



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Medienos–betono lenkiamų elementų tyrimai

Baigiamasis magistro projektas

Lukas Maslovas

Projekto autorius

Doc. Rėda Bistrickaitė

Vadovė

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Medienos–betono lenkiamų elementų tyrimai

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Lukas Maslovas

Projekto autorius

Doc. Rėda Bistrickaitė

Vadovė

Doc. Ignacio Villalon Fornes

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Lukas Maslovas

Medienos–betono lenkiamų elementų tyrimai

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.

Lukas Maslovas

Patvirtinta elektroniniu būdu



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
Magistro baigiamojo projekto užduotis**

Studijų programa: Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)	
Baigiamojo projekto tema (tematika, lietuvių k.): Medienos – betono lenkiamų elementų tyrimai.	
Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.: V25-09-35 (2025-12-01)	
(lietuvių k.): Medienos – betono lenkiamų elementų tyrimai.	
(anglų k.): Research on Bending Elements of Wood–Concrete Composite Structures.	
Pradiniai duomenys darbui:	
Kita papildoma su užduotimi susijusi informacija (pagal poreikį):	
Atlikti:	Baigiamojo projekto dalys:
☒	Įvadas
☒	Literatūros apžvalga
☒	Metodologija
☒	Eksperimentiniai tyrimai
☒	Analitiniai tyrimai
☒	Skaitiniai tyrimai
☐	Ekonominė dalis
☒	Išvados
Generatyvinio dirbtinio intelekto (GDI) naudojimo suderinimas su baigiamojo darbo vadovu:	
☐	Leidžiama
☒	Draudžiama
Generatyvinio dirbtinio intelekto (GDI) naudojimo sąlygos (jei leidžiama), laikantis Universitete nustatytos GDI etiško naudojimo tvarkos:	
Konsultacijų laikas (su vadovu ir/ar konsultantu suderintas kas savaitinis konsultacijų laikas, kuris įvedamas į AIS, nurodant studento vidinį vidko kodą):	

Vadovas:	Doc. Rēda Bistrickaitē
(indēlis 100 %)	<i>pareigos, vards, pavardē</i> <i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>
Studentas:	Lukas Maslovas
	<i>vardas, pavardē</i>
	<i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>

Maslovas, Lukas. Medienos–betono lenkiamų elementų tyrimai. Magistro baigiamasis projektas / vadovė doc. dr. Rėda Bistrickaitė; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: Medžio ir betono kompozitas, Eurokodas 5, Timošenkos sijos teorija, gama metodas, tangentiniai įtempiai, normaliniai įtempiai, jungties standumas.

Kaunas, 2026. 68 p.

Santrauka

Medienos ir betono kompozitų pritaikymas statyboje plečiasi dėl jų efektyvių mechaninių savybių. Vis dėlto, esminis iššūkis siekiant užtikrinti monolitinę konstrukcijos darbą išlieka tinkamos tarpsluoksninės jungties parinkimas ir jos elgsenos įvertinimas.

Baigiamajame magistro darbe analizuojama medienos–betono kompozitinė sijinė perdanga, kurios elementai sujungti klijuota jungtimi. Literatūros apžvalga patvirtino, kad klijuotos jungtys, dažniausiai epoksidinės, inžineriniuose skaičiavimuose laikomos standžiomis dėl jų minimalių deformacijų.

Atlikti analitiniai skaičiavimai, remiantis Eurokodo 5 metodika ir taikant standžios jungties prielaidą. Normaliniai ir tangentiniai (kirpimo) įtempiai apskaičiuoti pagal klasikinės mechanikos formules, o įlinkiai – taikant Timošenkos sijos teoriją, kuri įvertina šlyties deformacijas. Šie teoriniai rezultatai verifikuoti sukuriant skaitmeninį modelį „Robot Structural Analysis Professional“ programinėje aplinkoje, kuris taip pat rėmėsi standžios jungties prielaida.

Eksperimentinėje dalyje atlikti laboratoriniai praspaudimo bandymai, tiriant jungtis su silikatiniais kljais bei jų mišiniais su pucolaninėmis medžiagomis. Remiantis gautais bandymų rezultatais, apskaičiuotas realus jungties poslinkio modulis. Ši eksperimentinė reikšmė pritaikyta Eurokodo 5 B priede aprašytame „Gama“ metode, siekiant patikslinti teorinį modelį ir įvertinti realią konstrukcijos elgseną.

Maslovas, Lukas. Research on Bending Elements of Wood–Concrete Composite Structures. Master's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. Doc. Rėda Bistrickaitė; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering Sciences, Civil Engineering (E05).

Keywords: Timber-concrete composite, Eurocode 5, Timoshenko beam theory, Gamma method, Tangential stresses, Normal stresses, Connection stiffness.

Kaunas, 2026. 68 p.

Summary

The application of timber and concrete composites in construction is expanding due to their effective mechanical properties. However, the essential challenge in order to ensure the monolithic operation of the structure remains the selection of a suitable interlayer connection and the evaluation of its behavior.

In the final master's thesis, a timber-concrete composite beam floor is analyzed, the elements of which are connected by an adhesive connection. The literature review confirmed that adhesive connections, mostly epoxy-based, are considered rigid in engineering calculations due to their minimal deformations.

Analytical calculations were performed based on the Eurocode 5 methodology and applying the rigid connection assumption. Normal and tangential (shear) stresses were calculated according to classical mechanics formulas, and deflections were calculated applying Timoshenko beam theory, which evaluates shear deformations. These theoretical results were verified by creating a numerical model in the "Robot Structural Analysis Professional" software environment, which was also based on the rigid connection assumption.

In the experimental part, laboratory push-out tests were performed investigating connections with silicate adhesives and their mixtures with pozzolanic materials. Based on the obtained test results, the real slip modulus of the connection was calculated. This experimental value was applied in the "Gamma" method described in Eurocode 5 Annex B in order to refine the theoretical model and evaluate the real behavior of the structure.

Turinys

Lentelių sąrašas	10
Paveikslų sąrašas	11
Įvadas.....	12
1. Literatūros analizė ir apžvalga.....	13
1.1. Medžio–betono kompozitai	13
1.1.1. Panaudojimas.....	13
1.1.2. Naudojamos medžiagos.....	13
1.1.3. Konstrukciniai trūkumai.....	13
1.2. Perdangos konstrukcijos	14
1.3. Mediena	15
1.3.1. Poveikis aplinkai ir panaudojimas.....	15
1.3.2. Konstrukcinė vientisoji mediena	15
1.4. Inžinerinė mediena	16
1.4.1. Klijuotoji mediena	16
1.4.2. Gamyba.....	16
1.4.3. Klijuotos medienos mechaninės savybės	16
1.4.4. Kryžmai klijuota mediena (CLT)	17
1.4.5. Laminuota faneruota mediena (LVL).....	17
1.5. Betonai	17
1.5.1. Betono klasės ir jo sudėtis	18
1.6. Jungtys.....	18
1.6.1. Klijinės jungtys.....	18
1.6.2. Mechaninės jungtys	19
1.6.3. Kombinuotos jungtys.....	21
1.7. Rankiniai skaičiavimai	21
1.7.1. Timošenko-Ehrenfestio sijos teoriją.....	21
1.7.2. Gama metodas	23
1.7.3. Santykinio slydimo analizė.....	25
1.7.4. Normaliniai įtempiai.....	26
1.8. Tyrimai ir bandymai	27
1.8.1. Reikalingi bandymai.....	27
1.8.2. Lenkimo bandymai.....	27
1.8.3. Gniuždymo bandymai	27
1.8.4. Jungčių patikra.....	27
1.8.5. Baigtinių elementų metodas	28
1.8.6. Poveikių į aplinkai tyrimai	28
1.9. Apibendrinimas	29
2. Medienos-betono lenkiamų elementų tyrimo metodologija	30
2.1. Medienos-betono lenkiamųjų elementų tyrimo metodologija.....	30
2.2. Teoriniai skaičiavimai	32
2.2.1. Normaliniai įtempiai.....	32
2.2.2. Įlinkiai.....	36
2.2.3. Tangentiniai įtempiai.....	37
2.3. Programiniai skaičiavimai su Robot Structural Analysis Professional	38

2.4. Bandiniai.....	40
2.4.1. Medžiagos.....	40
2.4.2. Bandinių ruošimas	41
2.4.3. Bandymai.....	42
2.4.4. Kontakto zonos apžiūra	44
2.4.5. Skaičiavimai pagal LST EN 26891	45
2.4.6. Skaičiavimai pagal Eurokodą 5, B priedą, gama metodas	45
3. Medžio–betono lenkiamųjų elementų skaičiavimai	48
3.1. Teoriniai skaičiavimai	48
3.1.1. Normalinių įtempių skaičiavimai	48
3.1.2. Įlinkio analizė ir teorijos palyginimas.	49
3.1.3. Tangentinių įtempių skaičiavimas jungtyje.....	50
3.1.4. Teorinių skaičiavimų apibendrinimas	51
3.2. Skaičiavimai su programa Robot Structural Analysis Professional	51
3.2.1. Normaliniai įtempiai.....	51
3.2.2. Įlinkiai.....	51
3.2.3. Tangentiniai įtempiai.....	52
3.2.4. Sumodeliuotą sijos patikra	52
3.2.5. Programinės įrangos rezultatų apibendrinimas	52
3.3. Bandiniai.....	52
3.3.1. Gniuždymo bandymai	52
3.3.2. Šlyties bandymai	53
3.3.3. Kontakto zonos apžiūra	57
3.3.4. Skaičiavimai pagal LST EN 26891	60
3.3.5. Skaičiavimai pagal Eurokodo 5 gama metodą	61
Išvados	63
Literatūros sąrašas	64
Priedai.....	69
1 priedas. Literatūros apžvalgos protokolas	69
2 priedas. Prisma stūktura.....	71
3 priedas. Skaičiavimai.....	72

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Vientisosios medienos fizikinių ir mechaninių savybių charakteristinių rodiklių reikšmės (STR 2.05.07:2005 „Medinių konstrukcijų projektavimas“)	15
2 lentelė. Homogeninės klijuotosios sluoksninės medienos fizikinių ir mechaninių savybių charakteristinių rodiklių reikšmės (STR 2.05.07:2005 „Medinių konstrukcijų projektavimas“).....	16
3 lentelė. Elementų charakteristikos ir jų matmenys.	30
4 lentelė. Apkrovos.	32
5 lentelė. k_{mod} –modifikavimo koeficientas	35
6 lentelė. Medžiagos savybių daliniai koeficientai	35
7 lentelė. Betono sudėtis (1 m ³ mišinio).	40
8 lentelė. Medžiagos, naudojamos kompozitiniams bandiniams	41
9 lentelė. Teorinių skaičiavimų normaliniai įtempiai.	48
10 lentelė. Projektinės reikšmės ir išnaudojimas	49
11 lentelė. Timošenko sijos teorijos reikšmių lentelė	49
12 lentelė. Tangentinių įtempių skaičiavimo reikšmės veikiant TRB ir SRB	50
13 lentelė. Normalinių įtempių suvestinė taškuose.....	51
14 lentelė. Teorinių ir skaitmeninio modelio tangentinių įtempių suvestinė.	52
15 lentelė. Gniuždymo bandinių rezultatai.	52
16 lentelė. Bandinių rezultatai.....	53
17 lentelė. Bandinio vizualinė ataskaita.....	57
18 lentelė. Atliktų bandinių pagal	60
19 lentelė. Apskaičiuotos jungties standumo reikšmės.....	60
20 lentelė. Gama reikšmės	61
21 lentelė. Normalinių įtempių pasiskirstymas.....	61
22 lentelė. Gama metodu gautas reikšmės sijos.....	62
23 lentelė. Įlinkių w visų skaičiavimų reikšmės	62
24 lentelė. Teorinių ir skaitmeninio modelio tangentinių įtempių suvestinė.	62

Paveikslų sąrašas

1 pav. Trimatė grindų sistemos schema. 1 – faneros sija, 2 – klijuotos medienos sija, 3 – klojinys, 4 – armatūros strypai, 5 – betono plokštė [2]	14
2 pav. Bandinys su epoksidiniais klijais ir kvarciniu smėliu [3]	19
3 pav. a) varžtinė jungtis, b) armatūros jungtis, c) plieninė plokštelė, d) dvikryptė anglies pluošto plokštelė.....	20
4 pav. LVL išpjovimas jungčiai su strypinėmis jungtimis.....	21
5 pav. Kombinuotas jungtis varžtai su epoksidine derva [39]	21
6 pav. Skerspjūvio parametrai [20]	22
7 pav. Skerspjūvio parametrai [20]	25
8 pav. Redukuotas skerspjūvis	26
9 pav. Šlyties bandymo įrengimas: scheminis vaizdas (kairėje) ir bandymai nuotrauka (dešinėje) [15]	28
10 pav. Sijų išdėstymas.....	31
11 pav. Skaičiuojamasis skerspjūvis. 1 – betonas ir 2 – GL24h sija	31
12 pav. Kompozitinės sijos modelis	33
13 pav. Skerspjūvio redukavimas	33
14 pav. Programinės įrangos pasirinkimas modeliuojant naujus elementus.....	38
15 pav. Modeliuojamas skerspjūvis.	39
16 pav. 3D skaičiuojamasis modelis.	39
17 pav. Normaliniai įtempių pasiskirstymas spalvinė išraiška	40
18 pav. Bandiniai su smėliu ir granito skalda.	41
19 pav. Suformuoti bandiniai.....	42
20 pav. a) gniuždomi kubeliai ir b) bandymų atlikimas.....	42
21 pav. Apkrovimo schema ir atliekamas bandymas.....	44
22 pav. Skerspjūvis ir normalinių įtempių diagrama	48
23 pav. a) betono atsiskyrimas nuo medienos b) įtrūkimai ant betoninio paviršiaus c) nesukibusio betono vaizdas d) atsiskyrimas nuo medienos bandymo metu.....	54
24 pav. Tangentinių įtempių pasiskirstymas skirtinguose bandiniuose	54
25 pav. Medžio–betono kompozito su epoksidiniais klijais ir granito bandinys Nr. 1.....	55
26 pav. Medžio–betono kompozito su epoksidiniais klijais ir granito skalda bandinys Nr. 2.....	55
27 pav. Medžio–betono kompozito su epoksidiniais klijais ir granito skalda bandinys Nr. 3.....	56
28 pav. Medžio–betono kompozito su epoksidiniais klijais ir smėliu bandinys Nr. 1.....	56
29 pav. Medžio–betono kompozito su epoksidiniais klijais ir smėliu bandinys Nr. 2.....	56
30 pav. Medžio–betono kompozito su epoksidiniais klijais ir smėliu bandinys Nr. 3.....	57
31 pav. Įtempių pasiskirstymas	61
32 pav. Normalinių įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje.....	75
33 pav. Normalinių įtempių pasiskirstymas išilgai pjūvyje.....	75
34 pav. Tangentiniai įtempių išilgai kompozito (vaizdas iš šono ir viršaus).....	76
35 pav. Įlinkiai pagal programinius skaičiavimus.....	76
36 pav. Sijos išnaudojimas dėl didžiausių ją veikiančių įtempių.....	76

Ivadas

Europos Sąjungos strategija „Europos žaliasis kursas“ siekia iki 2050 metų visą Europos Sąjungą paversti klimatui neutraliu regionu. Šiuo tikslu siekiama sumažinti šiltnamio efektą, mažinant jį sukeliančių dujų išmetimą į atmosferą. Taip skatinama statybose panaudoti kuo daugiau organinių medžiagų, kurios pakeistų betoną, plieną ir kitus gaminius, kurių gamybos metu į aplinką išskiriami dideli kiekiai anglies dioksido.

Lietuvos statybų sektoriuje jau atsirado pokyčių, prisidedančių prie šios strategijos. Nuo 2024 m. lapkričio mėnesio įsigaliojo įstatymas, nurodantis visuomeninės paskirties pastatuose naudoti 50 proc. organinių medžiagų. Pasirinktas medžio-betono kompozitas, kuris gali padidinti organinių medžiagų panaudojimą statyboje.

Medžio-betono kompozitas turi pagrindinę problemą, kuri riboja jo naudojimą – tai medienos ir betono tarpusavio sąveika. Skirtingos medžiagų savybės apsunkina konstrukcijų darbą kaip vieno elemento. Apkraunant perdangas, sijas ar kitus lenkiamus elementus, jungties kontakto zonoje atsiranda praslydimas.

Tikslas:

Atlikus literatūros analizę, atlikti medienos-betono lenkiamųjų elementų tyrimus.

Uždaviniai:

1. Atlikti medžio–betono lenkiamųjų elementų mechaninių savybių teorinius skaičiavimus;
2. Atlikti medžio–betono lenkiamųjų elementų mechaninių savybių skaičiavimus programine įranga;
3. Atlikti medžio–betono lenkiamųjų elementų kontakto zonos šlyties tyrimus ir nustatyti jos tikrąją vertę;
4. Atlikti skaičiavimus pagal Eurokodo 5 ribines reikšmes.

1. Literatūros analizė ir apžvalga

1.1. Medžio–betono kompozitai

1.1.1. Panaudojimas

Medžio–betono kompozitai nėra plačiai taikomi masinėje statyboje, tačiau šios konstrukcijos gali būti perspektyvus sprendimas dėl efektyvaus medžiagų savybių išnaudojimo ir sąnaudų mažinimo [5]. Pagrindinis šių kompozitų privalumas yra efektyvus medžiagų savybių suderinimas: betonas viršutinėje zonoje perima gniuždymo įrašas, o mediena apatinėje zonoje – tempimo įrašas. Tai leidžia žymiai padidinti konstrukcijos standumą ir sumažinti įlinkius, lyginant su grynai medinėmis perdangomis. Kompozito betono sluoksnis gali pagerinti perdangos akustines savybes ir sumažinti vibracijų lygį eksploatacijos metu.

Viena iš pagrindinių sričių, kur gali būti taikomi šie kompozitai, yra daugiaaukščių pastatų konstrukcijos, ypač perdangos. Dažniausiai perdangoms taikoma kryžmai klijuota mediena (CLT), kuri su betonu gali sudaryti mechaniškai tvirtą medžiagų derinį. Tokio tipo konstrukcijos leidžia sumažinti konstrukcijos svorį 1,5–2 kartus. Be to, jos padeda mažinti išmetamo CO₂ kiekį į aplinką, o pati mediena gali kaupti anglį [21].

Kita išskirtinė konstrukcija – tiltai. Pirmasis toks tiltas buvo pastatytas 1930 metais Amerikoje. Tuo metu, dėl didelio plieno stygiaus, jie paplito visoje šalyje iki 1940-ųjų. 1950-aisiais jie pradėti statyti Australijoje ir Naujojoje Zelandijoje. Europoje ir Pietų Amerikoje tokie tiltai pradėti statyti tik 1990 metais [32].

1.1.2. Naudojamos medžiagos

Medžio–betono kompozitą sudaro trys pagrindiniai elementai: medienos elementas, kuris naudojamas tempiamoje zonoje ir kaip klojinių dalis, betono sluoksnis, dažniausiai naudojamas gniuždymo zonoje, ir jungiamoji dalis, kuri užtikrina medžiagų kaip kompozito darbą kartu.

Siekiant užtikrinti parinktų medžiagų patikimumą, dažniau pasirenkami inžinerinės medienos gaminiai. Jie pasirenkami dėl geresnių mechaninių savybių, mažesnės defektų tikimybės, matmenų tikslumo ir galimybės perdengti didesnius tarpatramius. Tyrimuose dažniausiai naudojami šie medienos produktai:

- Kryžmai klijuota mediena (CLT) – tai plokštės kurios sluoksniuojamos skirtingomis kryptimis ir taip išgaunamas standumą abejomis kryptimis [6, 7, 10, 11, 13, 14];
- Klijuotos medienos sijos (GL) – tai sijos kurios naudojamos perdengti ilgiems tarpatramiams [1];
- Klijuota lukštinė mediena (LVL) – pasižymi geresnėmis savybėmis už GL medieną. Galimas panaudojimas tiek sijoms, tiek plokštėms.[4, 8].

Taip pat naudojama paprasta konstrukcinė mediena, kuri atitinka C16 [9] ir C24 [12] medienos stiprumo klases.

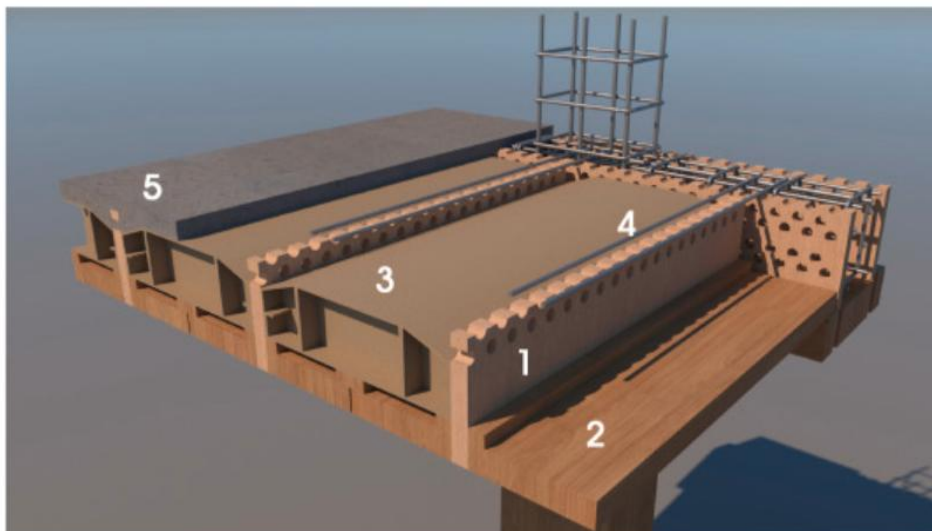
1.1.3. Konstrukciniai trūkumai

Vienas pagrindinių medžio–betono kompozito trūkumų yra susijęs su skirtingomis medžiagų deformacijomis ir fizikinėmis savybėmis [13, 14]. Netinkamai parinktos arba nepakankamo

standumo jungtys neleidžia užtikrinti tarpusavio darbo tarp elementų, todėl jie veikia kaip atskiri elementai. Betonui, kaip medžiagai, kad susiformuotų projektinis stipris, reikalingas vanduo. Tačiau mediena veikia skirtingai – ji yra jautri drėgmei. Jungiant šias medžiagas kartu, mediena traukia vandenį iš betono. Atsiradus drėgmei, ji pradeda brinkti, prarandamos jos mechaninės savybės, gali atsirasti grybelis ir kiti biologiniai reiškiniai. Mediena nuo brinkimo plečiasi, taip atsiranda tarp betono ir medienos vidiniai įtempiai, kurie lemia jų atsiskyrimą sluoksniais. Nors statyboje mediena dažniausiai impregnuojama, ilgalaikės drėgmės poveikis išlieka reikšmingas rizikos veiksnys. Betono traukimas ir valkšnumas sukelia papildomas deformacijas. Šie ilgalaikiai reiškiniai gali neigiamai paveikti jungties standumą, todėl laikui bėgant sumažėja visos konstrukcijos ilgaamžiškumas bei mechaninės savybės.

