



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STAYBOS FAKULTETAS
METALINIŲ IR KOMPOZITINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Monika Valkauskaitė

**SLUOKSNINĖS LUKŠTŲ MEDIENOS JUNGČIŲ TYRIMAS IR
ANALIZĖ**

**RESEARCH AND ANALYSIS OF LAMINATED VENEER LUMBER
JOINTS**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Lengvųjų šiuolaikinių konstrukcijų specializacija

Statinių konstrukcijų studijų kryptis

Vilnius, 2023

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
METALINIŲ IR KOMPOZITINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas,pavardė)

(Data)

Monika Valkauskaitė

SLUOKSNINĖS LUKŠTŲ MEDIENOS JUNGČIŲ TYRIMAS IR
ANALIZĖ
RESEARCH AND ANALYSIS OF LAMINATED VENEER LUMBER
JOINTS

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Lengvųjų šiuolaikinių konstrukcijų specializacija

Statinių konstrukcijų studijų kryptis

Vadovas

doc. dr. Tomas Gečys

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

lekt. Lina Rutkienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
METALINIŲ IR KOMPOZITINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Studijų kryptis: Statybos inžinerija

Studijų programa: Statinių konstrukcijos, valstybinis kodas 6211EX040

Specializacija: Lengvosios šiuolaikinės konstrukcijos

TVIRTINU

Katedros vedėjas

Alfonsas Daniūnas

2023-05-30

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Nr. LŠKfm-21-4250

Vilnius

Studentas (-ė): Monika Valkauskaitė

Baigiamojo darbo tema: Sluoksninės lukštų medienos jungčių tyrimas ir analizė

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas pagal numatytą studijų kalendorinį grafiką.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Bendroji baigiamojo magistro darbo užduotis: Magistro baigiamajame darbe analizuojamos sluoksninės lukšto medienos (agl. LVL Laminated Veneer Lumber) jungtys. Darbe turi būti atlikta mokslinės literatūros analizė nagrinėjamu klausimu. Išanalizuojami dažniausiai pasitaikantys sluoksninės lukšto medienos elementų jungimo mazgai, kurie gali būti pritaikomi masinėje sluoksninės lukštų medienos perdangų gamyboje. Atliekami teoriniai pasirinktų jungčių skaičiavimai. Rengiant magistro baigiamąjį darbą atliekami eksperimentiniai sluoksninės lukštų medienos jungčių tyrimai, kurių rezultatai palyginami su teorinių skaičiavimų rezultatais. Darbo pabaigoje suformuluojamos išvados bei rekomendacijos tolimesniems tyrimams.

Vadovas docentas Tomas Gečys

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

	Monika Valkauskaitė, 20173024	
	(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)	
	Statybos fakultetas	
	(Fakultetas)	
	Statinių konstrukcijos, LŠKfm-21	
	(Studijų programa, akademinė grupė)	

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO) SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2023 m. gegužės 30 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Sluoksninės lukštų medienos jungčių tyrimas ir analizė“ yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: daktaras Lina Rutkienė. Mano darbo vadovas docentas daktaras Tomas Gečys.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

			Monika Valkauskaitė
	(Parašas)		(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas	ISBN	ISSN
Statybos fakultetas	Egz. sk.	
Metalinių ir kompozitinių konstrukcijų katedra	Data-.....-.....	

Antrosios pakopos studijų Statinių konstrukcijų programos magistro baigiamasis darbas	
Pavadinimas	Sluoksninės lukštų medienos jungčių tyrimas ir analizė
Autorius	Monika Valkauskaitė
Vadovas	Tomas Gečys

	Kalba: lietuvių
--	------------------------

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe išanalizuota mokslinė literatūra susijusi su sluoksninės lukštų medienos jungtimis, jų elgsena veikiant gniuždymui. Pasirenkami trys skirtingi medienos jungimo tipai: jungtys su išpjovomis, su medsraigčiais ir su kljais.

Teorinių skaičiavimų dalyje, remiantis Eurokodu 5, apskaičiuotos sluoksninės lukštų medienos jungčių laikomosios galios. Nustatomi teoriniai jungčių irties būdai.

Eksperimentinių tyrimų dalyje laboratoriniai bandimais ištirta sluoksninės lukštų medienos jungčių su išpjovomis, su medsraigčiais ir su kljais. Atlikti eksperimentiniai tyrimai: sluoksninės lukštų medienos lenkiamojo stiprio nustatymas; medienos tankio ir drėgnio nustatymas; jungčių su išpjovomis, su medsraigčiais ir su kljais laikomosios galios nustatymas.

Eksperimentinių bandymų rezultatai palyginti su teoriniais skaičiavimais. Remiantis eksperimentinių bandymų rezultatais pateikiamos išvados.

Darbą sudaro 6 dalys: įvadas, literatūros apžvalga, teoriniai skaičiavimai, eksperimentiniai tyrimai, rezultatų palyginimas, išvados ir siūlymai, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 55 p. teksto be priedų, 42 iliustr., 13 lent., 13 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: Sluoksninė lukštų mediena, medienos jungtys, jungtys su medsraigčiais, jungtys su kljais, jungtys su išpjovomis.

<table border="1"> <tr><td>Vilnius Gediminas Technical University</td></tr> <tr><td>Faculty of Civil Engineering</td></tr> <tr><td>Department of Steel and Composite Structures</td></tr> </table>		Vilnius Gediminas Technical University	Faculty of Civil Engineering	Department of Steel and Composite Structures	<table border="1"> <tr><td>ISBN</td><td>ISSN</td></tr> <tr><td>Copies No.</td><td></td></tr> <tr><td>Date*.....*.....</td><td></td></tr> </table>		ISBN	ISSN	Copies No.		Date*.....*.....								
Vilnius Gediminas Technical University																			
Faculty of Civil Engineering																			
Department of Steel and Composite Structures																			
ISBN	ISSN																		
Copies No.																			
Date*.....*.....																			
<table border="1"> <tr> <td colspan="4">Master Degree Studies Structural Engineering study programme Master Graduation Thesis</td> </tr> <tr> <td>Title</td> <td colspan="3">Research and analysis of laminated veneer lumber joints</td> </tr> <tr> <td>Author</td> <td colspan="3">Monika Valkauskaitė</td> </tr> <tr> <td>Academic supervisor</td> <td colspan="3">Tomas Gečys</td> </tr> </table>				Master Degree Studies Structural Engineering study programme Master Graduation Thesis				Title	Research and analysis of laminated veneer lumber joints			Author	Monika Valkauskaitė			Academic supervisor	Tomas Gečys		
Master Degree Studies Structural Engineering study programme Master Graduation Thesis																			
Title	Research and analysis of laminated veneer lumber joints																		
Author	Monika Valkauskaitė																		
Academic supervisor	Tomas Gečys																		
			<table border="1"> <tr><td>Thesis language: Lithuanian</td></tr> </table>	Thesis language: Lithuanian															
Thesis language: Lithuanian																			
<table border="1"> <tr> <td colspan="4"> Annotation The scientific literature analyzed in the final master's thesis is related to the joints of laminated veneer lumber, their behavior under compression. There are three different types of wood joints to choose from: joints with cutouts, with wood screws and with glue. In the part of the theoretical calculations, based on Eurocode 5, the load-bearing capacity of the laminated wood joints was calculated. The theoretical methods of joint disintegration are determined. As part of the experimental research, laboratory tests were carried out to examine laminated veneer lumber joints with cutouts, wood screws and glue. Experimental studies were done: determination of the bending strength of laminated veneer lumber; determination of wood density and moisture content; determination of the bearing capacity of joints with cut-outs, with wood screws and with glue. The results of experimental tests are compared with theoretical calculations. Conclusions are presented based on the results of experimental tests. The work consists of 6 parts: introduction, literature review, theoretical calculations, experimental studies, comparison of results, conclusions and suggestions, list of references. Thesis consist of - 55 p. text without appendices, 42 illustrations, 13 tables, 13 bibliographic sources. Work accessories are attached separately. </td> </tr> </table>				Annotation The scientific literature analyzed in the final master's thesis is related to the joints of laminated veneer lumber, their behavior under compression. There are three different types of wood joints to choose from: joints with cutouts, with wood screws and with glue. In the part of the theoretical calculations, based on Eurocode 5, the load-bearing capacity of the laminated wood joints was calculated. The theoretical methods of joint disintegration are determined. As part of the experimental research, laboratory tests were carried out to examine laminated veneer lumber joints with cutouts, wood screws and glue. Experimental studies were done: determination of the bending strength of laminated veneer lumber; determination of wood density and moisture content; determination of the bearing capacity of joints with cut-outs, with wood screws and with glue. The results of experimental tests are compared with theoretical calculations. Conclusions are presented based on the results of experimental tests. The work consists of 6 parts: introduction, literature review, theoretical calculations, experimental studies, comparison of results, conclusions and suggestions, list of references. Thesis consist of - 55 p. text without appendices, 42 illustrations, 13 tables, 13 bibliographic sources. Work accessories are attached separately.															
Annotation The scientific literature analyzed in the final master's thesis is related to the joints of laminated veneer lumber, their behavior under compression. There are three different types of wood joints to choose from: joints with cutouts, with wood screws and with glue. In the part of the theoretical calculations, based on Eurocode 5, the load-bearing capacity of the laminated wood joints was calculated. The theoretical methods of joint disintegration are determined. As part of the experimental research, laboratory tests were carried out to examine laminated veneer lumber joints with cutouts, wood screws and glue. Experimental studies were done: determination of the bending strength of laminated veneer lumber; determination of wood density and moisture content; determination of the bearing capacity of joints with cut-outs, with wood screws and with glue. The results of experimental tests are compared with theoretical calculations. Conclusions are presented based on the results of experimental tests. The work consists of 6 parts: introduction, literature review, theoretical calculations, experimental studies, comparison of results, conclusions and suggestions, list of references. Thesis consist of - 55 p. text without appendices, 42 illustrations, 13 tables, 13 bibliographic sources. Work accessories are attached separately.																			
<table border="1"> <tr> <td colspan="4">Keywords: Laminated veneer lumber, wood joints, wood screw joints, glue joints, cut-out joints.</td> </tr> </table>				Keywords: Laminated veneer lumber, wood joints, wood screw joints, glue joints, cut-out joints.															
Keywords: Laminated veneer lumber, wood joints, wood screw joints, glue joints, cut-out joints.																			

TURINYS

IVADAS.....	11
1. MEDIENOS JUNGČIŲ ANKSTESNIŲ TYRIMŲ APŽVALGA	13
1.1. Medienos jungtys su išpjovomis	13
1.2. Medienos jungtys su medsraigčiais	16
1.3. Medienos jungtys su klėjais	19
1.4. Pirmojo skyriaus išvados.....	21
2. TEORINIAI MAZGO SKAIČIAVIMAI.....	22
2.1. Analizuojami mazgai ir jų geometrijos	22
2.2. Medienos jungties su išpjovomis laikomosios galios skaičiavimai.....	24
2.3. Medienos jungties su medsraigčiais laikomosios galios skaičiavimai	26
2.4. Medienos jungties su klėjais laikomosios galios skaičiavimai.....	27
2.5. Teorinių skaičiavimų rezultatai	28
2.6. Antrojo skyriaus išvados	28
3. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI	29
3.1. Eksperimentiniams tyrimams naudojamos medžiagos	29
3.2. Eksperimentinių tyrimų metodika	31
3.2.1. <i>Lenkiamojo stiprio nustatymas</i>	<i>31</i>
3.2.2. <i>Medienos tankio ir drėgnio nustatymas.....</i>	<i>33</i>
3.2.3. <i>Bendra jungčių eksperimentinių tyrimų informacija</i>	<i>35</i>
3.2.4. <i>Jungties su išpjovomis laikomosios galios eksperimentinis tyrimas</i>	<i>39</i>
3.2.5. <i>Jungties su medsraigčiais laikomosios galios eksperimentinis tyrimas.....</i>	<i>43</i>
3.2.6. <i>Jungties su klėjais laikomosios galios eksperimentinis tyrimas</i>	<i>46</i>
3.3. Trečiojo skyriaus išvados	51
4. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATŲ VERTINIMAS IR PALYGINIMAS SU TEORINIAIS SKAIČIAVIMAIS	53
4.1. Eksperimentinių ir teorinių laikomųjų galių palyginimas	53
4.1.1. <i>Medienos jungčių su išpjovomis palyginimas.....</i>	<i>53</i>
4.1.2. <i>Medienos jungčių su medsraigčiais palyginimas</i>	<i>54</i>
4.2. Medinių elementų defektai.....	54
4.3. Ketvirto skyriaus išvados	56
IŠVADOS IR SIŪLYMAI	57
LITERATŪRA	58
PRIEDAI.....	59

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Medienos ir betono kompozito perdangos sistemos tipai (Zhang <i>et al.</i> 2019)	13
1.2 pav. Įvairios išpjovos formos masyvios medienos ir betono kompozito perdangoje: a) stačiakampio, b) trapecijos, c) trikampio, d) apvalios, e) banguotos ir f) mikrodygiuotos išpjovos (Zhang <i>et al.</i> 2019).....	14
1.3 pav. Dailidžių jungtys a) piramidinės galvutės jungtis, b) laiptuota jungtis, c) įstrižoji jungtis (Brown <i>et al.</i> 2021).....	15
1.4 pav. Bandinių serijos su išdrožomis (Brown <i>et al.</i> 2021).....	16
1.5 pav. Kryžmai sluoksniuotos medienos sluoksniai (Brown <i>et al.</i> 2020)	17
1.6 pav. Bandinių variantai (a – CLT5 izometrija, b – CLT7 izometrija, c – 2S bandinių serija, d – 8ST bandinių serija, e – 8SC bandinių serija, f – 16X-400 bandinių serija, g – 16X bandinių serija, h – 16X+16S bandinių serija, i – 12X bandinių serija, j – 12X+4S bandinių serija, k – 12X bandinių serija) (Brown <i>et al.</i> 2020)	18
1.7 pav. Baigtinių elementų metodo modeliai 10 ir 15 mm klijų sluoksniams (Pečnik <i>et al.</i> 2021).....	21
2.1 pav. Medienos jungties su išpjovomis vaizdas iš šono ir iš viršaus	22
2.2 pav. Medienos jungties su medsraigčiai vaizdas iš šono ir iš viršaus	23
2.3 pav. Medienos jungties su klijais, kai naudojami 6 medsraigčiai klijų apspaudimui, vaizdas iš šono ir iš viršaus.....	23
2.4 pav. Medienos jungties su klijais, kai naudojami 8 medsraigčiai klijų apspaudimui, vaizdas iš šono ir iš viršaus.....	24
2.5 pav. Glemžimo veikiamos medienos jungties su išpjovomis nariai	25
2.6 pav. Gniuždymo veikiamos medienos jungties su išpjovomis laikomosios galios nariai	26
2.7 pav. Medienos jungčių su medsraigčiais irties būdai, kai veikia vienpusė šlytis (LST EN 1995-1-1:2004+AC:2006).....	27
3.1 pav. Sluoksninės lukštų medienos plokštės.....	30
3.2 pav. Dalinai sriegti medsraigčiai	30
3.3 pav. Medienos jungtims naudojami klijai	31
3.4 pav. Sluoksninės lukštų medienos plokštės lenkiamojo stiprio nustatymas (Guršnys <i>et al.</i> 2011)	32
3.5 pav. Sluoksninės lukštų medienos plokštės lenkiamojo stiprio eksperimentas	32
3.6 pav. Lenkiamojo stiprio ir poslinkio priklausomybės grafikas	33
3.7 pav. Apkrovos pridėjimo procedūra.....	36
3.8 pav. Bandymo apkrovimas eksperimento metu	37
3.9 pav. Poslinkių ir apkrovos fiksavimo įrenginys ALMEMO 2890-9	37
3.10 pav. Linijinių poslinkių jutiklių išdėstymas	38

3.11 pav. Medinės jungties su išpjovomis detali schema iš šono ir iš viršaus	39
3.12 pav. Medinių jungčių su išpjovomis eksperimentui paruošti bandiniai	39
3.13 pav. Medienos jungčių su išpjovomis apkrovos ir poslinkio kreivės	41
3.14 pav. Medienos jungties su išpjova suirimo forma: iškišos skilimas išilgai pluošto	42
3.15 pav. Medinės jungties su medsraigčiais detali schema iš šono ir iš viršaus	43
3.16 pav. Medinių jungčių su medsraigčiais eksperimentui paruošti bandiniai	43
3.17 pav. Medienos jungčių su medsraigčiais apkrovos ir poslinkio kreivės.....	44
3.18 pav. Medienos jungties su medsraigčiais suirimo forma: lėtas medsraigčių tekėjimas, deformavosi medsraigčiai	45
3.19 pav. Medinės jungties su klėjais, kai 6 medsraigčiai naudojami klijų suspaudimui, detali schema iš šono ir iš viršaus.....	46
3.20 pav. Medinių jungčių su klėjais ir suspaustų 6 medsraigčiais eksperimentui paruošti bandiniai	47
3.21 pav. Medinės jungties su klėjais, kai 8 medsraigčiai naudojami klijų suspaudimui, detali schema iš šono ir iš viršaus.....	47
3.22 pav. Medinių jungčių su klėjais ir suspaustų 6 medsraigčiais eksperimentui paruošti bandiniai	48
3.23 pav. Medienos jungčių su klėjais, kuomet naudojami 6 medsraigčiai apkrovos ir poslinkio kreivės	49
3.24 pav. Medienos jungčių su klėjais, kuomet naudojami 8 medsraigčiai apkrovos ir poslinkio kreivės	50
3.25 pav. Medienos jungties su klėjais suirimo forma.....	51
4.1 pav. Medienos elemento krašto atplaiša.....	55
4.2 pav. Medienos elemento išorinio sluoksnio šakos defektas	55
4.3 pav. Medinio elemento išsigaubimas	56

Lentelių sąrašas

2.1 lentelė. Sluoksninės lukštų medienos jungčių teorinių skaičiavimų rezultatai.....	28
3.1 lentelė. Sluoksninės lukštų medienos lenkiamojo stiprio rezultatai	32
3.2 lentelė. Bandinių duomenys	34
3.3 lentelė. Medienos tankio ir drėgnio skaičiavimo rezultatai	35
3.4 lentelė. Eksperimentinių bandinių tipas, numeris ir jungties tipas	35
3.5 lentelė. Medienos jungties su išpjovomis faktiniai geometriniai matmenys	40
3.6 lentelė. Bandinių laikomosios galios rezultatai	41
3.7 lentelė. Medienos jungties su medsraigčiais faktiniai geometriniai matmenys.....	44
3.8 lentelė. Bandinių su medsraigčiais laikomosios galios rezultatai.....	45
3.9 lentelė. Medienos jungties su medsraigčiais faktiniai geometriniai matmenys.....	48
3.10 lentelė. Bandinių su klizais laikomosios galios rezultatai.....	50
4.1 lentelė. Medienos jungčių su išpjovomis eksperimentinių ir teorinių laikomųjų galių palyginimas.....	53
4.2 lentelė. Medienos jungčių su medsraigčiais eksperimentinių ir teorinių laikomųjų galių palyginimas	54
P.1 lentelė. Medienos jungčių tūris, svoris ir tankis	59

IVADAS

Anksčiau mediena buvo pagrindinė žaliava statyti statiniams. Bėgant laikui ją pakeitė naujos statybinės medžiagos, medienos naudojimas laikančiosioms pastatų ar kitų statinių konstrukcijoms mažėjo. Naujoms statybinėms medžiagoms, kaip plienui ar betonui, pagaminti yra sunaudojama daug žaliavų, kurių atsargos neatsinaujina. Gaminant tokias konstrukcines medžiagas išnaudojama daug energijos, gamybos metu išskiriamos šiltnamio efektą didinančios medžiagos. Medienos pagrindinis pranašumas, prieš aukščiau išvardintas medžiagas, yra nuolatinis atsargų atsinaujinimas. Mediena yra anizotropinė medžiaga, ji skirtingomis kryptimis turi skirtingas savybes. Pjautinės medienos skerspjūvio matmenys yra apriboti, taip pat savybės skirtingomis kryptimis yra skirtingos. Pjautinės medienos ilgio bei maksimalių skerspjūvio matmenų apribojimai paskatino inžinerinės medienos produktų kūrimą. Inžinerinės medienos gaminiai turi geresnes mechanines savybes, lyginant su pjautine mediena. Gaminių matmenų pasirinkimas yra kur kas platesnis, nes mediena yra klijuojama.

