86	-0,2	-0,75	-3,005
18,0 kN	10,08	44,42	70,2	-0,89	-0,27	-0,9	-3,63
21,0 kN	11,22	44,1	71,38	-1,14	-0,32	-1,18	-4,47
28,6 kN (suirimas)	nematuota	nematuota	nematuota	-	-	-	-

Nustatyta, jog maksimalus armuoto elemento įlinkis jį veikiant koncentruota 21 kN apkrova – 4,47 mm.



53 pav. Eksperimentiškai gautų IV bandinio įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikas

### 2.3.3.2.4. V bandinio (armuota sija) įlinkių nustatymas

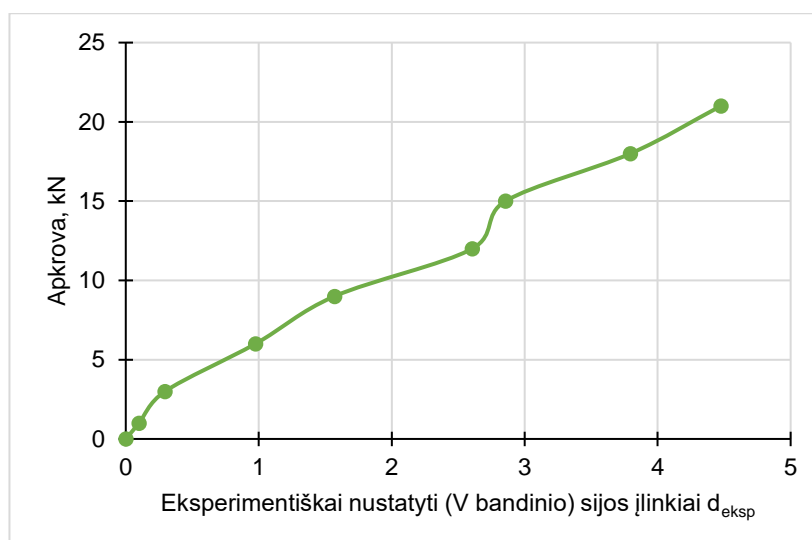
Kompozitinio elemento, armuoto priklijuotu medžio tašu, įlinkis gaunamas pagal bandymų metu nustatytus matavimų rezultatus žr.20 lentelė. Žinant ribinę narmuoto elemento apkrovimo reikšmę, bandinį veikianti jėga didinama kas 3,0 kN iki 21,0 kN. Tolimesnis apkrovimas vykdomas iki visiško elemento suirimo, nuėmus tyrimams naudotus indikatorius.

20 lentelė. Armuotos sijos (V bandinio) indikatorių ir apskaičiuotų įlinkių duomenys

Indikatorius Apkrova	I <sub>1</sub> (K.P.), mm	I <sub>2</sub> (V.), mm	I <sub>3</sub> (D.P.), mm	I <sub>1</sub> fiksuojamasis įlinkis, $d_1$ mm	I <sub>2</sub> fiksuojamasis įlinkis, $d_2$ mm	I <sub>3</sub> fiksuojamasis įlinkis, $d_3$ mm	Vidutinis įlinkis, $d_v$ mm
0 kN	45,07	23,57	87,18	0	0	0	0
1 kN	45,44	23,31	87,52	-0,37	-0,26	-0,34	-0,095
3,0 kN	46,18	22,8	88,2	-0,74	-0,51	-0,68	-0,295
6,0 kN	47,16	22,54	89,1	-0,98	-0,26	-0,9	-0,975
9,0 kN	48,11	22,2	90,02	-0,95	-0,34	-0,92	-1,57
12,0 kN	49,14	21,78	91,9	-1,03	-0,42	-1,88	-2,605
15,0 kN	50,42	21,27	92,14	-1,28	-0,51	-0,24	-2,855
18,0 kN	52,18	19,3	94,2	-1,76	-1,97	-2,06	-2,795
21,0 kN	54,94	18,7	96	-2,76	-0,6	-1,8	-4,475
26,4 kN (suirimas)	nematuota	nematuota	nematuota	-	-	-	-

Nustatyta, jog maksimalus armuoto elemento įlinkis jį veikiant koncentruota 21 kN apkrova – 4,48 mm.





54 pav. Eksperimentiškai gautų V bandinio įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikas

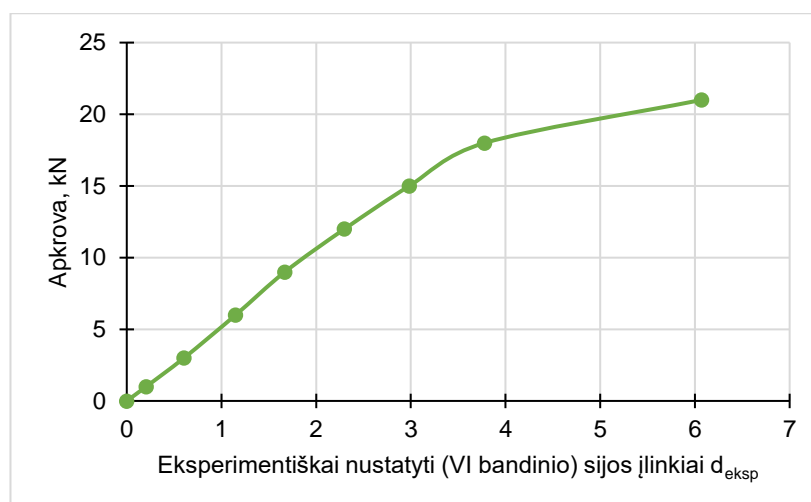
### 2.3.3.2.5. VI bandinio (armuota sija) įlinkių nustatymas

Kompozitinio elemento, armuoto priklijuotu medžio tašu, įlinkis gaunamas pagal bandymų metu nustatytus matavimų rezultatus žr.21 lentelė. Žinant ribinę nearmuoto elemento apkrovimo reikšmę, bandinį veikianti jėga didinama kas 3,0 kN iki 21,0 kN. Tolimesnis apkrovimas vykdomas iki visiško elemento suirimo, nuėmus tyrimams naudotus indikatorius.

21 lentelė. Armuotos sijos (VI bandinio) indikatorių ir apskaičiuotų įlinkių duomenys

Indikatorius Apkrova	I <sub>1</sub> (K.P.), mm	I <sub>2</sub> (V.), mm	I <sub>3</sub> (D.P.), mm	I <sub>1</sub> fiksuojamasis įlinkis, d <sub>1</sub> mm	I <sub>2</sub> fiksuojamasis įlinkis, d <sub>2</sub> mm	I <sub>3</sub> fiksuojamasis įlinkis, d <sub>3</sub> mm	Vidutinis įlinkis, d <sub>v</sub> mm
0 kN	64,32	16,76	5,42	0	0	0	0
1 kN	64,68	16,62	5,75	-0,36	-0,14	-0,33	-0,205
3,0 kN	65,39	16,34	6,4	-0,71	-0,28	-0,65	-0,605
6,0 kN	66,31	16,03	7,19	-0,92	-0,31	-0,79	-1,15
9,0 kN	67,22	15,7	7,98	-0,91	-0,33	-0,79	-1,67
12,0 kN	68,25	15,44	8,73	-1,03	-0,26	-0,75	-2,3
15,0 kN	69,28	15,1	9,75	-1,03	-0,34	-1,02	-2,985
18,0 kN	70,73	14,32	11,45	-1,45	-0,78	-1,7	-3,78
21,0 kN	73,3	13,9	14,3	-2,57	-0,42	-2,85	-6,07
25,1 kN (suirimas)	nematuota	nematuota	nematuota	-	-	-	-

Nustatyta, jog maksimalus armuoto elemento įlinkis jį veikiant koncentruota 21 kN apkrova – 6,07 mm.



55 pav. Eksperimentiškai gautų VI bandinio įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikas

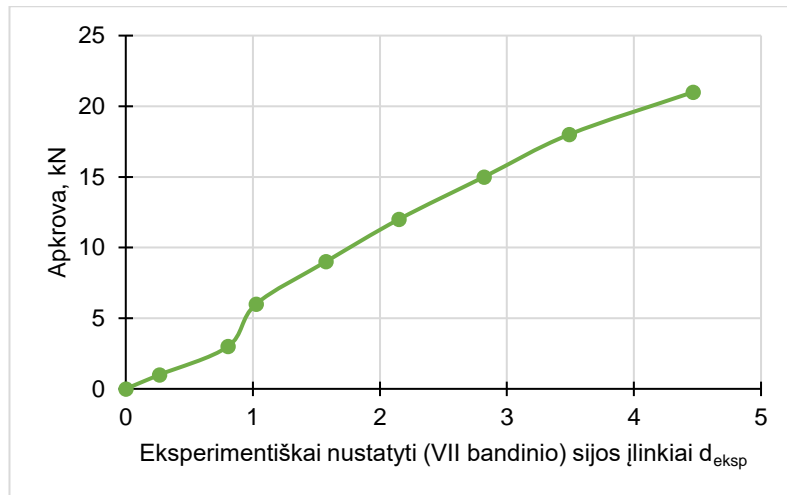
### 2.3.3.2.6. VII bandinio (armuota sija) įlinkių nustatymas

Kompozitinio elemento, armuoto priklijuotu medžio tašu, įlinkis gaunamas pagal bandymų metu nustatytus matavimų rezultatus žr.22 lentelė. Žinant ribinę nearmuoto elemento apkrovimo reikšmę, bandinį veikianti jėga didinama kas 3,0 kN iki 21,0 kN. Tolimesnis apkrovimas vykdomas iki visiško elemento suirimo, nuėmus tyrimams naudotus indikatorius.