1.2. Perdangos konstrukcijos

Medžio–betono kompozitinėse perdangose mediena dažniausiai naudojama kaip liktinis klojinys ir laikančioji konstrukcijos dalis [2, 5] (1 pav.). Toks sprendimas leidžia sutrumpinti statybos laiką ir sumažinti darbų apimtį statybos aikštelėje. Lyginant su tradicinėmis gelžbetoninėmis perdangomis, medžio–betono kompozitai yra lengvesni, todėl sumažėja betono ir armatūros kiekis bei naudojamų mechanizmų apkrovos.



1 pav. Trimatė grindų sistemos schema. 1 – faneros sija, 2 – klijuotos medienos sija, 3 – klojinys, 4 – armatūros strypai, 5 – betono plokštė [2]

Liktiniams klojiniams naudojamos medinės sijos iš vientisos arba klijuotos medienos, tvirtinamos prie betono varžtinėmis jungtimis ir epoksidiniais kljais. Paties klojinio apačia gaminama iš vandeniui atsparios faneros. Skydas, atliekantis klojinio funkciją, dėl savo atsparumo drėgmei leidžia išlaikyti drėgmę betono kietėjimo metu.

Betono plokštėje įrengiama armatūra, skirta riboti susitraukimo deformacijas ir apsaugoti viršutinį betono sluoksnį nuo plyšių, taip sumažinant išorės poveikio ir pažeidimų riziką [1, 14]. Ant medinių plokščių taip pat galimas apdailos arba šiltinimo medžiagų kljavimas [18].

1.3. Mediena

1.3.1. Poveikis aplinkai ir panaudojimas

Mediena – tai viena iš organinių medžiagų, kuri plačiausiai naudojama pastatų ir kitų statinių konstrukcijose bei apdailoje. Naudojant medines konstrukcijas ir mažinant betono bei armatūros kiekį gaminiuose, mažėja anglies dioksido (CO₂) emisija į aplinką, todėl mediena yra tvari medžiaga ir priklauso atsinaujinančių medžiagų grupei [8]. Medienos konstrukcijos dažniausiai dėl savo estetiškos išvaizdos paliekamos matomos išorėje.

Tokias konstrukcijas reikia gerai impregnuoti ir apsaugoti nuo aplinkos poveikio. Didelių tarpatramių sijos gaminamos iš konstrukcinės klijuotosios medienos. Vienas iš sudėtingiausių iššūkių, atsirandančių medinių konstrukcijų pastatuose, yra jų jungtys [1]. Daugiaaukščių pastatų statyboje medinės konstrukcijos nėra plačiai naudojamos, nes sunku užtikrinti, kad jungtys būtų standžios arba pusiau standžios. Aukštus pastatus veikiantys horizontalūs vėjo apkrovos gali pakenkti statinio stabilumui.

1.3.2. Konstrukcinė vientisoji mediena

Medinės konstrukcijos, yra gaminamos iš tiesinių pastovaus skerspjūvio elementų: tašų, rąstų, balkių ir lentų. Mediena skirstoma į dvi grupes: spygliuočius ir lapuočius. Medienos stiprumo klasės nurodomos pagal STR 2.05.07:2005 „Medinių konstrukcijų projektavimas“ (žr. 1 lentelė). Vientisa mediena klasifikuojama į skirtingas grupes. Iš viso yra 15 stiprumo klasių. Mediena, gaminama iš spygliuočių, žymima raide C, o iš lapuočių – raide D. Prie raidės rašomi skaičiai atspindi stiprumo klasę lenkiant, kurios reikšmė išreiškiama MPa [16].

1 lentelė. Vientisosios medienos fizikinių ir mechaninių savybių charakteristinių rodiklių reikšmės (STR 2.05.07:2005 „Medinių konstrukcijų projektavimas“)

Charakteristinės reikšmės																
Biologinės rūšys		Spygliuočiai								Lapuočiai						
Stiprumo klasės		C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Stiprio reikšmės (MPa)																
Lenkimas	$f_{m,k}$	14	16	18	22	24	27	30	35	40	30	35	40	50	60	70
Tempimas išilgai pluoštų	$f_{t,0,k}$	8	10	11	13	14	16	18	21	24	18	21	24	30	36	42
Tempimas skersai puoštų	$f_{t,90,k}$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,9
Gniuždymas išilgai pluoštų	$f_{c,0,k}$	16	17	18	20	21	22	23	25	26	23	25	26	29	32	34
Gniuždymas skersai pluoštų	$f_{c,90,k}$	4,3	4,6	4,8	5,1	5,3	5,6	5,7	6,0	6,3	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
Šlytis (kirpimas) išilgai pluoštų	$f_{v,k}$	1,7	1,8	2,0	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
Modulių reikšmės (10 ⁻³ MPa)																
Vidutinis tamprumo išilgai pluošto modulis	$E_{0,mean}$	7	8	9	10	11	12	12	13	14	10	10	11	14	14,3	20
5% tamprumo išilgai pluošto modulis	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,7	7,4	8,0	8,0	8,7	9,4	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
Vidutinis tamprumo skersai pluošto modulis	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,33	0,37	0,40	0,40	0,43	0,47	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
Vidutinis šlyties modulis	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,63	0,69	0,75	0,75	0,81	0,88	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25
Tankio reikšmės (kg/m ³)																
Tankis	ρ_k	290	310	320	340	350	370	380	400	420	530	560	590	650	700	900
Vidutinis tankis	ρ_{mean}	350	370	380	410	420	450	460	480	500	640	670	700	780	840	1080

1.4. Inžinerinė mediena

1.4.1. Klijuotoji mediena

Klijuotosios medienos konstrukcijos pradėtos naudoti XX amžiuje. Atlikus patikrinimus po 25 metų, pastebėta, kad jų būklė išliko nepakitusi [18]. Atliekant daugiau apžiūrų matyti, kad gerai prižiūrima mediena gali tarnauti ilgai.

Klijuotąją medieną atskirais elementais sukūrė Vokietijos statybininkas Otto Hetzeris. Jis sumanė, kad galima medinius tašelius klijuoti 90° kampu ir taip sukurti stipresnes konstrukcijas. Jau 1907 m. jis buvo užpatentavęs kljais klijuotus dvitėjinio ir stačiakampio formos profilius. Tais laikais daugiau dėmesio buvo skiriama gelžbetoninėms, plieninėms ir betono konstrukcijoms. Medinės konstrukcijos buvo laikomos atgyvenusiu sprendimu, nes žmonės baiminosi dėl jų puvinimo ir degumo.

1.4.2. Gamyba

Klijuotos medienos konstrukcijos parenkamos atsižvelgiant į eksploatacijos aplinką. Kad konstrukcija dirbtų kaip vienas elementas, naudojami kljai arba papildomai taikomos varžtinės jungtys ar viny. Svarbu atsižvelgti, ar gaminys bus naudojamas patalpose, ar lauke, nes konstrukcijos parenkamos pagal santykinę oro drėgmę:

- Jeigu oro drėgmė viršija 70 %, naudojami rezorcininiai kljai (svarbioms konstrukcijoms) arba fenol-rezorcininiai kljai (masinės gamybos konstrukcijoms).
- Patalpoms, kuriose oro drėgmė mažesnė, konstrukcijoms naudojami karbamidiniai kljai arba epoksidiniai kljai, kai mediena klijuojama su metalais, plastikais ar kitais elementais. Karbamidiniai kljai kietėdami smarkiai traukiasi, todėl siūlėse tarp elementų atsiranda vidiniai įtempiai, dėl kurių mediena gali trūkinėti. Šiuos trūkumus galima sumažinti naudojant kljus, kurių sudėtyje yra papildomų medžiagų, pavyzdžiui, lignino ar medžio miltų [18, 20].

1.4.3. Klijuotos medienos mechaninės savybės

Klijuotoji mediena, kaip ir mediena, turi savo mechanines savybes, nustatytas pagal LST EN 14080. Homogeninės klijuotos medienos stiprumo klasės žymimos GL raidėmis. Kaip ir medienos atveju, šalia raidės esantis skaičius parodo gaminio stiprų lenkimui.

Lyginant su paprastąja mediena, klijuotosios medienos savybės keičiasi: toks pats stiprumas lenkimui pasiekiamas sunkesniu gaminiu, tačiau pagerėja medžiagos mechaninės savybės. Tamprumo modulis skiriasi nežymiai, tačiau gniuždymo ir tempimo stipris padidėjęs, o šlytis kirpimui sumažėjusi [16].

2 lentelė. Homogeninės klijuotosios sluoksninės medienos fizikinių ir mechaninių savybių charakteristinių rodiklių reikšmės (STR 2.05.07:2005 „Medinių konstrukcijų projektavimas“)

Stiprumo klasės		GL24h	GL28h	GL32h	GL36h
Stiprio reikšmės (MPa)					
Lenkimas	$f_{m, g, k}$	24	28	32	36
Tempimas išilgai pluoštų	$f_{t,0, g, k}$	16,5	19,5	22,5	26
Tempimas skersai pluoštų	$f_{t,90, g, k}$	0,4	0,45	0,5	0,6
Gniuždymas išilgai pluoštų	$f_{c,0, g, k}$	24	26,5	29	31
Gniuždymas skersai pluoštų	$f_{c,90, g, k}$	2,7	3,0	3,3	3,6
Šlytis (kirpimas) išilgai pluoštų	$f_{v, g, k}$	2,7	3,2	3,8	4,3
Modulių reikšmės (10^{-3} MPa)					
Vidutinis tamprumo modulis išilgai pluošto	$E_{0, g, mean}$	11,60	12,60	13,70	14,70
5 % tamprumo išilgai pluošto modulis	$E_{0, g, 0,5}$	9,40	10,20	11,10	11,90
Vidutinis tamprumo skersai pluošto modulis	$E_{90, g, mean}$	0,39	0,42	0,46	0,49
Vidutinis šlyties modulis	$G_{g, mean}$	0,72	0,78	0,85	0,91
Tankio reikšmės (kg/m^3)					
Tankis	$\rho_{g, k}$	380	410	430	450

1.4.4. Kryžmai klijuota mediena (CLT)

CLT mediena sudaryta iš ne mažiau kaip trijų sluoksnių medienos lamelių, kurios yra pasuktos 90° kampu. Lamelės tarpusavyje suklijuojamos klėjais. Pagal paskirtį, tokio tipo medienos gaminiai yra tinkami konstrukcijoms dėl galimybės jose daryti išpjovas ar skylės. Tokiose konstrukcijose jungčių montavimas yra paprastas. [20]

Medžio–betono kompozituose CLT naudojama dėl mažo svorio, todėl neapkraunamos kitos pastato konstrukcijos ir supaprastinamas viso statinio karkasas. Mediena gali būti naudojama kompozitinėje struktūroje tiek kaip surenkamasis elementas, tiek montuojama vietoje statybos aikštelėje. Tai leidžia paprasčiau išardyti konstrukcijas, o panaudotą medieną galima perdirbti ir naudoti kaip antrinę žaliavą [33].

1.4.5. Laminuota faneruota mediena (LVL)

LVL gaminama iš plonų medienos lakštų arba faneros, suklijuotų tarpusavyje klėjais. Iš lakštų gaminama medžiaga dažniausiai turi pluoštą orientuotą viena kryptimi, o kryžmai klijuojama iš faneros. Dėl galimybės parinkti plokštes ir pašalinti jų defektus, LVL įgauna mechanines savybes, kurios prilygsta arba net lenkia masyvios medienos savybes.

Dažnai statybos ar baldų pramonėje LVL gaminiai buvo naudojami ne kaip konstrukciniai elementai, tačiau medžio–betono kompozito konstrukcijoje jie dažniausiai atlieka klojinių paskirtį [31].

1.5. Betonas

Betonas – dirbtinis akmuo, nuo seno naudojamas statyboje. Jis pasižymi puikiais gniuždymo mechaninėmis savybėmis, todėl daugiausia naudojamas gniuždymo zonose. Didžiausias betono trūkumas – tempiamoji zona, kurioje medžiaga pleišėja ir atsiskiria. Siekiant to išvengti, betonas dažniausiai naudojamas kaip kompozitinė medžiaga, pavyzdžiui, gelžbetonio kompozite. Į kompozitą įkomponuojamos medžiagos, atsparios įtempimams, tokios kaip plieninė ar stiklo pluošto armatūra, plieniniai gaminiai, fibros. Betonui iki visiško stiprumo reikia drėgmės, o džiūstant jis susitraukia, dėl ko gali atsirasti pleišėjimas [1].

1.5.1. Betono klasės ir jo sudėtis

Betonas, kaip ir kitos konstrukcinės medžiagos, turi savo mechanines savybes. Betonai skirstomi į:

- lengvąjį betoną (LC),
- sunkųjį betoną,
- normalųjį betoną (C).

Analizuojant konstrukcijas pastebėta, kad medžio–betono kompozituose dažniausiai naudojami sunkieji ir normalieji betonai aukštos klasės. Gaminiuose dažniausiai pasirenkamas betonas, kurio klasė yra C25/30 ar aukštesnė [6]. Taip pat naudojami aukšto stiprio betonai, tokie kaip C40/50 [1, 3, 10] arba C45/50 [10]. Dažniausiai naudojamas cemento mišinys CEM II 42,5 R, pasižymintis greitu kietėjimu. Betono mechanines savybes galima pagerinti naudojant fibras. Tyrimai parodė, kad HPFRC suarmuotas betonas sumažina poslinkius konstrukcijose iki 1,68 karto, taip padidindamas konstrukcijos standumą ir efektyvumą.

1.6. Jungtys

Kompozitas turi veikti kaip vienas elementas. Tarp sluoksnių jungtis yra kritinis kompozitinės konstrukcijos elementas, nes nuo jos standumo priklauso įrašų pasiskirstymas tarp betono ir medienos. Jeigu jungtis konstrukcijoje yra silpnos, atsiranda tarp elementų praslydimas, todėl pilnai neišnaudojamos medžiagų mechaninės savybės. Mediena gerai veikia tempimui, betonas – gniuždymui. Silpnos jungtys padidina deformacijas ir sumažina konstrukcijos efektyvumą. Jungtys gali būti mechaninės, tvirtinamos plokštelėmis, varžtais, armatūros strypais ar kitais elementais [1, 6, 9, 13, 14]. Jas galima įrengti įpjaunant išpjovas į medinį elementą arba išgręžiant skylės. Kitas būdas – klizai, kurie geriausiai sujungia betoną ir medieną. Trečias tipas – kombinuotos jungtys, kur naudojamos tiek mechaninės jungtys, tiek klizai.

1.6.1. Klizinės jungtys

Kompozito gamyboje rečiau naudojamos klizinės jungtys. Nors klizinės jungtys gali būti standžios, jos kartu yra ir nepatvarios. Medis ir betonas skirtingai reaguoja į aplinkos veiksnius – drėgmę ir temperatūrinius pokyčius, dėl to atsiranda vidinių įtempių. Gali įvykti atsiskyrimas ir atsirasti kitų pažeidimų.

Klizams naudojamos pagrinde epoksidinės dervos. Jos gali gerai įsigeria į medienos struktūrą ir užtikrina didesnę lenkimo stiprumą. Sudarius gerą sąlytį konstrukcijoms jos deformuojasi mažiau. Siekiant pagerinti klizų kokybę, patariama pridėti papildomų medžiagų. Viena iš tokių gali būti granito skaldelės klizavimas ant medinio paviršiaus, nes tai pagerina kontakto zoną tarp medienos ir betono. Tyrimais nustatyta, kad tokio tipo jungtis gali pagerinti kompozito darbą 28 % daugiau nei naudojant vien tik klizus, o poslinkiai gali sumažėti 3,8 karto. Kita medžiaga, kuri naudojama su epoksidine derva, yra kvarcinis smėlis (žr. 2 pav.). Jis, taip pat kaip granito skalda, naudojamas užkirsti kelią šlyties pažeidimams. Tai padėjo pasiekti geresnius laikomosios galios ir deformacijų rezultatus [7].



2 pav. Bandinys su epoksidiniais kljais ir kvarciniu smėliu [3]

Medžio–betono kompozito bandinių gamyboje kljavimas gali būti atliekamas keliais būdais.

Pirmasis – „šlapas ant šlapio“ (angl. *wet on wet*) metodas [21], kai reikia atsižvelgti į kljų stingimo laiką. Prieš formuojant bandinį, medienos paviršių rekomenduojama pašiaušti, o klojinius iškloti polietileno plėvele. Paruoštą bandinį užpylus kljais, reikia leisti jiems šiek tiek pastingti ant medinės sijos, kad kljai prikibtų. Tada pilamas šviežias, ką tik paruoštas betonas [38].

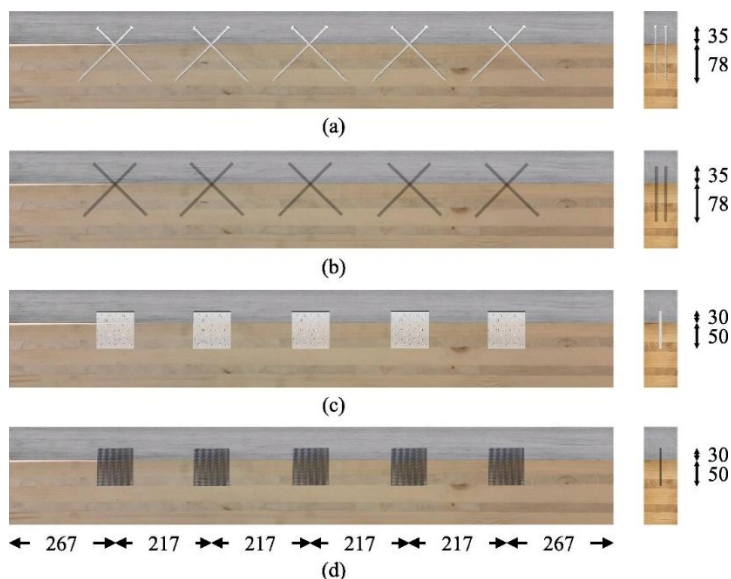
Antrasis būdas taikomas liejant betoną ant jau sukiėtėjusio kljų sluoksnio („Išdžiūvus kljams“). Prieš pradedant bandinio gamybą, paviršius rekomenduojama pašiaušti, kad kljai galėtų geriau įsigerti į medienos poras. Po kljų užtepimo nerekomenduojama laukti, kol jie pradės stingti, todėl patartina naudoti lėtai stingstančius kljus, kurie visiškai sukiėtėja per maždaug 24 valandas. Ant kljų sluoksnio gali būti užberiamos papildomos medžiagos, pagerinančios sukibimą. Kai kljų sluoksnis visiškai sukiėtėja, atliekami paruošiamieji darbai: medinė sija nuvaloma, pašalinamos neprikibusios priemonės ar kitos medžiagos. Tuomet paruošiami bandinio klojiniai, o į juos pilamas šviežias betonas, kuris tinkamai sukibs su jau paruošta jungtimi ir užtikrins geresnį mechaninį rezultatą [7].

Trečiasis būdas – „sausas su sausu“ [34]. Toks kljavimo būdas užtikrina geometrinį tikslumą ir leidžia kontroliuoti kljų kiekį ant konstrukcijos elementų paviršiaus. Prieš gamybą paruošiami betoniniai ir mediniai elementai. Medinis paviršius rekomenduojama gerai nuvalyti ir pašalinti dulkes, kad kljai tinkamai sukibtų. Užtepus kljus ant abiejų paviršių, elementai turi būti tvirtai suspausti spaustuvais arba varžtais. Pagamintas kompozitas paliekamas visiškai sukiėti prieš atliekant šlyties deformacijos bandymus.

1.6.2. Mechaninės jungtys

Dažniausiai pasitaikantis būdas yra tvirtinimas mechaniniu būdu. Tačiau mechaninis tvirtinimas negali užtikrinti visiškai standžios jungties. Tarp medžio ir betono atsiranda slydimas. Naudojama daug jungčių, kad būtų galima sumažinti praslydimą tarp elementų. Jungčiai panaudojami strypiniai, varžtiniai arba plokšteliniai elementai (3 pav.). Prie mechaninių jungčių priskiriamos išpjovos ir

skylės. Tyrimais nustatyta, kad mechaninės jungties gerinimui galima panaudoti gumos apvaskalą, siekiant užtikrinti šlyties jungčių ir visos konstrukcijos geresnes mechanines savybes. Lenkiamoji geba gali padidėti iki 25 % [24].



3 pav. a) varžtinė jungtis, b) armatūros jungtis, c) plieninė plokštelė, d) dvikryptė anglies pluošto plokštelė

Varžtinėms jungtims naudojami specialūs varžtai, skirti betono ir medžio sujungimui [29]. Varžtai dažniausiai sukami įvairiomis kryptimis, siekiant patikrinti jų veikimą kompozituose [9, 13, 14]. Optimaliausias varžtų sukimo kampas nustatytas 45° , nes tai geriausiai išnaudoja jų mechanines savybes [29]. Nors tokie jungimai užtikrina tvirtą konstrukciją, didelis varžtų kiekis apsunkina antrinių medžiagų panaudojimą ir didina atsiskyrimo riziką. Vienas sprendimų – sumažinti varžtų apsauginį sluoksnį, palengvinant jų išsukimą ir plokštės atsiskyrimą. Tyrimai rodo, kad tai beveik nepaveikia konstrukcijos mechaninių savybių – sumažėjimas siekia tik apie 1,5 % [33]. Plokštelinės jungtys populiarios dėl lengvo montavimo. Dažniausiai naudojamos plieninės plokštelės, tačiau tyrimuose taip pat taikytos anglies pluošto plokštelės, montuojamos į medinį elementą epoksidiniais klijais. Plokštelės gali būti kombinuojamos su varžtais, kas užtikrina tvirtą sujungimą ir paprastą montavimą statybos aikštelėje [24]. Lyginant plokšteles, anglies pluošto variantas suteikia geresnes mechanines savybes nei plieninės, kurios kartais prastesnės net už varžtų jungtis [29]. Strypinės (angl. *dowel-type*) jungtys yra vienos paprasčiausių – jos perveriamos per medinį elementą. Šios jungtys plačiai išbandytos ir dažnai naudojamos. Strypai gali veikti kaip inkariniai varžtai arba būti priveržiami per betoną [17].