Projektuojant medines konstrukcijas pats sudėtingiausias etapas yra mazgų konstravimas. Sujungti medinius elementus dažniausiai panaudojamos plieninės plokštelės. Plieninių plokštelių jungimui su mediena panaudojami varžtai ar smeigės, tai yra tipiniai medienos elementų mazgai. Didelių matmenų inžinerinės medienos gaminiai, dėl transportavimo apribojimų, gali būti vežami į statyb vietę dalimis. Statyb vietėje gaminiai yra sukljuojami, taip gaunant elementą, kuris pasižymi vienalytės medžiagos savybėmis. Taip pat mediena gali turėti išpjovas, kurios gali padėti perskirstyti apkrovas, taip pat gali užtikrinti tikslumą statyb vietėje.

Šiame baigiamajame magistro darbe eksperimentiškai tiriamos sluoksninės lukštų medienos jungtys (angl. *Laminated Veneer Lumber*, toliau – LVL). Pagrindiniai medienos jungimo elementai yra medsraigčiai ir klijai. Medsraigčiai paprastai naudojami statyb vietėje, kadangi juos paprasta įrengti. Naudojant medsraigčių jungties standumas yra mažesnis lyginant su klijuotinėmis jungtimis. Klijų jungtys tarp medienos yra pakankamai standžios, suirimas pasiekiamas, kai poslinkis nėra didelis, iki 0,5 mm. Jungčių klijavimas atliekamas gamykloje, užtikrinant atitinkamas aplinko temperatūros ir santykinio drėgnio sąlygas. Didesnė sąveika tarp jungiamų elementų gali būti padaroma jungiant elementus su išpjaustymais. Priklausomai nuo jungties skiriasi sąveika tarp elementų ir jungties suirimo pobūdis.

Darbo tikslas – eksperimentiškai ištirti trijų tipų sluoksninės lukštų medienos jungčių elgseną bei praktinį pritaikymą projektuojant jungtis pagal Eurokodą 5.

Darbo uždaviniai:

- atlikti medienos jungčių su medsraigčiais, klėjais ir su išpjovomis ankstesnių eksperimentinių bei kitų tyrimų apžvalgą;
- atlikti analizuojamų jungčių teorinius skaičiavimus pagal Eurokodą 5;
- eksperimentiškai ištirti tris skirtingas medienos jungtis ir palyginti tarpusavyje;
- palyginti eksperimentinius tyrimų rezultatus su teoriniais skaičiavimais.

Darbo praktinė vertė Eksperimentiškai ištirtos sluoksninės lukštų medienos jungtys skirtingais būdais. Gauti laikomosios galios rezultatai palyginami su teoriniais skaičiavimais. Eksperimentiniai tyrimai yra naudingi sparčiai vystantis LVL gamybos pramonei bei kuriantis naujiems konstrukciniams sprendimams panaudojant LVL. Darbo rezultatai gali būti panaudojami toliau tiriant sluoksninės lukštų medienos jungčių elgseną.

Darbo aprobacija Baigiamojo magistro darbo sluoksninės lukštų medienos jungčių eksperimentinės dalies rezultatai paskelbti 26-ojoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje, kuri vyko 2023 m. balandžio 24 dieną.

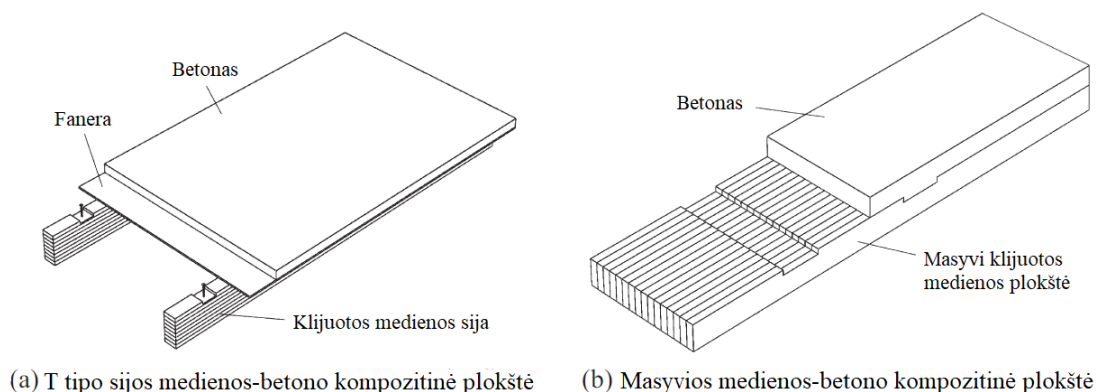
1. MEDIENOS JUNGČIŲ ANKSTESNIŲ TYRIMŲ APŽVALGA

1.1. Medienos jungtys su išpjovomis

Dažniausiai medienos jungtims naudojami tvirtinimo elementai, tokie kaip vinys, medsraigčiai ar kaiščiai. Jungtys naudojant mechaninius tvirtinimo elementus nėra tokios standžios lyginant su jungtimis, kai naudojami klijai ar išpjovos medienoje. Dailidžių jungtys (jungtys su išpjovomis) yra tradicinis jungimo metodas, kuris buvo naudojamas Azijoje, Europoje ir Šiaurės Amerikoje. Tokio tipo jungtys reikalauja aukštos kvalifikacijos ir brangios darbo jėgos, todėl jos tapo nekonkurencingos moderniems mediniams pastatams su mechaniniais tvirtinimo elementais (Zhang *et al.* 2019).

Medienos ir betono kompozito jungtis

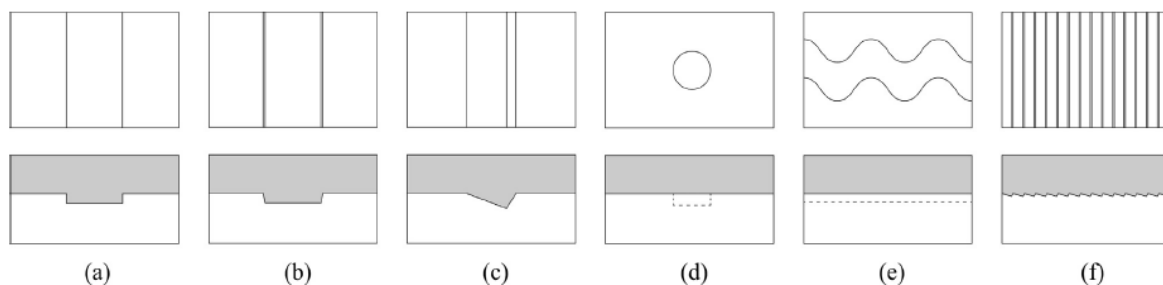
Medienos ir betono kompozitas (angl. *Timber-concrete composite*, toliau – TCC) dažniausiai naudojamas horizontalioms konstrukcijoms, tokioms kaip perdangos ar stogai. Betono naudojimas gniuždymo zonoje, o medienos – tempimo leidžia optimaliai išnaudoti medžiagas. Tokios perdangos naudojimas pakeičia tradicines gelžbetonio plokštes. TCC perdangos turi mažesnį savąjį svorį, produkto anglies pėdsakas yra mažesnis, greitesnis surinkimas statybvietyje, geresnės šilumos savybės lyginant su gelžbetonio plokštėmis. TCC perdangos gali būti gaminamos su sijomis 1.1 pav (a), arba su masyvios medienos plokštėmis .. pav. (b).



1.1 pav. Medienos ir betono kompozito perdangos sistemos tipai (Zhang *et al.* 2019)

Pasirinkus tinkamas jungtis medienos ir betono kompozito sistema gali būti konstruktyviai ir ekonomiškai konkurencinga. Kompozito sistemai yra naudojami mechaniniai tvirtinimo elementai, tokie kaip medsraigčiai, vinys ir kaiščiai, tačiau jie yra sąlyginai lankstūs, lyginant su išpjovomis medienoje ar klijais. Išpjovos medienoje yra daromos, kad perduoti šlyties jėga per medienos ir betono gniuždymo zoną. Išpjovos medienoje gali būti įvairios,

keletas jų pavaizduota 1.2 pav. Išpjovos medienoje dažniausiai daromos naudojant didelio tikslumo kompiuterinio skaitmeninio valdymo (angl. *Computer Numerical Control*, toliau – CNC) stakles gamykloje. Padidinti kompozito sąveiką tarp medienos ir betono galima naudojant plieninius tvirtinimo elementus, kad būtų galima išvengti betono atsiskyrimo nuo medienos, kai betoną traukia stingdamas ir mediena džiūna.



1.2 pav. Įvairios išpjovos formos masyvios medienos ir betono kompozito perdangoje: a) stačiakampio, b) trapecijos, c) trikampio, d) apvalios, e) banguotos ir f) mikrodygiuotos išpjovos (Zhang *et al.* 2019)

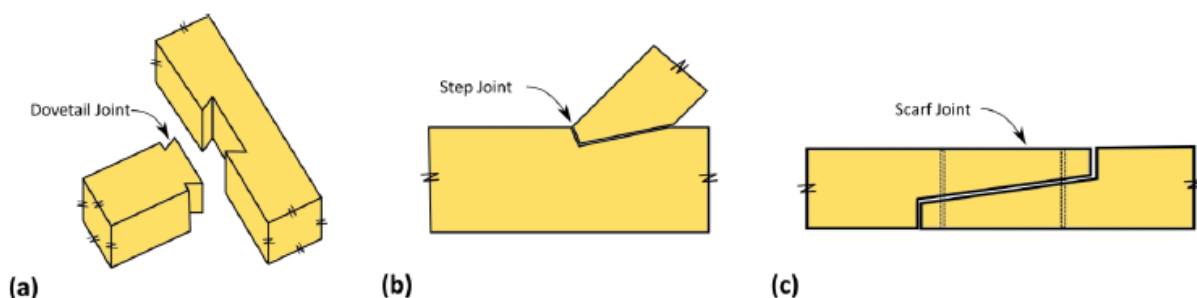
Lei Zhang, Ying Hei Chui, Douglas Tomlinsonas (Zhang *et al.* 2019) atliko tyrimą, kurio tikslas – nustatyti masyvios medienos ir betono kompozito perdangos šlyties veikimą, kai medienoje yra išpjovos. Pagrindinis tyrimo tikslas ištirti kai kuriuos svarbius veiksnius, kurie daro įtaką šlyties pasiskirstymui išpjovos jungtyje. Pasirinkti veiksniai: jungties geometrija, medsraigčio naudojimas išpjovoje ir medienos orientacija. Buvo pasirinkta stačiakampio formos išpjova, nes yra paprasčiausia ir efektyviausia. Eksperimentinę dalį sudarė 10 bandinių variantų po 6 bandinius. Išpjovos aukštis varijuoja nuo 10 iki 40 mm, o plotis nuo 150 iki 350 mm. Medienos ilgio ir išpjovos aukščio santykis varijuoja nuo 6 iki 25 kartų. Savigrėžiai buvo sukami į išpjovą, prieky išpjovos arba nenaudojami.

Atliktų tyrimų rezultatai:

- Medienos išdrožos be medsraigčių išilgine kryptimi turi 9 kartus didesnę poslinkio modulį K_{ser} ir 2 – 3 kartus didesnę laikomąją galią F_{max} , nei skersine kryptimi;
- Dias *et al.* pataria, kad konstrukcijų išpjovos gylis būtų ne mažesnis nei 20 mm;
- Eksperimento rezultatai parodo, kad neužtenka 8 kartų išpjovos aukščio ir pločio santykio, kad būtų galima išvengti suirimo dėl šlyties;
- Medsraigčiai, kai išpjovos yra skersine kryptimi, gali padidinti stiprumą ir standumą, kai išpjovos yra išilgine kryptimi medsraigčiai turi mažai įtakos (Zhang *et al.* 2019).

Medienos su mediena jungtis

Medienos elementus tarpusavyje galima jungti be papildomų mechaninių tvirtinimo elementų. Tokiu atveju medienos elementas yra išpjauostomas. Išpjovos gali turėti įvairias formas, keletas jų pavaizduota 1.3 paveiksle. Išpjovų jungtys gali užtikrinti didesnę šlyties stiprumą ir standumą tarp medinių elementų, lyginant su mechaniniais tvirtinimo elementais. Mechaniniai tvirtinimo elementai yra populiarūs, kadangi juos naudojant pasiekama tampriai plastinė jungčių elgsena, sąlyginai nesudėtingas įrengimas bei aiškus skaičiavimo metodai remiantis projektavimo normomis tokiomis kaip Eurokodas 5.

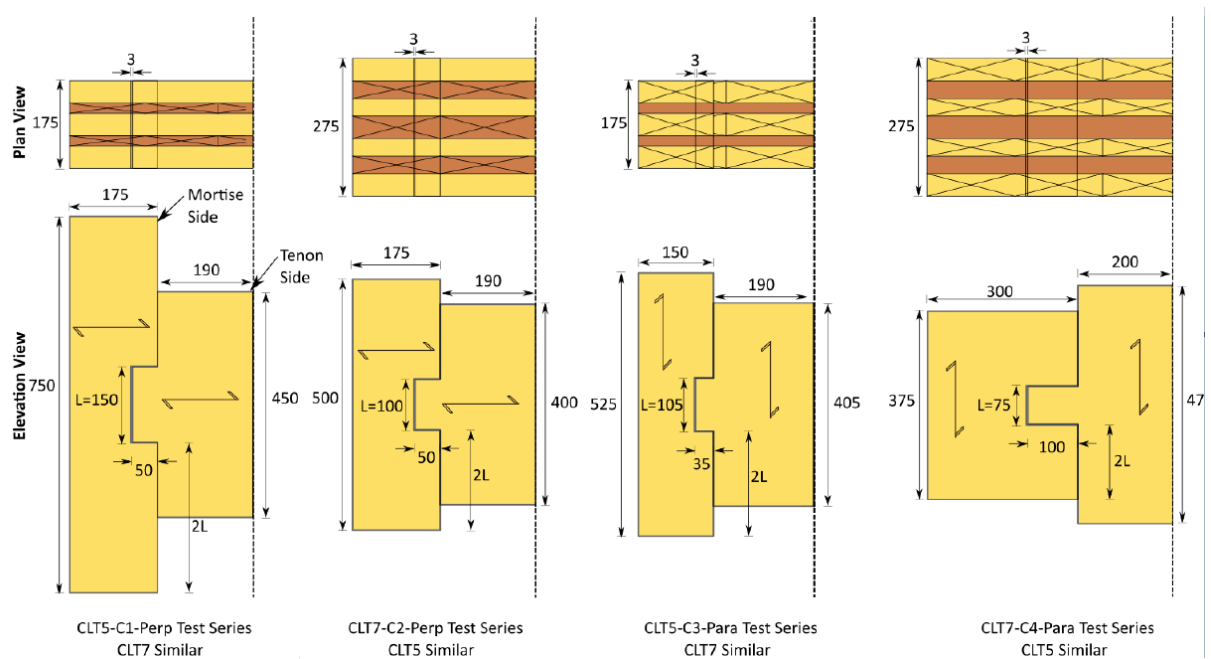


1.3 pav. Dailidžių jungtys a) piramidinės galvutės jungtis, b) laiptuota jungtis, c) įstrižoji jungtis
(Brown *et al.* 2021)

Per paskutinius kelis dešimtmečius masyvios medienos konstrukcijos išpopuliarėjo visame pasaulyje, dėl inžinerinės medienos gaminių, tokių kaip kryžmai sluoksnuiota mediena, prieinamumo ir ekonomiško. Taip pat dėl naujos kompiuterinio skaitmeninio valdymo apdirbimo pažangos inžinerinės medienos gaminiai gali būti labiau/daugiau apdirbami ir sudėtingesni. CNC staklių tikslumas ir efektyvumas leidžia statyboje naudoti dailidžių jungtis.