22 lentelė. Armuotos sijos (VII bandinio) indikatorių ir apskaičiuotų įlinkių duomenys

Indikatorius Apkrova	I <sub>1</sub> (K.P.), mm	I <sub>2</sub> (V.), mm	I <sub>3</sub> (D.P.), mm	I <sub>1</sub> fiksuojamasis įlinkis, $d_1$ mm	I <sub>2</sub> fiksuojamasis įlinkis, $d_2$ mm	I <sub>3</sub> fiksuojamasis įlinkis, $d_3$ mm	Vidutinis įlinkis, $d_v$ mm
0 kN	96,45	76,01	69,76	0	0	0	0
1 kN	97,29	75,82	69,83	-0,84	-0,19	-0,07	-0,265
3,0 kN	98,97	75,45	69,97	-1,68	-0,37	-0,14	-0,805
6,0 kN	99,82	75	70,46	-0,85	-0,45	-0,49	-1,025
9,0 kN	100,65	74,7	71,33	-0,83	-0,3	-0,87	-1,575
12,0 kN	101,5	74,35	72,33	-0,85	-0,35	-1	-2,15
15,0 kN	102,55	73,95	73,42	-1,05	-0,4	-1,09	-2,82
18,0 kN	103,81	73,3	74,8	-1,26	-0,65	-1,38	-3,49
21,0 kN	105,66	72,35	76,8	-1,85	-0,95	-2	-4,465
24,9 kN (suirimas)	nematuoja	nematuoja	nematuoja	-	-	-	-

Nustatyta, jog maksimalus armuoto elemento įlinkis jį veikiant koncentruota 21 kN apkrova – 4,47 mm.



56 pav. Eksperimentiškai gautų VII bandinio įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikas

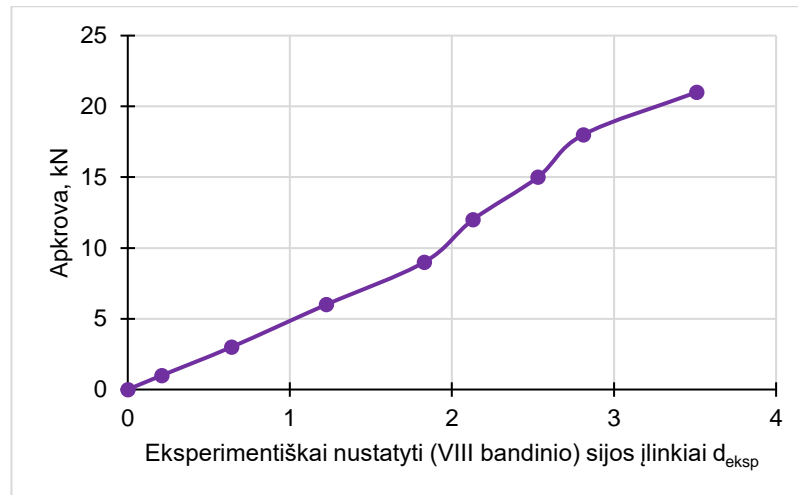
### 2.3.3.2.7. VIII bandinio (armuota sija) įlinkio nustatymas

Kompozitinio elemento, armuoto priklijuotu anglies pluoštu, įlinkis gaunamas pagal bandymų metu nustatytus matavimų rezultatus žr.23 lentelė. Žinant ribinę nearmuoto elemento apkrovimo reikšmę, bandinį veikianti jėga didinama kas 3,0 kN iki 21,0 kN. Tolimesnis apkrovimas vykdomas iki visiško elemento suirimo, nuėmus tyrimams naudotus indikatorius.

23 lentelė. Armuotos sijos (VIII bandinio) indikatorių ir apskaičiuotų įlinkių duomenys

Indikatorius Apkrova	I <sub>1</sub> (K.P.), mm	I <sub>2</sub> (V.), mm	I <sub>3</sub> (D.P.), mm	I <sub>1</sub> fiksuojamasis įlinkis, $d_1$ mm	I <sub>2</sub> fiksuojamasis įlinkis, $d_2$ mm	I <sub>3</sub> fiksuojamasis įlinkis, $d_3$ mm	Vidutinis įlinkis, $d_v$ mm
0 kN	19,58	57,5	3,8	0	0	0	0
1 kN	19,94	57,36	4,14	-0,36	-0,14	-0,34	-0,21
3,0 kN	20,66	57,09	4,82	-0,72	-0,27	-0,68	-0,64
6,0 kN	21,67	56,72	5,72	-1,01	-0,37	-0,9	-1,225
9,0 kN	22,64	56,29	6,55	-0,97	-0,43	-0,83	-1,83
12,0 kN	23,74	55,78	7,54	-1,1	-0,51	-0,99	-2,13
15,0 kN	25,04	55,03	8,8	-1,3	-0,75	-1,26	-2,53
18,0 kN	26,88	54,8	10,5	-1,84	-0,23	-1,7	-2,81
21,0 kN	29,9	51,7	12,7	-3,02	-3,1	-2,2	-3,51
28,2 kN (suirimas)	nematuota	nematuota	nematuota	-	-	-	-

Nustatyta, jog maksimalus armuoto elemento įlinkis jį veikiant koncentruota 21 kN apkrova – 3,51 mm.



57 pav. Eksperimentiškai gautų VIII bandinio įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikas

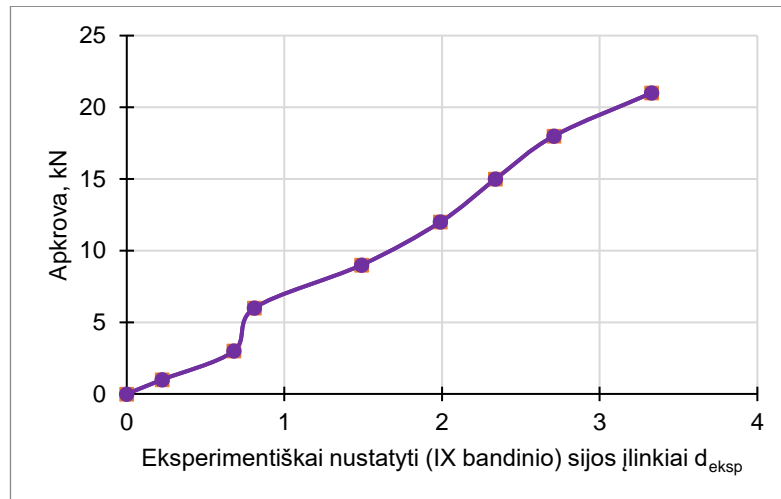
### 2.3.3.2.8. IX bandinio (armuota sija) įlinkio nustatymas

Kompozitinio elemento, armuoto priklijuotu anglies pluoštu, įlinkis gaunamas pagal bandymų metu nustatytus matavimų rezultatus žr.24 lentelė. Žinant ribinę nearmuoto elemento apkrovimo reikšmę, bandinį veikianti jėga didinama kas 3,0 kN iki 21,0 kN. Tolimesnis apkrovimas vykdomas iki visiško elemento suirimo, nuėmus tyrimams naudotus indikatorius.

24 lentelė. Armuotos sijos (IX bandinio) indikatorių ir apskaičiuotų įlinkių duomenys

Indikatorius Apkrova	I <sub>1</sub> (K.P.), mm	I <sub>2</sub> (V.), mm	I <sub>3</sub> (D.P.), mm	I <sub>1</sub> fiksuojamasis įlinkis, $d_1$ mm	I <sub>2</sub> fiksuojamasis įlinkis, $d_2$ mm	I <sub>3</sub> fiksuojamasis įlinkis, $d_3$ mm	Vidutinis įlinkis, $d_v$ mm
0 kN	40,95	50,68	16,72	0	0	0	0
1 kN	41,28	50,55	17,1	-0,33	-0,13	-0,38	-0,225
3,0 kN	41,94	50,3	17,85	-0,66	-0,25	-0,75	-0,68
6,0 kN	42,92	50	18,82	-0,98	-0,3	-0,97	-0,81
9,0 kN	43,93	49,7	19,77	-1,01	-0,3	-0,95	-1,49
12,0 kN	44,91	49,38	20,7	-0,98	-0,32	-0,93	-1,99
15,0 kN	46,01	49	22,9	-1,1	-0,38	-2,2	-2,34
18,0 kN	47,2	48,61	23,05	-1,19	-0,39	-0,15	-2,71
21,0 kN	49,04	47,8	25,85	-1,84	-0,81	-2,8	-3,33
31,4 kN (suirimas)	nematuota	nematuota	nematuota	-	-	-	-

Nustatyta, jog maksimalus armuoto elemento įlinkis jį veikiant koncentruota 21 kN apkrova – 3,33 mm.