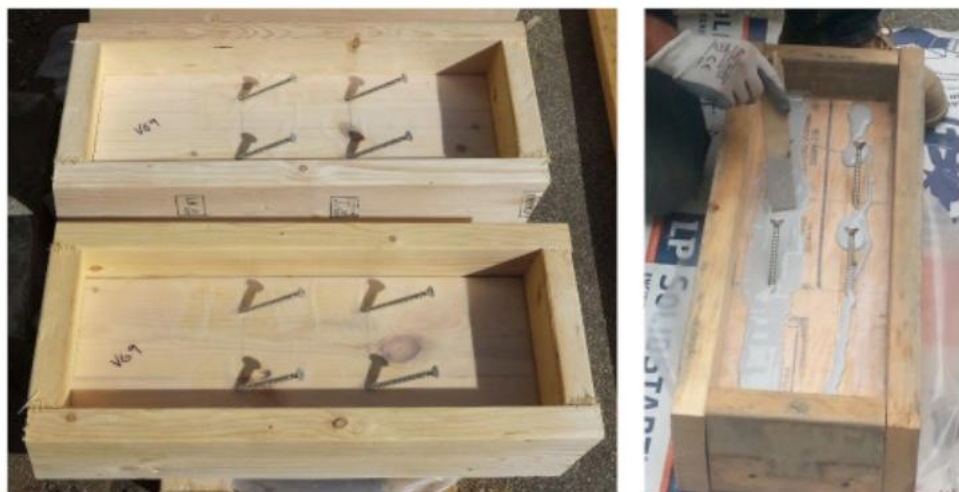
Išpjovos (angl. *notch*) jungtys, dar vadinamos dantytosiomis, užtikrina standų ryšį: apkrovos metu betonas įsipauna į medieną, perduodamas sukimosi ir šlyties jėgas. Dėl geresnio standumo tokios jungtys paprastai kombinuojamos su varžtais ar sraigtais, kurie neleidžia betonui atsiskirti nuo medienos ir užtikrina, kad konstrukcija veiktų kaip vientisas elementas [23].



4 pav. LVL išpjovimas jungčiai su strypinėmis jungtimis

1.6.3. Kombinuotos jungtys

Efektyvesnį poveikį norint pasiekti naudojamos kombinuotosios jungtys, kurios užtikrina gerą jungties standumą. Toks derinys taip pat padeda apsaugoti jungtį. Dėl aplinkos poveikių klijuose gali susidaryti vidiniai įtempiai, todėl kompozitas dažnai veikia tik su mechaninėmis jungtimis. Ilgalaikiai bandymai rodo, kad deformacijoms didėjant konstrukcijose laikui bėgant, standumas sumažėja tik apie 3 %. Naudojant tokias jungtis, reikėtų atsižvelgti ir į konstrukcijos vibracijas [25]. Pačių bandinių paruošimas, jeigu klijais klijuojami varžtai į patį bandinį, reikalauja kruopštumo: išgręžtas vietas reikia išvalyti ir į jas pilti klijus. Prieš dedant į skyles varžtus, jie taip pat turi būti kruopščiai nuvalyti, kad neliktų pašalinių tepalų [39].

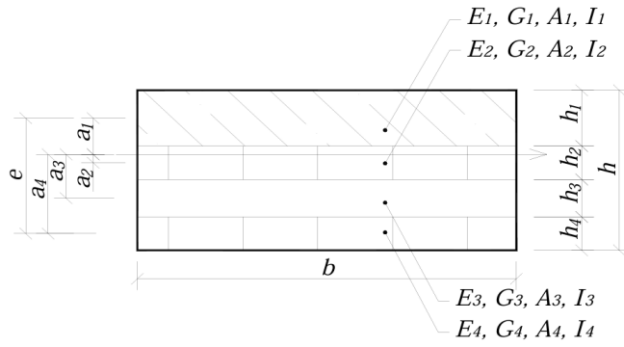


5 pav. Kombinuotas jungtis varžtai su epoksidine derva [39]

1.7. Rankiniai skaičiavimai

1.7.1. Timošenko-Ehrenfestio sijos teoriją.

Timošenkos-Ehrenfestio sijos teorija, sukurta XX a. pradžioje, leidžia tiksliau įvertinti storų, kompozitinių arba aukšto dažnio virpesių veikiamų sijų elgseną, nes įtraukia ne tik lenkimo, bet ir šlyties deformacijas bei rotacinio lenkimo efektą. Taikant šią teoriją, būtina atsižvelgti į medienos sluoksnių orientaciją ir kiekvieno sluoksnio standumo parametrus.



6 pav. Skerspjūvio parametrai [20]

Efektyvusis kompozitinio skerspjūvio lenkimo standumas $(EI)_{eff}$ nustatomas pagal išraišką:

$$(EI)_{eff} = \sum_i (E_i I_i) + \sum_i (E_i A_i a_i^2) \quad (1.7.1.1)$$

čia:

- I_i – i -tojo sluoksnio inercijos momentas;
- E_i – i -tojo sluoksnio tamprumo modulis;
- A_i – i -tojo sluoksnio skerspjūvio plotas;
- a_i – atstumas tarp bendrojo sunkio centro ir i -tojo sluoksnio sunkio centro.

Lygties taikymo atveju būtina atsižvelgti į kiekvieno sluoksnio atitinkamus tamprumo modulius:

- Betonui- vidutinį tamprumo modulį $E_{c,mean}$,
- CLT išilginėms (išilgai skaidulų) sluoksniams – vidutinį medienos tamprumo modulį išilgai skaidulų $E_{0,mean}$,
- CLT skersiniams sluoksniams – vidutinį tamprumo modulį statmenai skaiduloms $E_{90,mean}$.

Kadangi santykis $E_{0,mean}/E_{90,mean} \approx 30$, skersinių sluoksnių įtaka bendram standumui yra nereikšminga.

Tačiau parametrinės analizės metu skersinių sluoksnių standumas vis dėlto yra įtraukiamas į skaičiavimus.

Daugiasluoksnio skerspjūvio efektyvusis šlyties standumas $(GA)_{eff}$ apskaičiuojamas pagal [20] šaltinyje pateiktą formulę:

$$(GA)_{eff} = \frac{e^2}{\left(\frac{h_1}{2G_1b}\right) + \left(\sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i b_i}\right) + \left(\frac{h_n}{2G_n b}\right)} \quad (1.7.1.2)$$

čia:

- e – atstumas tarp viršutinio ir apatinio sluoksnių svorio centrų,
- h_i – i -tojo sluoksnio storis,
- G_i – i -tojo sluoksnio kirpimo modulis,
- b_i – i -tojo sluoksnio plotis.

Lygties (1.7.1.2) atveju įvertinami atskirų sluoksnių kirpimo moduliai: betoniniam sluoksniui naudojama vidutinė vertė $G_{c,mean}$ išilginiams CLT sluoksniams – vidutinė medienos kirpimo modulio vertė išilgai skiedrų $G_{0,mean}$, o skersiniams CLT sluoksniams – vertė statmenai skaiduloms $G_{90,mean}$.

Priimama, kad medienos kirpimo modulio vertė statmenai skaiduloms yra maždaug 10 kartų mažesnė nei išilgai skaidulų:

$$G_{90} = \frac{G_0}{10} \quad (1.7.1.3)$$

Kai tarpo ir skerspjūvio aukščio santykis yra mažas ($L/h < 30$), šlyties deformacijų įtaka bendram sijos įlinkiui gali būti reikšminga. Esant lygiai paskirstytai apkrovai ir viengubai atramai paremtai sijai, įlinkis w apskaičiuojamas įvertinant tiek lenkimo, tiek šlyties deformacijas:

$$w = w_M + w_V = \frac{5qL^4}{384(EI)_{eff}} + \frac{qL^2}{8\left(\frac{GA)_{eff}}{\kappa}\right)} \quad (1.7.1.4)$$

ia:

- w_M – įlinkis dėl lenkimo deformacijų;
- w_V – įlinkis dėl šlyties deformacijų;
- q – tolygiai paskirstyta apkrova (kN/m);
- L – sijos tarpatramis (m);
- $(EI)_{eff}$ – efektyvus lenkimo standumas;
- $(GA)_{eff}$ – efektyvus šlyties standumas
- κ – šlyties koeficientas, pagal literatūros šaltinius [20] $\kappa = 1,2$.

Ši išraiška remiasi Timošenkos sijos teorija, kuri leidžia įvertinti tiek lenkimo, tiek šlyties deformacijas- tai ypač svarbu mažo liaunio ($L/h < 30$) kompozitinėms sijoms, pvz., CLT- betono jungtinėms konstrukcijoms.

1.7.2. Gama metodas

Gama metodas (dar žinomas kaip *Möhler* metodas) leidžia įvertinti kompozitinių medžiagų tarpusavio sąveiką, t. y. kaip atskiri elementai veikia kaip vienas konstrukcinis vienetas. Šis metodas naudojamas apskaičiuoti įtempius, deformacijas bei kirpimo deformacijas jungtyje ir nustatyti efektyvųjį lenkimo standumą. Skaičiavimai atliekami darant prielaidą, kad ryšys tarp slydimo ir šlyties jėgos yra tiesinis. Šis metodas pateiktas medinių konstrukcijų projektavimo standarte Eurokodas 5 [6, 20, 29, 30].

Nors metodas tiksliausiai tinka sinusoidinei apkrovai, eksperimentiniai tyrimai patvirtina, kad paklaidos esant tolygiai paskirstytai arba sutelktai apkrovai yra nedidelės, todėl metodas plačiai taikomas inžinerinėje praktikoje [8–10].

CLT plokštėse išilginiai ir skersiniai sluoksniai yra suklijuoti tarpusavyje. Dėl skersinių sluoksnių mažo šlyties modulio juose atsiranda vadinamosios riedėjimo šlyties (angl. *rolling shear*)

deformacijos. Todėl skaičiavimuose skersinis sluoksnis laikomas pusiau standžia jungtimi tarp išilginių sluoksnių.

Šiuo atveju γ faktoriaus skaičiavime mechaninio tvirtinimo slydimas $\frac{s}{K}$ pakeičiamas šlyties slydimu [20]:

$$\frac{s}{K} \Rightarrow \frac{\Delta}{G_{90}b} \quad (1.7.2.1)$$

čia:

- Δ – CLT skersinio sluoksnio storis.
- G_{90} – šlyties modulis statmenai pluoštui,
- b – CLT plokštės plotis,

Kompozitinės sijos efektyvusis lenkiamasis standumas $(EI)_{eff}$ nustatomas sumuojant atskirų sluoksnių inercijos momentus ir jų Steinerio dedamąsias, pakoreguotas γ koeficientu:

$$(EI)_{eff} = \sum_{i=1,2,c} \gamma_i E_i I_i + \sum_{i=1,2,c} \gamma_i E_i A_i a_i^2 \quad (1.7.2.2)$$

čia:

- γ_i – i -ojo sluoksnio jungties efektyvumo koeficientas;
- I_i – i -ojo sluoksnio inercijos momentas apie jo paties ašį;
- E_i – i -ojo sluoksnio tamprumo modulis;
- A_i – i -ojo sluoksnio skerspjūvio plotas;
- a_i – atstumas nuo i -ojo sluoksnio svorio centro iki bendrosios neutraliosios ašies.

Skaičiavimams priimamos šios prielaidos:

- Betoniniam (gniuždomam) sluoksniui: $\gamma_c = 1,0$
- Apatiniam (tempiamam) medienos sluoksniui (jei laikoma, kad jis standžiai prijungtas) $\gamma_1 = 1,0$

Tačiau viršutiniam CLT sluoksniui (2), kurį veikia šlytis, koeficientas γ_2 apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\gamma_2 = [1 + \frac{\pi^2 E_c A_c \Delta}{G_{90} b L^2}]^{-1} \quad (1.7.2.3)$$

čia:

- G_{90} – šlyties modulis statmenai pluoštui,
- b – CLT plokštės plotis,
- L – sijos tarptraimis.

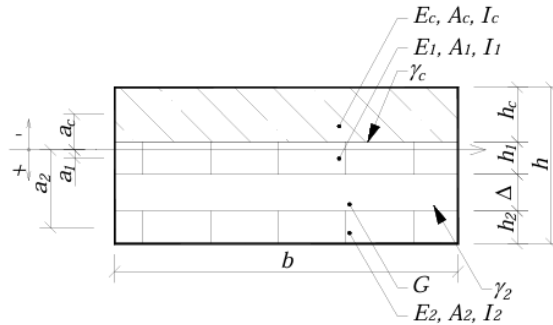
Atstumai nuo sluoksnių centrų iki neutraliosios ašies nustatomi pagal šias išraiškas:

$$a_1 = \frac{\gamma_c E_c A_c \left(\frac{h_c}{2} + \frac{h_1}{2}\right) - \gamma_2 E_2 A_2 \left(\frac{h_2}{2} + \Delta + \frac{h_1}{2}\right)}{\sum_{i=c,1,2} \gamma_i E_i A_i} \quad (1.7.2.4)$$

$$a_c = a_1 - \frac{h_c + h_1}{2}, a_2 = a_1 + \frac{h_1}{2} + \Delta + \frac{h_2}{2} \quad (1.7.2.5)$$

čia:

- h_i – i-ojo sluoksnio aukštis,
- Δ – CLT skersinio sluoksnio storis.



7 pav. Skerspjūvio parametrai [20]

Pastabos apie žymenis (pagal 7 pav.):

- „c“ – betono dalis,
- „1“ – pirmasis (apatinis) išilginis CLT sluoksnis,
- „2“ – antrasis (viršutinis) išilginis CLT sluoksnis.

Skaičiuojant turi būti naudojami:

- Betono sluoksniui – vidutinis tamprumo modulis $E_{c,mean}$,
- CLT išilginiams sluoksniams – medienos vidutinis tamprumo modulis pluošto kryptimi $E_{\parallel,mean}$.

Tolygiai apkrautos, paprastai remiamos sijos didžiausias įlinkis w tarpatramio viduryje apskaičiuojamas pagal formulę:

$$w = \frac{5qL^4}{384(EI)_{eff}} \quad (1.7.2.6)$$

čia:

- w – didžiausias sijos įlinkis tarpatramio viduryje
- q – tolygiai paskirstyta apkrova
- L – sijos tarpatramis
- $(EI)_{eff}$ – efektyvus sijos lenkiamasis standumas, apskaičiuotas pagal „γ–metodą“

1.7.3. Santykinio slydimo analizė

Santykinio slydimo analizė (angl. *Interface Relative Slip Analysis*) skirta įvertinti plastiškos deformacijos slydimo zonoje pokyčius. Šiuo metodu gaunami tikslesni duomenys nei gama metodu, nes skaičiavimuose įvertinamas netiesinis jungčių standumo mažėjimas. Skaičiavimais galima nustatyti ir optimizuoti jungčių kiekį elementuose. Patikrinant bandymo metu buvo pastebėta, kad šiuo metodu gaunami apie 10 % tikslesni rezultatai nei taikant gama metodą. Tai ypač naudingas

metodas analizuojant konstrukcijos elgseną ribinėse stadijose, kai kompozitinių konstrukcijų jungtyse atsiranda plastinės deformacijos. Šie skaičiavimai leidžia tiksliau prognozuoti suirimo mechanizmą ir išvengti staigaus konstrukcijos lūžio [6].

1.7.4. Normaliniai įtempiai

Kompozitinės sijos, pagamintos iš skirtingų medžiagų, normalinių įtempių pasiskirstymas nebėra tiesinis. Sukibusių vienas su kitu medžiagų sluoksniai deformuojasi kartu. Tiesinis išlieka tik deformacijų pasiskirstymo dėsnis (Bernulio hipotezė). Įtempiai apskaičiuojami pagal Huko dėsnį. Skirtingų medžiagų tamprumo moduliai yra proporcingi toms deformacijoms. Kiek kartų medžiagos tamprumo modulis yra skirtingas, tiek kartų skirsis ir įtempiai. Sudarant normalinių įtempių diagramas, kontakto zonoje matomas šuolis. Jeigu medžiagų išdėstymas nėra simetriškas, tai lenkimo atveju neutralioji linija pasislenka link tos sijos dalies, kur tamprumo modulis yra didesnis [35].

Maksimalūs normaliniai įtempiai skaičiuojami pagal formulę:

$$\sigma = \frac{MC}{I_{red}} \quad (1.7.4.1)$$

čia:

- M- skaičiuojamasis lenkimo momentas, veikiantis nagrinėjamame pjūvyje;
- C- atstumas nuo neutraliosios ašies iki nagrinėjamo taško;
- I_{red} - redukuotojo (bendro) skerspjūvio inercijos momentas.

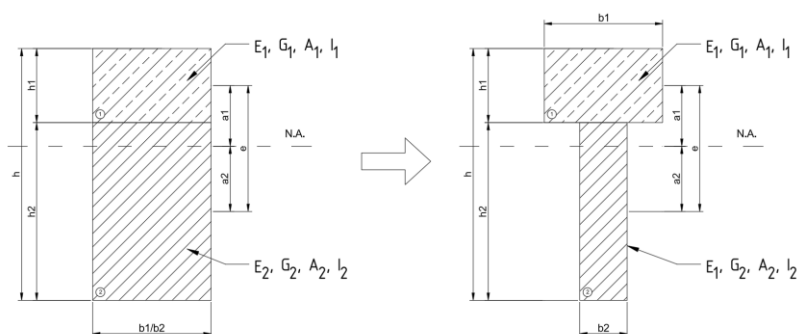
Tamprumo modulių santykis n , naudojamas skerspjūvio redukavimui, nustatomas taip:

$$n = \frac{E_1}{E_2} \quad (1.7.4.2)$$

čia:

- E_1 - medžiagos, į kurią redukuojama, tamprumo modulis (dažniausiai standesnės);
- E_2 - redukuojamos medžiagos tamprumo modulis.

Taikant šį metodą, gaunamas teorinis vientisas skerspjūvis, kuriam galioja standžios jungties prielaidos (žr. 8 pav.). Svarbu atkreipti dėmesį, kad redukuotoje (pakeisto pločio) dalyje gautus įtempius vėliau reikia perskaiciuoti atgal, padauginant iš santykio n , kad gautume tikrąsias reikšmes realioje medžiagoje.



8 pav. Redukuotas skerspjūvis

1.8. Tyrimai ir bandymai

1.8.1. Reikalingi bandymai

Konstrukcijoms dažnai atliekami bandymai, siekiant nustatyti mechanines savybes ir jų elgseną eksploatacijos metu. Kompozitinių konstrukcijų tyrimai iš esmės nesiskiria nuo paprastųjų konstrukcijų. Sijoms ir perdangoms matuojami lenkimo, gniuždymo, tiesinių judesių arba poslinkių dydžiai, taip pat fiksuojamos deformacijos naudojant specialius prietaisus. Kompozitų bandymuose ypač svarbu patikrinti jungčių šlyties elgseną. Gauti bandinių rezultatai lyginami su teoriniais skaičiavimais, dažnai papildomai atliekant baigtinių elementų analizę. Svarbu pabrėžti, kad atskirų medžiagų bandymai suteikia tik pirminius duomenis kompozitinių lenkiamųjų elementų projektavimui, tačiau neparodo tikrosios visos sistemos elgsenos. Norint užtikrinti skaičiavimų tikslumą, reikėtų atlikti pilno mastelio lenkimo bandymus ir įvertinti realią kompozito sąveiką [3].

1.8.2. Lenkimo bandymai

Sijos apkraunamos viena skersine jėga, sukeliant paprastąjį lenkimą. Skersinė jėga kartu su momentu veikia visą sijos ilgį, todėl sijų įtempių ir stiprumo pasiskirstymas priklauso nuo abiejų komponentų poveikio. Svarbu nustatyti skerspjūvius, kuriuose įtempių poveikis yra didžiausias [35]. Lenkimo bandymas gali būti atliekamas apkraunant kompozitą keliose vietose arba gembiniu būdu, kai sijos vienas galas tvirtai įtvirtinamas, o kitas – apkraunamas. Toks metodas leidžia gauti gryną lenkimo schemą, kai skersinė jėga prilyginama nuliui ir veikia tik lenkimo momentas [5]. Gembinės sijos bandymai leidžia tiksliai apskaičiuoti normalinius įtempius, nes skersinė jėga beveik neturi įtakos jų pasiskirstymui.

Įtempiams matuoti naudojami elektriniai indikatoriai (tenzometrai) [3, 10]. Kontaktiniai tenzometrai klijuojami tiesiai ant medžiagos paviršiaus; keičiantis deformacijoms, keičiasi jų varža, leidžianti nustatyti apkrovą ir konstrukcijos deformaciją. Papildomai gali būti naudojami LVDT poslinkių sensoriai, skirti įlinkimui ir deformacinių siūlių judėjimui stebėti. Tikslioms deformacijoms fiksuoti taikoma skaitmeninės vaizdo koreliacijos (DIC) metodika, kuri užfiksuoja vaizdus prieš ir po deformacijos.

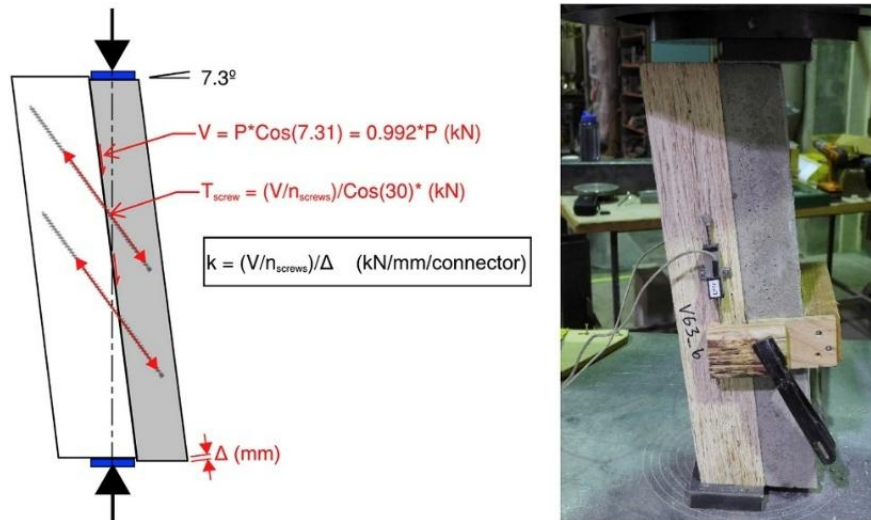
1.8.3. Gniuždymo bandymai

Kompozituose naudojami įvairių klasių betonai, dažnai papildyti specialiais priedais. Taikomas itin didelio stiprio pluoštinis betonas (UHPC), kurio stipris gali viršyti 120 MPa, leidžiantis projektuoti plonesnes perdangos plokštes. Siekiant užtikrinti, kad betonas atitiktų savo mechanines savybes, atliekami gniuždymo bandymai, kuriuose nustatomas gniuždomasis stipris. Bandiniai gniuždomi po 28 dienų, kai betonas pasiekia projektinį stiprį, tačiau galima atlikti patikras ir po 7 dienų, siekiant įvertinti eksploatacines galimybes trumpesniu laikotarpiu. Gniuždymo bandymai gali būti atliekami ne tik betonui, bet ir medienai. Svarbu atkreipti dėmesį, kad atliekant šiuos bandymus būtina įvertinti bandinių formą ir matmenis. Laboratorijose dažniausiai naudojami mažesnių matmenų kubeliai nei nurodyta standartuose, todėl, norint gauti tikrąją (standartinę) reikšmę, rezultatus reikia perskaičiuoti naudojant atitinkamus koeficientus [4].