Justinas R. Brownas, Minghao Li, ir Francesco Sarti (Brown *et al.* 2021) atliko tyrimą, kurio – tikslas nustatyti inžinerinės medienos jungties su išpjovomis šlyties elgseną, kaip pateikiama .. pav. Pagrindinis tyrimo tikslas nustatyti veiksnius, kurie daro įtaką jungties veikimui. Pasirinkti veiksniai: jungties geometrija, medienos orientacija, bandinio storis. Eksperimentinę dalį sudarė 29 bandiniai su skirtingomis išdrožomis ir 6 bandiniai su kampinėmis sujungimo detalėmis. Bandinių serijos pavaizduotos 1.4 pav. Išpjovos aukštis varijuoja nuo 75 iki 150 mm, o plotis nuo 35 iki 100 mm. Naudojami du CLT plokštės storiai, tai 175 (5 sluoksniai) ir 275 (7 sluoksniai). Pirmų dviejų bandinių išoriniai sluoksniai yra statmeni apkrovos kryptčiai, trečio ir ketvirto bandinių – lygiagretūs.

Kampinės tvirtinimo detalės dažniausiai naudojamos CLT sujungimui. Šiame tyrime šios jungtys buvo eksperimentiškai ištirtos, kad būtų galima palyginti gautus rezultatus su jungčių su išpjovomis rezultatais. Todėl bandinių medienos orientacija buvo tokia pati, kaip dailidžių jungčių.



1.4 pav. Bandinių serijos su išdžiomis (Brown *et al.* 2021)

Atliktų tyrimų rezultatai:

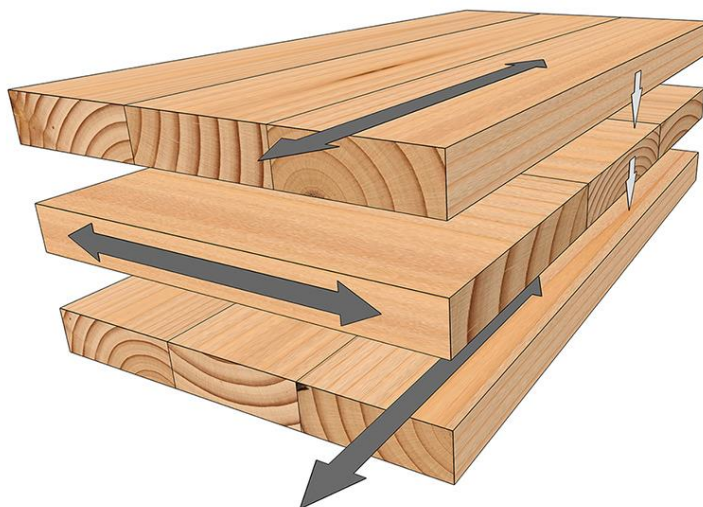
- Dailidžių jungčių stiprumas ir standumas buvo 2,5 – 7 kartus didesnis, lyginant su jungtimis, kuriose naudojamos kampinės tvirtinimo detalės;
- Dailidžių jungtys dėl kryžmai sluoksniuotos medienos nepatyrė staigių apkrovos pokyčių, kai įvyko irtis. Taip yra dėl sluoksnių kryžiovimo. Tai labiau pastebima septynių sluoksnių CLT;
- Nustatyta, kad pateiktas standumo analitinių komponentų modelis yra pakankamai tikslus, kad būtų galima įvertinti jungties stiprumą;
- Kampinių tvirtinimo elementų jungčių eksperimentinis standumas buvo apie 2,5 karto mažesnis, nei teorinis Eurokodo 5 skaičiavimas (Brown *et al.* 2021).

1.2. Medienos jungtys su medsraigčiais

Medienos jungtys su savigręžiais/savisriegiais

Per pastaruosius du dešimtmečius masyvūs inžinerinės medienos gaminiai, tokie kaip kryžmai sluoksniuota mediena ir kiti, vis dažniau naudojami statyboje. Taip yra dėl to, kad inžinerinė mediena tapo prieinama, ji yra ekonomiškai, estetiškai patraukli ir yra aplinkai nekenksminga konstrukcinė medžiaga. Kryžmai sluoksniuota mediena (angl. *Cross Laminated Timber*, toliau – CLT) vis dažniau naudojama šoninėms apkrovoms perimti kaip skersinės šlyties sienos. CLT yra sudaryta iš nelyginio skaičiaus medienos sluoksnių, kurie yra suklijuoti

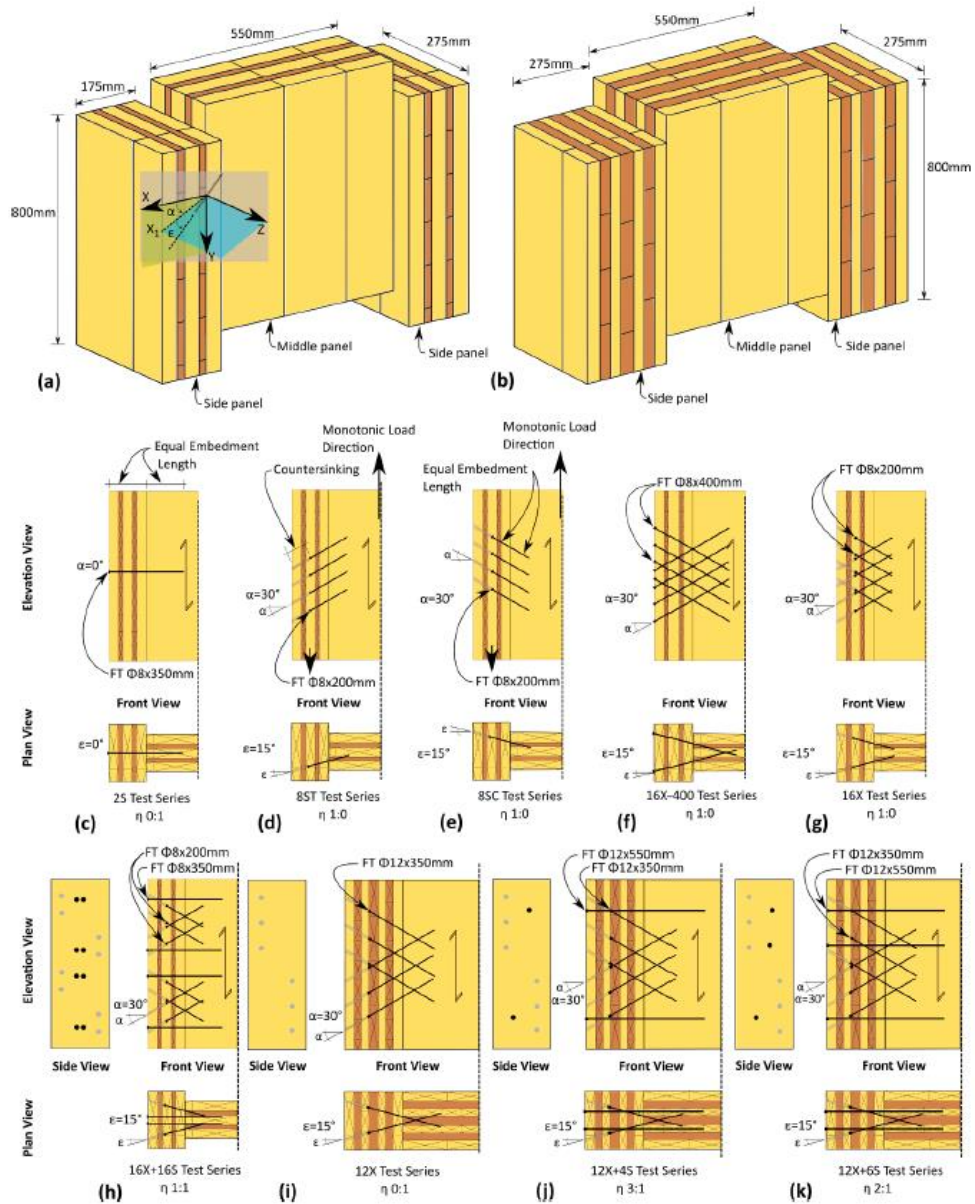
kryžmai vienas kitam. Toks klijavimo būdas sukuria didelių metmenų ir tvirtą medienos plokštę. Todėl CLT plokštės puikiai tinka šoninėms apkrovoms atsparioms sistemoms.



1.5 pav. Kryžmai sluoksniuotos medienos sluoksniai (Brown *et al.* 2020)

Iš kryžmai sluoksniuotos medienos galima daryti ir standumo diafragmas. Jų standumas ir stiprumas priklauso nuo naudojamų tvirtinimo detalių. Dažniausiai naudojamos mechaninės tvirtinimo detalės tokios kaip varžtai ir plokštelės. Jungtys su savigrėžiais varžtais yra našesnės lyginant su standartinėmis kaištinio tipo jungtimis, tokiomis kaip vinys, varžtai ar medsraigčiai. Savigrėžiai yra populiariausios tvirtinimo detalės masyvosios inžinerinės medienos konstrukcijose, dėl lengvo montavimo.

Justinas R. Brownas, Minghao Li, Thonas Tannertas, Danielis Moroderis (Brown *et al.* 2020) atliko tyrimą, kurio tikslas – nustatyti savigrėžių jungties elgseną, kai savigrėžiai montuojami skirtingais kampais. Pagrindinis tyrimo tikslas – ištirti veiksnius, kurie daro įtaką jungties stiprumui. Pasirinkti veiksniai: medienos storis, savigrėžių skersmuo, ilgis ir kiekis jungtyje, savigrėžių įsukimo kampas. Eksperimentinę dalį sudarė 9 bandinių variantai ir 59 bandiniai. Bandiniai buvo apkraunami monotonine ir cikline apkrovomis. Savigrėžių skersmuo 8 arba 12 mm, ilgis nuo 200 iki 550 mm. Savigrėžių kiekis jungtyje nuo 2 iki 32 vienetų. Savigrėžiai buvo sukami įvairiais kampais plokštumoje ir iš plokštumos (žr. 1.6 pav.).



1.6 pav. Bandinių variantai (a – CLT5 izometrija, b – CLT7 izometrija, c – 2S bandinių serija, d – 8ST bandinių serija, e – 8SC bandinių serija, f – 16X-400 bandinių serija, g – 16X bandinių serija, h – 16X+16S bandinių serija, i – 12X bandinių serija, j – 12X+4S bandinių serija, k – 12X bandinių serija)
(Brown *et al.* 2020)

Paiškinimas: S – 90 laipsnių kampų sukami savigrėžiai, ST – šlytis – tempimas, SC – šlytis – gniuždymas, X – kryžmai sukami savigrėžiai.

Atliktų tyrimų rezultatai:

- Jungčių, kai savigrėžiai įsukami keliais skirtingais kampais, poslinkis yra mažesnis lyginant su jungtimis, kurių savigrėžiai yra įsukti vienu kampų;
- Nustatyta, kad analitinio modeliavimo nepakanka nustatyti jungčių standumą;
- Nustatyta, kad savigrėžio ilgio ir skersmens santykis turi įtakos jungties laikomajai galiai, poslinkiui ir standumui (Brown *et al.* 2020).

Mišrios medienos jungtys su medsraigčiais

Skirtingi inžinerinės medienos gaminiai turi skirtingas panaudojimo sritis. Norint statyti pastatus ar kitus statinius iš skirtingų medienos gaminių reikia žinoti, kaip veikia tvirtinimo elementai, kurie sujungia skirtingus gaminius. Dažniausiai medienos jungtims yra naudojami medsraigčiai, nes juos lengva įrengti.

Gianni Schiro, Ivanas Giongo, Wndelis Sebastianas, Daniele Riccadonna, Maurizio Piazza (Schiro *et al.* 2018) atliko tyrimą, kurio tikslas – nustatyti medsraigčių veikimą skirtingais atvejais. Eksperimentinę dalį sudarė 14 skirtingų variantų, iš viso 58 bandiniai. Buvo pasirinkti keli veiksniai, turintys įtakos jungties veikimui: medsraigčiai, jų posvyrio kampas, medienos rūšis, mišrūs medienos produktai jungiami kartu. Medsraigčiai buvo viengubo ir dvigubo sriegimo, jie buvo skirtingų ilgių ir skersmenų. Jie buvo sukami skirtingu kampu, statmenai pluoštui (90°) ir 45° kampu pluoštui. Buvo pasirinktos spygliuočių ir lapuočių medienos rūšys. Jungiami skirtingi medienos produktai, tokie kaip beržo sluoksniuota mediena, kryžmai sluoksniuota mediena, spygliuočių pjautinė mediena.

Atliktų tyrimų rezultatai:

- Dvigubo sriegio medsraigčiai, nepriklausomai nuo medienos rūšių jungtyse, buvo standesni, nei vieno sriegio;
- Viengubo sriegimo medsraigčiai įsukti 45° kampu buvo standesni ir stipresni, nei medsraigčiai įsukti 90° kampu;
- Bandiniai iš lapuočių medienos yra tvirtesni ir turi didesnę laikomąją galią, nei bandiniai iš spygliuočių medienos (Schiro *et al.* 2018).

1.3. Medienos jungtys su klėjais

Medienos jungtys su poliuretaniniais klėjais

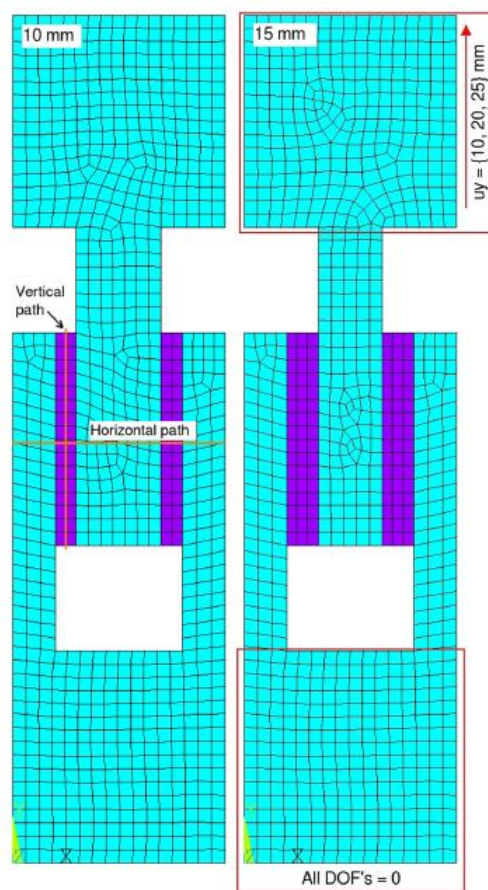
Iš inžinerinės medienos gaminių, tokių kaip kryžmai sluoksniuota mediena, galima statyti tiek žemus tiek aukštus pastatus. CLT plokštės yra standžios, atsparios šlyčiai, tempimui ir gniuždymui plokštumoje. Tinkamas inžinerinės medienos elementų sujungimas užtikrina pastato stiprumą ir standumą (Pečnik *et al.* 2021). Kai jungtys yra per standžios vykstant žemės drebėjimui viršutiniai aukštai gali būti pažeisti, todėl tinkamas jungčių parinkimas yra ypač svarbus, kuomet kalbama apie seisminius regionus (Pečnik *et al.* 2021). Tradiciniai tvirtinimo elementai, kaip vinys, medsraigčiai ar kaiščiai, ir metalinės jungimo detalės sukelia plastinę medienos irtį veikiant ciklinei apkrovai.

Atlikti klijų veikimo tyrimai atskleidė keletą privalumų. Klijų jungtys paskirsto įtempius per visą jungties plotą, tai jį sumažina. Naudojant mechaninius tvirtinimo elementus jungtyse gali susikonsoliduoti įtempiai, kurie sukelia nepageidaujamas medienos pažeidas. Šlyties bandymas ploniems klijų sluoksniams yra standartizuotas, o apie lanksčius kljus (storus sluoksnius) mažai kalbama.

Jaka Gašperas Pečnikas, Igoris Gavricas, Vaclavas Sebera, Meta Kržanas, Arkadiuszas Kwiecienas, Boguslawas Zajacius, Borisas Azinovicius (Pečnik *et al.* 2021) atliko tyrimą, kurio tikslas buvo ištirti lanksčių klijų elgseną ir pritaikymą pastatams, kurie statomi seisminėse zonose. Eksperimentinę dalį sudarė 6 bandinių variantai, iš viso 55 bandiniai. Buvo tiriami skirtingų tipų dviejų komponentų poliuretano kljiai, skirtingi klijų storiai. Bandiniai buvo apkraunami monotoniškai ir cikline apkrovomis. Dvigubo kirpimo bandiniai pagaminti iš eglės. Eksperimentiniai tyrimai buvo lyginami su baigtinių elementų modeliavimu (žr. 1.7 pav.).

Atliktų tyrimų išvados:

- Visų tipų klijų jungtys veikiant ciklinei apkrovai rodo simetrinį šlyties veikimą. Tai yra reikalinga, kai kalbama apie seismines zonas;
- Lyginant klijų jungtis su mechaninėmis tvirtinimo detalėmis, nustatyta, kad kljiai yra tampresni ir tvirtesni, klijų jungtys gali atlaikyti didesnes deformacijas, be didesnių jungties pažeidimų;
- Lankstūs kljiai gali atlaikyti ciklinę apkrovą be pažeidimų ar liekamųjų deformacijų;
- Tolesni tyrimai turėtų būti jungties sukibimo gerinimas keičiant medienos šiurkštumą arba gerinant klijų sukibimą (Pečnik *et al.* 2021).