58 pav. Eksperimentiškai gautų IX bandinio įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikas

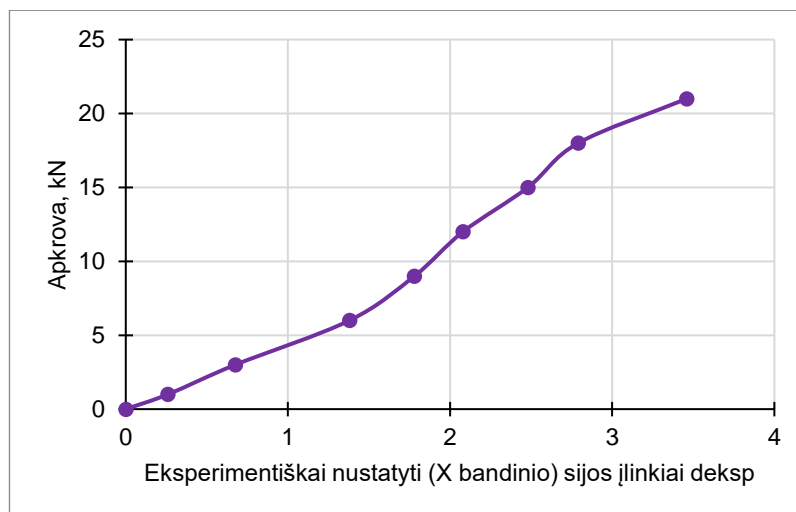
### 2.3.3.2.9. X bandinio (armuota sija) įlinkio nustatymas

Kompozitinio elemento, armuoto priklijuotu anglies pluoštu, įlinkis gaunamas pagal bandymų metu nustatytus matavimų rezultatus žr.25 lentelė. Žinant ribinę nearmuoto elemento apkrovimo reikšmę, bandinį veikianti jėga didinama kas 3,0 kN iki 21,0 kN. Tolimesnis apkrovimas vykdomas iki visiško elemento suirimo, nuėmus tyrimams naudotus indikatorius.

25 lentelė. Armuotos sijos (X bandinio) indikatorių ir apskaičiuotų įlinkių duomenys

Indikatorius Apkrova	I <sub>1</sub> (K.P.), mm	I <sub>2</sub> (V.), mm	I <sub>3</sub> (D.P.), mm	I <sub>1</sub> fiksuojamasis įlinkis, d <sub>1</sub> mm	I <sub>2</sub> fiksuojamasis įlinkis, d <sub>2</sub> mm	I <sub>3</sub> fiksuojamasis įlinkis, d <sub>3</sub> mm	Vidutinis įlinkis, d <sub>v</sub> mm
0 kN	61,8	32,95	58,8	0	0	0	0
1 kN	62,18	32,82	59,2	0,38	-0,13	0,4	0,26
3,0 kN	62,93	32,56	60	0,75	-0,26	0,8	0,675
6,0 kN	63,93	32,26	61,1	1	-0,3	1,1	1,380
9,0 kN	64,9	31,9	62,21	0,97	-0,36	1,11	1,780
12,0 kN	66,18	31,45	63,56	1,28	-0,45	1,35	2,080
15,0 kN	67,69	30,8	65,2	1,51	-0,65	1,64	2,480
18,0 kN	69,93	29,63	67,34	2,24	-1,17	2,14	2,79
21,0 kN	72,7	28,1	70,2	2,77	-1,53	2,86	3,46
29,0 kN (suirimas)	nematuota	nematuota	nematuota	-	-	-	-

Nustatyta, jog maksimalus armuoto elemento įlinkis jį veikiant koncentruota 21 kN apkrova – 3,46 mm.



59 pav. Eksperimentiškai gautų X bandinio įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikas

### 2.3.3.3. Tamprumo modulio nustatymas

Siekiant nustatyti nearmuoto medžio elemento tamprumo modulį, pagal gautus sijos vidutinius įlinkius žr.16 lentelė, braižoma įlinkių nuo veikiančios apkrovos kreivė žr.50 pav., kuri palyginama su teorinių skaičiavimų metu gauta kreive. Teoriškai keičiant elemento tamprumo modulio reikšmę brėžiama kreivė pagal kurią priimamas artimiausias tamprumo modulio rezultatas. Teoriškai įlinkis apskaičiuojamas kreivio formulę 2.3.3.3.1 įstačius į įlinkio formulę 2.3.3.3.2.

$$\frac{1}{r} = \frac{M_i}{E_i \cdot I_i} \quad (2.3.3.3.1)$$

čia:

$\frac{1}{r}$  – kreivis;  $M_i$  – lenkimo momentas, prie kurio matuojamas įlinkis;  $I_i$  – lenkiamo elemento inercijos momentas

$$d_i = s \cdot \frac{1}{r} \cdot L^2 \quad (2.3.3.3.2)$$

čia:

$s$  – apkrovimo schemos koeficientas, kai apkraunama koncentruota jėga per vidurį  $s = 1/12$ ;  $L$  – tarptraimis, mm

Eksperimentiškai nustatytų įlinkių priklausomybės grafikas nuo veikiančios apkrovos pateikiamas žr. 50 pav.

#### 2.3.3.3.1. Nearmuotos sijos (medžio elemento) tamprumo modulio nustatymas

Atliekami nearmuotos medžio sijos tamprumo modulio nustatymo skaičiavimai pagal 2.3.3.3 skyriuje pateiktas formules. Gauti rezultatai pateikiami 26 lentelėje.

26 lentelė. Teorinių įlinkių skaičiavimams reikalingų dėmenų skaičiavimas

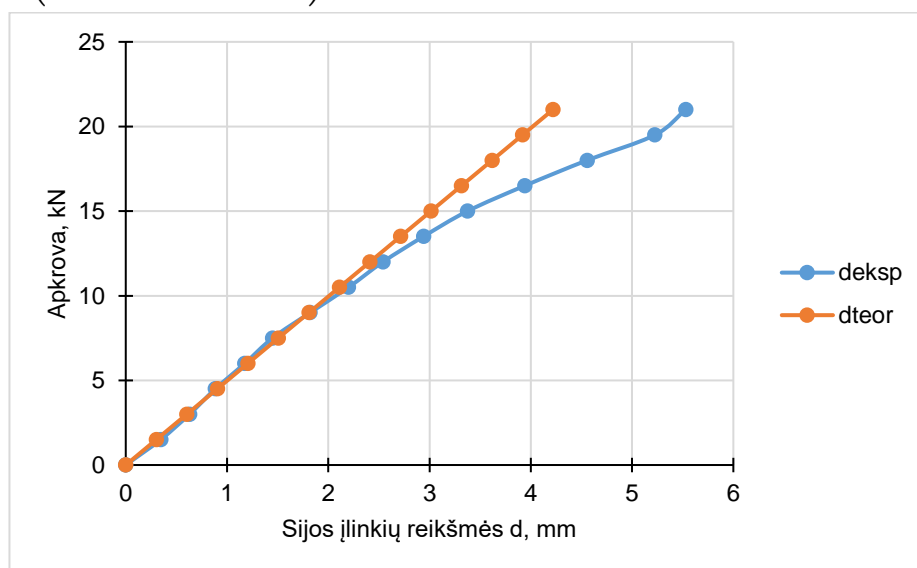
Apkrova, kN	Siją veikiantis lenkimo momentas, kNm	Kreivis 1/r, atitinkamu apkrovimo metu	Vidutinis įlinkis, $d_v$ mm
0	0	0	0
1,5	0,375	3,617	0,301
3,0	0,75	7,234	0,603

## 26 lentelės tęsinys

4,5	1,125	10,851	0,904
6,0	1,5	14,468	1,206
7,5	1,875	18,084	1,507
9,0	2,25	21,701	1,808
10,5	2,625	25,318	2,110
12,0	3	28,935	2,411
13,5	3,375	32,552	2,713
15,0	3,75	36,169	3,014
16,5	4,125	39,786	3,315
18,0	4,5	43,403	3,617
19,5	4,875	47,020	3,918
21,0	5,25	50,637	4,220
22,5 (suirimas)	5,625	-	-

Lenkiamo elemento tamprumo modulis nustatomas palyginus grafike pateiktas kreives žr.60 pav. ir patikslinamas pagal formulę pateikta LST EN 384:2016+A2 :

$$E_{0,mean} = \min \left( 1,1 \cdot E_{i,min}; \frac{\sum n_i \cdot E_i}{n} \right) \cdot k_n / 0,95 \quad (2.3.3.3.1.1)$$