1.8.4. Jungčių patikra

Norint užtikrinti kompozitinės konstrukcijos veikimą, būtina įvertinti šlyties jungčių charakteristikas [15]. Tam naudojamas gniuždymo presas su atramomis (9 pav.). Tinkamai atrėmus bandinius į

atramas, išvengiama momentų susidarymo aplink ašį. Papildomi įtvirtinimai nebūtinai, nes jie gali paveikti tyrimo rezultatus. Bandiniams montuojami LVDT sensoriai, leidžiantys tiksliai matuoti slydimą tarp medienos ir betono elementų. Apkrova pradedama nuo 40 % lūžio vertės, vėliau atleidžiama ir palaipsniui didinama iki galutinės lūžio vertės. Gauti eksperimento duomenys atvaizduojami diagramoje, kurios pagalba įvertinama jungties kokybė. Iš šios diagramos nustatomas standumo modulis (K). Remiantis gautais rezultatais, nustatomas jungties plastiškumas – gebėjimas deformuotis prieš suyrant. Tai yra rodikliai, parodantys kritines reikšmes ribiniams būviams. Plastiškos jungtys leidžia persiskirstyti įrąžoms ir išpėja apie artėjančią suirimą, tuo tarpu trapios jungtys gali staiga lūžti, diagramoje net neparodžiusios takumo ribos [25, 37].



9 pav. Šlyties bandymo įrengimas: scheminis vaizdas (kairėje) ir bandymai nuotrauka (dešinėje) [15]

1.8.5. Baigtinių elementų metodas

Skaitmeninis baigtinių elementų (FEM) modeliavimas yra racionalus ir plačiai naudojamas skaičiavimo metodas. Dažniausiai naudojamos programos yra ANSYS, ABAQUS arba „Robot Structural Analysis“. Šis metodas išlieka būtinas atliekant medžio–betono kompozito elementų analizę [1]. Baigtinių elementų analizės gali sudarytos: vienmatės (1D), dvimatis (2D) arba trimatis (3D). Atliekant skaičiavimus 1D modelyje, betoninė ir medinė sijos yra modeliuojamos kaip dvi lygiagrečios sijos, o jungtys – kaip atskiri tamprūs elementai. Įrodyta, kad 1D modelis gerai atitinka eksperimentinius rezultatus. Tačiau pagrindinis šio modelio trūkumas yra tas, kad jis neatsižvelgia į plokščių erdvinius poveikius, todėl gali pateikti perteklinius rezultatus [22].

1.8.6. Poveikių į aplinkai tyrimai

Šio tyrimo pagrindinis tikslas – nustatyti medžio–betono kompozito jungčių būklę, veikiant klimato sąlygoms: drėgmei ir temperatūrai. Konstrukcijos veikiamos tik savojo svorio. Tikrinama trintis ir susitraukimo deformacijos. Dažniausiai naudojant klajines jungtis, dėl oro sąlygų gali atsirasti įtempiai. Betonas ir medis reaguoja skirtingai, dėl to jungtyje atsirandantys įtempiai gali atskirti elementus. Naudojamos ciklinio šildymo ir šaldymo kameros. Nustatoma, kaip veikia oro drėgmė, temperatūros pokyčiai ir kokios deformacijos atsiranda. Toks tyrimo metodas iki šiol nėra plačiai taikomas, nors yra būtinas ilgalaikiam patikimumui užtikrinti [28].

1.9. Apibendrinimas

Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad pagrindinis mokslinių tyrimų objektas yra medienos ir betono jungčių elgsena, nes nuo jos priklauso visos konstrukcijos efektyvumas. Teorinėje dalyje dažniausiai taikomas gama metodas, kurio patikimumas pagrįstas Eurokodo 5 standartu. Visgi, literatūroje sutinkami ir alternatyvūs, paprastesni skaičiavimo modeliai, kurie, lyginant su realiais bandymais, pateikia pakankamai tikslius rezultatus ir dažnai nesiskiria nuo gama metodo duomenų.

Jungčių pasirinkimas praktikoje yra platus ir priklauso nuo konstrukcijos paskirties. Nors mechaninės jungtys statyboje labiausiai paplitusios dėl paprasto įrengimo, jos neužtikrina tokio didelio standumo kaip klajinės jungtys. Literatūros duomenimis, geriausi rezultatai pasiekiami naudojant epoksidines dervas su užpildais – tinkamai parinkti priedai (pavyzdžiui, granito skalda ar smėlis) padeda betonui ir medienai dirbti kaip vienam elementui ir gali pagerinti jungties savybes net iki 1,5 karto. Tai rodo, kad klajinės jungtys turi didelį potencialą, kurį verta toliau tyrinėti.

2. Medienos-betono lenkiamų elementų tyrimo metodologija

2.1. Medienos-betono lenkiamųjų elementų tyrimo metodologija

Baigiamojo magistro darbe tiriama medienos ir betono kompozitinė perdanga. Atliekant literatūros analizę buvo atsižvelgta į tokio tipo konstrukcijų trūkumus ir literatūroje pateiktus galimus sprendinius. Taip pat nagrinėti taikomi tyrimų metodai, skaičiavimai ir skaitmeninių programų sudarymas bei jų analizė. Literatūros analizės metu nustatyta, kad didelę įtaką kompozitinės konstrukcijos darbui turi medienos ir betono jungties standumas, kuris lemia konstrukcijos mechanines savybes ir deformacijas.

Atsižvelgus į identifikuotą problemą, darbe pasirinkta taikyti teorinius skaičiavimus, skaitmeninius skaičiavimo modelius ir atlikti eksperimentinius bandymus. Tyrimo tikslas – įvertinti medienos ir betono kompozitinių lenkiamųjų elementų elgseną ir mechanines savybes lenkimo metu, esant skirtingam jungties standumui.

Darbe buvo taikomi metodai:

- Teorinių skaičiavimų analizė
- Skaitmeninis modeliavimas
- Bandinių gautų rezultatų ir skaičiavimų analizė

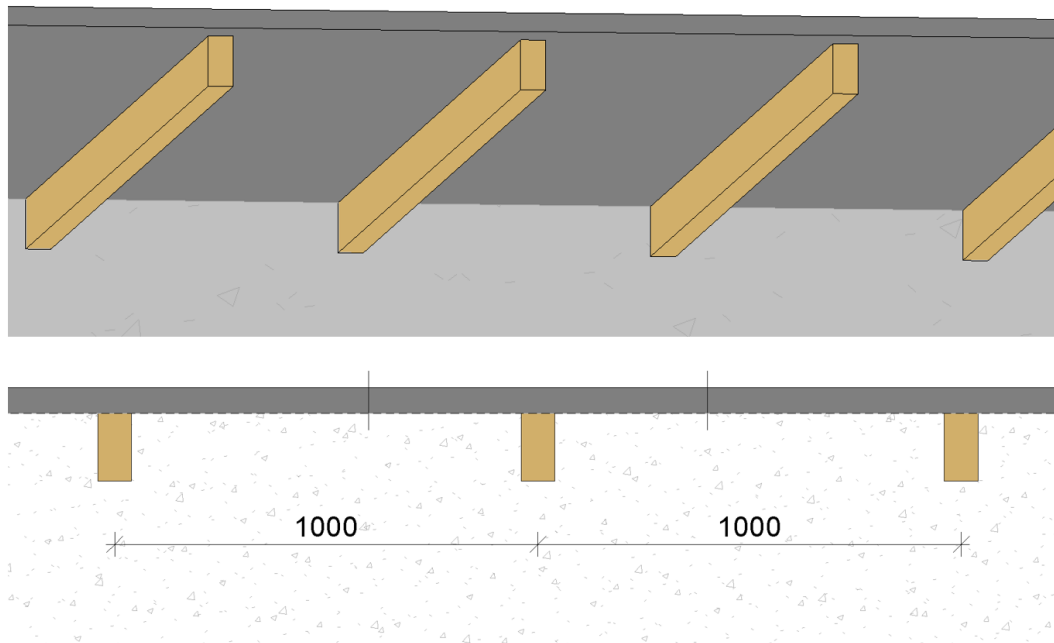
Atliekamo darbo tikslumui ir rezultatų patikimumui užtikrinti remiamasi literatūroje pateiktais skaičiavimo metodais, taikomi Eurokodai, statybos techniniai reglamentai (STR) ir kiti Lietuvoje galiojantys standartai.

Darbo projektavimo metu pasirinkta kompozitinė sijinė perdanga, sujungta standžia klijų jungtimi. Perdanga sudaryta iš GL24h medinių balkių ir C25/30 betono sluoksnio (lentelė 3).

3 lentelė. Elementų charakteristikos ir jų matmenys.

	Betonas C25/30	GL24h
Aukštis – h	60 mm	200 mm
Plotis – b	1000 mm	80 mm
Ilgis – L	4000 mm	4000 mm
Tamprumo modulis – E	31000 MPa	11500 MPa
Šlyties modulis – G	12900 MPa	720 MPa

Pasirinkta sijinė perdanga, kurios mediniai balkiai išdėstyti 1 metro atstumu (10 pav.). Perdangos tarpatramis parinktas 4 m ilgio.

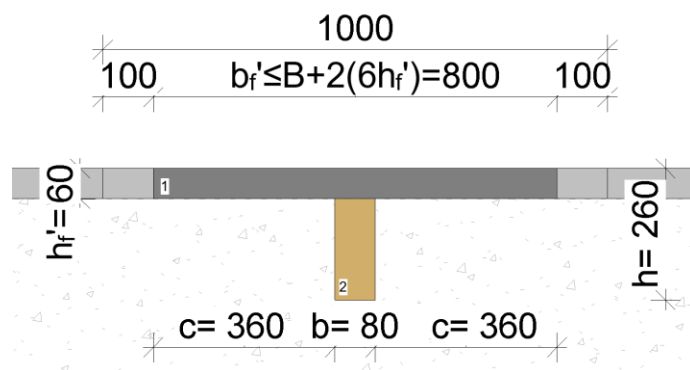


10 pav. Sijų išdėstymas

Kompozitinė medienos- betono perdanga skaičiuojama kaip tėjinio skerspjūvio elementas. Skaičiuotinis profilio lentynos plotas b'_f nustatomas pagal ribojimus [41]:

- Kai lentyna stora ($h'_f \geq 0,1h$): $c \leq 6h'_f$
- Kai lentyna vidutinė ($0,05h \leq h'_f < 0,1h$): $c \leq 3h'_f$
- Kai lentyna labai plona ($h'_f < 0,05h$): $c = 0$
 - l – skaičiuojamasis tarpatramio ilgis.
 - a – atstumas tarp gretimų išilginių sienelių (sijų).
 - h – visas sijos aukštis.
 - h'_f – lentynos aukštis (storis).

Šiuo atveju nors atstumas tarp sijų 1 m ilgio gautas tėjinis profilis mažesnis. Profilis atitinka sąlygą $h'_f \geq 0,1h$, ir apskaičiuojamas $b'_f = b + 2c$ (11 pav.)



11 pav. Skaičiuojamasis skerspjūvis. 1 – betonas ir 2 – GL24h sija

Perdangą veikiančios apkrovos skaičiuojamos remiantis LST EN 1991-1-1 (Euro kodu 1). Skaičiuojant saugos ribinį būvį (SRB), taikomi daliniai koeficientai: nuolatinėms apkrovoms $\gamma_G=1,35$ ir kintamosioms apkrovoms $\gamma_Q=1,5$.

Šiame darbe analizuojama visuomeninės paskirties pastato perdanga, todėl kintamosios (naudojimo) apkrovos pasirinktos C1 kategorijos. Reikšmės pateikiamos 4 lentelėje.

4 lentelė. Apkrovos.

Apkrova	TRB	SRB
Savasis svoris	1,6	2,16
Grindys	2	2,7
Naudojimo apkrova (kategorija C-1)	3	4,5
Kilnojamos pertvaros	0,8	1,2
	7,4	10,56

2.2. Teoriniai skaičiavimai

Teoriniai skaičiavimai atliekami siekiant užtikrinti, kad suprojektuota perdanga atitiktų saugos ir tinkamumo reikalavimus. Skaičiavimams naudojamas nustatytas efektyvusis skerspjūvio plotis, kadangi vertinamas ne visas geometrinis viršutinės betono lentynos plotis.

Skaičiavimų metu vertinamos normalinių įtempių reikšmės. Siekiama užtikrinti, kad jos neviršytų leistinų ribinių verčių, o elementai išlaikytų savo mechanines savybes bei reikiamą laikomąją galią.

Taip pat skaičiuojami perdangos įlinkiai. Jų analizė atliekama pagal tinkamumo ribinį būvį (TRB). Gautos reikšmės neturi viršyti normatyviniuose dokumentuose reglamentuotų leistinų ribų.

Tangentiniai įtempiai vertinami siekiant nustatyti kompozitinės perdangos elgseną veikiant skersinėms jėgoms. Ypatingas dėmesys skiriamas kontakto zonai – tikrinama, kokie įtempiai veikia jungtį ir ar ji pajėgi užtikrinti bendrą medienos bei betono elementų darbą.

2.2.1. Normaliniai įtempiai

Skaičiuojami maksimalūs normaliniai įtempiai sijos skerspjūvyje. Laikoma, kad įtempiai pasiskirsto tiesiškai ir priklauso nuo atstumo iki neutraliosios ašies. Skaičiavimams naudojama formulė:

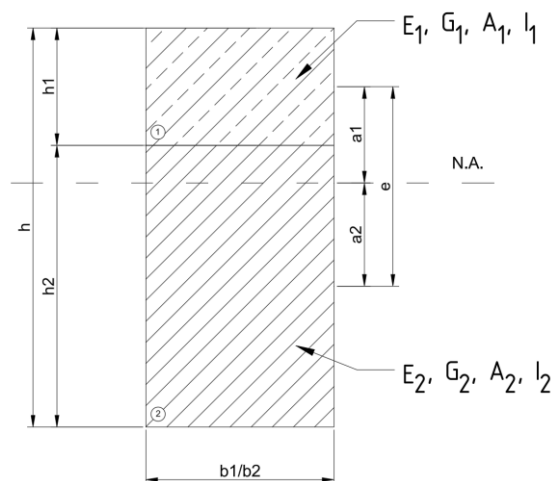
$$\sigma = \frac{MC}{I} \quad (2.2.1.1)$$

čia:

- σ – normalinis įtempis nagrinėjamame skerspjūvio taške (MPa).
- M – skaičiuojamasis lenkimo momentas, veikiantis nagrinėjame taške (kNm)
- C – atstumas nuo redukuotojo skerspjūvio neutraliosios ašies iki nagrinėjamo taško
- I – redukuotojo (bendro) skerspjūvio inercijos momentas neutraliosios ašies atžvilgiu.

Redukuotas inercijos momentas skaičiuojamas pagal H. Šteinerio teoremą. Šis metodas leidžia įvertinti ne tik atskirų sluoksnių inercijos momentus, bet ir jų išdėstymą bendrosios neutraliosios ašies atžvilgiu:

$$I = \sum \frac{b_i h_i^3}{12} + A_i a_i^2 \quad (2.2.1.2)$$



12 pav. Kompozitinės sijos modelis

Siekiant skaičiuoti kompozitinę siją kaip vienalytį elementą, nustatomas tamprumo modulių santykis n :

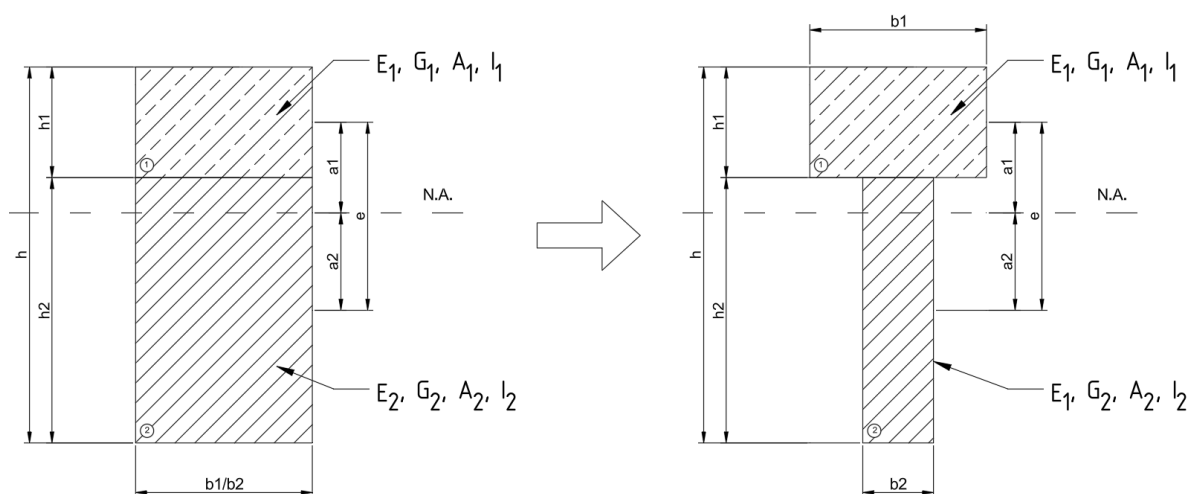
$$n = \frac{E_1}{E_2} \quad (2.2.1.3)$$

čia:

- n – tamprumo modulių santykis
- E_1 – 1-ojo sluoksnio tamprumo modulis išilgai sijos ašies.
- E_2 – 2-ojo sluoksnio tamprumo modulis išilgai sijos ašies.

Pagal gautą santykį apskaičiuojamas naujas redukuotas medienos plotis:

$$b_{2.1} = \frac{b_2}{n} \quad (2.2.1.4)$$



13 pav. Skerspjūvio redukavimas

Toliau nustatomi geometriniai skerspjūvio parametrai:

Sluoksnių plotai:

$$A_1 = b_1 h_1 \quad (2.2.1.5)$$

$$A_2 = b_{2,1} h_2 \quad (2.2.1.6)$$

čia:

- A_1 – pirmojo elemento plotas;
- b_1 – pirmojo elemento plotis;
- h_1 – pirmojo elemento aukštis;
- A_2 – antrojo elemento plotas;
- $b_{2,1}$ – antrojo elemento pakeistas plotis;
- h_2 – antrojo elemento aukštis;

Sluoksnių centrų aukščiai (y_i) nuo sijos apačios:

$$y_1 = h_2 + \frac{h_1}{2} \quad (2.2.1.7)$$

$$y_2 = \frac{h_2}{2} \quad (2.2.1.8)$$

čia:

- y_1 – pirmojo sluoksnio centro aukštis;
- h_2 – antrojo elemento aukštis;
- h_1 – pirmojo elemento aukštis;
- y_2 – antrojo sluoksnio centro aukštis;

Neutraliosios ašies padėtis ($\bar{y}$):

$$\bar{y} = \frac{A_1 y_1 + A_2 y_2}{A_1 + A_2} \quad (2.2.1.9)$$

čia:

- $\bar{y}$ – atstumas nuo atskaitos taško (apačios) iki neutraliosios ašies (N.A.)
- A_1 – pirmojo elemento plotas
- y_1 – pirmojo sluoksnio centro aukštis
- A_2 – antrojo elemento plotas
- y_2 – antrojo sluoksnio centro aukštis

Sluoksnių atstumai iki neutraliosios ašies (a_i):

$$a_i = y_i - \bar{y} \quad (2.2.1.10)$$

čia:

- a_i – atstumas nuo i -ojo sluoksnio svorio centro iki viso skerspjūvio bendrosios neutraliosios ašies
- $\bar{y}$ – neutralioji ašis (N.A.)

- y_i – i -tojo sluoksnio centro aukštis
- i – sluoksnio indeksas.

Medinių konstrukcijų projektinis stipris

Medienos projektinis stipris lenkiant ($f_{m,z,d}$) nustatomas pagal Eurokodo 5 (LST EN 1995-1-1) reikalavimus, naudojant šią formulę:

$$f_{m,z,d} = \frac{k_{mod} \cdot k_h \cdot f_m}{\gamma} \quad (2.2.1.11)$$

čia:

- $f_{m,z,d}$ – projektinis medienos stipris lenkiant;
- k_{mod} – modifikavimo koeficientas, įvertinantis apkrovos trukmę ir drėgmę (reikšmės pateiktos 5 lentelėje);

Klijuotos medienos aukščio koeficientas k_h apskaičiuojamas pagal formulę (LST EN 1995-1-1, 3.3 p.):

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1} \right. \\ \left. 1,1 \right\} \quad (2.2.1.12)$$

Modifikavimo koeficientas k_{mod} Eurokodo 5 (LST EN 1995-1-1) (3.1 lentelė) arba galima rasti tas pačias reikšmes STR 2.05.07:2005 „Medinių konstrukcijų projektavimas“ (5 lentelė).