1.7 pav. Baigtinių elementų metodo modeliai 10 ir 15 mm klijų sluoksniams (Pečnik *et al.* 2021)

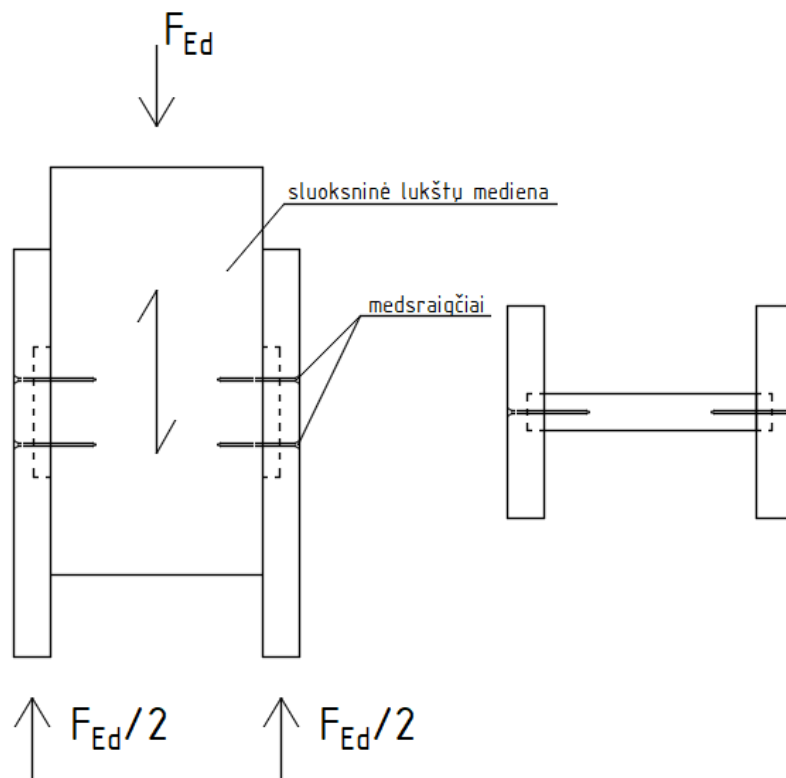
1.4. Pirmojo skyriaus išvados

1. Ištyrus medienos jungtis su išpjovomis rezultatai rodo, kad išpjovos išilgine medienos pluošto kryptimi yra geriau nei skersine kryptimi (didesnis poslinkio modulis ir didesnė laikomoji galia). Esant išpjovoms skersine medienos pluošto kryptimi standumą ir stiprumą galima pagerinti naudojant medsraigčius išpjovoje. Jungčių su išpjovomis stiprumas ir standumas yra didesnis, nei jungčių su kampinėmis detalėmis.
2. Eksperimentiškai tiriant medsraigtinės jungtis nustatyta, kad jungtis yra stipresnė ir turi mažesnę poslinkį, kai medsraigčiai įsukami 45° kampu. Geresnius rezultatus parodė jungtis, kurioje plokštumoje ir iš plokštumos medsraigčiai įsukti kampais.
3. Klijuotinių jungčių tarp sluoksninės lukštų medienos elementų eksperimentinių tyrimų rezultatai rodo, kad jungtys yra atsparios ciklinei apkrovai, atlaiko santykinai didesnes apkrovas nei mechaninės tvirtinimo detalės bei pasiekiamas didesnis jungčių standumas.

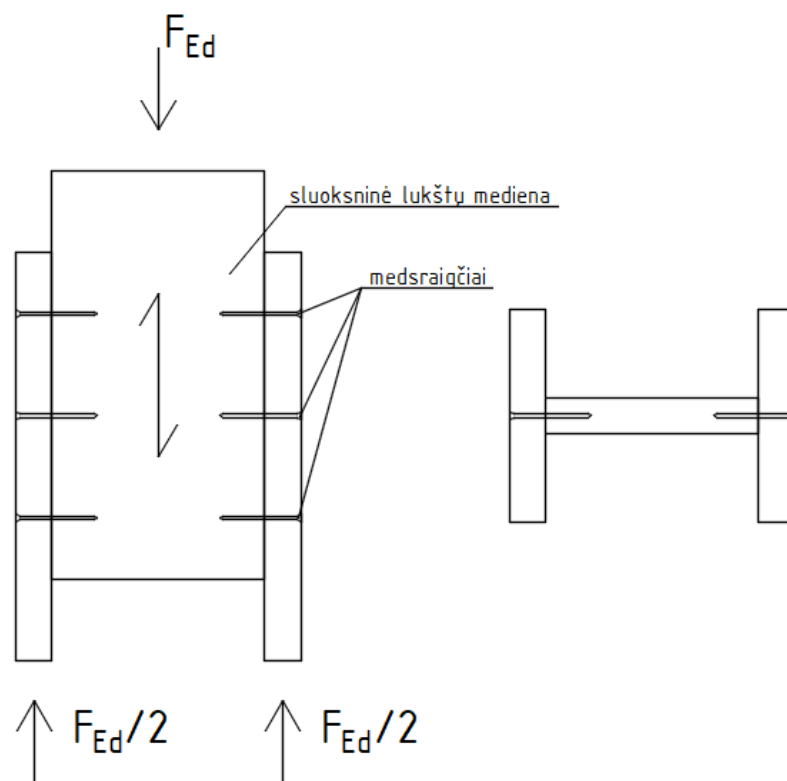
2. TEORINIAI MAZGO SKAIČIAVIMAI

2.1. Analizuojami mazgai ir jų geometrijos

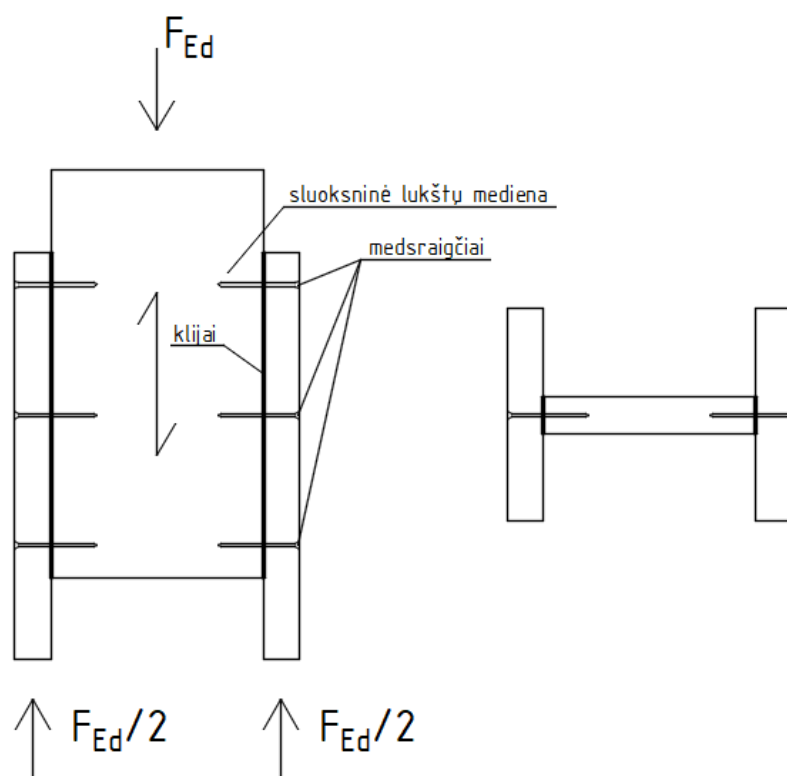
Lietuvoje galioja pagrindinės dvi medinių konstrukcijų projektavimo normos STR 2.05.07:2005 „Medinių konstrukcijų projektavimas“ ir LST EN 1995 – 1 – 1:2005+AC:2006 „Medinių konstrukcijų projektavimas“. Šiame baigiamajame darbe teoriniai mazgo skaičiavimai atliekami pagal LST EN 1995 – 1 – 1:2005+AC:2006. Analizuojami trys skirtingi lukštų medienos mazgai. Pirmojo tipo bandiniai yra su išpjovomis (žr. 2.1 pav.), kurios buvo pagamintos gamykloje su CNC staklėmis. Gamykloje buvo išfrezuojami grioveliai šoniniams elementams, o vidurinės plokštės šonuose suformuojamos iškišos. Kitų tipų bandiniams nereikėjo CNC apdirbimo. Visos plokštės, kurios reikalingos jungtims padaryti, buvo išpjauštos gamykloje „Gelmeda“. Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos fakulteto Metalinių ir kompozitinių konstrukcijų katedros laboratorijoje mazgai buvo surinkti ir paruošti bandymams. Paruoštų mazgų paveikslai pateikiami žemiau.



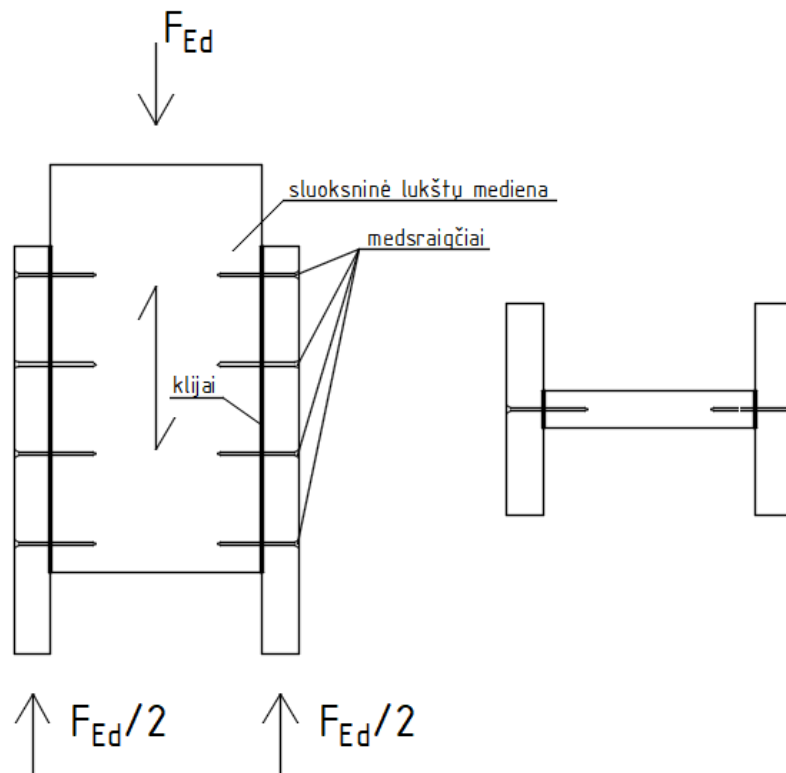
2.1 pav. Medienos jungties su išpjovomis vaizdas iš šono ir iš viršaus



2.2 pav. Medienos jungties su medsraigčiai vaizdas iš šono ir iš viršaus



2.3 pav. Medienos jungties su klėjais, kai naudojami 6 medsraigčiai klijų apspaudimui, vaizdas iš šono ir iš viršaus



2.4 pav. Medienos jungties su klijais, kai naudojami 8 medsraigčiai klijų apspaudimui, vaizdas iš šono ir iš viršaus

2.2. Medienos jungties su išpjovomis laikomosios galios skaičiavimai

Sluoksninės lukštų medienos jungtį su išpjovomis veikia gniuždymas. Galimi du irties pobūdžiai. Vienu atveju jungtyje gali įvykti glemžimas, kitu – iškišos nukirpimas. Glemžimo veikiamos jungties laikomoji galia apskaičiuojama pagal Eurokodą 5:

$$F_{v,k} = l \cdot b \cdot f_{v,k}; \quad (2.1)$$

čia:

$F_{v,k}$ – charakteristinė vienos bandinio pusės laikomoji galia;

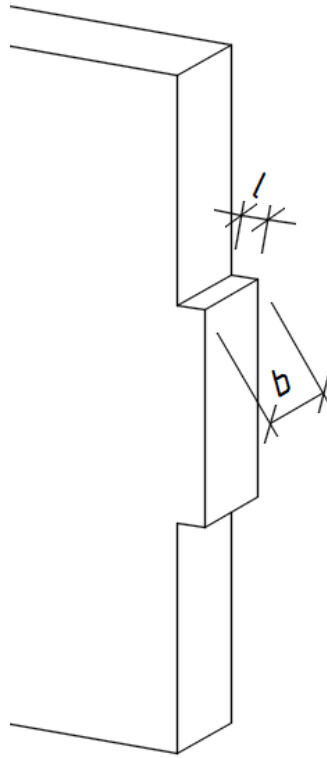
l – jungties aukštis (žr. 2.5 pav.);

b – jungties plotis (žr. 2.5 pav.);

$f_{v,k}$ – charakteristinė šlyjamoji galia esamomis sąlygomis.

Charakteristinis lenkiamasis stipris yra apskaičiuotas 3.2.1. skyrelyje pagal laboratorinių darbų metodiką (Gurkšnys *et al.* 2011). Naudojantis knygoje, 1.14. skyriuje,

nurodytomis formulėmis yra apskaičiuojama charakteristinė gniuždomoji ir šlyjamoji galia. Detalūs medienos jungčių teoriniai skaičiavimai pateikiami prieduose.



2.5 pav. Glemžimo veikiamos medienos jungties su išpjovomis nariai

Gniuždymo išilgai pluošto veikiamos jungties laikomoji galia apskaičiuojama pagal Eurokodą 5:

$$F_{c,k} = l \cdot b \cdot f_{c,k}; \quad (2.2)$$

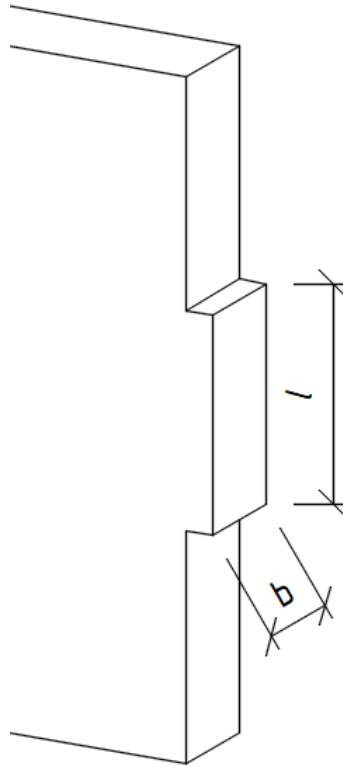
čia:

$F_{c,k}$ – charakteristinė vienos bandinio pusės laikomoji galia;

l – jungties aukštis (žr. 2.6 pav.);

b – jungties plotis (žr. 2.6 pav.);

$f_{c,k}$ – charakteristinė gniuždomoji galia esamomis sąlygomis.



2.6 pav. Gniuždymo veikiamos medienos jungties su išpjovomis laikomosios galios nariai

2.3. Medienos jungties su medsraigčiais laikomosios galios skaičiavimai

Sluoksninės lukštų medienos jungties su medsraigčiais, kuomet medsraigčiai veikiami vienpusės šlyties charakteristinė laikomoji galia, vienam medsraigčiui, pagal Eurokodą 5 apskaičiuojama pagal išraiškas:

$$F_{v,Rk} = \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & (a) \\ f_{h,2,k} t_2 d & (b) \\ \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (c) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (d) ; \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (e) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (f) \end{cases} \quad (2.3)$$

čia:

$F_{v,Rk}$ – vienos virbalinės jungės vieną šlyties plokštumą atitinkanti charakteristinė laikomoji galia;

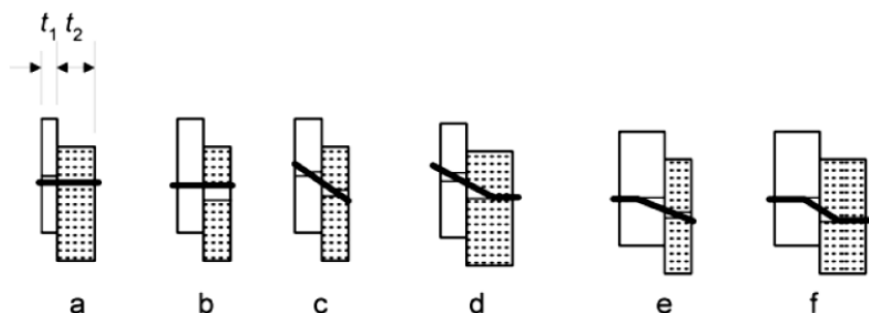
$f_{h,1,k}$ ir $f_{h,2,k}$ – medinio elemento charakteristinis vietinis stipris;

t_1 ir t_2 – plokštės storis arba virbalinės jungės įsmigimo gylis;

d – jungės skersmuo;

β – elementų vietinių stiprių dalmuo;

$F_{ax,Rk}$ – charakteristinė jungės ašinė ištraukiamoji galia;



2.7 pav. Medienos jungčių su medsraigčiais irties būdai, kai veikia vienpusė šlytis (LST EN 1995-1-1:2004+AC:2006)

2.4. Medienos jungties su kliais laikomosios galios skaičiavimai

Sluoksninės lukštų medienos jungties su kliais laikomoji galia apskaičiuojama pagal formulę:

$$F_{v,klijų} = l \cdot b \cdot f_{v,klijų}; \quad (2.4)$$

čia:

$F_{v,klijų}$ – charakteristinė vienos bandinio pusės laikomoji galia;

l – jungties aukštis;

b – jungties plotis;

$f_{v,klijų}$ – charakteristinė klijų šlyjamoji galia esamomis sąlygomis.

Klijų kerpamasis stipris nėra pateikiamas gamintojo techninių duomenų lape, tad atlikti teorinius laikomosios galios skaičiavimus nebuvo galimybės atlikti. 2.4 formulėje esantis klijų kerpamasis stipris paprastai turi būti prilyginamas mažesniajai reikšmei, medienos šlyjamajam ar klijų kerpamajam stipriui.

2.5. Teorinių skaičiavimų rezultatai

Pagal aukščiau pateiktas formules gaunami teoriniai laikomosios galios rezultatai (žr. 2.1 lentelę). Detalūs teoriniai sluoksninės lukštų medienos jungčių skaičiavimai pateikiami prieduose.