**60 pav.** Nearmuoto elemento analitiškai ir eksperimentiškai gautų įlinkių priklausomybės nuo veikiančios apkrovos grafikų palyginimas

Panašiausia į eksperimentiškai gautų įlinkių kreivę, teorinių įlinkių kreivės trajektorija gaunama priėmus  $E = 9000 \text{ MPa}$  tamprumo modulį. Pagal 2.3.3.3.1.1 patikslinamas nustatytas nearmuotos medžio sijos tamprumo modulis:

$$E_{0,mean} = \min \left( 1,1 \cdot 9000; \frac{1 \cdot 9000}{1} \right) \cdot \frac{1,0}{0,95} = 8550 \text{ MPa}$$

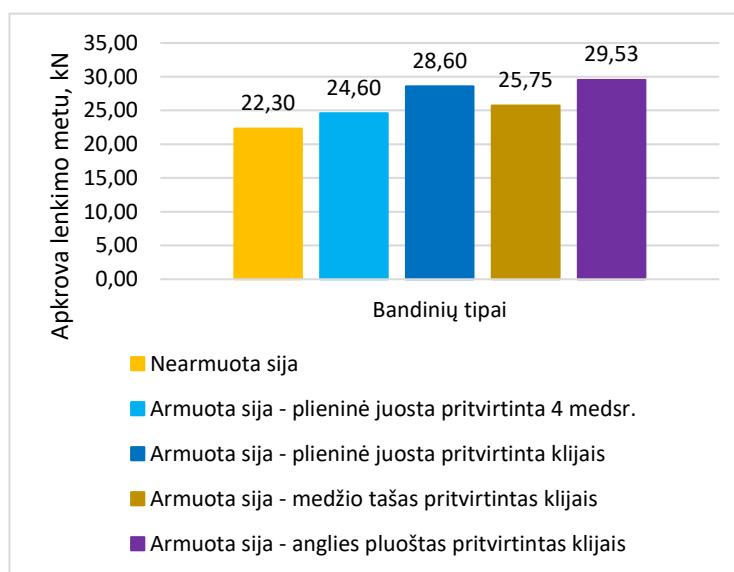
Atsižvelgiant į gautus rezultatus  $E_{0,mean} = 8550 \text{ MPa}$ , iš LST EN 338:2016 lentelėje pateiktų duomenų pagal vidutinį tamprumo išilgai pluošto modulį, ištirtą medieną galime priskirti C18 klasei. Atlikus daugiau nearmuotų medžio sijos bandymų tikėtina, jog tiriama mediena gali pasiekti ir C20 klasę.

## 2.3.4. Eksperimentinių tyrimų rezultatų palyginimas

Siekiant nustatyti efektyviausią lenkiamos medžio sijos stiprinimo būdą atlikti bandinių lenkimo bei įlinkių nustatymo bandymai. Remiantis analitinių skaičiavimų metu gautais armuojančių medžiagų kiekiais, devynioms 80x120x1000 mm matmenų sijoms sustiprinta tempiama zona, tempimo įtempius sumažinant 30%.

### 2.3.4.1. Lenkiamoji galia

Atliekant lenkimo bandymą buvo nustatoma didžiausia apkrovos vertė elemento suirties metu. Ištirta dešimt sijų: 1 nearmuota sija; 1 armuota sija su plienine plokštele galuose suvaržyta keturiais medsraigčiais; 3 armuotos sijos su priklijuota plienine plokštele; 3 armuotos sijos su priklijuotu anglies pluoštu. Gauti rezultatai pateikti 15 lentelėje jų palyginimą žr. 61 pav.



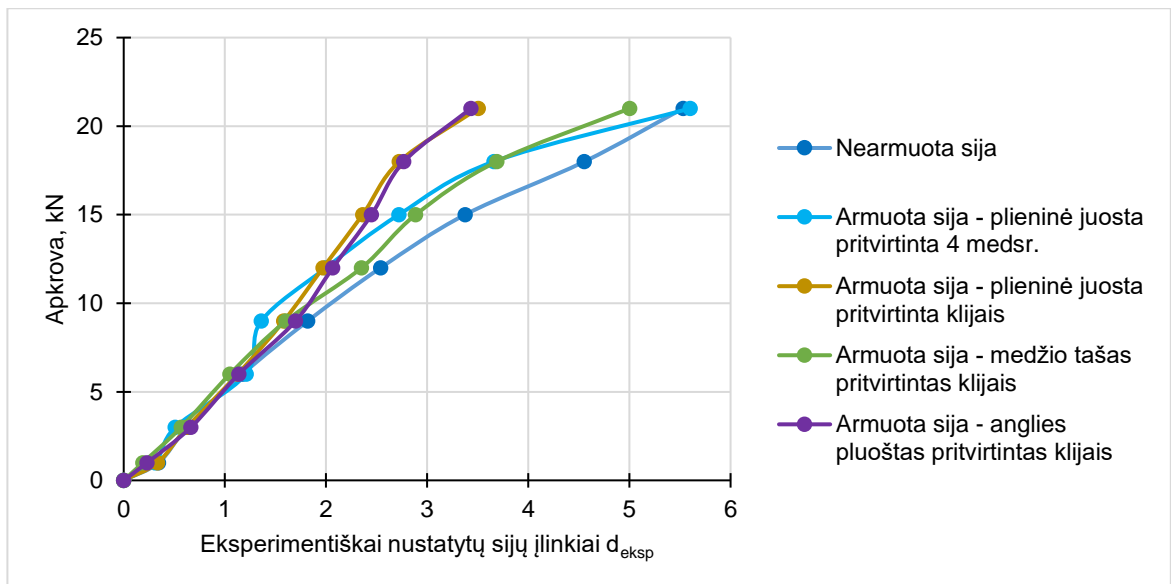
61 pav. Ištirtų bandinių ribinė (suirimo) apkrova lenkimo metu

Vykdamas bandymus, dviem sijoms nustatyta šlyties (kirpimo) suirtis, atsiradusi dėl medžio elemente esančių defektų pasiskirstymo. Rezultatai įvertinti remiantis ištirtais aštuoniais bandiniais. Atsižvelgiant į 54 pav. diagramoje pateiktus duomenis galima teigti, jog didžiausia sustiprinto skerspjūvio laikomoji galia pasiekta panaudojus anglies pluoštą, o mažiausia armuojant keturiais medsraigčiais pritvirtinta plienine juosta. Palyginus gautas vertes nustatyta, jog skerspjūvis sustiprintas: priklijuotu anglies pluoštu 32,4%, priklijuotu medžio tašu 15,5%, priklijuota plienine juosta 28,3%, pritvirtinta medsraigčiais plienine juosta 10,3%. Žemiausius rezultatus lėmė prastas armuojančios medžiagos sukibimas su medžio sija. Plieninė juosta nebuvo pilnai įdarbinta lenkimo metu, todėl medžio elementas pirmesnis prarado laikomąją galią. Tokiu būdu armuojant sijas reikalingas didesnis medsraigčių skaičius arba kitokio tipo plieno plokštelės (vinėtos) panaudojimas, kas padidintų dviejų elementų sukibimą.

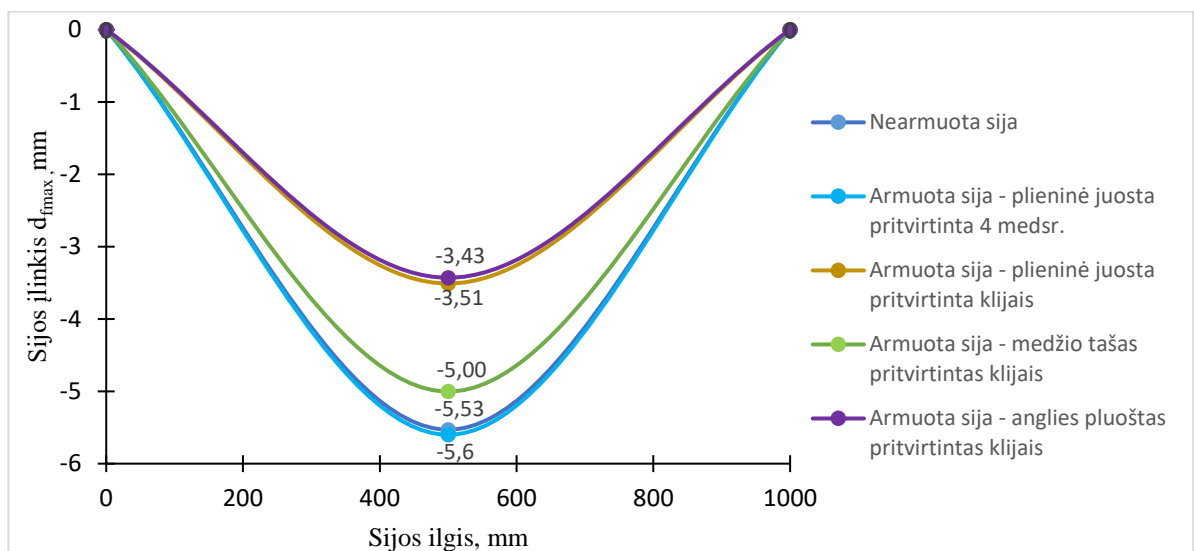
### 2.3.4.2. Kompozitinių elementų įlinkiai

Skirtingu apkrovimo metu kas 3,0 kN laipsniškai didinant apkrovą iki 21,0 kN, lenkiamoms sijoms atlikti įlinkio matavimai. Gauti rezultatai pateikiami 2.3.2. skyriuje. Vidutinius skirtingai armuotų bandinių įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikus žr. 62 pav., vidutinių vidurio sijos įlinkių ties 21,0 kN apkrova reikšmių palyginimą žr. 63 pav.