5 lentelė. k_{mod} – modifikavimo koeficientas

Medžiaga	Standartas	Eksploatavimo klasė	Apkrovos trukmės klasė				
			Nuolatinės apkrovos	Ilgalaikės apkrovos	Vidutinės trukmės apkrovos	Trumpalaikės apkrovos	Momentinės apkrovos
Vientisoji mediena	EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Klijuotoji mediena (GL)	EN 14080	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

Medžiagos savybių daliniai koeficientai γ_M parenkami pagal STR 2.05.07:2005:

6 lentelė. Medžiagos savybių daliniai koeficientai

Medžiaga	Koeficientas (γ_M)
Vientisa mediena (pvz., C24 klasės)	1,3
Klijuotoji sluoksninė mediena (Glulam)	1,25

Betono projektinis stipris

Vadovaujantis STR 2.05.05:2005 „Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas“, betono projektinis gniuždomasis stipris f_{cd} apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f_{cd} = \frac{a_{cc} \cdot a \cdot f_{ck}}{\gamma_c} \quad (2.2.1.13)$$

čia:

- f_{cd} – betono projektinis stipris MPa.
- f_{ck} – charakteristinis betono gniuždomasis stipris (cilindrinis) MPa.
- a_{cc} – koeficientas, įvertinantis ilgalaikį gniuždymo poveikį (sunkiajam betonui – 1,0, lengvajam – 0,85).
- a – koeficientas, įvertinantis stačiakampę įtempių diagramą (priimama 0,9 arba 1,0);
- f_{ck} – charakteristinis betono gniuždomasis stipris (cilindrinis) MPa.
- γ_c – betono dalinis patikimumo koeficientas (betoninėms konstrukcijoms – 1,8, gelžbetoninėms – 1,5).

2.2.2. Įlinkiai

Teoriniuose skaičiavimuose pasirinkta **Timošenkos-Erenfesto** (Timoshenko-Ehrenfest) sijos teorija. Ji pasirinkta todėl, kad literatūros analizė parodė, jog gaunami rezultatai yra artimi Eurokodo 5 gama metodui. Šioje teorijoje įvertinamas ne tik lenkimas, bet ir sijos šlyties deformacijos, kas yra svarbu kompozitinėms konstrukcijoms su paslankiu ryšiu.

Efektivus kompozitinio skerspjūvio lenkimo standumas $(EI)_{eff}$ nustatomas pagal išraišką:

$$(EI)_{eff} = \sum_i (E_i I_i) + \sum_i (E_i A_i a_i^2) \quad (2.2.2.1)$$

čia:

- $(EI)_{eff}$ – efektyvusis kompozitinio skerspjūvio lenkimo standumas ($N \cdot mm^2$)
- i – sluoksnio indeksas;
- E_i – i -ojo sluoksnio tamprumo modulis išilgai sijos ašies.
- I_i – i -ojo sluoksnio inercijos momentas jo paties neutraliosios ašies atžvilgiu.
- A_i – i -ojo sluoksnio skerspjūvio plotas ($b_i \cdot h_i$).
- a_i – atstumas nuo i -ojo sluoksnio svorio centro iki viso kompozitinio skerspjūvio neutraliosios ašies.

Daugiasluoksnio skerspjūvio efektyvus šlyties standumas $(GA)_{eff}$ apskaičiuojamas pagal [20] pateiktą išraišką:

$$(GA)_{eff} = \frac{e^2}{\left(\frac{h_1}{2G_1b}\right) + \left(\sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i b_i}\right) + \left(\frac{h_n}{2G_n b}\right)} \quad (2.2.2.2)$$

čia:

- e – atstumas tarp viršutinio ir apatinio sluoksnių svorio centrų;
- h_i – i -tojo sluoksnio storis,

- G_i - i -tojo sluoksnio kirpimo modulis,
- b_i - i -tojo sluoksnio plotis.

Tolygiai apkrautos, paprastai remiamos sijos vidurio nuokrypis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$w = w_M + w_V = \frac{5qL^4}{384(EI)_{eff}} + \frac{qL^2}{8(\frac{GA)_{eff}}{\kappa}} \quad (2.2.2.3)$$

čia:

- w – maksimalus sijos vidurio įlinkis
- w_M – įlinkio dedamoji, atsirandanti dėl lenkiamojo momento poveikio.
- w_V – įlinkio dedamoji, atsirandanti dėl kirpimo (šlyties) deformacijų.
- q – tolygiai paskirstyta apkrova, tenkanti sijos ilgio vienetui N/m arba kN/m
- L – sijos tarpatramio ilgis
- $(EI)_{eff}$ – anksčiau apskaičiuotas efektyvusis lenkimo standumas.
- $(GA)_{eff}$ – anksčiau apskaičiuotas efektyvusis šlyties standumas.

κ – šlyties formos koeficientas (kirpimo koeficientas). Jis priimamas šlyties įtepių pasiskirstymo netolygumui. Stačiakampiui skerspjūviui priimamas dažnai naudojama 1,2) [20]

Įlinkių patikrinimas

Sijos standumas tikrinamas pagal tinkamumo ribinį būvį (TRB). Konstrukcijos laikomos tinkamomis eksploatacijai, kai apskaičiuotas maksimalus sijos įlinkis nuo norminių apkrovų neviršija ribinių reikšmių, nurodytų normatyviniuose dokumentuose.

Tinkamumo sąlyga:

$$w \leq w_{rib} \quad (2.2.2.4)$$

čia:

- w – apskaičiuotas maksimalus sijos įlinkis pagal Timošenkos teoriją;
- w_{rib} – ribinis (leistinas) įlinkis.

Pagal STR 2.05.04:2003 „Poveikiai ir apkrovos“, leistinas įlinkis priklauso nuo sijos tarpatramio ilgio L . Pavyzdžiui, kai L yra 3–6 m, ribinis įlinkis dažniausiai yra $L/200$

2.2.3. Tangentiniai įtempiai

Tangentiniai (šlyties) įtempiai skaičiuojami pagal medinių konstrukcijų Eurokodą 5 (LST EN 1995-1-1). Bendroji tangentinių įtempių išraiška:

$$\tau = \frac{V \cdot Q}{I \cdot b} \quad (2.2.3.1)$$

čia:

- V – skersinė (kirpimo) jėga
- Q (arba S) – atpjautosios dalies statinis inercijos momentas neutraliosios ašies atžvilgiu;

- I – skerspjūvio inercijos momentas;
- b – skerspjūvio plotis ties nagrinėjama vieta.

Literatūroje sutinkama ir kita išraiška, skirta kompozitiniams elementams, įvertinant atskirų sluoksnių indėlį:

$$\tau = \frac{VE_i A_i a_i}{(EI)_{eff} \cdot b} \quad (2.2.3.2)$$

čia:

- V – skersinė jėga
- E_i – i -ojo sluoksnio tamprumo moduli.
- A_i – i – ojo sluoksnio skerspjūvio plotas
- $(EI)_{eff}$ – efektyvusis lenkimo standumas
- b – jungties plotis
- a_i – atstumas nuo i -ojo sluoksnio svorio centro iki neutraliosios ašies.

2.3. Programiniai skaičiavimai su Robot Structural Analysis Professional

Siekiant užtikrinti gautų teorinių skaičiavimų rezultatus, atliktas kompiuterinis modeliavimas naudojant „Robot Structural Analysis Professional“ programinę įrangą. Šiame darbe pasirinktas strypinis 1D modeliavimas, kuris leidžia efektyviai analizuoti lenkiamuosius elementus.

Kompozitinio skerspjūvio formavimas

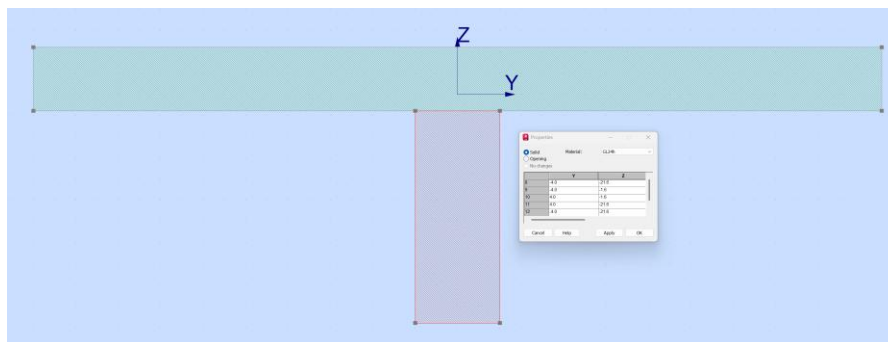
Svarbiausias modeliavimo etapas - tikslus skerspjūvio sudarymas. Tam panaudojama programos „Section Definition“ funkcija. Ji leidžia kurti nestandartinius profilius ir naudoti skirtingas medžiagas (4 pav.).



14 pav. Programinės įrangos pasirinkimas modeliuojant naujus elementus.

Proceso žingsniai:

1. Geometrijos kūrimas: Grafinėje aplinkoje nubraižomi du kontūrai, kurie atitinka anksčiau apskaičiuotą profilį (15 pav.).
2. Medžiagos priskyrimas: Kiekvienam kontūrai priskiriamos medžiagos. Betoninei daliai priskiriamas C25/30 betonas, o medinei daliai- GL24h
3. Charakteristikų generavimas: Automatiškai apskaičiuojamos redukuotos skerspjūvio charakteristikos. Programa priima, kad profilis yra sujungtas tarp jungčių standžiai.

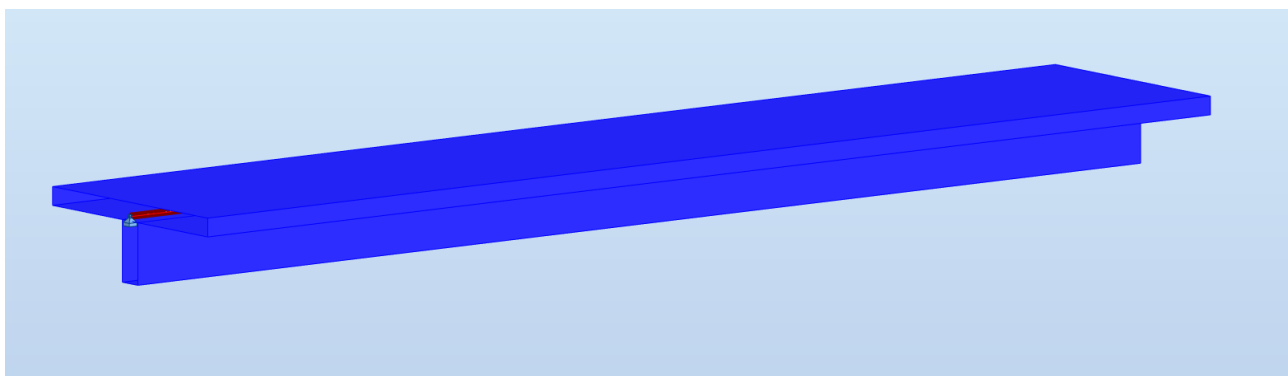


15 pav. Modeliuojamas skerspjūvis.

Sijos modeliavimas

Modeliavimo aplinkoje sukuriama ašys. Sijos tarpatramis parenkamas 4 m ilgio. Pati sija braižoma kaip strypinis elementas. Įkeliamas į profilių pasirinkimą naujai sukurtas redukuotas profilis. Strypiniam elementui priskiriamas redukuotasis skerspjūvis ir sukuriamą statiškai išsprendžiama sistema:

- Viena gale – lankstus nepaslankus atraminis ryšys (fiksotos U_x , U_y , U_z kryptys).
- Kita gale – lankstus paslankus atraminis ryšys (fiksotos U_y , U_z kryptys, leidžiamas poslinkis U_x).

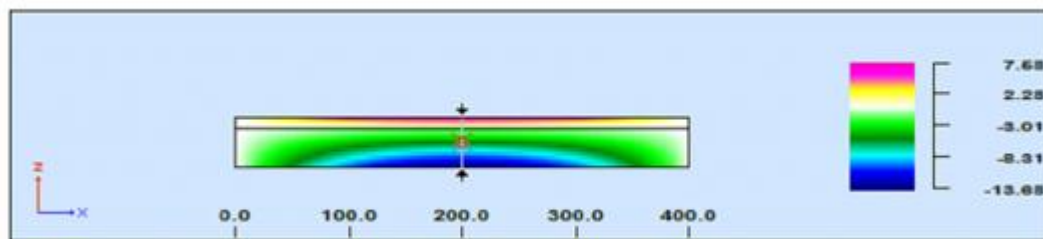


16 pav. 3D skaičiuojamasis modelis.

Apkrovos ir analizė

Kompozitinė sija modelyje apkraunama tolygiai paskirstyta apkrova (q). Atliekama tiesinė statinė analizė. Rezultatai vertinami naudojant „Stress Analysis“ (įtempių analizė) funkcija, kuris leidžia detalizuoti įtempius bet kuriame skerspjūvio taške:

- Fiksuojami maksimalūs įlinkiai sijos viduryje
- Normalinių įtempių pasiskirstymas (17 pav.)
- Tangentiniai įtempių lenkiamos sijos kontakto zonoje.



17 pav. Normaliniai įtempių pasiskirstymas spalvine išraiška

2.4. Bandiniai

Atliekamas naujos jungties tyrimas, kurioje naudojami klijai, siekiant įvertinti, ar jie gali atitikti įprastai naudojamų epoksidinių klijų charakteristikas ir ar įmanoma pasiekti geresnius rezultatus. Bandymų tikslas – patikrinti, ar skaičiavimuose priimtose prielaidos apie jungties standumą atitinka realią lenkiamąją kompozitinės perdangos elgseną.

Literatūros analizėje ir normatyviniuose dokumentuose dažnai daroma prielaida, kad klijuotos jungtys yra visiškai standžios (nesideformuojančios). Tačiau eksperimentiniai tyrimai rodo, kad realiomis sąlygomis jungtys pasižymi tam tikru paslankumu. Taikant Huko dėsnį ir skaičiuojant įtempius, standžios jungties prielaida ne visada tiksliai atspindi realias klijų mechanines savybes, todėl būtina nustatyti tikrąjį poslinkio modulį.

Atliekant bandymus pagal galiojančius standartus (LST EN 26891), užtikrinamas gautų rezultatų patikimumas. Eurokodo 5 B priede aprašyti skaičiavimo metodai leidžia, žinant tikrąsias jungties standumo reikšmes, atlikti realesnius kompozitinės perdangos skaičiavimus. Taikant šiuos metodus, apskaičiuojami normaliniai įtempiai, tangentinių įtempių pasiskirstymas ir perdangos įlinkiai.

2.4.1. Medžiagos

Bandinių formavimui naudota klijuota mediena GL24h, gauta iš UAB „Jūrės medis“. Mediena pasirinkta dėl galimų matmenų įvairovės ir tinkamumo didelio tarpatramio konstrukcijoms.

Betono sluoksniui parinkta C25/30 stiprio klasė. Naudojamas cementas CEM II/A-LL 42,5R. Užpildams naudojamas smėlis ir žvirgždas. Betono mišinio sudėtis pateikta 7 lentelėje.

7 lentelė. Betono sudėtis (1 m³ mišinio).

Eil. Nr.	Medžiagos pavadinimas	Reikalingas kiekis 1m ³ mišinio paruošimui, kg.
1.	Portlandcementis, CEM II 42,5N	320
2.	Smėlis, fr. 0/2	1000
3.	Žvirgždas fr. 4/16	964
4.	Vanduo	185
5.	Vandens cemento santykis V/C	0,578

Kompozito gamybai naudojami trijų tipų rišikliai:

1. Epoksidiniai klijai „PENOSIL Epoxy Fix&Coat 507“;
1. Silikatiniai klijai;
2. Silikatiniai klijai, modifikuoti pridedant pucolaninių medžiagų.

Siekiant pagerinti kontakto zonos sukibimą tarp skirtingų medžiagų, papildomai naudojamas smėlis ir granito skalda.

Pucolaninės medžiagos naudojamos kaip cemento pakaitalas. Tai medžiagos, kuriose vyrauja aliuminio ir silicio junginiai (dažniausiai amorfinės formos), padedantys suriši kalcio hidroksidą į kalio silikato hidratus.

2.4.2. Bandinių ruošimas

Medienos ruošiniai (200 mm ilgio) buvo supjaustyti užtikrinant tikslius matmenis, būtinus jungties ploto skaičiavimams. Iš viso suformuoti 6 skirtingų rūšių bandiniai (žr. 8 lentelę).

8 lentelė. Medžiagos, naudojamos kompozitiniams bandiniams

Bandinio žymuo	Mediena	Betonas	Klijai	Papildomi priedai
1.1	GL24h	C25/30	Epoksidiniai klijai	Granito skalda 8/12
1.2	GL24h	C25/30	Epoksidiniai klijai	Smėlis
2.1	GL24h	C25/30	Silikatiniai klijai	Granito skalda 8/12
2.2	GL24h	C25/30	Silikatiniai klijai	Smėlis
3.1	GL24h	C25/30	Silikatiniai klijai+ pucolaninė medžiaga	Granito skalda 8/12
3.2	GL24h	C25/30	Silikatiniai klijai+ pucolaninė medžiaga	Smėlis

Prieš betonavimą paruošiamas klijų sluoksnis.

- Epoksidiniai klijai: dvikomponenčiai klijai kruopščiai išmaišomi ir nedelsiant tepami ant medienos paviršiaus. Ant šviežių klijų užbarstomas smėlis arba granito skalda.
- Silikatiniai klijai: tepami tiesiogiai ant paviršiaus, užbarstant užpildą.
- Modifikuoti silikatiniai klijai: maišomi su pucolaninėmis medžiagomis santykiu 1:1,25 (pucolanas : klijai).



18 pav. Bandiniai su smėliu ir granito skalda.

Betonavimo procesas:

Aplink paruoštas medines sijas suformuojami klojiniai, naudojant drėgmei atsparią deformacinę juostą, kuri užtikrino sandarumą. Betono sluoksnio storis – 50 mm. Užpylus betoną, bandiniai tankinami ant vibracinio stalo, siekiant pašalinti oro tarpus. Kartu su bandiniais suformuoti trys

kontroliniai betono kubeliai (100x100x100), skirti nustatyti realų betono gniuždomąjį stiprį po 28 parų kietėjimo.



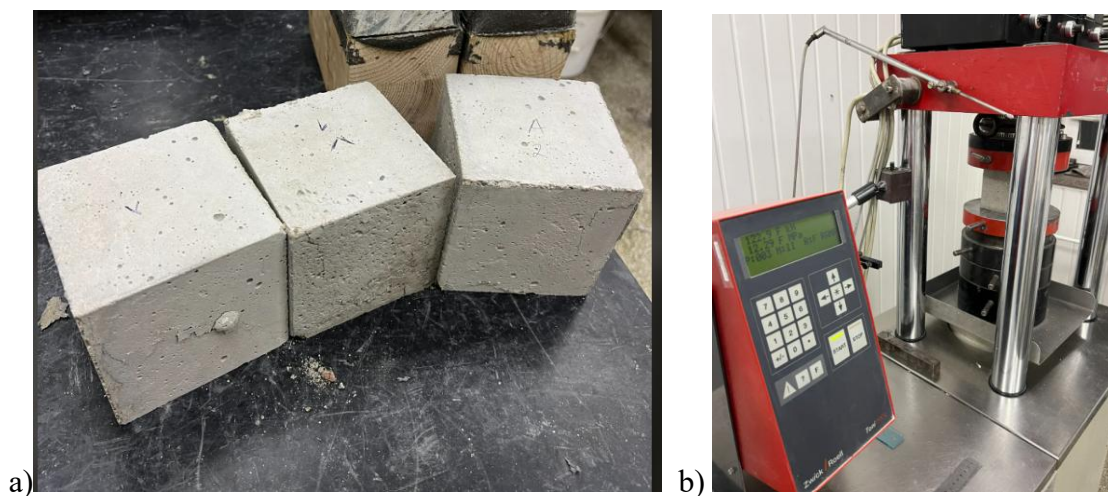
19 pav. Suformuoti bandiniai

2.4.3. Bandymai

Gniuždomo bandymai

Betono gniuždomasis stipris nustatomas vadovaujantis LST EN 12390-3 standartu. Bandymams naudojami trys 100x100x100 dydžio betono kubeliai, kurie buvo formuojami kartu su pagrindiniais bandiniais ir kietinami 28 paras standartinėmis sąlygomis.

Prieš bandymą bandiniai pasveriami ir išmatuojami jų tikslūs matmenys (kiekviena kraštinė matuojama trijose vietose, imamas vidurkis). Bandinys gniuždomo presu apkraunamas tolygiai didėjančia jėga iki suirimo (žr. 20 pav.).



20 pav. a) gniuždomi kubeliai ir b) bandymų atlikimas

Betono gniuždomasis stipris f_c (MPa) paskaičiuojamas pagal formulę:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (2.4.3.1)$$

čia:

- F – didžiausioji ardomojo apkrova, N
- A_c – bandinio sjerisėjūvio plotas, kurį veikia gniuždymo jėga (mm^2).

Gniuždomasis stipris pateikiamas 0,1 MPa tikslumu.

Remiantis **LST 197:2012** rekomendacijomis, betono gniuždomasis stipris apibrėžiamas naudojant standartinius 150x150x150 kubelius. Atliekant bandymus su nestandartinių matmenų bandiniais, gautą gniuždomąjį stiprį būtina perskaičiuoti į standartinį. Skaičiavimams taikomi šie formos koeficientai (β):

- Bandant 100 mm kubus taikomas stiprio perskaičiavimo koeficientas priklausantis nuo užpildo dydžio,
 - kai $D_{\max} \geq 8\text{mm}$, tai $\beta = 0,95$
 - kai $D_{\max} \leq 8\text{mm}$ -, tai $\beta = 1,00$
- Bandant 200 mm kubus, perskaičiavimo koeficientas taikomas $\beta = 1,05$
- Bandant 100x100 cilindrus yra taikomas gniuždomojo stiprio koeficientas $\beta = 0,93$
- Bandant 100x200 cilindrus yra taikomas gniuždomojo stiprio koeficientas $\beta = 1,16$

Perskaičiuotas (standartinis) stipris $f_{c,cube,150}$ nustatomas pagal formulę:

$$f_{c,cube,150} = \beta \cdot f_{c,cube,100} \quad (2.4.3.2)$$

čia:

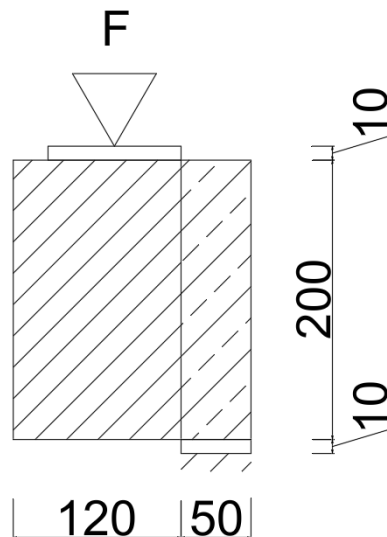
- β – dydžio įtakos koeficientas (šiuo atveju 0,95);
- $f_{c,cube,100}$ – bandymo metu gautas 100 mm bandinio stipris;

2.4.3.1. Šlyties bandymai

Kontakto zonos laikomajai galiai nustatyti naudojamas praspaudimo (angl. *push-out*) bandymas. Kompozitinė sija įtvirtinama į specialią formą, kuri užtikrina vertikalų bandinio stabilumą ir neleidžia jam krypti į šoną. Sijos įtvirtinamos nevaržant jų skersinių deformacijų, kad būtų išvengta papildomų gniuždymo jėgų iš šonų.