2.1 lentelė. Sluoksninės lukštų medienos jungčių teorinių skaičiavimų rezultatai

Jungties nr.	Laikomoji galia pagal EC5, kN	Irties pobūdis
1	46,80	Išpjovos glemžimas
	401	Išpjovos nukirpimas
2	17,4	Medsraigčių irtis pagal f modelį (žr. 2.3. skyrių)

2.6. Antrojo skyriaus išvados

1. Teorinių skaičiavimų skyriuje pateikiamos sluoksninės medienos jungčių su išpjovomis ir su medsraigčiais skaičiavimų formulės ir rezultatai. Medienos jungčių su klėjais laikomosios galios nebuvo galima apskaičiuoti, nes gamintojo techniniame lape klijų kerpamasis stipris nebuvo pateiktas.
2. Pagal gautus teorinius skaičiavimus medienos jungtys su išpjovomis turėtų susiglemžti (glemžimo laikomoji galia – 46,80 kN, kirpimo – 401 kN) , o medienos jungtys su medsraigčiais turėtų suirti pagal f modelį (medsraigčių laikomoji galia – 17,4 kN), t.y. turėtų plastiškai deformuotis medsraigčiai.

3. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamos sluoksninės lukštų medienos jungtys, kai naudojamos skirtingos jungimo metodikos. Eksperimentinę dalį sudaro 3 skirtingi medienos jungimo būdai:

- Bandinių jungtys su išpjovomis
- Bandinių jungtys su medsraigčiais
- Bandinių jungtys su klėjais

Eksperimentinių bandymų tikslai:

1. Atlikti bandinių eksperimentinius gniuždymo bandymus, kai naudojami skirtingi jungimo būdai;
2. Nustatyti medžiagų savybes, kurios reikalingos teoriniams skaičiavimams atlikti;
3. Palyginti skirtingų jungčių efektyvumą;

Kad įvykdyti darbo tikslus, atliekami šie eksperimentiniai tyrimai:

1. Lenkiamojo stiprio nustatymas pagal LST EN 408:2010
2. Medienos tankio ir drėgnio tyrimai pagal ISO 3131 ir ISO 3130
3. Medienos jungčių gniuždymo bandymas pagal LST EN 26891:2000

3.1. Eksperimentiniams tyrimams naudojamos medžiagos

Mediena. Bandymams buvo naudota .. stiprumo klasės sluoksninė lukštų mediena pagal LST EN .. standartą. Sluoksninės lukštų medienos plokščių tiekėjas UAB „Gelmeda“. Bandiniams iš viso panaudota 57 vnt. medienos plokščių, kurių matmenys yra 500 x 260 x 45 mm (5 plokštės yra 500 x 300 x 45 mm) (žr. 3.1 pav.). Gamykla pagal darbo brėžinius pagamino plokštes (vienam tipui reikėjo CNC apdirbimo). Laboratorijoje plokštės buvo sujungtos ir gauti 19, skirtingo sujungimo, bandinių.

Medsraigčiai. Vieno tipo bandiniai laboratorijoje buvo sujungiami su nepilnai sriegtais medsraigčiais, negręžiant išankstinių skylių medienoje. Kito tipo bandiniams taip pat buvo naudojami medsraigčiai su išankstiniu skylių gręžimu. Medsraigčių matmenys 5 x 100 mm (žr. 3.2 pav.). Medsraigčių tiekėjas GmbH „Schmid Schrauben Hainfeld“. Medsraigčiai yra iš anglinio plieno, grūdinti.

Klijai. Medienos jungtims su klėjais naudojami poliuretaniniai klijai KLEIBERIT PUR 501.0 (žr. 3.3 pav.). Klijai naudojami suklijuoti medžiagas, kur reikalingas suklijavimo

stiprumas ir atsparumas sudėtingoms aplinkos sąlygoms. Klijus galima naudoti įvairiems medienos gaminiams, betonui, akmenims ir metalams.



3.1 pav. Sluoksninės lukštų medienos plokštės



3.2 pav. Dalinai sriegti medšraigčiai



3.3 pav. Medienos jungtims naudojami klijai

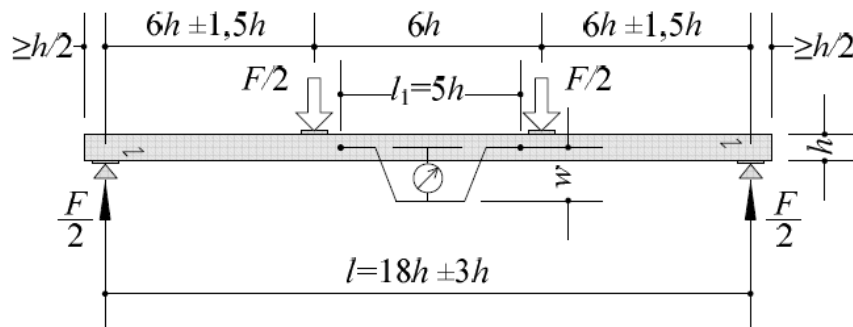
3.2. Eksperimentinių tyrimų metodika

3.2.1. Lenkiamojo stiprio nustatymas

Eksperimentinio tyrimo metodika

Siekiant nustatyti tiriamų jungčių LVL medienos mechanines charakteristikas, eksperimentiškai nustatomas bandinių lenkiamasis stipris. Eksperimentai buvo atliekami Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos fakulteto Metalinių ir kompozitinių konstrukcijų katedros laboratorijoje. Plokščių klasės nustatymui atliekamas lenkiamojo stiprio bandymas pagal LST EN 408:2010 standartą. Nustatant lenkiamąjį stiprį mažiausias bandinio ilgis turi būti ne mažesnis kaip 19 skerspjūvio aukščių. Bandinys apkraunamas pastoviu greičiu – $0,003h \text{ mm/s}$ (Guršnys *et al.* 2011). Bandinys atremiamas ant šarnyrų, tarp kurių atstumas 835 mm. Iš viršaus apkrova perduodama dviem taškais, atstumas tarp taškų 270 mm. Atramose ir apkrovų pridėjimo vietose, norint išvengti glemžimo deformacijų, naudojamos plieninės plokštelės (Guršnys *et al.* 2011).

Eksperimentą sudarė 5 bandiniai (žr. 3.5 pav.), kurių matmenys 900 x 260 x 45 mm. Bandinys apkraunamas gniuždymo jėga presu. Bandinio apkrovimo greitis $8,1 \text{ mm/min}$. Apkrova pridėjama pastoviu greičiu taip, kad irtis įvyktų per 300 sekundžių ($\pm 120 \text{ s}$) (Guršnys *et al.* 2011).



3.4 pav. Sluoksninės lukštų medienos plokštės lenkiamojo stiprio nustatymas (Guršnys *et al.* 2011)



3.5 pav. Sluoksninės lukštų medienos plokštės lenkiamojo stiprio eksperimentas

Lenkiamojo stiprio bandymo rezultatai

Lenkiamasis stipris apskaičiuojamas pagal EN 408:2010 pateiktą išraišką:

$$f_m = \frac{3 \cdot a \cdot F_{max}}{b \cdot h^2}; \quad (3.1)$$

čia:

a – atstumas nuo atramos iki jėgos pridėjimo vietos, mm;

F_{max} – didžiausia jėgos reikšmė, N;

b – bandinio skerspjūvio plotis, mm;

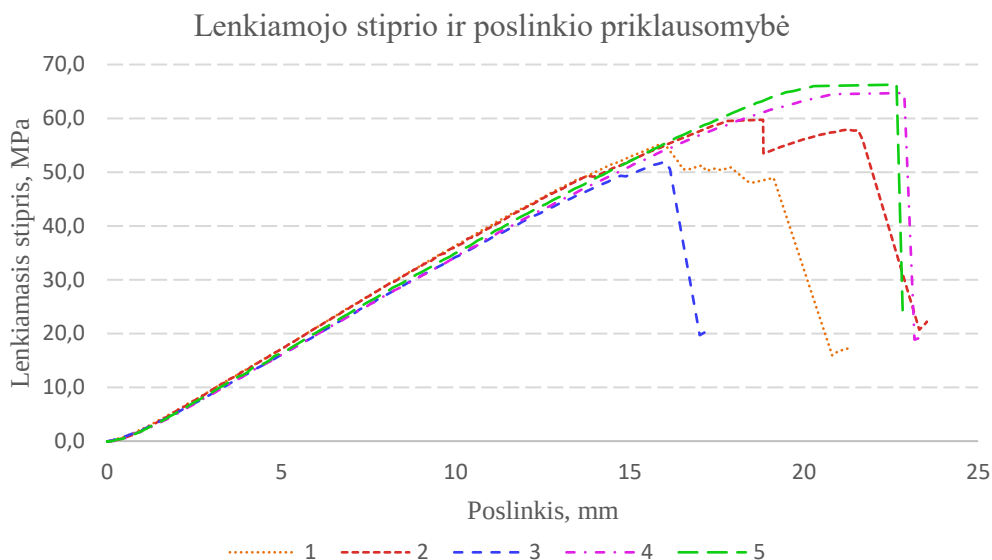
h – bandinio skerspjūvio aukštis, mm.

Gauti eksperimentiniai rezultatai pateikiami .. lentelėje.

3.1 lentelė. Sluoksninės lukštų medienos lenkiamojo stiprio rezultatai

Bandinio nr.	a , mm	b , mm	h , mm	F_{max} , N	f_m , N/mm ²	f_m vidurkis	t , s
1	282,5	260	46	35900	55,30	59,60	196
2	282,5	255	46,1	38200	59,74		228
3	282,5	258	46,2	33800	52,02		176
4	282,5	258	46,2	42040	64,70		216
5	282,5	257	46,5	43450	66,27		209

Apskaičiavus sluoksninės lukštų medienos plokštės lenkiamąjį stiprį kiekvienu užfiksuotu laiko momentu gaunamas visų bandinių lenkiamojo stiprio ir poslinkio priklausomybės grafikas (žr. 3.6 pav.).



3.6 pav. Lenkiamojo stiprio ir poslinkio priklausomybės grafikas

Atlikus eksperimentinius tyrimus gaunama, kad vidutinė sluoksninės lukštų medienos plokščių bandinių lenkiamasis stipris yra 59,60 MPa, standartinis nuokrypis ~ 8 %. Charakteristinis lenkiamasis stipris gaunamas 45,5 MPa, gamintojo lenkiamojo stiprio deklaruoja vertė yra 50 MPa. Gauti elementai deklaruojamos klasės neatitinka.

3.2.2. Medienos tankio ir drėgnio nustatymas

Medienos tankio ir drėgnio nustatymo metodika

Medienos tankis ir drėgnis nustatomi pagal ISO 3131 ir ISO 3130 standartus. Medienos tankio ir drėgnio nustatymui naudojami sluoksninės lukštų medienos bandiniai, kurių matmenys 100 x 100 x 45 mm. Pagal standartus bandinių matmenys matuojami 0,1 mm tikslumu, o sveriami 0,01 g tikslumu. Pamatavus ir pasvėrus bandinius, medienos tankis esant W drėgniui apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\rho_W = \frac{m_W}{a_W \cdot b_W \cdot l_W}; \quad (3.2)$$

čia:

ρ_W – medienos tankis esant W medienos drėgniui, kg/m³;

m_W – medienos masė esant W medienos drėgniui, kg;

a_W – bandinio aukštis, mm;

b_W – bandinio plotis, mm;

l_W – bandinio ilgis, mm;

Ekspimentiškai nustatant medienos drėgnį yra nustatoma medienos masė m_1 , esant medienos drėgniui W ir medienos masė m_2 , esant sausai medienai. Turint šiuos dydžius, medienos drėgnis apskaičiuojamas pagal išraišką 1 % tikslumu:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100\%; \quad (3.3)$$

Medienos drėgnis gali būti nustatomas ir elektoriniu drėgnomačiu, tačiau gaunami rezultatai nėra tokie tikslūs.

Medienos tankio ir drėgnio eksperimentinio tyrimo rezultatai

Medienos tankiui ir drėgniui nustatyti 100 x 100 x 45 mm dydžio bandiniai išpjauti iš sluoksninės lukštų medienos plokščių. Iš viso ištirti 5 mediniai bandiniai. Išpjovus taisyklingos formos bandinius, jie yra pamatuojami elektroniniu slankmačiu ir pasveriami. Paruošti bandiniai yra džiovinami kameroje, kurios temperatūra 105 ± 2 °C, iki kol pasiekama pastovi masė. Bandymas laikomas baigtu, kai tarp bandinių svėrimų masės sumažėjimas yra mažesnis nei 0,5 %. Džiovinimo kameroje bandiniai laikomi 24 valandas. Išdžiovinus bandinius nustatoma jų masė m_2 . Turint duomenis, kurie pateikti 3.3 lentelėje, yra apskaičiuojamas medienos tankis ir drėgnis. Kiekvieno bandinio matmenys buvo matuojami tris kartus ir apskaičiuotos vidutinės reikšmės, kurios pateiktos 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Bandinių duomenys

Bandinio nr.	Matmenys, mm			Tūris V , m^3
	a	b	c	
1	101,2	101,5	46,23	0,000475
2	101,5	101,5	46,14	0,000475
3	100,5	100,9	45,42	0,000461
4	101,2	100,5	45,42	0,000462
5	101,5	101,5	45,21	0,000466

3.3 lentelė. Medienos tankio ir drėgnio skaičiavimo rezultatai

Bandinio nr	Masė m_1 prieš džiovinimą, kg	Masė m_2 po džiovinimo, kg	Apskaičiuotas medienos tankis, ρ_M , kg/m ³	Bandinių drėgnis W, %
1	0,24975	0,2323	525,9386	7,511838
2	0,25508	0,23738	536,6199	7,456399
3	0,24333	0,22642	528,313	7,468422
4	0,24280	0,22718	525,5995	6,875605
5	0,24521	0,22837	526,4675	7,373998

Iš rezultatų pateiktų .. lentelėje matoma, kad tankio reikšmės yra panašios, standartinis nuokrypis $\sim 0,6$ %. Tankio vidurkis ρ_{vid} 528,588 kg/m³. Bandinių drėgnio standartinis nuokrypis $\sim 2,5$ %.

3.2.3. Bendra jungčių eksperimentinių tyrimų informacija

Eksperimentinių tyrimų metu iš viso buvo ištirta 19 jungčių bandinių. Bandinius galima išskirti į tris tipus:

- Jungtys su išpjovomis;
- Jungtys su medsraigčiais;
- Jungtys su kliais suspaudžiant medsraigčiais.

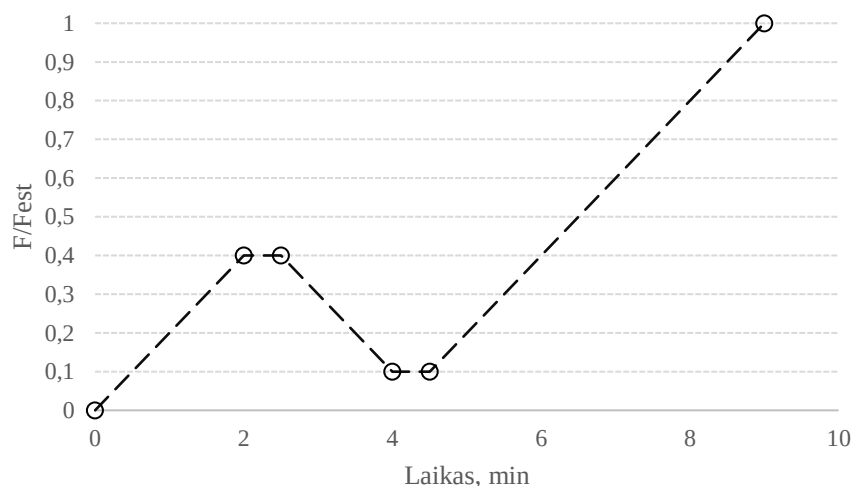
Detalesnę informaciją apie bandinius galima rasti .. lentelėje.

3.4 lentelė. Eksperimentinių bandinių tipas, numeris ir jungties tipas

Bandinio tipas	Bandinio numeris	Jungties būdas
1	2	3
1	1 bandinys/1 variantas	Jungtis su išpjovomis
	1 bandinys/2 variantas	
	1 bandinys/3 variantas	
	1 bandinys/4 variantas	
	1 bandinys/5 variantas	
2	2 bandinys/1 variantas	Jungtis su medsraigčiais
	2 bandinys/2 variantas	
	2 bandinys/3 variantas	
	2 bandinys/4 variantas	
	2 bandinys/5 variantas	

1	2	3
3	3 bandinys/1 variantas	Jungtis su klėjais suspaudžiant 6 medsraigčiais
	3 bandinys/2 variantas	
	3 bandinys/3 variantas	
	3 bandinys/4 variantas	
4	4 bandinys/1 variantas	Jungtis su klėjais suspaudžiant 8 medsraigčiais
	4 bandinys/2 variantas	
	4 bandinys/3 variantas	
	4 bandinys/4 variantas	
	4 bandinys/5 variantas	

Jungčių laikomosios galios tyrimas buvo atliekamas pagal LST EN 26891:2000 standartą. Bandymo apkrovimo procedūra atliekama pagal .. pav. pateiktą kreivę.