62 pav. Vidutinių, skirtingai armuotų sijų įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikų palyginimai



63 pav. Skirtingai armuotų skerspjūvių vidutiniai sijos vidurio įlinkiai veikiant 21,0 kN apkrovai

Maksimalūs skirtingai armuotų sijų įlinkiai negali būti įvertinti, dėl matavimų trūkumo kurie nebuvo atliekami siekiant išvengti prietaisų pažeidimo sijos deformavimosi metu. Atsižvelgiant į 62 pav. pateiktas bandinių įlinkių kreives, galima spręsti jog anglies pluoštu ir plieno juosta armuoti bandiniai laipsniškai didinant apkrovą deformuojasi panašiai. Tokia kreivių trajektorija pastebima, dėl armavimui naudotų medžiagų panašių tamprumo modulių. Atsižvelgiant į staigų sijos, armuotos plieno juosta suveržta medsraigčiais, įlinkių didėjimą galima teigti, jog tarp medžio elemento ir plieno juostos vyrauja mažas sukibimas. Tarpusavyje palyginus kreives galima daryti išvada jog esant didesniai dviejų sluoksnių sukibimui gaunami mažesni sustiprinto elemento įlinkiai. Palyginus 63 pav. pateiktus rezultatus nustatyta jog sustiprintų skerspjūvių įlinkiai ties 21,0 kN apkrova sumažinti: priklijuotu anglies pluoštu 37,9%, priklijuota plieno juosta 36,5%, priklijuotu medžio tašu 9,6%.

#### 2.4. Teorinių skaičiavimų pataisa

Atlikus eksperimentinius tyrimus nustatytas armuojamos medžio sijos tamprumo modulis,  $E_{0,mean} = 9000 \text{ MPa}$ . Norint tarpusavyje palyginti eksperimentinius ir teorinius rezultatus, tikslinami teoriniai armuojamų elementų skaičiavimai pagal 2.1.3 – 2.1.4 skyriuose pateiktas formules, esant

pilnam elementų skubimui. Atlikus skaičiavimus gaunamos teorinės, skirtingais būdais armuotų sijų, įlinkių reikšmės žr. 27-29 lentelėse, kurios lyginamos su eksperimentinėmis. Palyginimas pateikiamas 2.5 skyriuje.

**27 lentelė.** Plienine juosta armuotos sijos tarpiniai teoriniai įlinkių skaičiavimai

Apkrova, kN	Siją veikiantis lenkimo momentas, kNm	Kompozitinio elemento inercijos momentas $I_{comp}$ , m <sup>4</sup>	Kreisvis 1/r, atitinkamu apkrovimo metu	Vidutinis įlinkis, $d_{teor}$ mm
0	0	$1,73358 \cdot 10^{-5}$	0	0
1,0	0,25		1,602	0,134
3,0	0,75		4,807	0,401
6,0	1,5		9,614	0,801
9,0	2,25		14,421	1,202
12,0	3		19,228	1,602
15,0	3,75		24,035	2,003
18,0	4,5		28,842	2,404
21,0	5,25		33,649	2,804

Atlikus teorinius, plienine juosta armuoto elemento skaičiavimus nustatyta, jog maksimalus armuoto elemento įlinkis jį veikiant koncentruota 21 kN apkrova – 2,81 mm.

**28 lentelė.** Papildomu medžio sluoksniu armuotos sijos tarpiniai teoriniai įlinkių skaičiavimai

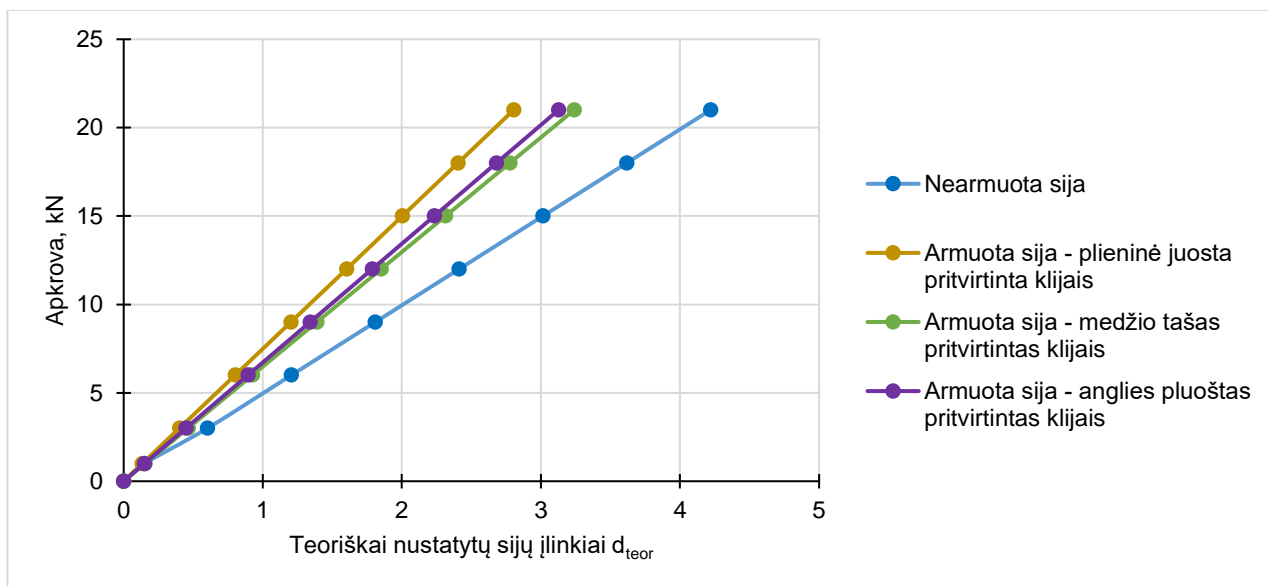
Apkrova, kN	Siją veikiantis lenkimo momentas, kNm	Kompozitinio elemento inercijos momentas $I_{comp}$ , m <sup>4</sup>	Kreisvis 1/r, atitinkamu apkrovimo metu	Vidutinis įlinkis, $d_{teor}$ mm
0	0	$1,50079 \cdot 10^{-5}$	0	0
1,0	0,25		1,851	0,154
3,0	0,75		5,553	0,463
6,0	1,5		11,105	0,925
9,0	2,25		16,658	1,388
12,0	3		22,211	1,851
15,0	3,75		27,763	2,314
18,0	4,5		33,316	2,776
21,0	5,25		38,868	3,239

Atlikus teorinius, papildomu medžio sluoksniu armuoto elemento skaičiavimus nustatyta, jog maksimalus armuoto elemento įlinkis jį veikiant koncentruota 21 kN apkrova – 3,24 mm.

**29 lentelė.** Anglies pluoštu armuotos sijos tarpiniai teoriniai įlinkių skaičiavimai

Apkrova, kN	Siją veikiantis lenkimo momentas, kNm	Kompozitinio elemento inercijos momentas $I_{comp}$ , m <sup>4</sup>	Kreisvis 1/r, atitinkamu apkrovimo metu	Vidutinis įlinkis, $d_{teor}$ mm
0	0	$1,55492 \cdot 10^{-5}$	0	0
1,0	0,25		1,786	0,149
3,0	0,75		5,359	0,447
6,0	1,5		10,719	0,893
9,0	2,25		16,078	1,340
12,0	3		21,437	1,786
15,0	3,75		26,797	2,233
18,0	4,5		32,156	2,680
21,0	5,25		37,515	3,126

Plienine juosta, medžio tašu ir anglies pluoštu armuotų sijų teoriškai apskaičiuotų įlinkių priklausomybės grafikų nuo veikiančios apkrovos palyginimą žr. 64 pav. Nearmuotos sijos priklausomybių grafikas imamas iš 2.3.3.3.1. skyriaus.