Po betonine sijos dalimi, ties pat jungtimi, padedamas metalinis strypelis (atrama), per kurį perduodama apkrova. Strypelio kontaktinis plotas – 800 mm^2 . Metalinė plokštelė taip pat dedama ties kontakto zona, siekiant tolygiai paskirstyti įtempius. Bandinys stende įstatomas taip, kad būtų pakeltas 10 mm nuo pagrindo (žr. 21 pav.), leidžiant medinei daliai laisvai slinkti žemyn apkrovos metu.

Dėl techninių įrangos galimybių, bandymas atliktas taikant modifikuotą LST EN 26891 metodiką. Bandymo metu fiksuojamos deformacijos (slydimas tarp betono ir medienos) bei maksimali jėga, kurią atlaiko kontakto zona iki suirimo. Bandymai atlikti po 28 parų betono kietėjimo.



21 pav. Apkrovimo schema ir atliekamas bandymas.

Remiantis LST EN 26891 standartais turi būti:

Apkrovos taikymas:

- Apkrova turi būti uždedama iki $0,4 F_{est}$ ir laikoma 30 s.
- Tuomet apkrova sumažinama iki $0,1 F_{est}$ ir laikoma 30 s. Po to apkrova didinama tol, kol pasiekama galutinė apkrova arba 15 mm poslinkis.³⁾
- Esant mažiau nei $0,7 F_{est}$, turi būti naudojamas pastovus apkrovos arba poslinkio didinimo greitis, atitinkantis $0,2 F_{est}$ per minutę $\pm 25\%$.
- Virš $0,7 F_{est}$ turi būti naudojamas pastovus poslinkio didinimo greitis, sureguliuotas taip, kad galutinė apkrova arba 15 mm poslinkis būtų pasiektas per 3–5 min papildomo bandymo laiko (bendras bandymo laikas apie 10–15 min).
- Bandymas gali būti nutrauktas, kai pasiekama galutinė apkrova arba kai poslinkis siekia 15 mm. Esant specialiems bandymams, išankstinio apkrovimo ciklas iki $0,4 F_{est}$ gali būti praleistas, atitinkamai pakoreguojant bendrą bandymo trukmę.

Poslinkio matavimai

Poslinkio reikšmės $v_{01}, v_{04}, v_{14}, v_{11}, v_{21}, v_{24}, v_{26}$, ir v_{28} , turi būti užregistruotos kiekvienam bandiniui. Taip pat turi būti užregistruotas poslinkis esant maksimaliai apkrovai F_{max} . Tais atvejais, kai nėra galimybės gauti tolydžios apkrovos–poslinkio diagramos, matavimai turi būti atliekami kas $0,1 \cdot F_{est}$ apkrovos intervalą.

2.4.4. Kontakto zonos apžiūra

Siekiant nustatyti bandinių suirimo priežastis, po bandymų atlikta kontakto zonos analizė. Tyrimas vykdytas dviem etapais:

1. Vizualinis vertinimas: plika akimi įvertinamas kompozito suirimo pobūdis. Nustatoma, ar klijai atsiskyrė nuo paviršiaus (adhezinis atsiskyrimas), ar suiro medžiagos sluoksnis (kohezinis suirimas).

2. Optinė analizė: naudojant optinį mikroskopą, apžiūrima klijų kontakto zona su mediniu paviršiumi, vertinant klijų pasiskirstymą.

2.4.5. Skaičiavimai pagal LST EN 26891

Remiantis bandymų rezultatais, apskaičiuojami vidutiniai šlyties (tangentiniai) įtempiai jungtyje pagal formulę:

$$\tau = \frac{F_{max}}{A_{\omega}} \quad (2.4.5.1)$$

čia:

- F_{max} – maksimali bandymo metu pasiekta apkrova (N);
- A_{ω} – kontakto (šlyties) plotas (mm^2).

Poslinkio modulis (K_s). Šis parametras naudojamas tinkamumo ribinio būvio (TRB) skaičiavimams. Jungties standumas eksploatacinėmis sąlygomis apskaičiuojamas pagal LST EN 26891 standartą, naudojant apkrovos ir poslinkio kreivės atkarpą tarp 10 % ir 40 % maksimalios jėgos:

$$K_s = \frac{0,4F_{max} - 0,1F_{max}}{\delta_{0,4} - \delta_{0,1}} \quad (2.4.5.2)$$

čia:

- F_{max} – maksimali jėga,
- $\delta_{0,4}$ – poslinkis prie 40% jėgos (mm)
- $\delta_{0,1}$ – poslinkis prie 10% jėgos (mm)

Poslinkio modulis (K_u). Šis parametras naudojamas saugos ribinio būvio (SRB) skaičiavimams (konstrukcijos laikomajai galiai nustatyti). Pagal standartą LST EN 26891 jis apskaičiuojamas:

$$K_u = \frac{2}{3} \cdot K_s \quad (2.4.5.3)$$

Jungties standumas (**k**), tenkantis ploto vienetui, apskaičiuojamas:

$$k = \frac{K_s}{A_w} \quad (2.4.5.4)$$

čia:

- K_s – poslinkio modulis (kN/mm)
- A_w – klijų plotas (mm^2)

2.4.6. Skaičiavimai pagal Eurokodą 5, B priedą, gama metodas

Kai jungtis tarp medienos ir betono nėra visiškai standi (egzistuoja praslydimas), skaičiavimams taikomas Eurokodo 5 (LST EN 1995-1-1) B priede pateiktas „gama“ (γ) metodas. Šis metodas leidžia įvertinti kompozitinio skerspjūvio efektyvųjį standumą, atsižvelgiant į jungties paslankumą.

Sijos efektyvus lenkiamasis standumas $(EI)_{eff}$ skaičiuojamas pagal formulę:

$$(EI)_{eff} = \sum_{i=1,2,c} \gamma_i E_i I_i + \sum_{i=1,2,c} \gamma_i E_i A_i a_i^2 \quad (2.4.6.1)$$

čia:

- γ_i – i -ojo sluoksnio jungties efektyvumo koeficientas;
- I_i – i -ojo sluoksnio inercijos momentas,
- E_i – i -ojo sluoksnio tamprumo modulis,
- I_i – i -ojo sluoksnio inercijos momentas,
- A_i – i -ojo sluoksnio skerspjūvio plotas,
- a_i – atstumas tarp i -ojo sluoksnio ir bendro sunkio centro.

Jungties efektyvumo koeficientas (γ) nustatymas.

Koeficientas γ įvertina jungties standumą. Betonui (kaip gniuždomam elementui) dažniausiai priimama $\gamma = 1$. Mediniam elementui (kai jungtis lanksti) koeficientas apskaičiuojamas:

$$\gamma_i = \left[1 + \frac{\pi^2 E_i A_i}{k L b} \right]^{-1} \quad (2.4.6.2)$$

čia:

- E_i – i -ojo sluoksnio tamprumo modulis,
- A_i – i -ojo sluoksnio skerspjūvio plotas
- k – jungties standumas SRB arba TRB kombinacijoms
- L – konstrukcijos ilgis
- b – skerspjūvio plotis

Neutraliosios ašies padėtis

Kompozitinės sijos neutralioji ašis (vieta, kurioje įtempiai lygūs nuliui) nustatoma įvertinant γ koeficientus:

$$a_m = \frac{\gamma_c E_c A_c \cdot d}{\gamma_c E_c A_c + E_t A_t} \quad (2.4.6.3)$$

čia:

- γ_c – Betono jungties efektyvumo koeficientas;
- E_c – Betono tamprumo modulis;
- A_c – Betono skerspjūvio plotas;
- E_t – Medienos tamprumo modulis;
- A_t – Medienos skerspjūvio plotas;
- d – atstumas tarp betono ir medienos sluoksnių centrų.

Įlinkių skaičiavimai.

Skaičiuojant įlinkius, naudojamas efektyvusis standumas $(EI)_{eff}$, kuris jau įvertina jungties paslankumą (pagal γ metodą). Didžiausias sijos įlinkis tarpatramio viduryje apskaičiuojamas:

$$w = \frac{5qL^4}{384(EI)_{eff}} \quad (2.4.6.4)$$

čia:

- q – tolygiai paskirstyta apkrova;
- L – sijos tarpatramis;
- $(EI)_{eff}$ – efektyvus sijos lenkiamasis standumas.

Tangentinių įtempių skaičiavimas pagal gama metodą.

Šlyties (tangentiniai) įtempiai jungtyje skaičiuojami įvertinant „gama“ metodo koeficientus. Jei jungtis būtų visiškai standi, $\gamma = 1$. Esant lanksčiai jungčiai, taikoma formulė:

$$\tau = \frac{V_{SRB} \gamma_i E_i A_i a_i}{\frac{TRB}{EI} \cdot b} \quad (2.4.6.5)$$

čia:

- $V_{SRB/TRB}$ – skersinė (kirpimo) jėga (apskaičiuota pagal TRB arba SRB apkrovų derinius);
- γ_i – i -ojo sluoksnio jungties efektyvumo koeficientas;
- E_i – i -ojo sluoksnio tamprumo modulis;
- A_i – i -ojo sluoksnio skerspjūvio plotas;
- EI – efektyvusis lenkimo standumas;
- b – kontakto zonos plotis.

3. Medžio–betono lenkiamųjų elementų skaičiavimai

Šiame skyriuje pateikiami ir detaliai analizuojami tyrimo rezultatai. Darbe lyginami teorinių skaičiavimų, skaitmeninio modeliavimo bei eksperimentinių bandymų duomenys.

Pirmiausia pristatomi analitiniai skaičiavimai ir skaitmeninio modeliavimo naudojant „Robot Structural Analysis“ rezultatai, gauti taikant standžios jungties prielaidą. Toliau aptariama eksperimentinė dalis, kurioje tirta šlytis tarp medienos ir betono. Remiantis gautais rezultatais, nustatytas realus jungties standumas ir įvertintas suirimo pobūdis.

Galiausiai, įvertinus eksperimentinius duomenis, atlikti skaičiavimai pagal Eurokodo 5 „Gama“ metodą. Tai leido nustatyti tikrąją jungties paslankumo įtaką medienos ir betono kompozitinės perdangos įlinkiams bei įtempiams.

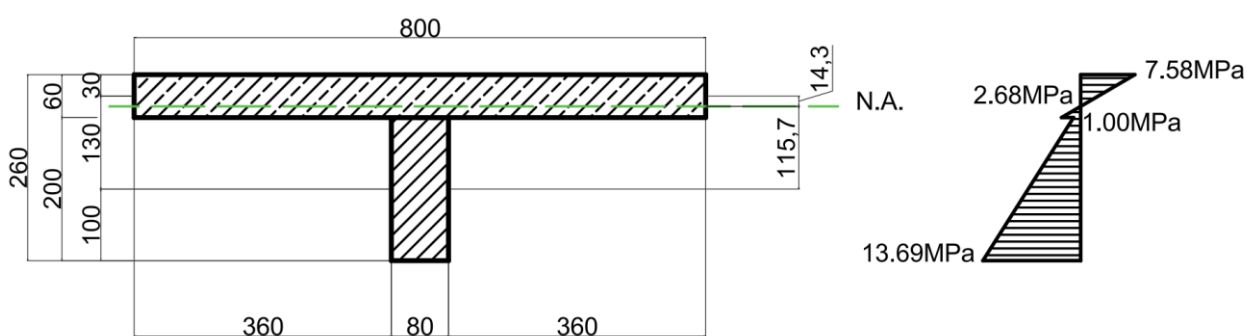
3.1. Teoriniai skaičiavimai

3.1.1. Normalinių įtempių skaičiavimai

Remiantis metodologijoje aprašyta H. Šteinerio teorema, buvo nustatyti medžio–betono lenkiamųjų elementų normaliniai įtempiai, kurie pateikiami 9 lentelėje. Skaičiavimais matoma, kad kompozitinis skerspjūvis dirba efektyviai. Įtempių pasiskirstymas tarp skirtingų medžiagų sluoksnių yra netolygus dėl skirtingų medžiagų tamprumo modulių (22 pav.).

9 lentelė. Teorinių skaičiavimų normaliniai įtempiai.

Nr.	Skaičiuojama zona	Normaliniai įtempiai, MPa
1	Betono viršus	7,58
2	Betonas kontakto zonoje	2,68
3	Medienos kontakto zonoje	1,00
4	Medienos apačioje	13,69



22 pav. Skerspjūvis ir normalinių įtempių diagrama

Atlikus analizę nustatyta, kad viršutinė lenkiamo kompozito dalis yra gniuždoma 7,58 MPa įtempiais. Viršutinis sluoksnis parinktas iš betono, todėl jis turi atitikti gniuždymo betono C25/30 projektinį stiprį. Apatinė sijos dalis (mediena GL24h) yra tempiama 13,69 MPa įtempiais.

Skaičiavimai rodo, kad neutralioji ašis (kurioje įtempiai lygūs nuliui) yra betono sluoksnyje. Tai lemia, kad betono skerspjūvis yra veikiamas dvejopai: viršutinė dalis gniuždoma, o apatinė dalis tempiama (2,68 MPa). Taip pat stebimas įtempių šuolis kontaktinėje zonoje dėl skirtingų medžiagų

tamprumo modulių. Tai reiškia, kad visa medinė sija yra tempiama, o betono sluoksnis patiria tiek gniuždymą, tiek tempimą.

Tokia neutraliosios ašies padėtis yra palanki medienai, nes išnaudojamas jos didelis stipris tempiant išilgai pluošto. Nors apatinė betono dalis skaičiuojant gaunama tempiama, šiame etape priimta prielaida, kad kompozitas veikia elastingoje stadijoje (ir betono tempimo stipris dar nėra viršytas arba plyšiai ignoruojami). Didžioji gniuždymo jėga tenka viršutiniam betono sluoksniui, kuris dėl savo didelio standumo efektyviai perima apkrovas.

Apskaičiuojamos projektinės maksimalios reikšmės betonui f_{cd} ir medienai $f_{m,z,d}$. Betono sluoksnio išnaudojimas $\frac{\sigma_1}{f_{cd}}$ ir medienos sluoksnio $\frac{\sigma_4}{f_{m,z,d}}$ pateikiama 10 lentelėje.

10 lentelė. Projektinės reikšmės ir išnaudojimas

f_{cd}	$f_{m,z,d}$	$\frac{\sigma_1}{f_{cd}}$	$\frac{\sigma_4}{f_{m,z,d}}$
12,5 MPa	16,89 MPa	0,61	0,81

Pagal gautus rezultatus matoma, kad medžio-betono kompozitinė sija tenkina projektinio stiprio sąlygas. Gniuždomas betonas išnaudojamas 61 %, tai parodo, kad betono sluoksnis yra parinktas tinkamai ir turi rezervą papildomoms apkrovoms.

Vertinant medienos sluoksnį, didžiausių įtempių zonoje (sijos apačioje) matomas 81 % sijos išnaudojimas. Tai patvirtina, kad sija suprojektuota teisingai.

3.1.2. Įlinkio analizė ir teorijos palyginimas.

Vienas iš svarbiausių lenkiamųjų elementų rodiklių pagal tinkamumo ribinį būvį – sijos įlinkis. Šiame darbe įlinkiai skaičiuojami taikant Timošenkos sijos teoriją, kuri, skirtingai nuo klasikinės Bernulio teorijos, įvertina ir kirpimo (šlyties) deformacijas. Svarbu įvertinti šlyties deformacijas, ypač kompozitinėse konstrukcijose, nes tai gali sudaryti reikšmingą bendrojo įlinkio dalį.

Pagal metodologijoje aprašytas formules apskaičiuotos šios reikšmės:

- Efektyvus kompozitinio skerspjuvio lenkimo standumas $(EI)_{eff}$,
- Efektyvus šlyties standumas $(GA)_{eff}$,
- Įlinkis dėl lenkimo deformacijų w_M ,
- Įlinkis dėl šlyties deformacijų w_V
- Bendras įlinkis w .

Gautos reikšmės pateikiamos 11 lentelėje.

11 lentelė. Timošenko sijos teorijos reikšmių lentelė

$(EI)_{eff}(Nmm^2)$	$(GA)_{eff}(Nmm^2)$	w_M (mm)	w_V (mm)	w (mm)
$3,8271 \cdot 10^{12}$	$9,72 \cdot 10^6$	6,445	1,269	7,714

Analizuojant gautus duomenis matyti, kad sija įlinks 7,714 mm. Išskaidžius įlinkį į dedamąsias:

- Įlinkis dėl lenkimo deformacijų sudaro 6,445 mm (apie 83,5 % bendro įlinkio);
- Įlinkis dėl šlyties deformacijų sudaro 1,269 mm (apie 16,5 % bendrojo įlinkio).

Tinkamumo ribinio būvio patikra

Pagal STR 2.05.04:2003 „Poveikiai ir apkrovos“, 4 m tarpatramio sijoms ribinis leistinas įlinkis w_{rib} yra $L/200$.

$$w_{rib} = \frac{L}{200} = \frac{4000}{200} = 20 \text{ mm} \quad (3.1.2.1)$$

Palyginamas apskaičiuotas įlinkis su ribine verte:

$$w = 7,714 \text{ mm} \leq 20 \text{ mm} \quad (3.1.2.2)$$

Sąlyga tenkinama. Kompozitinė sija atitinka tinkamumo ribinio būvio reikalavimus. Sijos išnaudojimas siekia 38,5 % leistino įlinkio.

3.1.3. Tangentinių įtempių skaičiavimas jungtyje.

Atliekant analizę pirmiausiai buvo apskaičiuojamos skersinių jėgų reikšmės. Didžiausios skersinės jėgos dviatraminėje perdanga veikia ties jos atrėmimu. Apskaičiuotos skersinės jėgos:

- Tinkamumo ribinio būvio (V_{TRB});
- Saugos ribinių būvių (V_{SRB}).

Apskaičiavus skersines jėgas skaičiuojami tangentiniai įtempiai pagal ribinius būvius. Jų reikšmės reikalingus nustatyti įtempiams jungtyje kaip yra apkraunamos šita jėga.

- Tinkamumo ribinių būvių tangentiniai įtempiai τ_{TRB} ;
- Saugos ribinių būvių tangentiniai įtempiai τ_{SRB} .

Apskaičiuoti kokia jėga turi atlaikyti mūsų tolimesnėse bandymuose naudojama sija nuo gautų tangentinių įtempių

- Tinkamumo ribinių būvių jėga F_{TRB} ;
- Saugos ribinių būvių jėga F_{SRB} .

Visų gauti rezultatai pateikiami 12 lentelėje.

12 lentelė. Tangentinių įtempių skaičiavimo reikšmės veikiant TRB ir SRB

V_{TRB}	V_{SRB}	τ_{TRB}	τ_{SRB}	F_{TRB}	F_{SRB}
14,8 kN	15,56 kN	1,03 MPa	1,47 MPa	16,48 kN	23,52 kN

Atlikus skaičiavimus nustatyta, kad didžiausia skersinė jėga ties sijos atrama siekia 14,8 kN pagal tinkamumo ribinį būvį ir 15,56 kN pagal saugos ribinį būvį. Šios jėgos lemia tangentinių įtempių atsiradimą medžio ir betono kompozito jungtyje: TRB atveju įtempiai siekia 1,03 MPa, o SRB atveju padidėja iki 1,47 MPa.

Remiantis gautais duomenimis, apskaičiuotos jėgos, kurios eksperimento metu sukeltų analogiškas įrašas. Norint imituoti TRB apkrovą, bandymo metu sija turi būti veikiamą 16,48 kN jėga, o siekiant pasiekti SRB, prognozuojama reikalinga jėga yra 23,52 kN.

3.1.4. Teorinių skaičiavimų apibendrinimas

1. Vertinant pagal Timošenkos sijos teoriją nustatyta, kad 4 m ilgio kompozitinės perdangos maksimalus įlinkis, veikiant TRB apkrovoms, siekia 7,71 mm. Tai sudaro 38,5 % leistinos ribos, todėl konstrukcijos standumo sąlyga tenkinama su didele atsarga.
2. Nustatyta, kad parinktas skerspjūvis saugiai atlaiko projektines apkrovas. Medinio sluoksnio išnaudojimas siekia 81% ($\sigma_4 = 13,69 \text{ MPa} < f_{m,z,d} =$), o betono sluoksnis 61% ($\sigma_1 = 7,58 \text{ MPa} < f_{cd}$). Stiprumo sąlygos tenkinamos
3. Remiantis tangentinių įtempių skaičiavimais, nustatytos kontrolinės apkrovos eksperimentiniams bandymams. Siekiant imituoti tinkamumo ribinį būvį (TRB), bandinį reikės veikti 16,48 kN jėga, o norint pasiekti saugos ribinį būvį (SRB) ir prognozuojamą suirimą, reikalinga jėga yra 23,52 kN.

3.2. Skaičiavimai su programa Robot Structural Analysis Professional

Siekiant verifikuoti analitinius skaičiavimus, buvo atliktas skaitmeninis modeliavimas naudojant „Robot Structural Analysis Professional“ programinę įrangą. Analizė atlikta darant prielaidą, kad jungtis tarp medienos ir betono sluoksnių yra absoliučiai standi.

3.2.1. Normaliniai įtempiai

Skaitmeninės analizės metu gautas normalinių įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje visiškai atitinka analitinius rezultatus. Veikiant SRB apkrovoms:

- Viršutinis betono sluoksnis gniuždomas, maksimalūs įtempiai siekia 7,58 MPa.
- Apatinis medienos sluoksnis tempiamas, maksimalūs įtempiai siekia 13,69 MPa.

Rezultatų palyginimas pateikiamas 13 lentelėje. Matoma, kad programinio modeliavimo ir rankinių skaičiavimų rezultatai sutampa. Skaitinės reikšmės ir vaizdai pateikiami prieduose.

13 lentelė. Normalinių įtempių suvestinė taškuose.