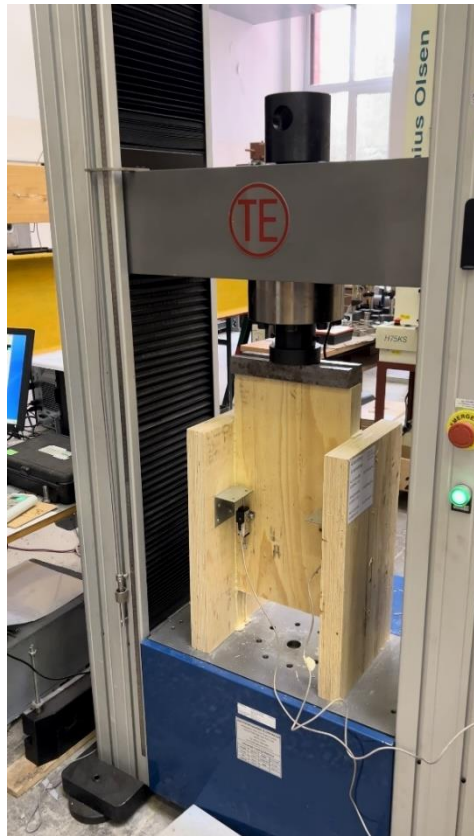


3.7 pav. Apkrovos pridėjimo procedūra

Bandinys apkraunamas iki $0,4F_{est}$, kur F_{est} – prognozuojamoji ardomoji apkrova. Pasiekus šią apkrovą yra vykdomas 30 sekundžių išlaikymas. Tuomet bandinys yra nukraunamas iki $0,1F_{est}$, ši apkrova taip pat išlaikoma 30 sekundžių. Po to apkrova yra keliama nustatytu greičiu tolygiai iki kol bandinys suyra, tai yra pasiekiami maksimali ardančioji apkrova F_{est} arba iki tol kol pasiekiamas 15 mm poslinkis (LST EN 26891). Prognozuojamoji ardomoji apkrova yra apskaičiuojama eksperimentinio tyrimo pasiruošimo metu pagal norminių dokumentų arba literatūros pateiktas metodikas (Gečys, 2010). Būtina atsižvelgti į tai, kad charakteristinė reikšmė, kuri apskaičiuota pagal medinių konstrukcijų projektavimo norminius dokumentus, yra 1,5 karto didesnė nei eksperimentinė.

Medienos jungties su išpjovomis laikomosios galios eksperimentinis tyrimas atliekamas Vilniaus Gedimino technikos universitete Metalinių ir medinių konstrukcijų

katedros laboratorijoje. Bandinys apkraunamas išskirstyta gniuždymo apkrova WDW-200 bandymo presu. Išskirstyti apkrovai ant bandinio buvo uždėtos dvi plokštelės 0,75 x 2 mm storio, po 3.1 bandinio plokštelės pakeistos į vieną plokštelę, kurios storis 3,5 mm. Apkrovimo procedūra valdoma automatiškai būdu, naudojantis ALMEMO 2890-9 prietaisu (žr. 3.8 pav.), kuris fiksuoja poslinkius ir apkrovos dydį. Bandinių apkrovimo greitis yra 1,2 mm/min.

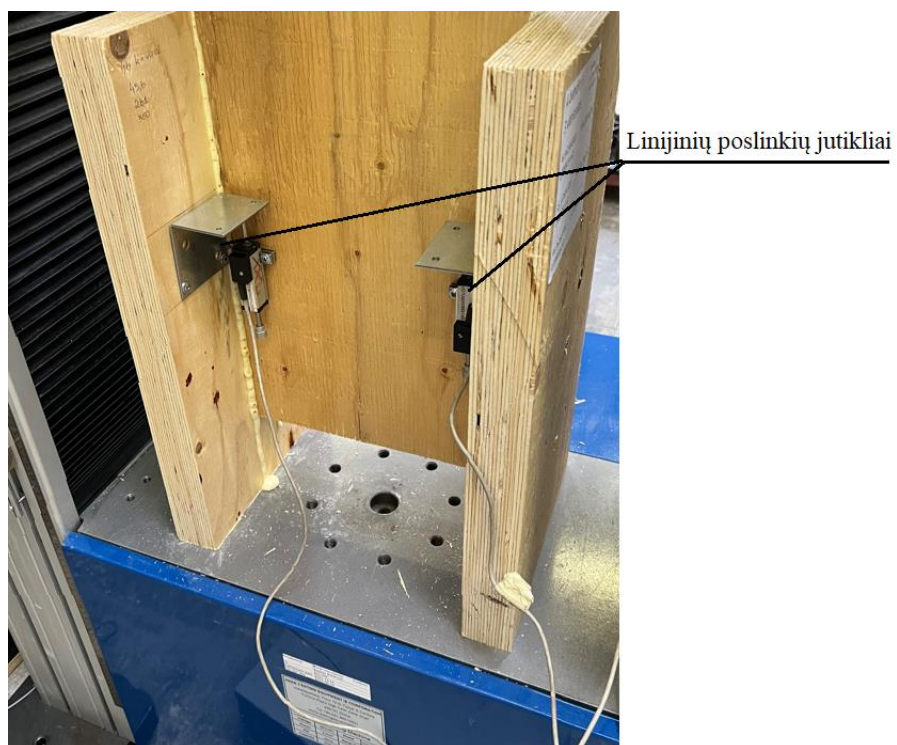


3.8 pav. Bandymo apkrovimas eksperimento metu



3.9 pav. Poslinkių ir apkrovos fiksavimo įrenginys ALMEMO 2890-9

Linijinių deformacijų jutikliai fiksuoja slinktį tarp medienos vidurinio ir kraštinio elementų (žr. 3.9 pav.)

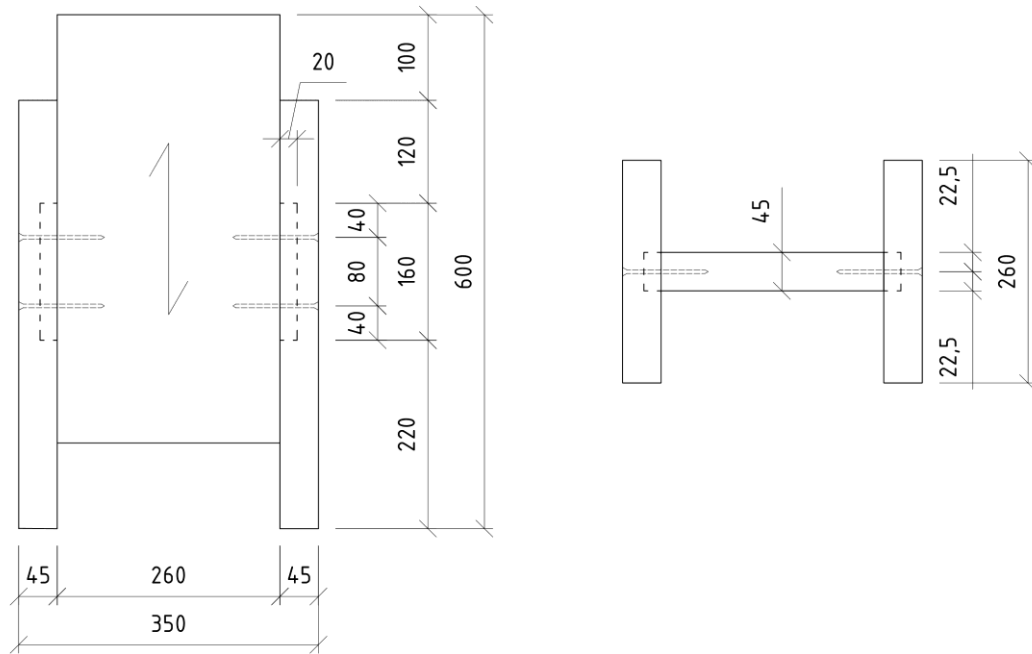


3.10 pav. Linijinių poslinkių jutiklių išdėstymas

3.2.4. Jungties su išpjovomis laikomosios galios eksperimentinis tyrimas

Bandymo metodikos apžvalga ir tyrimo objektas

Medienos jungties su išpjovomis detali schema pateikta 3.11 paveiksle. Bandinio tipas 1-asis.



3.11 pav. Medienės jungties su išpjovomis detali schema iš šono ir iš viršaus



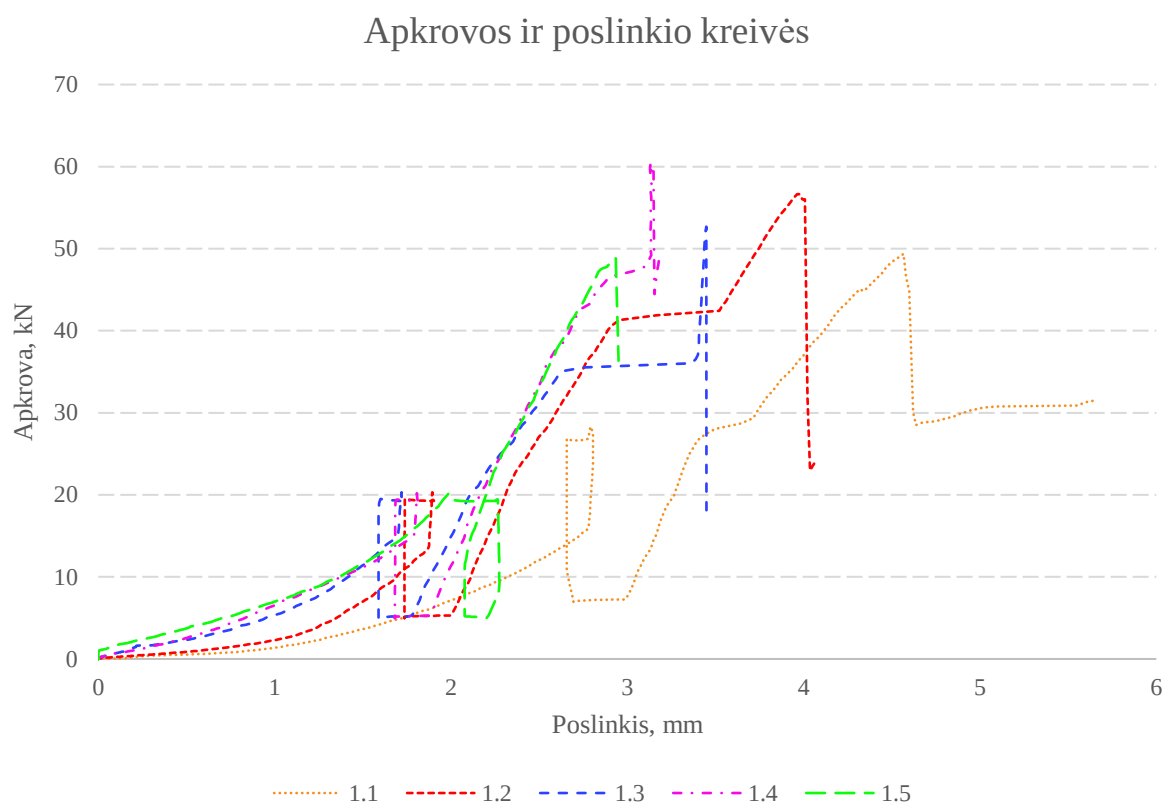
3.12 pav. Medinių jungčių su išpjovomis eksperimentui paruošti bandiniai

3.5 lentelė. Medienos jungties su išpjovomis faktiniai geometriniai matmenys

Bandinio nr	Plokštės nr	Plokštė			Iškiša/išpjova			Iškiša		
		Storis, mm	Plotis, mm	Ilgis, mm	Storis, mm	Plotis, mm	Ilgis, mm	Storis, mm	Plotis, mm	Ilgis, mm
1 bandinys/ 1 variantas	1	46,5	257	500	46,4	21	160	46,0	21	159
	2	47,0	260	500	23,0	50	163	-	-	-
	3	47,1	260	500	24,0	49	164	-	-	-
1 bandinys/ 2 variantas	1	46,4	259	500	46,1	19	160	46,7	20	160
	2	46,0	258	501	23,7	49	162	-	-	-
	3	46,7	260	500	24,0	49	164	-	-	-
1 bandinys/ 3 variantas	1	46,8	255	500	45,9	21	160	46,3	21	160
	2	46,7	252	500	25,3	48	162	-	-	-
	3	47,4	259	500	25,0	50	163	-	-	-
1 bandinys/ 4 variantas	1	46,8	255	500	45,9	21	160	46,3	21	160
	2	46,7	252	500	25,3	48	162	-	-	-
	3	47,4	259	500	25,0	50	163	-	-	-
1 bandinys/ 5 variantas	1	46,4	256	500	47,0	21	160	46,6	21	160
	2	46,3	260	500	23,5	49	164	-	-	-
	3	47,1	259	500	23,5	50	164	-	-	-

Medienos jungties su išpjovomis laikomosios galios bandymo rezultatai

Apkraunant bandinius išskirstyta gniuždymo jėga viso eksperimento metu buvo fiksuojamas poslinkis tarp medienos vidurinio ir kraštinio elementų ir apkrovos dydis. Pagal gautus duomenis kiekvienam bandiniui braižoma apkrovos – poslinkio kreivė (žr. 3.13 pav.). Kreivė parodo jungties elgsenos charakterį ir suirimo pobūdį. Poslinkis tarp medienos vidurinio ir kraštinio elementų matuojamas linijiniais poslinkių jutikliais, 3.13 paveiksle pateikiama vidutinė dviejų poslinkių jutiklių reikšmė.



3.13 pav. Medienos jungčių su išpjovomis apkrovos ir poslinkio kreivės

Atlikus medienos jungčių su išpjovomis bandymus, nustatomos laikomosios galios arba maksimalios pasiektos jėgų reikšmės (žr. 3.6 lentelę). Laikomoji galia tai maksimali apkrova, kuri pasiekta kontakto suirimo metu.

3.6 lentelė. Bandinių laikomosios galios rezultatai

Bandinio nr	Jungties laikomoji galia, kN	Vidutinė jungties laikomoji galia, kN	Standartinis nuokrypis	Suirimo pobūdis
1 bandinys/1 variantas	49,37	53,63	2,13	Staigus medienos suirimas
1 bandinys/2 variantas	56,66		1,52	Staigus medienos suirimas
1 bandinys/3 variantas	52,68		0,47	Staigus medienos suirimas
1 bandinys/4 variantas	60,52		3,45	Staigus medienos suirimas
1 bandinys/5 variantas	48,90		2,36	Staigus medienos suirimas

Eksperimentiniai rezultatai analizuojami 4 skyriuje.

Bandinių suirimo formos

Visi bandiniai su išpjovomis suiro vienodai. Visais atvejais įvyko staigus medienos vidurinio elemento iškišos skilimas išilgai pluošto (žr. 3.14 pav.)



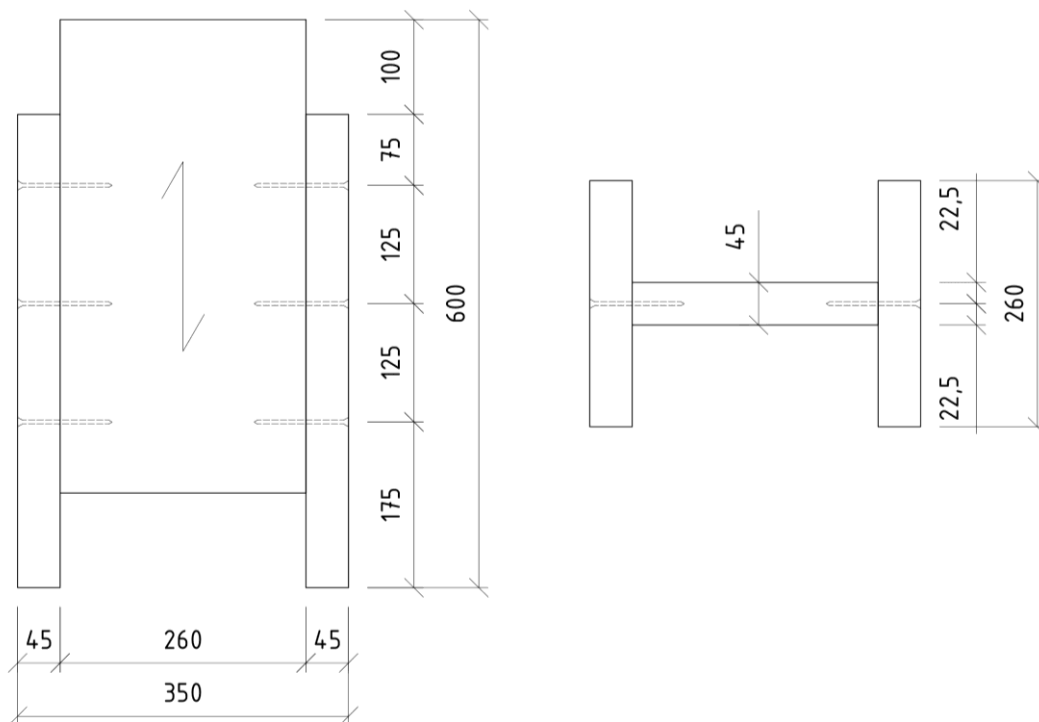
3.14 pav. Medienos jungties su išpjova suirimo forma: iškišos skilimas išilgai pluošto

Atlikus eksperimentinius tyrimus bandiniai buvo išsukti, kad įvertinti suirimo formą. Visi medienos jungčių su išpjovomis bandiniai suiro vienodai. Pasiekus maksimalią apkrovą, kuri nurodyta 3.6 lentelėje, bandinių iškišos buvo nukirptos. Pagal teorinius skaičiavimus irties pobūdis buvo iškišos glemžimas.

3.2.5. Jungties su medsraigčiais laikomosios galios eksperimentinis tyrimas

Bandymo tyrimo objektas

Kitas būdas sujungti medieną yra naudoti medsraigčius (žr. 3.15 pav.). Bandinio tipas 2-asis.