64 pav. Teoriškai apskaičiuotų, skirtingai armuotų sijų įlinkių priklausomybės nuo apkrovos grafikai

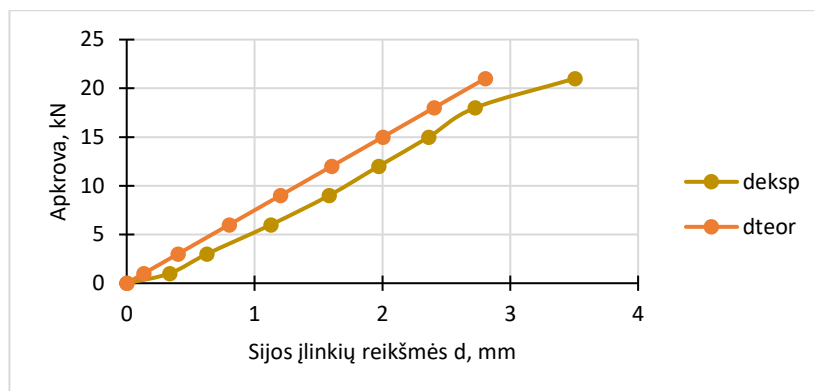
Atsižvelgiant į gautus duomenis matoma, jog mažiausius įlinkių rezultatus pasiekia sija armuota plienine juosta (įlinkiai sumažinti 33,5%). Panaši įlinkių kreivė gauta, skerspjūvį armuojant anglies pluoštu (įlinkiai sumažinti 25,8%). Žemiausiais rezultatais pasižymėjo medžio sluoksniu armuotas skerspjūvis (įlinkiai sumažinti 23,2%) . Pastebima, jog naudojant medžiagą su aukštesne tamprumo modulio verte gaunami žemesni įlinkio rezultatai.

## 2.5. Analitinių skaičiavimų ir eksperimentinių tyrimų metu gautų rezultatų palyginimas

Pagal atliktus analitinius skaičiavimus nustatyta, jog sijoje sumažinus tempimo įtempius 30% armuojant skirtingomis medžiagomis, esant pilnam sukibimui, mažiausiai sunaudojama plieno juostos arba anglies pluošto. Šį teiginį patvirtina eksperimentiškai gauti ribinių lenkimo apkrovų rezultatai, kuriuose pastebima jog būtent šiais būdais sustiprintos sijos padidino elemento laikomąją galią 32,4% ir 28,3%.

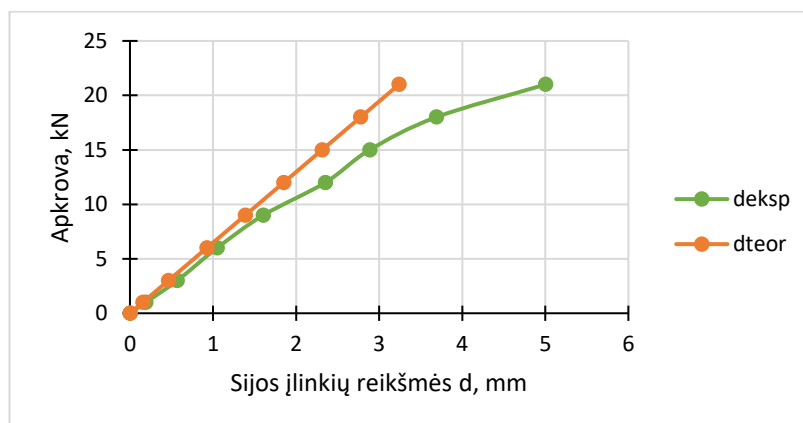
Eksperimentinių tyrimų metu pastebėta, jog tokiu atveju kai sija buvo armuota keturiais varžtais prisukta plieno juosta, gauti žemiausi sustiprinto skerspjūvio rezultatai. Tai lėmė mažas armuojančios medžiagos ir medžio elemento sluoksnių sukibimas. Šį faktą galima patvirtinti atliktais analitiniais skaičiavimais, jog nesant sukibimui reikalingas dešimtims kartu didesnis armuojančios medžiagos kiekis. Priešingu atveju panaudoto armuojančio sluoksnio nepakaks tempimo įtempiams sumažinti iki norimos ribos.

Nagrinėjant gautus įlinkių rezultatus pastebima, jog vyraujant mažesniai kompozitinio elemento sluoksnių sukibimui gaunamos įlinkių reikšmės yra artimesnės nearmuotam elementui. Eksperimentiškai ir patikslintų analitiškai gautų sijų įlinkių palyginimus žr. 65 - 67 pav.



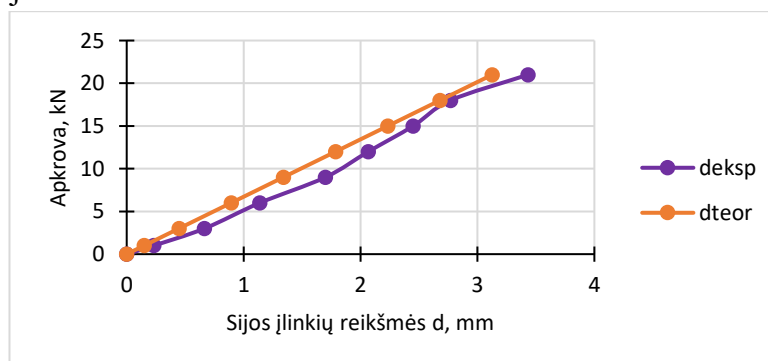
**65 pav.** Plienine juosta armuoto elemento analitiškai ir eksperimentiškai gautų įlinkių priklausomybės nuo veikiančios apkrovos grafikų palyginimas

Atsižvelgiant į gautus rezultatus pastebima, jog eksperimentiškai nustatytų įlinkių kreivės trajektorija simetriška analitiškai apskaičiuotų įlinkių kreivei. Iš ko galima spręsti, kad bandymai buvo atlikti tinkamai. Nustatyta, jog eksperimentiškai gauta įlinkių reikšmė, ties 21 kN apkrova 20,0% mažesnė nei apskaičiuota analitiškai. Rezultatų skirtumą galėjo lemti eksperimentinių bandinių sluoksnių sukibimo įtaka, medžio sijos natūralių defektų kiekis bei jų išsidėstymas.



**66 pav.** Medžio tašu armuoto elemento analitiškai ir eksperimentiškai gautų įlinkių priklausomybės nuo veikiančios apkrovos grafikų palyginimas

Pagal gautą grafiką žr. 66 pav. matomas didesnis eksperimentiškai nustatytų įlinkių kreivės atotrūkis nuo teoriškai apskaičiuotų įlinkių kreivės. Siją veikiant 21,0 kN apkrova eksperimentinių įlinkių reikšmė nuo analitinių skiriasi 35,2%. Atsižvelgiant į rezultatus tikėtina, jog eksperimentiniams bandiniams naudota armuojančio medžio sluoksnio mediena buvo žemesnės klasės nei medžio sijos.



**67 pav.** Anglies pluoštu armuoto elemento analitiškai ir eksperimentiškai gautų įlinkių priklausomybės nuo veikiančios apkrovos grafikų palyginimas

Atsižvelgiant į gautus rezultatus pastebima, jog eksperimentiškai nustatytų įlinkių kreivės trajektorija simetriška analitiškai apskaičiuotų įlinkių kreivei. Iš ko galima spręsti, kad bandymai buvo atlikti tinkamai. Nustatyta, jog eksperimentiškai gauta įlinkių reikšmė, ties 21 kN apkrova 8,8% mažesnė nei apskaičiuota analitiškai. Tikėtina, jog mažą rezultatų skirtumą lėmė kokybiškas anglies pluošto ir medžio sijos sukibimas.

Įvertinus analitiškai ir eksperimentiškai gautus sijų įlinkius galima teigti, jog vyraujant 1 - 5 kN apkrovai, skirtingai armuotų elementų įlinkių reikšmės gaunamos panašios. Didėjant apkrovai pastebimas įlinkių kitimas bei skirtumas tarp naudojamos armuojančios medžiagos. Atsižvelgus į atliktus tyrimus galima teigti, jog stiprinant medžio elementą anglies pluoštu gaunamos mažiausios deformacijos.