Nr.	Skaičiuojama zona	Normaliniai įtempiai, MPa (rankiniai skaičiavimai)	Normaliniai įtempiai, MPa (skaičiavimai programa)
1	Betono viršus	7,58	7,58
2	Betonas kontakto zonoje	2,68	2,68
3	Medienos kontakto zonoje	1,00	1,00
4	Medienos apačioje	13,69	13,69

3.2.2. Įlinkiai

Vertinant perdangos tinkamumo ribinį būvį (TRB), programinė įranga apskaičiavo maksimalų sijos įlinkį, kuris siekia 6,44 mm.

Lyginant su analitinėje dalyje gautu rezultatu (7,71 mm), atsirado skirtumas. Taip yra todėl, kad rankiniuose skaičiavimuose taikyta Timošenkos sijos teorija, įvertinanti papildomas deformacijas dėl šlyties. Programa naudoja Bernulio sijos modelį, todėl šlyties deformacijų įtaka nėra vertinama (šiuo atveju vertinamas tik lenkiamasis standumas). Visgi, abu rezultatai tenkina leistiną ribinį įlinkį.

3.2.3. Tangentiniai įtempiai

Veikiant SRB apkrovų deriniui, buvo apskaičiuoti tangentiniai įtempiai. Gauti rezultatai atitinka prieš tai teoriškai skaičiuotas reikšmes. Didžiausi įtempiai fiksuojami sijos galuose. Vaizdiniai rezultatai pateikiami prieduose, o gautos reikšmės lyginamos 14 lentelėje.

14 lentelė. Teorinių ir skaitmeninio modelio tangentinių įtempių suvestinė.

Teoriniai skaičiavimai		Skaitmeninio modelio	
τ_{TRB}	τ_{SRB}	τ_{TRB}	τ_{SRB}
1,03 MPa	1,47 MPa	1,03 MPa	1,47 MPa

3.2.4. Sumodeliuotą sijos patikra

Atlikus sumodeliuotos sijos patikrą (priskiriant ją prie medinių konstrukcijų), gauta, kad dėl didžiausių įtempių ji yra išnaudojama 82 %. Teoriniais skaičiavimais gauta reikšmė buvo 1 % mažesnė – 81 %. Skirtumas atsirado todėl, kad skaičiuojant teoriškai buvo vertinama tik medinė sijos dalis, o programinė įranga vertino visą sijos aukštį.

3.2.5. Programinės įrangos rezultatų apibendrinimas

1. Skaičiuojant rankiniu būdu ir naudojant „Robot Structural Analysis Professional“ programinę įrangą, gautos identiškos normalinių įtempių reikšmės. Galima teigti, kad skaičiavimai atlikti teisingai.
2. Įlinkių skirtumas tarp teorinių ir skaitmeninių skaičiavimų atsirado dėl šlyties deformacijų įvertinimo Timošenkos teorijoje (rankiniu būdu). Atmetus šlyties dedamąją, rezultatai būtų vienodi.
3. Tangentinių įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje ir maksimalios reikšmės ties atramomis taip pat sutapo. Apibendrinant galima teigti, kad teorinis modelis yra tikslus ir patvirtintas skaitmenine analize.

3.3. Bandiniai

3.3.1. Gniuždymo bandymai

Siekinat užtikrinti bandinams naudojamas faktines medžiagas atlikti gniuždymo bandymai. Faktiniai bandymo matmenų vidurkiai išmatuojant gniuždymo plotą, veikiančias jėgas ir gautus įtempius suvesti buvo į 15 lentelę.

15 lentelė. Gniuždymo bandinių rezultatai.

Nr.	Faktiniai skerspjūvio matmenys (mm)	Tikslus gniuždomas plotas A_c (mm ²)	Suirimo jėga F_{max} (kN)	Gniuždymo stipris (MPa)
K-1	100x101	10100	320.9	31.8
K-2	100x101	10100	319.1	31.6
K-3	101x101	10201	321.1	31.5

Bandymams buvo naudojami 100×100×100 mm dydžio kubeliai. Pagal metodinius nurodymus, gautos reikšmės turi būti perskačiuotos į standartinio (150×150×150 mm) kubelio stiprį.

Standartuose nurodoma, kad tokiu atveju taikomas koeficientas 0,95. Perskaičiuojamas gautas vidutinis stipris (31,6 MPa):

$$f_{c,cube,150} = 0,95 \cdot 31,6 = 30,0 \text{ MPa} \quad (3.3.1.1)$$

Gauti rezultatai patvirtina, kad parinkta betono sudėtis yra tinkama. Faktinis betono stipris atitinka teoriniuose ir skaitmeniniuose skaičiavimuose projektuotą C25/30 betono klasę.

3.3.2. Šlyties bandymai

Atlikus eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad didžiausią stiprį pasiekė bandiniai, kurių jungčiai naudoti epoksidiniai klijai su granito skaldos arba smėlio užpildu. Gauti rezultatai patvirtina literatūros šaltiniuose skelbiamas išvadas, jog granito skalda užtikrina geresnį sukibimą nei smėlio užpildas. Daugumos šios serijos bandinių suirimas įvyko ne klijų siūlėje, o pačiame betone, kas rodo itin stiprų ryšį tarp sluoksnių.

Silikatiniais klijais padengtas medienos paviršius pasižymėjo labai prastomis sukibimo savybėmis. Naudojant smėlio užpildą, sukibimas faktiškai neįvyko – nuėmus klojinius, bandiniai atsiskyrė dar prieš pradedant bandymą. Rezultatus pavyko užfiksuoti tik bandiniuose su granito skalda, tačiau ir šiuo atveju vienas iš bandinių buvo netinkamas (atsiskyrė).

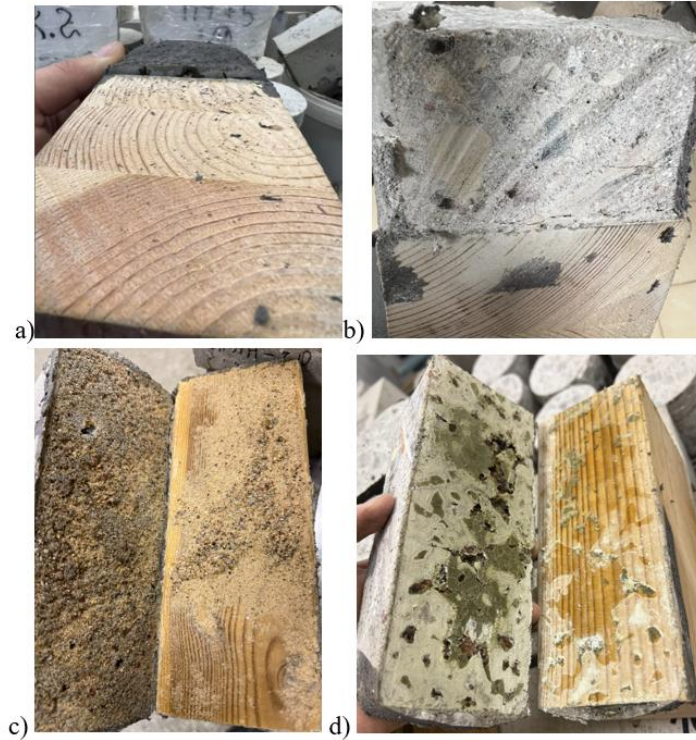
Silikatiniai klijai su pucolaniniais priedais pademonstravo geresnius rezultatus nei gryni silikatiniai klijai. Nors pasiektas stipris neprilygo epoksidinių klijų rezultatams, pavyko sėkmingai atlikti bandymus tiek su granito skalda, tiek su smėliu. Apibendrinant galima teigti, kad pucolaninių medžiagų įmaišymas pagerina klijų mechanines bei sukibimo savybes.

Užfiksuotos maksimalios bandinių įtempių reikšmės, poslinkiai ir pastebėjimai pateikiami 16 lentelėje, o įtempių pasiskirstymo palyginimas vaizduojamas grafike (žr. 24 pav.).

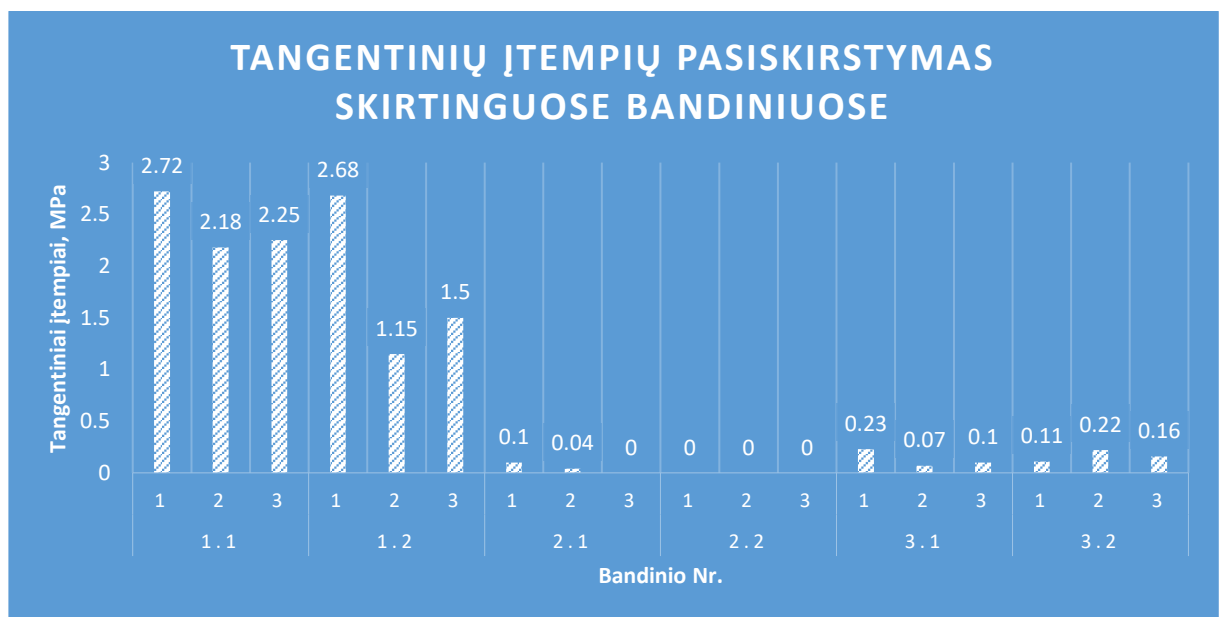
16 lentelė. Bandinių rezultatai.

Bandinio žymuo	Nr.	Plotas mm ²	Maksimali jėga, kN	Įtempiai, MPa	Poslinkiai, μm	Pastabos
1.1	1	16000	43.53	2.72	4403	Betonas prasistumė. Neatsiskyrė (1 Pav. a)
	2	16000	34.82	2.18	1284	Bandymai sustojo dėl gniuždomo betono. (1 Pav. b)
	3	16000	36.04	2.25	1730	Bandymai sustojo dėl gniuždomo betono.
1.2	1	16000	42.94	2.68	2092	Betonas prasistumė. Neatsiskyrė
	2	16000	18.33	1.15	1244	Bandymai sustojo dėl gniuždomo betono.
	3	16000	24.03	1.50	895	Bandymai sustojo dėl gniuždomo betono.
2.1	1	16000	1.57	0.10	Neužfiksuota	Pilnai atsiskyrė
	2	16000	0.66	0.04	Neužfiksuota	Pilnai atsiskyrė
	3	16000	0	0.00	Neužfiksuota	Klijai nesukibo
2.2	1	16000	0	0.00	Neužfiksuota	Klijai nesukibo (1 Pav. c)
	2	16000	0	0.00	Neužfiksuota	Klijai nesukibo
	3	16000	0	0.00	Neužfiksuota	Klijai nesukibo

3.1	1	16000	3.63	0.23	Neužfiksuota	Pilnai atsiskyrė (1 Pav. d)
	2	16000	1.1	0.07	Neužfiksuota	Pilnai atsiskyrė
	3	16000	1.64	0.10	Neužfiksuota	Pilnai atsiskyrė
3.2	1	16000	1.74	0.11	Neužfiksuota	Pilnai atsiskyrė
	2	16000	3.51	0.22	Neužfiksuota	Pilnai atsiskyrė
	3	16000	2.63	0.16	Neužfiksuota	Pilnai atsiskyrė

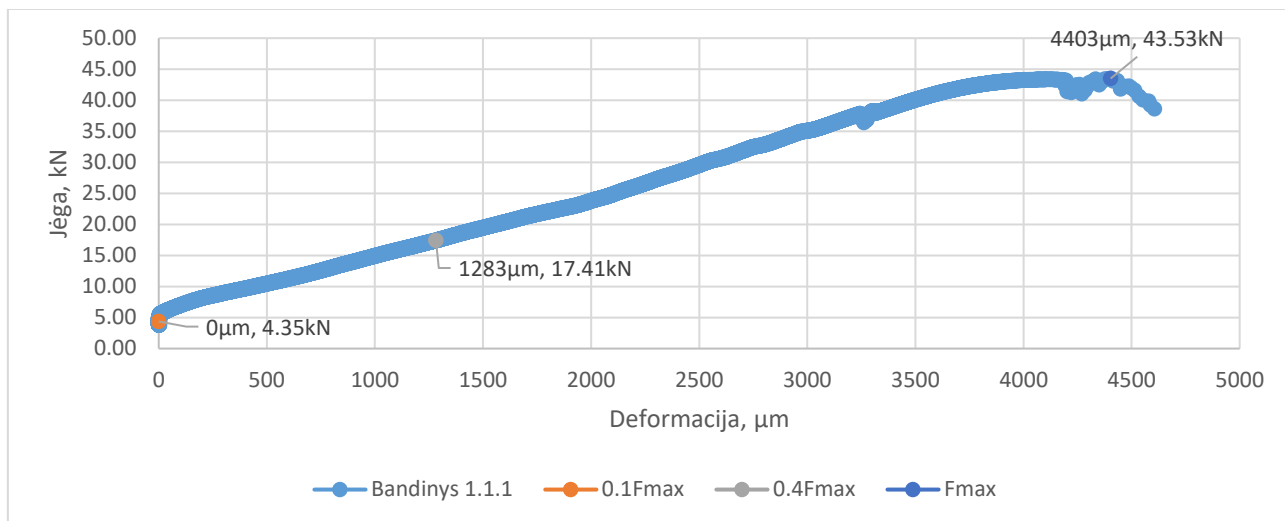


23 pav. a) betono atsiskyrimas nuo medienos b) įtrūkimai ant betoninio paviršiaus c) nesukibusio betono vaizdas d) atsiskyrimas nuo medienos bandymo metu

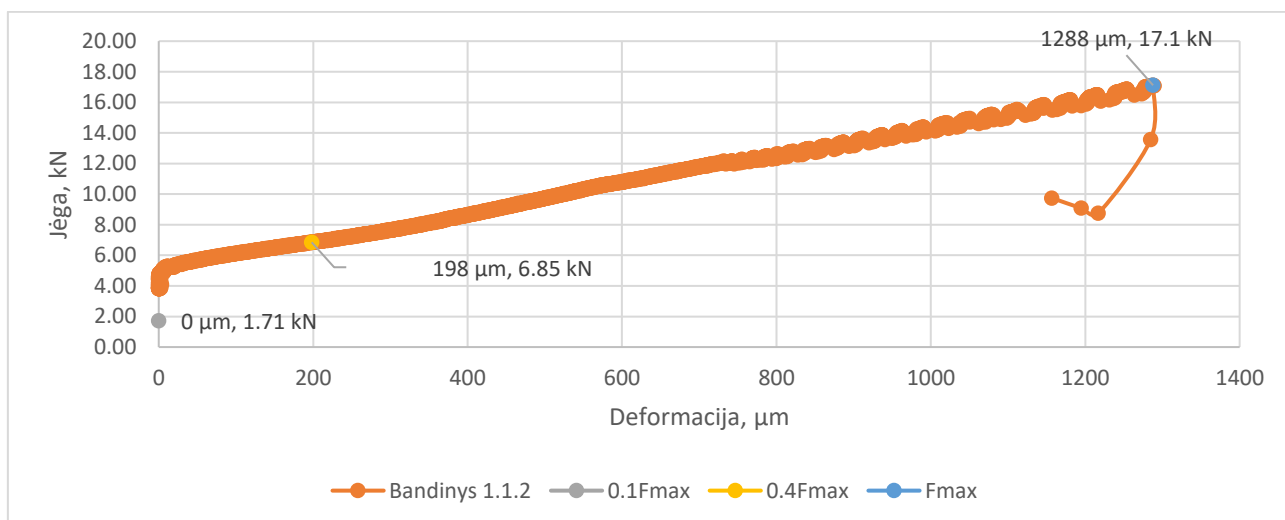


24 pav. Tangentinių įtempių pasiskirstymas skirtinguose bandiniuose

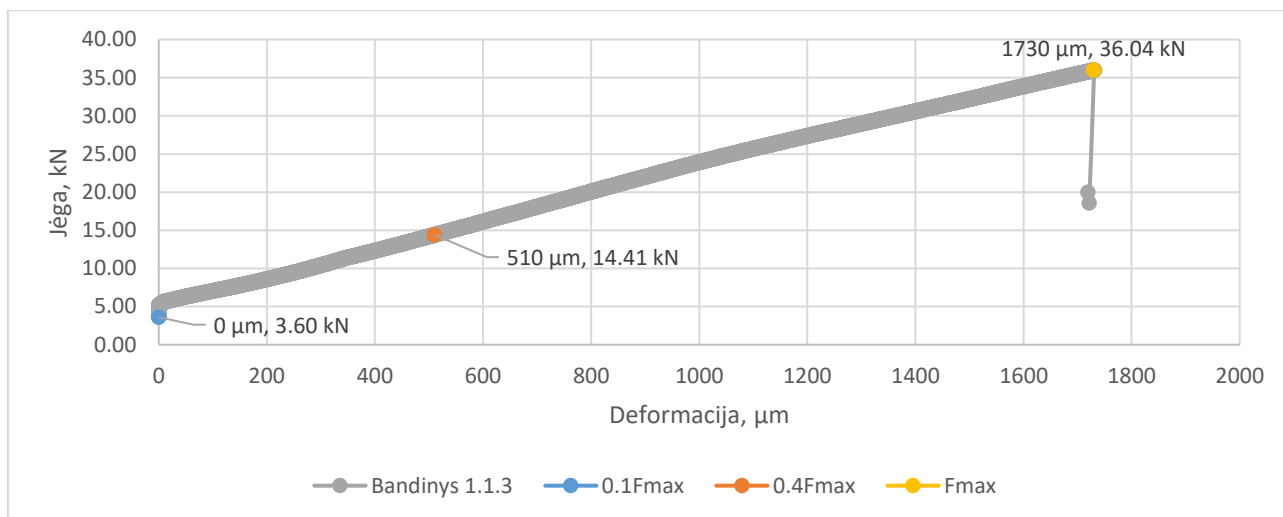
Bandymų rezultatai pateikiami grafikuose (žr. 25–30 pav.). Juose jėga išreikšta kiloniutonais (kN), o poslinkiai – mikrometrais (μm). Grafikai sudaryti tik bandiniams su epoksidiniais klėjais, nes kitų bandymų metu deformacijų užfiksuoti nepavyko. Iš pateiktų kreivių matomas adhezinis suirimas – bandymas buvo stabdomas pradėjus mažėti apkrovai ir atsiradus įtrūkiams. Pastebėta, kad bandiniai su epoksidiniais klėjais nebuvo visiškai atplėšti.



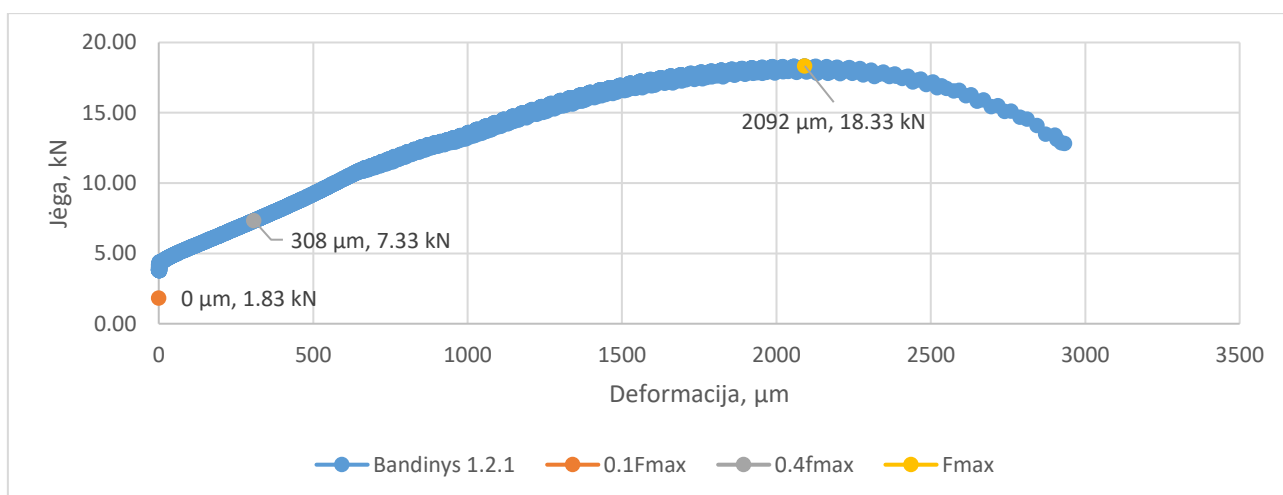
25 pav. Medžio–betono kompozito su epoksidiniais klėjais ir granito bandinys Nr. 1.



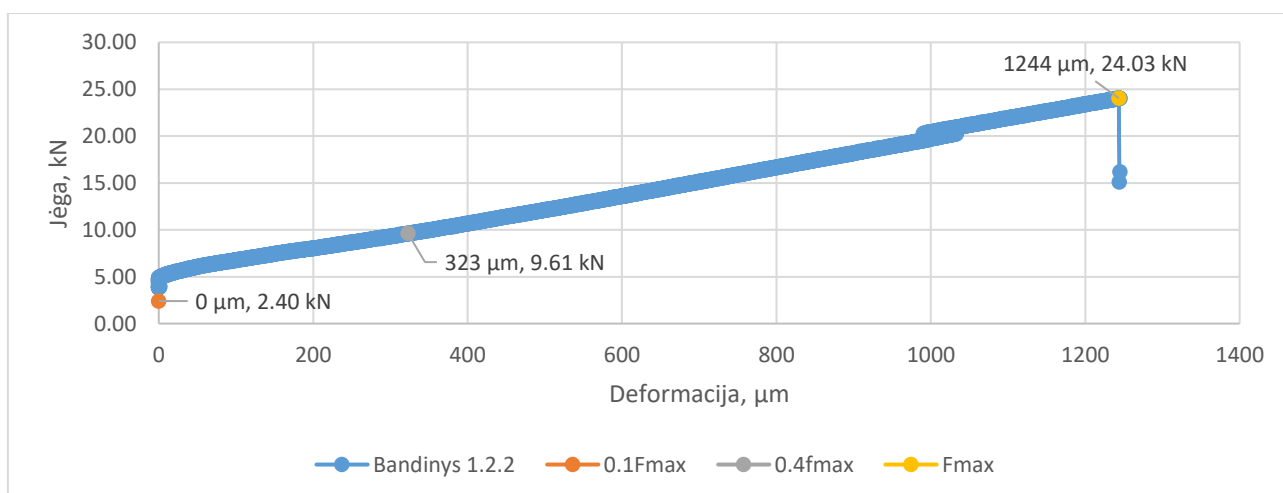
26 pav. Medžio–betono kompozito su epoksidiniais klėjais ir granito skalda bandinys Nr. 2.