3.15 pav. Medinės jungties su medsraigčiais detali schema iš šono ir iš viršaus



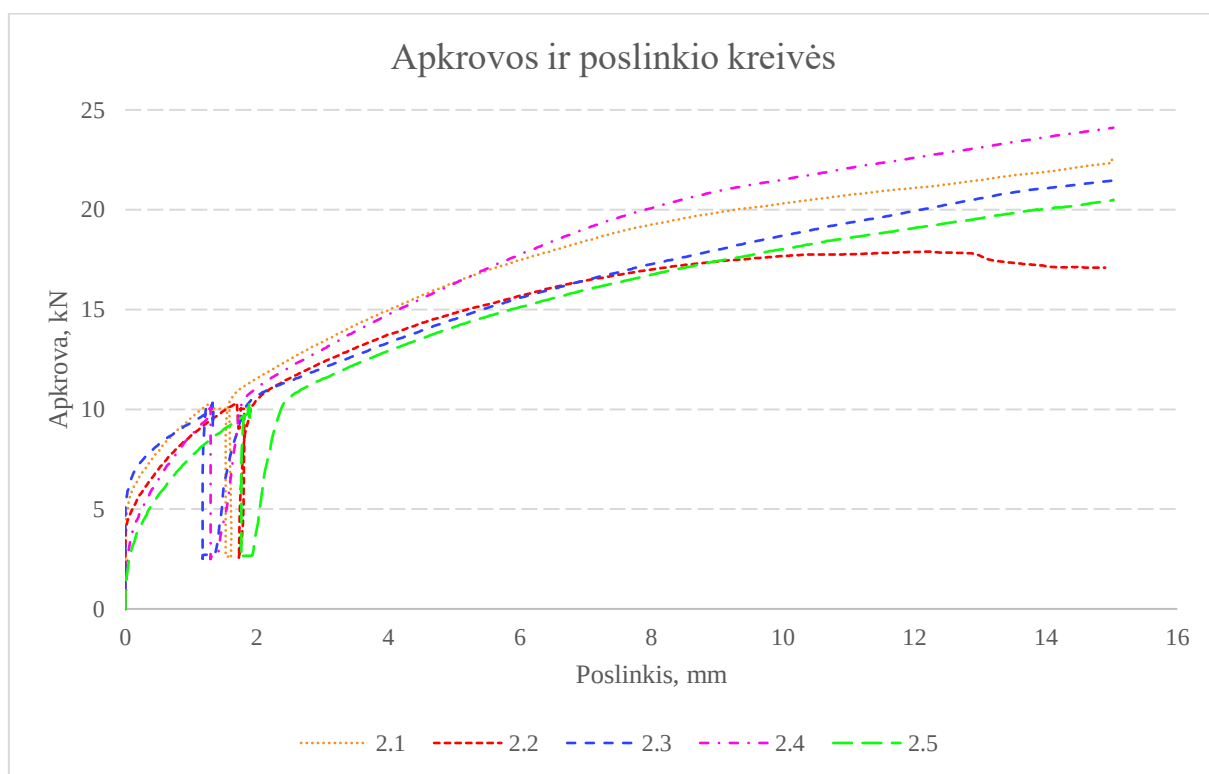
3.16 pav. Medinių jungčių su medsraigčiais eksperimentui paruošti bandiniai

3.7 lentelė. Medienos jungties su medsraigčiais faktiniai geometriniai matmenys

Bandinio nr	Plokštės nr	Storis, mm	Plotis, mm	Ilgis, mm
2 bandinys/1 variantas	1	46,1	259	500
	2	47,0	260	500
	3	46,9	260	500
2 bandinys/2 variantas	1	46,5	259	500
	2	45,7	260	500
	3	46,0	259	500
2 bandinys/3 variantas	1	46,5	260	500
	2	46,7	262	501
	3	46,2	261	501
2 bandinys/4 variantas	1	46,0	260	500
	2	46,0	258	500
	3	46,7	260	501
2 bandinys/5 variantas	1	46,7	261	500
	2	45,7	262	501
	3	45,7	262	500

Medienos jungties su medsraigčiais laikomosios galios bandymo rezultatai

Pagal gautus duomenis kiekvienam bandiniui braižoma apkrovos – poslinkio kreivė (žr. 3.17 pav.).



3.17 pav. Medienos jungčių su medsraigčiais apkrovos ir poslinkio kreivės

Atlikus medienos jungčių su medsraigčiais bandymus, nustatomos laikomosios galios arba maksimalios pasiektos jėgų reikšmės (žr. 3.8 lentelę).

3.8 lentelė. Bandinių su medsraigčiais laikomosios galios rezultatai

Bandinio nr	Jungties laikomoji galia, kN	Vidutinė jungties laikomoji galia, kN	Standartinis nuokrypis	Suirimo pobūdis
2 bandinys/1 variantas	22,60	21,32	0,64	Plastinis medsraigčių irimas
2 bandinys/2 variantas	17,90		1,71	Plastinis medsraigčių irimas
2 bandinys/3 variantas	21,48		0,08	Plastinis medsraigčių irimas
2 bandinys/4 variantas	24,11		1,40	Plastinis medsraigčių irimas
2 bandinys/5 variantas	22,60		0,41	Plastinis medsraigčių irimas

Bandinių suirimo formos

Visi bandiniai su medsraigčiais suiro vienodai. Visais atvejais vyko lėtas medsraigčių tekėjimas gniuždant bandinį (žr. 3.18 pav.)



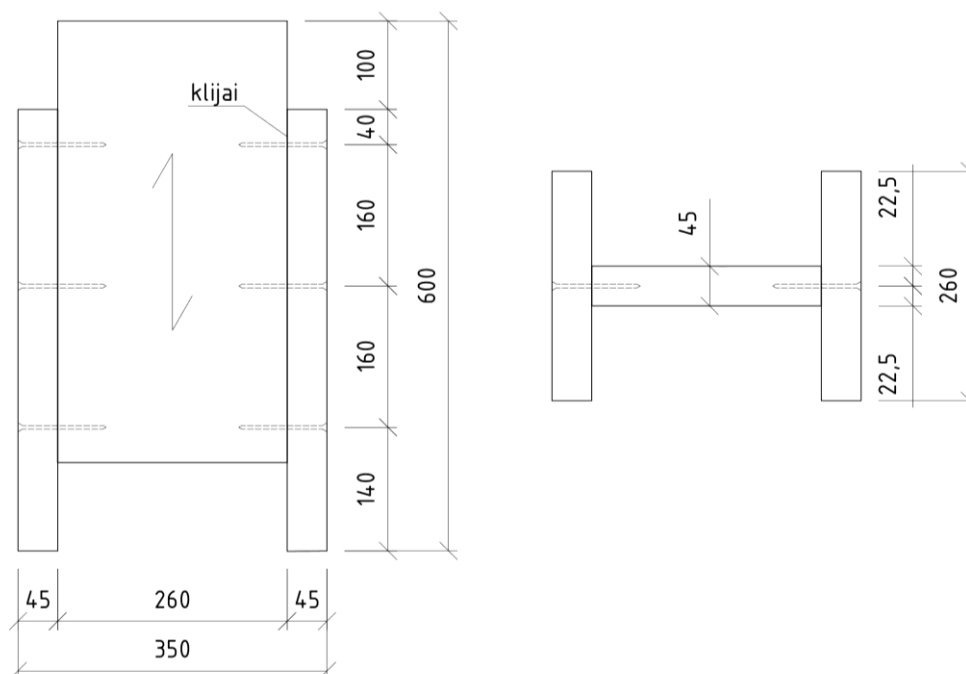
3.18 pav. Medienos jungties su medsraigčiais suirimo forma: lėtas medsraigčių tekėjimas, deformavosi medsraigčiai

Medienos jungčių su medsraigčiais suirimo pobūdis vienodas. Išsukus medsraigčius buvo pastebėta, kad medsraigčiais plastiškai deformavosi. Mediena ties medsraigčių vietomis šiek tiek pasiglemžusi. Jungtis suiro taip kaip buvo prognozuojama teoriniais skaičiavimais.

3.2.6. Jungties su klėjais laikomosios galios eksperimentinis tyrimas

Bandymo tyrimo objektas

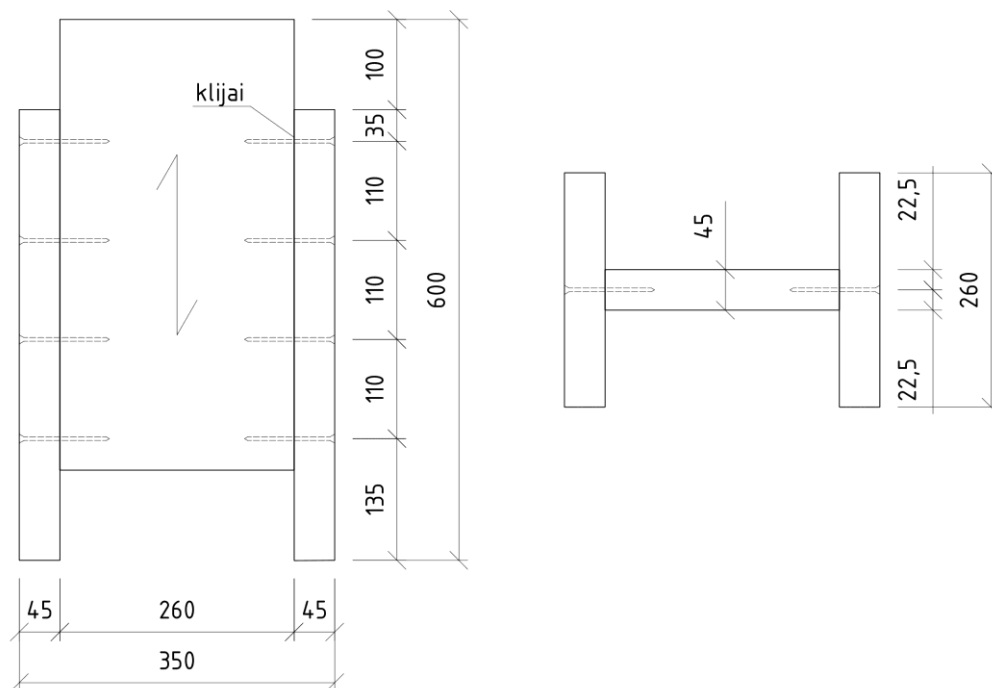
Kitas būdas sujungti medieną yra kljuoti jungtis suspaudžiant elementus medsraigčiais (žr. 3.19 pav. ir 3.21 pav.). Medsraigčiai įsijungia į darbą tik tuomet, kai klėjai suyra. Šių eksperimentinių tyrimų, kurie atliekami su skirtingu kiekiu medsraigčių, tikslas yra nustatyti medsraigčių apspaudimo įtaką kljuotinės jungties laikomajai galiai.



3.19 pav. Medinės jungties su klėjais, kai 6 medsraigčiai naudojami klijų suspaudimui, detali schema iš šono ir iš viršaus



3.20 pav. Medinių jungčių su klijais ir suspaustų 6 medsraigčiais eksperimentui paruošti bandiniai



3.21 pav. Medinės jungties su klijais, kai 8 medsraigčiai naudojami klijų suspaudimui, detali schema iš šono ir iš viršaus



3.22 pav. Medinių jungčių su kljais ir suspaustų 6 medsraigčiais eksperimentui paruošti bandiniai

3.9 lentelė. Medienos jungties su medsraigčiais faktiniai geometriniai matmenys

Bandinio nr	Plokštės nr	Storis, mm	Plotis, mm	Ilgis, mm
3 bandinys/1 variantas	1	45,6	260	500
	2	45,8	261	500
	3	46,0	260	500
3 bandinys/2 variantas	1	45,7	261	500
	2	45,9	261	500
	3	45,8	262	500
3 bandinys/3 variantas	1	47,5	260	500
	2	46,5	262	500
	3	46,5	260	501
3 bandinys/4 variantas	1	46,5	260	500
	2	46,0	260	500
	3	45,9	260	500
4 bandinys/1 variantas	1	46,9	260	500
	2	46,1	262	500
	3	46,0	259	500
4 bandinys/2 variantas	1	46,0	260	500
	2	45,8	261	500
	3	46,0	260	500
4 bandinys/3 variantas	1	46,3	258	500
	2	45,6	261	500
	3	46,3	260	500
4 bandinys/4 variantas	1	45,7	260	500
	2	45,8	261	500
	3	46,1	261	500
4 bandinys/5 variantas	1	45,8	261	500
	2	45,5	262	500
	3	45,3	261	500

Medienos jungties su klizais laikomosios galios bandymo rezultatai

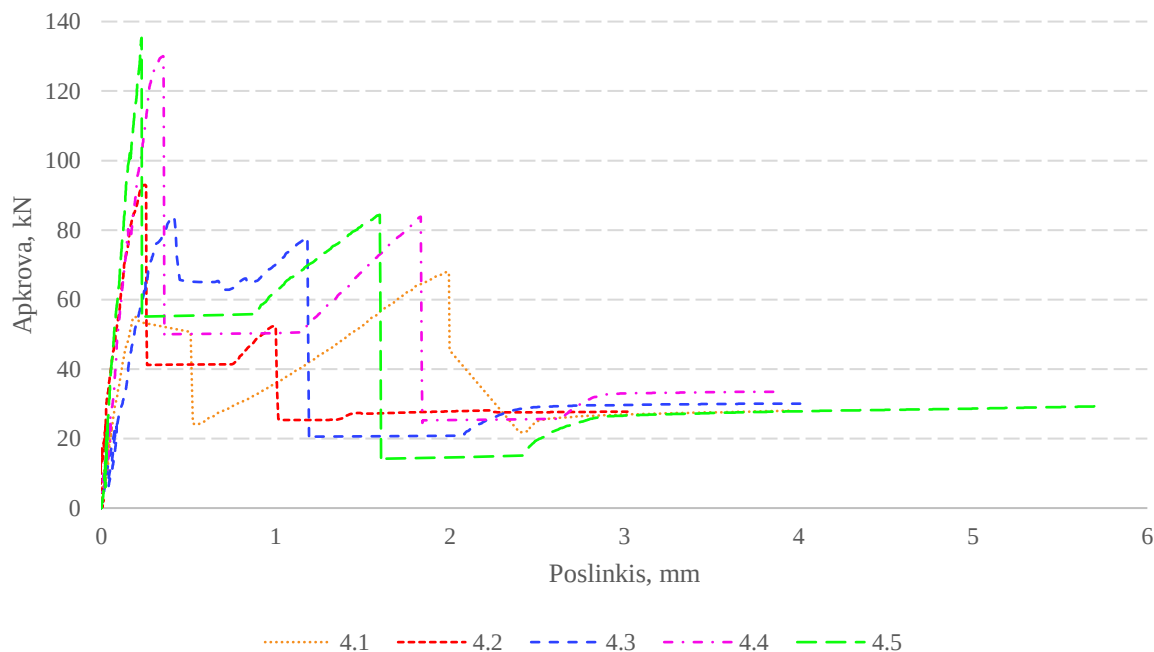
Pagal gautus duomenis kiekvienam bandiniui braižoma apkrovos – poslinkio kreivė (žr. 3.23 ir 3.24 pav.).



3.23 pav. Medienos jungčių su klizais, kuomet naudojami 6 medsraigčiai apkrovos ir poslinkio kreivės

Apdorojant duomenis buvo pastebėta, jog atliekant 3.3 bandymą poslinkių jutikliai nerodė jokio pasislinkimo.

Apkrovos ir poslinkio kreivė



3.24 pav. Medienos jungčių su kljais, kuomet naudojami 8 medsraigčiai apkrovos ir poslinkio kreivės

Atlikus medienos jungčių su kljais bandymus, nustatomos laikomosios galios arba maksimalios pasiektos jėgų reikšmės (žr. 3.10 lentelę).

3.10 lentelė. Bandinių su kljais laikomosios galios rezultatai

Bandinio nr	Jungties laikomoji galia, kN	Vidutinė jungties laikomoji galia, kN	Standartinis nuokrypis	Suirimo pobūdis
3 bandinys/1 variantas	139,88	102,87	18,51	Staigi klijų irtis
3 bandinys/2 variantas	80,26		11,31	Staigi klijų irtis
3 bandinys/3 variantas	70,04		16,42	Staigi klijų irtis
3 bandinys/4 variantas	121,30		9,22	Staigi klijų irtis
4 bandinys/1 variantas	67,92	102,06	17,07	Staigi klijų irtis
4 bandinys/2 variantas	92,99		4,54	Staigi klijų irtis
4 bandinys/3 variantas	84,03		9,02	Staigi klijų irtis
4 bandinys/4 variantas	130,05		13,99	Staigi klijų irtis
4 bandinys/5 variantas	135,32		16,63	Staigi klijų irtis

Bandinių suirimo formos

Visi bandiniai su klijais suiro vienodai. Visais atvejais įvyko staigus klijų irimas ir bandinys plyšo per vidurį vidurinio elemento (žr. 3.25 pav.)



3.25 pav. Medienos jungties su klijais suirimo forma

Atlikus medienos jungčių su klijais eksperimentinius tyrimus ir apžiūrėjus bandinius matome, kad bandinio vidurinė plokštė plyšo per visus sluoksnius. Taip galėjo atsitikti, dėl skėtimo jėgų atsiradusių spaudžiant bandinį didele jėga. Jungties irtis yra per klijų sluoksnį, kaip ir buvo numatyta.

3.3. Trečiojo skyriaus išvados

1. Atlikus skirtingų sluoksninės lukštų medienos jungčių eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad skirtingai sujungus medienos elementus, jų veikimas eksperimento metu skyrėsi. Pirmuoju atveju, kuomet medienos jungtis yra su išpjovomis, jungtis laikomosios galios netenka staiga, kai iškiša, esanti viduriniame bandinio elemente, yra nukerpama. Antruoju atveju, kuomet medienos jungtis yra su medsraigčiais, jungtis suyra plastiškai, jungtis savo maksimalios prognozuojamos laikomosios galios nepasiekia. Trečiuoju ir ketvirtuoju atveju, kuomet medienos jungtis yra su klijais, o apspaudimas klijams perduodama šešiais arba aštuoniais medsraigčiais atitinkamai, jungtis laikomosios galios netenka staiga, įvyksta trapi klijų irtis. Taip pat galimai dėl

skėtimo jėgų bandinio apačioje vidurinis elementas eksperimento metu įplyšta per visus sluoksnius.