## Išvados

1. Išnagrinėjus įvairią literatūrą pastebėta, jog racionaliausias lenkiamų medinių elementų stiprinimo būdas yra tempiamos zonos armavimas polimeriniais pluoštais. Šis sprendinys lemia didžiausia kompozitinio elemento galios padidėjimą bei pasižymi mažiausiomis laiko sąnaudomis jį pritaikant. Efektyviausia stipriai pažeista medžio elementą armuoti anglies pluoštu, apgaubiant puse apatinės sijos skerspjūvio. Tokiu būdu padidinamas elemento stiprumas lenkiant bei atsparumas šlyčiai. Konstrukcijų stiprinimas efektyvus tik tuo atveju, kai yra įvertintos eksploataavimo sąlygos, atmosferos poveikio įtaka bei pasirinkta tinkama armavimo technologija.
2. Polimeriniai pluoštai nėra atsparūs aukštos temperatūros poveikiams, kylant temperatūrai jų standumas ir stiprumas mažėja. Didžiausių atsparumu temperatūros pokyčiams pasižymi anglies pluoštas. Tokiu būdu armuotų elementų stiprumą gaisro metu labiausiai lemia greitas klijų savybių kitimas. Siekiant apsaugoti sustiprintas medžio konstrukcijas nuo gaisro poveikio rekomenduojama: pluoštinę medžiaga apsaugoti papildomu medžio sluoksniu, uždenkti mineraliniu pluoštu (akmens vata), padengti ugniai atspariais tinkais.
3. Atlikus analitinius skaičiavimus nustatyta, jog armuojant sijos tempiamą zoną skirtingomis medžiagomis, medžio elemente sumažinant tempimo įtempius 30% bei vyraujant pilnam sukibimui, mažiausiai sunaudojama plieno juostos arba anglies pluošto. Sukibimui tarp sluoksnių mažėjant, stiprinimas tampa vis mažiau efektyvus. Atsižvelgiant į tai galima teigti, jog vykdant konstrukcijų armavimo darbus svarbu užtikrinti kokybišką sukibimą, priešingu atveju įgyvendinti sprendiniai nėra tinkami.
4. Analitinių skaičiavimų metu išsiaiškinta, jog efektyviau didinti stiprinančio sluoksnio plotį nei aukščio dedamąją, nes tokiu būdu medžiaga perima 0, 5- 4% didesnius tempimo įtempius, o medžio sija 0, 5- 4% mažesnius tempimo įtempius.
5. Eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, jog didžiausią apkrovą elemento suirties metu galima pasiekti armuojant anglies pluoštu. Atsižvelgiant į atliktus bandymus pastebėta, jog mažėjant armuojančio medžiagos ir medžio elemento sluoksnių sukibimui gaunamos įlinkių reikšmės yra artimesnės nearmuotam elementui.
6. Įvertinus analitiškai ir eksperimentiškai atliktų tyrimų rezultatus galima teigti, jog armuojant medžio elementą anglies pluoštu gaunami mažiausi sijos įlinkiai bei didžiausi laikomosios galios rezultatai. Ekonominiu požiūriu įvertinus stiprinimo būdus, armavimas anglies pluoštu tinkamesnis didelių deformacijų mažinimui, mažesnėms galima naudoti plieno juostas.

## Literatūros sąrašas

1. European Commission. *The European Green Deal*. , 2019.
2. *STATINIŲ KONSTRUKCIJŲ TECHNINĖS BŪKLĖS VERTINIMAS* Vilnius "Technika" 2012.
3. MALESZA, J. Possible Defects in Wood, Wood Parameters Variability and some of its Influence on Quality of Building Structure. *Engineering Structures and Technologies*, Apr 03, 2015, vol. 7, no. 2. pp. 67-80. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3846/2029882X.2016.1123895> CrossRef. ISSN 2029-882X. DOI 10.3846/2029882X.2016.1123895.
4. KUTUT, V. *Paveldo Statinių Tvarkybos Technologijos*. VGTU leidykla TECHNIKA, 2014, 2014 ISBN 978-609-457-661-4.
5. GOODELL, B., WINANDY, J.E. and MORRELL, J.J. Fungal Degradation of Wood: Emerging Data, New Insights and Changing Perceptions. *Coatings (Basel)*, Dec 01, 2020, vol. 10, no. 12. pp. 1210. Available from: <https://search.proquest.com/docview/2470448273> CrossRef. ISSN 2079-6412. DOI 10.3390/coatings10121210.
6. DEGL&#39;INNOCENTI, M., et al. Evaluation of the Mechanical Contribution of Wood Degraded by Insects in Old Timber Beams through Analytical Calculations and Experimental Tests. *Construction & Building Materials*, Jul 11, 2022, vol. 339. pp. 127653. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127653> CrossRef. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.127653.
7. CORRADI, M., et al. Local FRP Reinforcement of Existing Timber Beams. *Composite Structures*, Feb 15, 2021, vol. 258. pp. 113363. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113363> CrossRef. ISSN 0263-8223. DOI 10.1016/j.compstruct.2020.113363.
8. ŚLIWA-WIECZOREK, K., OSTROWSKI, K.A., JASKOWSKA-LEMAŃSKA, J. and KAROLAK, A. The Influence of CFRP Sheets on the Load-Bearing Capacity of the Glued Laminated Timber Beams Under Bending Test. *Materials*, Jul 18, 2021, vol. 14, no. 14. pp. 4019. Available from: <https://search.proquest.com/docview/2554605333> CrossRef. ISSN 1996-1944. DOI 10.3390/ma14144019.
9. HALICKA, A. and ŚLÓSZARZ, S. Strengthening of Timber Beams with Pretensioned CFRP Strips. *Structures (Oxford)*, Dec, 2021, vol. 34. pp. 2912-2921. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2021.09.055> CrossRef. ISSN 2352-0124. DOI 10.1016/j.istruc.2021.09.055.
10. FRANKE, S., FRANKE, B. and HARTE, A.M. Failure Modes and Reinforcement Techniques for Timber Beams – State of the Art. *Construction & Building Materials*, Oct 30, 2015, vol. 97. pp. 2-13. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.021> CrossRef. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.021.
11. YEBOAH, D. and GKANTOU, M. Investigation of Flexural Behaviour of Structural Timber Beams Strengthened with NSM Basalt and Glass FRP Bars. *Structures (Oxford)*, Oct, 2021, vol. 33. pp. 390-405. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.044> CrossRef. ISSN 2352-0124. DOI 10.1016/j.istruc.2021.04.044.
12. GAND, A.K., et al. Behaviour of Strengthened Timber Beams using Near Surface Mounted Basalt Fibre Reinforced Polymer (BFRP) Rebars. *Engineering Solid Mechanics (Print)*, 2018, vol. 6. pp. 341-352. Available from: [https://explore.openaire.eu/search/publication?articleId&#61;core\\_ac\\_uk::34004674eee63e73c49c0435ddcc72cb](https://explore.openaire.eu/search/publication?articleId&#61;core_ac_uk::34004674eee63e73c49c0435ddcc72cb) CrossRef. ISSN 2291-8744. DOI 10.5267/j.esm.2018.7.001.
13. WADOWIAK-POSTULAK, A. Numerical, Theoretical and Experimental Models of the Static Performance of Timber Beams Reinforced with Steel, Basalt and Glass Pre-Stressed Bars. *Composite Structures*, Feb 01, 2023, vol. 305. pp. 116479. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116479> CrossRef. ISSN 0263-8223. DOI 10.1016/j.compstruct.2022.116479.
14. NIANQIANG, Z. and WEIXING, S. *Experimental Investigations of Timber Beams Strengthened by CFRP and Rebars Under Bending*. IOP Publishing, -04, 2017 ISBN 1757-8981. DOI 10.1088/1757-899x/191/1/012043.
15. JASIEŃKO, J. and NOWAK, T.P. Solid Timber Beams Strengthened with Steel Plates – Experimental Studies. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 63. pp. 81-88. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814003377> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.020.
16. JURKIEWIEZ, B., DURIF, S., BOUCHAR, A. and GRAZIDE, C. Experimental and Analytical Study of Hybrid Steel-Timber Beams in Bending. *Structures*, 2022, vol. 39. pp. 1231-1248. Available from:

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012422002235> ISSN 2352-0124. DOI 10.1016/j.istruc.2022.03.055.
17. YORESTA, F.S. and NUGROHO, N. Strengthening of Timber Beam with Cold-Formed Steel Plates. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, Feb 14, 2023, vol. 14, no. 1. pp. 306 CrossRef. ISSN 2180-3242. DOI 10.30880/ijscet.2023.14.01.028.
18. NOWAK, T., JASIEŃKO, J., KOTWICA, E. and KRZOSEK, S. *Strength Enhancement of Timber Beams using Steel Plates -Review and Experimental Tests.* , 2016 DOI 10.12841/wood.1644-3985.150.06.
19. IGNÁCIO LIMA GADELHA JARDIM, P., et al. Numerical Analysis of Hardwood Timber Beams Reinforced with Steel Plate Screwed. *Revista Árvore*, Jan 01, 2022, vol. 46. Available from: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-67622022000100233&lng=en&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622022000100233&lng=en&tlng=en) CrossRef. ISSN 1806-9088. DOI 10.1590/1806-908820220000019.
20. KHELIFA, M., AUCHET, S., MÉAUSOONE, P.-. and CELZARD, A. Finite Element Analysis of Flexural Strengthening of Timber Beams with Carbon Fibre-Reinforced Polymers. *Engineering Structures*, Oct 01, 2015, vol. 101. pp. 364-375. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.07.046> CrossRef. ISSN 0141-0296. DOI 10.1016/j.engstruct.2015.07.046.
21. JIAN, B., et al. A Review on Strengthening of Timber Beams using Fiber Reinforced Polymers. *Journal of Renewable Materials*, 2022, vol. 10, no. 8. pp. 2073-2098 CrossRef. ISSN 2164-6341. DOI 10.32604/jrm.2022.021983.
22. D'AMBRISI, A., FOCACCI, F. and LUCIANO, R. Experimental Investigation on Flexural Behavior of Timber Beams Repaired with CFRP Plates. *Composite Structures*, 2014, vol. 108. pp. 720-728. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822313005187> ISSN 0263-8223. DOI 10.1016/j.compstruct.2013.10.005.
23. KRAMÁR, S., et al. Basalt-Fiber-Reinforced Polyvinyl Acetate Resin: A Coating for Ductile Plywood Panels. *Materials*, Dec 20, 2019, vol. 13, no. 1. pp. 49. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31861838> PubMed. ISSN 1996-1944. DOI 10.3390/ma13010049.
24. DE LA ROSA GARCÍA, P., ESCAMILLA, A.C. and NIEVES GONZÁLEZ GARCÍA, M. Bending Reinforcement of Timber Beams with Composite Carbon Fiber and Basalt Fiber Materials. *Composites. Part B, Engineering*, Dec 01, 2013, vol. 55. pp. 528-536. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.07.016> CrossRef. ISSN 1359-8368. DOI 10.1016/j.compositesb.2013.07.016.
25. KHELIFA, M., AUCHET, S., MÉAUSOONE, P.-. and CELZARD, A. Finite Element Analysis of Flexural Strengthening of Timber Beams with Carbon Fibre-Reinforced Polymers. *Engineering Structures*, Oct 01, 2015, vol. 101. pp. 364-375. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.07.046> CrossRef. ISSN 0141-0296. DOI 10.1016/j.engstruct.2015.07.046.
26. ŚLIWA-WIECZOREK, K., OSTROWSKI, K.A., JASKOWSKA-LEMAŃSKA, J. and KAROLAK, A. The Influence of CFRP Sheets on the Load-Bearing Capacity of the Glued Laminated Timber Beams Under Bending Test. *Materials*, Jul 18, 2021, vol. 14, no. 14. pp. 4019. Available from: <https://search.proquest.com/docview/2554605333> CrossRef. ISSN 1996-1944. DOI 10.3390/ma14144019.
27. BAZLI, M., HEITZMANN, M. and VILLACORTA HERNANDEZ, B. Durability of Fibre-Reinforced Polymer-Wood Composite Members: An Overview. *Composite Structures*, 2022, vol. 295. pp. 115827. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822322005979> ISSN 0263-8223. DOI 10.1016/j.compstruct.2022.115827.
28. CORRADI, M., BORRI, A., CASTORI, G. and SPERANZINI, E. Fully Reversible Reinforcement of Softwood Beams with Unbonded Composite Plates. *Composite Structures*, 2016, vol. 149. pp. 54-68. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822316302537> ISSN 0263-8223. DOI 10.1016/j.compstruct.2016.04.014.
29. HUANG, S., YAN, L. and KASAL, B. Flexural Behaviour of Wood Beams Strengthened by Flax-Glass Hybrid FRP Subjected to Hygrothermal and Weathering Exposures. *Construction and Building Materials*, 2023, vol. 365. pp. 130076. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822037321> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.130076.
30. VAHEDIAN, A., SHRESTHA, R. and CREWS, K. Bond Strength Model for Externally Bonded FRP-to-Timber Interface. *Composite Structures*, Sep 15, 2018, vol. 200. pp. 328-339. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.152> CrossRef. ISSN 0263-8223. DOI 10.1016/j.compstruct.2018.05.152.



31. JUVANDES, L.F.P. and BARBOSA, R.M.T. Bond Analysis of Timber Structures Strengthened with FRP Systems. *Strain*, Apr, 2012, vol. 48, no. 2. pp. 124-135. Available from: <https://api.istex.fr/ark:/67375/WNG-SHR3MJV8-B/fulltext.pdf> Materials Research Database. ISSN 0039-2103. DOI 10.1111/j.1475-1305.2011.00804.x.
32. LAU, D., QIU, Q., ZHOU, A. and CHOW, C.L. Long Term Performance and Fire Safety Aspect of FRP Composites used in Building Structures. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 126. pp. 573-585. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816314593> ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.031.
33. HUANG, S., YAN, L., BACHTIAR, E.V. and KASAL, B. Durability of Epoxy and Polyurethane Bonded Timber-Hybrid FRP Joints Under Hygrothermal and Weathering Conditions. *Journal of Building Engineering*, 2022, vol. 58. pp. 104989. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710222009998> ISSN 2352-7102. DOI 10.1016/j.jobbe.2022.104989.
34. SCHÖBER, K., et al. FRP Reinforcement of Timber Structures. *Construction & Building Materials*, Oct 30, 2015, vol. 97. pp. 106-118. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.020> CrossRef. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.020.
35. KRZYWON, R. FRP Strengthening of Timber Structures Under the Elevated Temperature. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, Feb 01, 2019, vol. 471, no. 5. pp. 52049. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/471/5/052049> CrossRef. ISSN 1757-8981. DOI 10.1088/1757-899X/471/5/052049.
36. ZIGLER, R. and POKORNÝ, M. Fire Protection of Timber Structures Strengthened with Frp Materials. *Civil Engineering Journal*, Dec 01, 2015, vol. 24, no. 4. Available from: <https://search.proquest.com/docview/2383342257> CrossRef. ISSN 1805-2576. DOI 10.14311/CEJ.2015.04.0022.
37. RESCALVO, F.J., VALVERDE-PALACIOS, I., SUAREZ, E. and GALLEGO, A. Experimental Comparison of Different Carbon Fiber Composites in Reinforcement Layouts for Wooden Beams of Historical Buildings. *Materials*, Sep 21, 2017, vol. 10, no. 10. pp. 1113. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28934116> PubMed. ISSN 1996-1944. DOI 10.3390/ma10101113.
38. BAKALARZ, M.M. and KOSSAKOWSKI, P.G. Ductility and Stiffness of Laminated Veneer Lumber Beams Strengthened with Fibrous Composites. *Fibers*, Feb 01, 2022, vol. 10, no. 2. pp. 21. Available from: <https://search.proquest.com/docview/2632727358> CrossRef. ISSN 2079-6439. DOI 10.3390/fib10020021.
39. ANDRÉ, A. and KLIGER, R. *Strengthening of Timber Beams using Frp, with Emphasis on Compression Strength: A State of the Art Review.* , 03.31, 2020.
40. SHAKIR ABBOOD, I., ODA, S.A., HASAN, K.F. and JASIM, M.A. Properties Evaluation of Fiber Reinforced Polymers and their Constituent Materials used in Structures – A Review. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 43. pp. 1003-1008. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320357618> ISSN 2214-7853. DOI 10.1016/j.matpr.2020.07.636.
41. KRAMÁR, S., et al. Constraining Delamination of CFRP by Beam Corrugation. *Engineering Structures*, Mar 15, 2020, vol. 207. pp. 110237. Available from: <https://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110237> CrossRef. ISSN 0141-0296. DOI 10.1016/j.engstruct.2020.110237.
42. William.M.C. McKenzie and Binsheng Zhang. *Design of Structural Timber to Eurocode 5*. Second ed. Great Britain by Cromwell Press Ltd, Trowbridge, Wiltshire: PALGRAVE MACMILLAN, 2007 ISBN 978-0230-00777-2.
43. Dr. Tadas Lisauskas. *Lenkiamų Gelžbetoninių Sijų, Sustiprintų Anglies Plaušu, Tyrimai*. Daktaro disertacija ed. Kauno technologijos universitetas, 2021.
44. FAN, X., XU, T., ZHOU, Z. and ZHOU, X. Experimental Study on Basic Mechanical Properties of BFRP Bars. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, Oct 01, 2017, vol. 250, no. 1. pp. 12014. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/250/1/012014> CrossRef. ISSN 1757-8981. DOI 10.1088/1757-899X/250/1/012014.
45. PENOSIL. *PENOSIL Epoxy Fix&Coat 507 Techninių Duomenų Lapas*. Available from: <https://penosil.com/lt/produktai/premium-epoxy-fixcoat-507-epoksidine-deriva/>.
46. Lietuvių žodynas.lt. <https://www.lietuviuzodynas.lt/terminai/Tiksotropija> , 2009-, 2023 *Tiksotropija Reikšmė*.
47. LNB Mokslo ir enciklopedijų leidybos centras. *Visuotinė Lietuvių Enciklopedija*. , 2023 Available from: <https://www.vle.lt/straipsnis/stiklejimas/>.

# CERTIFICATE

**Edmondas Vaškys**

Has participated in Student scientific conference  
„SMART BUILT ENVIRONMENT“  
on 24 November 2023

Delivered the presentation:

**Normal Section Strengthening Methods of Bendable Wooden  
Beams and their Analysis**

Dean of the Faculty of Civil  
Engineering and Architecture

Prof. Dr. Andrius Jurelionis