2. Atlikus medienos elementų eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad vidutinis sluoksninės lukštų medienos lenkiamasis stipris išilgai pluošto – $59,60 \text{ MPa}$, medienos vidutinė tankio reikšmė – $528,59 \text{ kg/m}^3$ (tankio standartinis nuokrypis $\sim 2,5 \%$), vidutinis medienos drėgnis – $7,34 \%$.
3. Medienos jungčių su išpjovomis vidutinė laikomoji galia – $53,63 \text{ kN}$ (variacijos koeficientas $\sim 8 \%$), medienos jungčių su medsraigčiais vidutinė laikomoji galia – $21,32 \text{ kN}$ (variacijos koeficientas $\sim 10 \%$), medienos jungčių su klėjais vidutinė laikomoji galia – $102,5 \text{ kN}$ (variacijos koeficientas $\sim 27 \%$).
4. Medienos jungtys su klėjais buvo apspaudžiamos 6 arba 8 medsraigčiais. Rezultatai nepriklausomai nuo apspaudimui naudojamų medsraigčių kiekio yra panašūs. Jungties eksperimentiniai rezultatai turi didelį variacijos koeficientą ($\sim 27 \%$).

4. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATŲ VERTINIMAS IR Palyginimas su teoriniais skaičiavimais

4.1. Eksperimentinių ir teorinių laikomųjų galių palyginimas

Gniuždomų sluoksninės lukštų medienos jungčių su išpjovomis, medsraigčiais ir klėjais laikomoji galia gali būti apskaičiuojama pagal kelias metodikas, šiame darbe pasirinkta skaičiuoti pagal EC5. Baigiamajame darbe 2.2 2.3 ir 2.4 poskyriuose pateikti medinių jungčių su išpjovomis, medsraigčiais ir su klėjais teoriniai skaičiavimai. Eksperimentinių tyrimų rezultatai, kurie pateikti 3.2.3 – 3.2.5 skyreliuose, palyginami su teorinėmis laikomosiomis galiomis.

4.1.1. Medienos jungčių su išpjovomis palyginimas

4.1 lentelė. Medienos jungčių su išpjovomis eksperimentinių ir teorinių laikomųjų galių palyginimas

Bandinio nr	Eksperimentinė jungties laikomoji galia, kN	Laikomoji galia pagal EC5 (glemžimas), kN	Santykis
1.1	49,37	46,80	1,05
1.2	56,66	46,80	1,21
1.3	52,68	46,80	1,13
1.4	60,52	46,80	1,29
1.5	48,90	46,80	1,04

4.1 lentelėje pateikiami penkių sluoksninės lukštų medienos jungčių su išpjovomis bandinių teoriniai ir eksperimentiniai rezultatai. Iš gautų rezultatų matyti, kad eksperimentinė laikomoji galia yra didesnė nei teorinė laikomoji galia. Gautų eksperimentinių laikomųjų galių variacijos koeficientas ~ 8 %.

4.1.2. Medienos jungčių su medsraigčiais palyginimas

4.2 lentelė. Medienos jungčių su medsraigčiais eksperimentinių ir teorinių laikomųjų galių palyginimas

Bandinio nr	Eksperimentinė jungties laikomoji galia, kN	Laikomoji galia pagal EC5, kN	Santykis
2.1	22,60	17,4	1,30
2.2	17,90	17,4	1,03
2.3	21,48	17,4	1,23
2.4	24,11	17,4	1,39
2.5	20,50	17,4	1,18

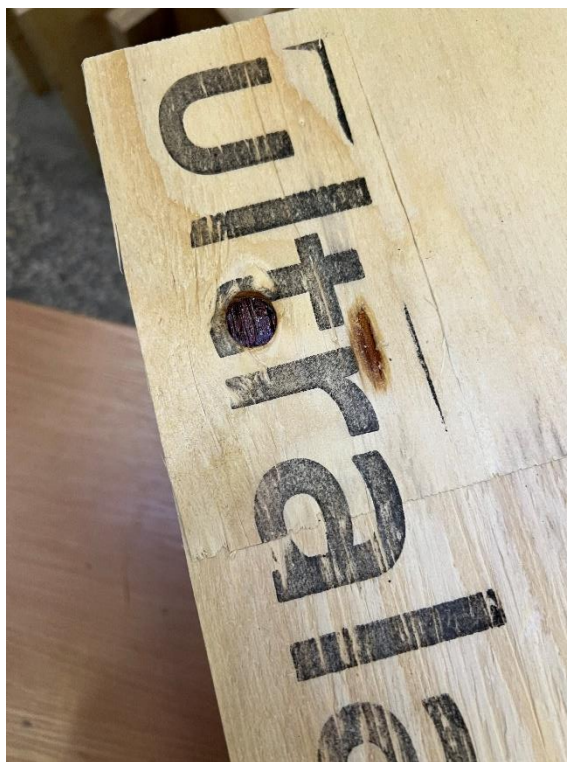
4.2 lentelėje pateikiami penkių sluoksninės lukštų medienos jungčių su medsraigčiais bandinių teoriniai ir eksperimentiniai rezultatai. Iš gautų rezultatų matyti, kad visų bandinių eksperimentinė jungties laikomoji galia yra didesnė už teorinę. 2.2 bandinio eksperimentinė laikomoji galia yra mažiausia, taip galėjo įvykti dėl to, kad medienos savybės varijuoja. Visi mazgai buvo daromi Vilniaus Gedimino technikos universitete Statybos fakulteto Metalinių ir kompozitinių konstrukcijų katedros laboratorijoje. Rezultatų variacijos koeficientas ~ 10 %.

4.2. Medinių elementų defektai

Eksperimentiniams rezultatams įtakos galėjo turėti sluoksninės lukštų medienos elementų defektai. Visų bandinių plokštės turėjo juodo ar pilko atspalvio. Gaminiai galėjo pakeisti spalvą dėl drėgmės. Kai kurios plokštės turėjo atplaišas (žr. 4.1 pav.). Išoriniuose sluoksninės lukštų medienos plokštės sluoksniuose buvo matomos šakos, kai kur šakų viduriukai yra iškritę (žr. 4.2 pav.). Taip pat buvo rasti keli bandiniai, kurie turėjo išlinkį iš plokštumos (žr. 4.3 pav.)



4.1 pav. Medienos elemento krašto atplaiša



4.2 pav. Medienos elemento išorinio sluoksnio šakos defektas



4.3 pav. Medinio elemento išsigaubimas

4.3. Ketvirtosios skyriaus išvados

1. Sluoksninės lukštų medienos jungčių su išpjovomis eksperimentinė jungties laikomoji galia visų bandinių yra didesnė už teorinę. Pagal teorinius skaičiavimus jungtis turėjo suirti suglemžus iškišą. Atlikus eksperimentinius bandymus visų bandinių jungtys suiro nukirpus iškišą. Taip galėjo atsitikti dėl to, kad medienos elementai neatitinka deklaruojamos gamintojo klasės. Reikia tolimesnių tyrimų, kad ištirti.
2. Medienos jungčių su medsraigčiais teorinė laikomoji galia lyginant su visomis eksperimentinių bandymų vertėmis yra mažesnė. Vieno bandinio eksperimentinė laikomoji galia ir teorinė skiriasi 0,5 kN. Taip gali būti dėl to, kad surenkant bandinius laboratorijoje medsraigčiais nebuvo tiksliai įgręžti.
3. Jungčių su kljais teoriniai skaičiavimai nebuvo atliekami, todėl palyginti eksperimentinių ir teorinių rezultatų negalima. Jungčių eksperimentiniai rezultatai turi didelę sklaidą. Suirimas įvyko per kljų siūlę, kaip ir buvo planuota.
4. Medienos elementai turėjo defektų, kurie aprašyti 4.2 poskyryje, kurie galėjo turėti įtakos bandinių laikomajai galiai.

IŠVADOS IR SIŪLYMAI

1. Sluoksninės medienos jungtys su išpjovomis nėra plačiai ištirtos, todėl yra aktualu toliau tirti šiais jungtis, nustatyti tikslų mazgo laikomosios galios skaičiavimo metodą.
2. Baigiamajame magistro darbe buvo atliekami eksperimentiniai bandymai. Ištirtos trys medienos jungtys, su išpjovomis, su medsraigčiais ir su kljais. Medienos jungties su kljais laikomoji galia buvo didžiausia, tačiau rezultatų variacijos koeficientas $\sim 30\%$.
3. Medienos jungties su išpjovomis irtis įvyko staigiai, kai buvo nukirpta iškiša. Pagal teorinius skaičiavimus iškiša turėjo būti glemžiama (teorinė jungties laikomoji galia – 46,8 kN), gniuždomoji galia (teorinė jungties laikomoji galia – 401 kN) šiai jungčiai buvo daug didesnė. Šiai jungčiai reiktų atlikti daugiau eksperimentinių tyrimų.
4. Medienos jungčių su išpjovomis vidutinė eksperimentinė laikomoji galia – 53,63 kN, rezultatų variacijos koeficientas $\sim 8\%$. Jungties su medsraigčiais vidutinė eksperimentinė laikomoji galia – 21,32 kN, rezultatų variacijos koeficientas $\sim 10\%$. Naudojant kljus vidutinė eksperimentinė laikomoji galia – 102,47 kN, rezultatų variacijos koeficientas $\sim 30\%$.
5. Medienos jungčių su išpjovomis eksperimentinio tyrimo rezultatai parodė, kad šias jungtis reikia tirti toliau, nes medienos irties pobūdis eksperimento metu buvo kitoks, nei buvo prognozuojama teoriniais skaičiavimais. Medienos jungtys su medsraigčiais yra silpniausios, tačiau jos yra plačiausiai ištirtos, skaičiavimo metodika pateikta Eurokode 5. Medienos jungtys su kljais yra stipriausios iš visų tiriamų, tačiau yra didelė rezultatų sklaida. Kljai buvo spaudžiami medsraigčiais, kuriais nebuvo galima užtikrinti tinkamo apspaudimo, todėl rezultatų sklaida yra didelė.
6. Eksperimento metu, kai buvo tiriamos medienos jungtys su kljais, buvo pastebėta, kad vidurinis medienos elementas per visus sluoksnius įplyšo. Taip galėjo atsitikti, dėl skėtimo jėgų apkrovus bandinį didele gniuždymo jėga. Atliekant tokio tipo bandinius reiktų suvaržyti medienos bandinio pasislinkimą į šonus.

LITERATŪRA

1. Brown J. R., Li M., Sarti F. (2021). *Structural performance of CLT shear connections with castellations and angle brackets*.
2. Brown J. R., Li M., Tannert T., Moroder D. (2020). *Experimental study on ortjogonal joints in cross-laminated timber with self-tapping screws installed with mixed angles*.
3. Gečys T. (2010). *Plieninių strypų, įklijuotų medienoje, tyrimas ir analizė*.
4. Gurkšnyš K., Kavaliauskas S. (2011). *Medinės konstrukcijos. Laboratorinių darbų metodikos nurodymai*. Vilnius: Technika.
5. International Organization for Standardization. (1998). *Wood – Determination of moisture content for physical and mechanical tests*. Geneva. (ISO 3130:1975).
6. International Organization for Standardization. (1998). *Wood – Determination of density for physical and mechanical tests*. Geneva. (ISO 3131:1975).
7. Lietuvos standartizacijos departamentas. (2006). *Eurokodas 5. Medinių konstrukcijų projektavimas. 1–I dalis. Bendrosios nuostatos. Bendrosios ir pastatų taisyklės* (LST EN 1995–1–1:2005+AC:2006).
8. Lietuvos standartizacijos departamentas. (2000). *Medinės konstrukcijos. Sujungimai mechaninėmis tvirtinimo detalėmis. Bendrieji mechaninio stiprio ir deformacijų būdingųjų savybių nustatymo principai*. Vilnius. (LST EN 26891:2000).
9. Lietuvos standartizacijos departamentas. (2012). *Medinės konstrukcijos. Statybinė mediena ir klijuotoji sluoksninė mediena. Tam tikrų fizikinių ir mechaninių savybių nustatymas* (LST EN 408:2012).
10. Pečnik J. G., Gavric I., Sebera V., Kržan M., Kwiecien A., Zajac B., Azinovic B. (2021). *Mechanical performance of timber connections made of thick flexible polyurethane adhesives*.
11. Schiro G., Giongo I., Sebastian W., Riccadonna D., Piazza M. (2018). *Testing of timber-to-timber screw-connections in hybrid configurations*.
12. Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija. (2005). *Medinių konstrukcijų projektavimas*. Vilnius. (STR 2.05.07:2005).
13. Zhang L., Chui Y. H., Tomlinson D. (2019). *Experimental investigation on the shear properties of notched connections in mass timber panel-concrete composite floors*.

PRIEDAI

P.1 lentelė. Medienos jungčių tūris, svoris ir tankis

Bandinio nr	Plokštės nr	Tūris, m ³	Svoris, kg	Tankis, kg/m ³	Vidutinis bandinio tankis, kg/m ³
1	2	3	4	5	6
1.1	1	0,0063	3,5366	562,73	533,06
	2	0,0059	3,0398	513,26	
	3	0,0059	3,1027	523,21	
1.2	1	0,0063	3,4562	548,74	536,74
	2	0,0058	3,0357	527,24	
	3	0,0059	3,1404	534,25	
1.3	1	0,0063	3,4672	552,38	544,35
	2	0,0057	3,1885	560,62	
	3	0,0059	3,0862	520,04	
1.4	1	0,0063	3,2859	523,50	536,12
	2	0,0057	3,1630	556,14	
	3	0,0059	3,1378	528,73	
1.5	1	0,0063	3,5429	566,53	533,33
	2	0,0058	3,0382	521,12	
	3	0,0059	3,0262	512,33	
2.1	1	0,0060	3,2230	539,87	539,81
	2	0,0061	3,3140	542,39	
	3	0,0061	3,2752	537,18	
2.2	1	0,0060	3,2016	531,67	537,45
	2	0,0059	3,1251	526,02	
	3	0,0060	3,3040	554,64	
2.3	1	0,0060	3,3572	555,37	540,54
	2	0,0061	3,3153	540,84	
	3	0,0060	3,1742	525,43	
2.4	1	0,0060	3,2883	549,88	549,61
	2	0,0059	3,2853	553,64	
	3	0,0061	3,3171	545,29	
2.5	1	0,0061	3,2363	531,03	536,17
	2	0,0060	3,2412	540,32	
	3	0,0060	3,2158	537,16	
3.1	1	0,0059	3,3655	567,73	558,40
	2	0,0060	3,2877	550,07	
	3	0,0060	3,3333	557,41	
3.2	1	0,0060	3,2985	553,08	555,51
	2	0,0060	3,3327	556,38	
	3	0,0060	3,3422	557,05	
3.3	1	0,0062	3,2921	533,13	533,47
	2	0,0061	3,2316	530,51	
	3	0,0061	3,2513	536,78	

1	2	3	4	5	6
3.4	1	0,0060	3,2318	534,62	536,86
	2	0,0060	3,3187	554,97	
	3	0,0060	3,1088	521,00	
4.1	1	0,0061	3,4093	559,18	546,66
	2	0,0060	3,1268	517,76	
	3	0,0060	3,3540	563,04	
4.2	1	0,0060	3,2911	550,35	546,54
	2	0,0060	3,2244	539,48	
	3	0,0060	3,2877	549,78	
4.3	1	0,0060	3,1911	534,28	548,84
	2	0,0060	3,1916	536,33	
	3	0,0060	3,4663	575,89	
4.4	1	0,0059	3,3126	557,58	542,55
	2	0,0060	3,2693	546,99	
	3	0,0060	3,1469	523,08	
4.5	1	0,0060	3,1677	529,99	531,72
	2	0,0060	3,1330	525,63	
	3	0,0059	3,1895	539,53	

Sluoksninės lukštų medienos charakteristinis lenkiamasis, gniuždomasis ir šlyjamasis stipriai

$$f_{m,k} = 59,6 - 1,64 \cdot 6,05 = 45,50 \text{ MPa}$$

$$f_{c,k} = 5 \cdot 45,50^{0,45} = 27,87 \text{ MPa}$$

$$f_{v,k} = \min \left\{ \begin{matrix} 3,8 \\ 0,2 \cdot 45,5^{0,8} \end{matrix} \right. = 3,8 \text{ MPa}$$

Medienos su išpjovomis laikomosios galios skaičiavimas

Glemžimas

$$F_{v,k} = 0,02 \cdot 0,045 \cdot 27,87 = 46,8 \text{ kN}$$

Kirpimas

$$F_{c,k} = 0,16 \cdot 0,045 \cdot 27,87 = 401 \text{ kN}$$

$$fh1k := 45.5 \text{ MPa}$$

Varžtinės jungtys

$$fh2k := 45.5 \text{ MPa}$$

$$t1 := 45 \text{ mm}$$

$$t2 := 55 \text{ mm}$$

$$d := 5 \text{ mm}$$

$$\beta := \frac{fh2k}{fh1k} = 1$$

$$FaxRk := 4.08 \text{ kN}$$

$$MyRk := 5900 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$(a) \quad a := fh1k \cdot t1 \cdot d = 10.238 \text{ kN}$$

$$(b) \quad b := fh2k \cdot t2 \cdot d = 12.513 \text{ kN}$$

$$(c) \quad c := \frac{fh1k \cdot t1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left(\sqrt[2]{\beta + 2 \beta^2 \left(1 + \frac{t2}{t1} + \left(\frac{t2}{t1} \right)^2 \right) + \beta^3 \cdot \left(\frac{t2}{t1} \right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t2}{t1} \right) \right) + \frac{FaxRk}{4} = 5.772 \text{ kN}$$

$$(d) \quad d. := 1.05 \cdot \frac{fh1k \cdot t1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left(\sqrt[2]{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot MyRk}{fh1k \cdot d \cdot t1^2}} - \beta \right) + \frac{FaxRk}{4} = 4.739 \text{ kN}$$

$$(e) \quad e := 1.05 \cdot \frac{fh1k \cdot t2 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left(\sqrt[2]{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot MyRk}{fh1k \cdot d \cdot t2^2}} - \beta \right) + \frac{FaxRk}{4} = 5.511 \text{ kN}$$

$$(f) \quad f := 1.15 \cdot \sqrt[2]{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt[2]{2 \cdot MyRk \cdot fh1k \cdot d} + \frac{FaxRk}{4} = 2.904 \text{ kN}$$

$$\min(a, b, c, d., e, f) \cdot 6 = 17.425 \text{ kN}$$