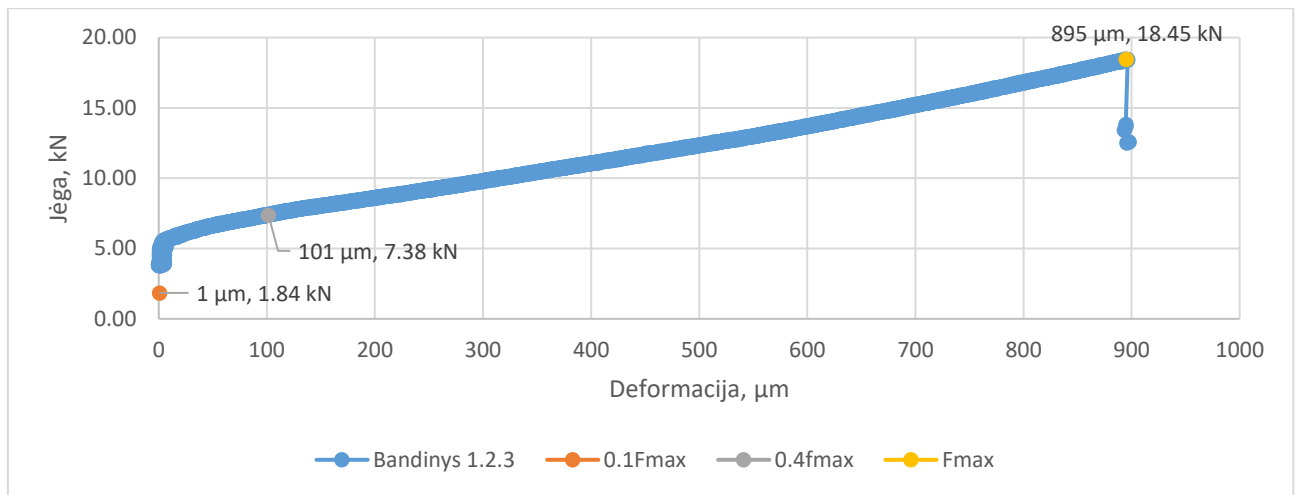
27 pav. Medžio–betono kompozito su epoksidiniais klijais ir granito skalda bandinys Nr. 3.



28 pav. Medžio–betono kompozito su epoksidiniais klijais ir smėliu bandinys Nr. 1.



29 pav. Medžio–betono kompozito su epoksidiniais klijais ir smėliu bandinys Nr. 2.



30 pav. Medžio–betono kompozito su epoksidiniais klijais ir smėliu bandinys Nr. 3.

3.3.3. Kontakto zonos apžiūra

Atlikus šlyties bandymus buvo įvertinta medžiagų kontakto zona ir jos atsiskyrimas.

Epoksidiniai klijai su granito skalda atlaikė didžiausius įtempius, bandymo metu neatsiskyrė nuo paviršiaus, kas rodo labai gerą sukibimą. Atplėšus betoną nuo medinės sijos matomas klijų likutis ant medinio paviršiaus, kas parodo, kad klijai gerai įsigėrė į medieną.

Epoksidiniai klijai su smėliu bandymo metu taip pat nebuvo atplėšti pilnai, įvyko tik praslydimas. Buvo deformuota jungtis arba betono paviršius. Atplėšus matoma, kad klijai įsigėrė į smėlį ir pasiliko betonas ant medinio paviršiaus. Mikroskopo pagalba galima pastebėti betono likučių su klijais ant medienos.

Silikatinių klijų jungtis (naudojant granito skaldą) parodė prastesnį sukibimą. Matoma, kad atplėšus bandymo metu klijai pasiliko ant medinio paviršiaus, tačiau susidarę klijų sluoksniai nėra gerai prikibę ir atšokinėja.

Naudojant silikatinčius klijus ir smėlį jungčiai suformuoti, šlyties bandymai nebuvo atlikti. Pastebima, kad nors klijai buvo gausiai tepti, jų nelieka ant medinio paviršiaus. Smėlis, kuriuo buvo padengta medinė sija, sukontaktavo su betonu ir kartu atsiskyrė nuo paviršiaus.

Pucolaninės medžiagos naudojamos su silikatiniais klijais ir granito skalda parodė gerą sukibimą tarp granito skaldos ir klijų. Tačiau bandymo metu atsiskyręs sluoksnis paliko minimaliai klijų ant medienos paviršiaus.

Panaudojus tokius pat klijus, tik su smėliu, matomas geresnis sukibimas su medienos paviršiumi. Įvyko kohezinis atsiskyrimas, nes matomas atplyšęs betono sluoksnis nuo medinio paviršiaus.

Vaizdinė informacija ir trumpas aprašymas pateikiami 17 lentelėje.

17 lentelė. Bandinio vizualinė ataskaita.

Bandinio žymuo ir pastebėjimai	Vizuali apžiūra	Mikroskopinis vaizdas
-----------------------------------	-----------------	-----------------------

1.1 Epoksidiniai
klėjai su granito
skalda. Bandymo
metu jungtis
neatsiskyrė
(nebuvo atplėšti).



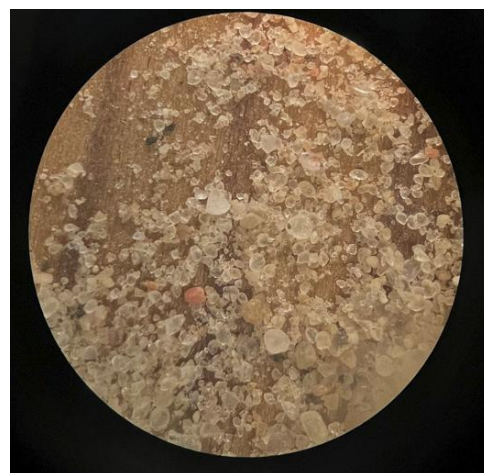
1.2 Epoksidiniai
klėjai su smėliu.
Bandymo metu
jungtis
neatsiskyrė
(nebuvo atplėšti).



2.1 Silikatiniai
klėjai su granito
skalda. Klėjai
atsiskyrė nuo
medienos
paviršiaus.



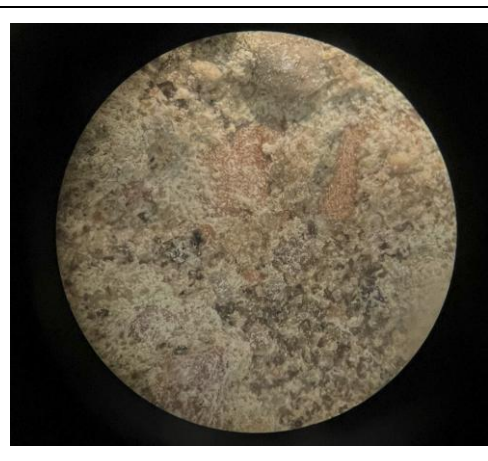
2.2 Silikatiniai
klėjai su smėliu.
Nebuvo bandyti,
nes jungtis
nesusiformavo
(nesukibo).



3.1 Silikatiniai
klėjai maišyti su
pucolaninėmis
medžiagomis.
Papildomai naudo
jama granito
skalda. Nesukibo
su mediena. Klėjai
pasiliko ant
betono sluoksnio.
Mikroskopu
matomas
medienos
kontakto su
klėjais.



3.2 Silikatiniai klėjai maišyti su pucolaninėmis medžiagomis. Papildomai naudojamas smėlis. Matomas geras sukibimas su mediena. Įvyko betono sluoksnio atplyšimas.



3.3.4. Skaičiavimai pagal LST EN 26891

Tolesniems skaičiavimams iš kiekvienos serijos buvo atrinkta po du bandinius, parodžiusius geriausius rezultatus. Atranka atlikta vertinant jėgos ir poslinkio kreivės tolygumą bei bandymo eigos stabilumą. Skaičiavimams atlikti naudojama maksimali fiksuota jėga $F_{\max}$

bei poslinkių reikšmės, pasiekus 10 % ir 40 % maksimalios apkrovos. Šie pradiniai duomenys pateikiami 18 lentelėje.

18 lentelė. Atliktų bandinių pagal

Bandinio numeris	$F_{\max}$, kN	Deformacija prie $F_{\max}$ (μm)	$0.1F_{\max}$ kN	Deformacija prie $0.1F_{\max}$ (μm)	$0.4F_{\max}$ kN	Deformacija prie $0.4F_{\max}$ (μm)
1.1.1	43.53	4403	4.35	0	17.41	1283
1.1.3	36.04	1730	3.60	1	14.41	510
1.2.2	24.03	1244	2.4	0	9.61	323
1.2.3	18.45	895	1.84	1	7.28	101

Remiantis standarto LST EN 26891 metodika, apskaičiuoti poslinkio moduliai:

K_s (tinkamumo ribiniam būviui) ir K_u (saugos ribiniam būviui). Iš gautų rezultatų nustatytas savitasis jungties standumas eksploatacinėmis sąlygomis (k_s) bei saugos ribinio būvio standumas (k_u) SRB sąlygoms skaičiuoti. ios reikšmės, apibūdinančios realų jungties paslankumą, yra būtinos taikant Eurokodo 5 „Gama“ metodą.

Gauti rezultatai apibendrinti 19 lentelėje.

19 lentelė. Apskaičiuotos jungties standumo reikšmės

Bandinio numeris	K_s (kN/mm)	K_u (kN/mm)	k_s (N/mm/mm ²)	k_u (N/mm/mm ²)
1.1.1	10,18	6,78	127,3	84,8
1.1.3	21,17	14,11	264,6	176,4
1.2.2	22,29	14,86	278,6	185,8
1.2.3	54,95	36,63	686,9	457,9

3.3.5. Skaičiavimai pagal Eurokodo 5 gama metodą

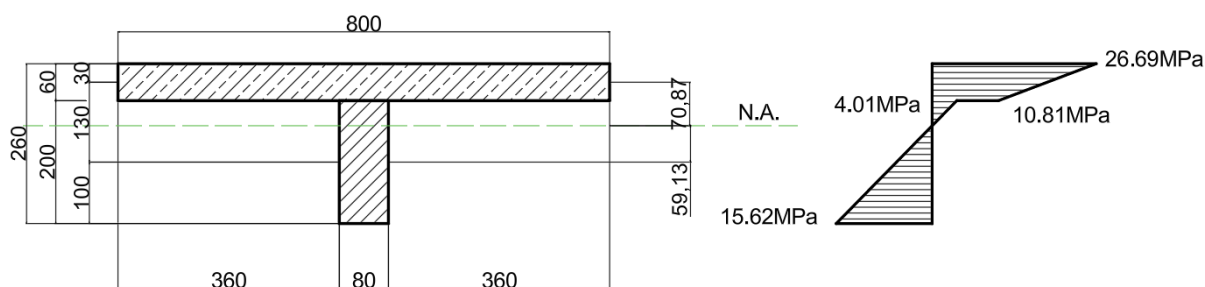
Taikant „Gama“ metodą ir naudojant eksperimentinių bandymų metu nustatytą tikrąjį jungties standumą, buvo patikslinta kompozitinės sijos elgsena. Pirmiausia apskaičiuotos jungties paslankumo koeficiento γ reikšmės tinkamumo (TRB) ir saugos (SRB) ribiniams būviams. Gautos reikšmės pateikiamos 20 lentelėje.

20 lentelė. Gama reikšmės

γ_{TRB}	γ_{SRB}
0,103	0,069

Normaliniai įtempių skaičiavimas

Atlikus skaičiavimus pagal „Gama“ metodą, nustatyta, kad dėl jungties paslankumo neutralioji ašis pasislinko į betono sluoksnio viršų. Tai lėmė įtempių persiskirstymą: visas betono sluoksnis yra gniuždomas, o medinė sija – tempiama. Pagal gautus rezultatus sudaryta įtempių pasiskirstymo diagrama (31 pav.).



31 pav. Įtempių pasiskirstymas

Analizuojant rezultatus matoma, kad betono viršutinėje zonoje gniuždymo įtempiai siekia 26,69 MPa. Ši reikšmė viršija betono projektinį stiprį, kas rodo, kad esant realiam jungties paslankumui, betono sluoksnis yra per daug apkrautas. Medienos sluoksnyje maksimalūs tempimo įtempiai siekia 15,62 MPa.

Lyginant su rankiniais (teoriniais) ir programiniais skaičiavimais (žr. 22 lentelę), matomas akivaizdus įtempių padidėjimas betone dėl dalinio jungties standumo praradimo.

21 lentelė. Normalinių įtempių pasiskirstymas.

Nr.	Skaičiuojama zona	Normaliniai įtempiai, MPa (rankiniai skaičiavimai)	Normaliniai įtempiai, MPa (skaičiavimai programa)	Normaliniai įtempiai, MPa (skaičiavimai atlikus bandymus)
1	Betono viršus	7,58	7,58	26,69
2	Betonas kontakto zonoje	2,68	2,68	10,81
3	Medienos kontakto zonoje	1,00	1,00	4,01
4	Medienos apačioje	13,69	13,69	15,62

Įlinkių skaičiavimas

Žinant tikrąjį medžio ir betono jungties standumą, nustatytas efektyvusis lenkiamasis standumas $(EI)_{eff}$. Remiantis juo, apskaičiuotas maksimalus perdangos įlinkis w

22 lentelė. Gama metodu gautas reikšmės sijos

$(EI)_{eff}(Nmm^2)$	$w(mm)$
$2,47417 \cdot 10^{12}$	9,97

Gautais rezultatais matoma, kad įlinkis padidėjo ir jo reikšmė siekia 9,97 mm. Pagal gautus rezultatus matoma, kad standžiai sujungus kompozitą jo reikšmė gaunama tik 6,44 mm, o įvertinus realią situaciją pagal „Gama“ metodą ji padidėjo 3,53 mm. Teoriniuose skaičiavimuose naudojant Timošenkos sijos teoriją dėl šlyties įlinkis padidėjo tik 1,27 mm, kas parodo, kad mūsų pradiniai teoriniai ir skaitmeniniai skaičiavimai (su standžios jungties prielaida) buvo netikslūs

23 lentelė. Įlinkių w visų skaičiavimų reikšmės

Teorinių skaičiavimų w	Skaitmeninių skaičiavimų w	Gama metodu w
7,71	6,44	9,97

Tangentiniai įtempiai

Apskaičiavus tangentinių įtempių reikšmes pagal „Gama“ metodą, stebimas jų sumažėjimas lyginant su standžios jungties modeliu. Taip yra todėl, kad dėl atsiradusio jungties paslankumo (slydimo) dalis įrąžų nėra perduodama, todėl tangentiniai įtempiai jungtyje persiskirsto.

24 lentelė. Teorinių ir skaitmeninio modelio tangentinių įtempių suvestinė.

Teoriniai skaičiavimai		Skaitmeninio modelio		Bandymo metu patikslinti rezultatai	
τ_{TRB}	τ_{SRB}	τ_{TRB}	τ_{SRB}	τ_{TRB}	τ_{SRB}
1,03 MPa	1,47 MPa	1,03 MPa	1,47 MPa	0,81 MPa	1,16 MPa

Išvados

1. Teoriniai, programos ir bandymų rezultatai skaičiuojant įlinkius pagal TRB kombinaciją skiriasi. Teoriškai, kai jungtis vertinama kaip standi, gautas 7,71 mm įlinkis, su programa – 6,44 mm, o perskaičiavus pagal bandymų rezultatus („Gama“ metodu) gaunama 9,97 mm. Įvertinus realų jungties paslankumą, įlinkis padidėjo. Rezultatai galėtų būti geresni, jei bandymų metu nebūtų įvykęs betono gniuždomasis suirimas.
2. Normalinių įtempių rezultatai tarp teorinių ir programinių skaičiavimų nesiskyrė, o gautos reikšmės tenkino eksploatacines sąlygas. Tačiau perskaičiavus su bandinių rezultatais matoma, kad įtempiai betono sluoksnyje gerokai padidėjo dėl pasikeitusios neutraliosios ašies. Teoriškai betono paviršiuje gautas 7,58 MPa įtempis (mažesnis už $f_{cd}=12,5\text{MPa}$), tačiau praktiškai, pasikeitus jungties standumui, gauta reikšmė buvo apie 3,5 karto didesnė, todėl stiprumo sąlyga nebetenkinama.
3. Nustatyta, kad pucolaninių medžiagų įmaišymas reikšmingai pagerino silikatinių klijų sukibimą su medžiagomis. Dėl pagerėjusio sukibimo pavyko sėkmingai atlikti bandymus su smėlio užpildu, nors naudojant grynos sudėties silikatinį klijų, tokie bandiniai buvo netinkami (jungtis nesusiformavo). Pucolaninių priedų efektyvumą patvirtina ir kiekybiniai rezultatai: bandiniai su silikatiniais klijais, pucolaninėmis medžiagomis ir granito skalda vidutiniškai atlaikė 2,12 kN apkrovą, o be pucolaninių priedų – tik 1,12 kN. Tai rodo, kad pucolaninės medžiagos pagerino jungties laikomąją galią 1,89 karto. Ateities tyrimuose rekomenduojama sukibimą dar labiau gerinti papildomai pašiuvinant medienos paviršių.
4. Teoriniai ir programiniai tangentinių įtempių skaičiavimai parodė vienodus rezultatus. Bandomos sijos turėjo atlaikyti 16,48 kN (pagal TRB) ir 23,52 kN (pagal SRB) apkrovas. Atlikus bandymus, epoksidinių klijų bandiniai tokias apkrovas atlaikė, tačiau nustačius, kad jungtis deformuojasi, perskaičiuoti tangentiniai įtempiai buvo mažesni: 0,81 MPa (TRB) ir 1,16 MPa (SRB). Tai parodo, kad dėl paslankumo jungties perimami įtempiai sumažėjo apie 1,27 karto.

Literatūros sąrašas

1. TAO, H.; YANG, H.; JU, G.; XU, J.; SHI, B. Effective width of timber-concrete composite beams with crossed inclined coach screw connections at the serviceability state. Engineering Structures [interaktyvus]. 2022, t. 267, 114716 [žiūrėta 2025-05-24]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029622008082?via%3Dihub>
2. MARTÍN-GUTIÉRREZ, E.; ESTÉVEZ-CIMADEVILA, J.; SUÁREZ-RIESTRA, F.; OTERO-CHANS, D. Flexural behaviour of a new timber-concrete composite structural flooring system. Full scale testing. Journal of Building Engineering [interaktyvus]. 2023, t. 64, 105606 [žiūrėta 2025-05-24]. ISSN 2352-7102. Prieiga per: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710222016126?pes=vor&utm_source=scopus&getft_integrator=scopus
3. FERRARA, G.; MICHEL, L.; FERRIER, E. Flexural behaviour of timber-concrete composite floor systems linearly supported at two edges. Engineering Structures [interaktyvus]. 2023, t. 281, 115782 [žiūrėta 2025-05-24]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029623001967?via%3Dihub>
4. KREIS, B.; KÜBLER, W.; FRANGI, A. Development and investigation of an innovative, light-weight, two-way spanning timber-concrete composite slab. Engineering Structures [interaktyvus]. 2023, t. 286, 116087 [žiūrėta 2025-05-24]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029623005011?pes=vor&utm_source=scopus&getft_integrator=scopus
5. ESTÉVEZ-CIMADEVILA, J.; SUÁREZ-RIESTRA, F.; MARTÍN-GUTIÉRREZ, E.; OTERO-CHANS, D. Full scale testing of timber-concrete composite floors in an overhanging configuration. Engineering Structures [interaktyvus]. 2023, t. 291, 116460 [žiūrėta 2025-05-24]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029623008751?pes=vor&utm_source=scopus&getft_integrator=scopus
6. BAO, Y.; LU, W.; YUE, K.; LU, B.; DAI, C.; QIU, G. Experimental and nonlinear-analytical studies of cross-laminated-timber concrete composite floors with interface shear resistance enhancement of plate-end. Construction and Building Materials [interaktyvus]. 2023, t. 403, 133042 [žiūrėta 2025-05-24]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823027599?via%3Dihub>
7. NGUYEN, T.-T.; SORELLI, L.; BLANCHET, P. Composite slab floors made of cross laminated timber and ultra high-performance concrete: Early-age deflection, stripping time, and its implication on the structural performances. Engineering Structures [interaktyvus]. 2023, t. 295, 116810 [žiūrėta 2025-05-24]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029623012257?via%3Dihub>
8. BAE, H.; YOSHIOKA, T.; FUJITA, K.; ITO, J.; NOHARA, H.; NOHARA, K.; NARITA, T.; LEE, W.; HOSOKAWA, A.; TANAKA, T. Evaluation of bending creep performance of laminated veneer lumber (LVL) formwork for the design of timber concrete composite (TCC) structures. Journal of Korean Wood Science and Technology [interaktyvus]. 2024, t. 52, nr. 4, p. 375–382 [žiūrėta 2025-05-24]. Prieiga per: https://www.woodj.org/archive/view_article?pid=wood-52-4-375
9. ADEMA, A.; CHACABÓN, M. F.; SANTA MARÍA, H.; OPAZO-VEGA, A.; CASANOVA, E.; GUINDOS, P. Flexural performance of full-scale two-span Nail-Laminated Timber

- Concrete composite slabs. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2024, t. 432, 136528 [žiūrėta 2025-05-24]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061824016696?pes=vor&utm_source=scopus&getft_integrator=scopus
10. CHEN, H.; MA, W.; KASAL, B.; WEI, Y.; YAN, L. Flexural behavior of adhesively bonded cross-laminated timber-concrete composite (TCC) panel with glass-fiber textile mesh as reinforcement in concrete: Experimental studying and numerical simulation. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2025, t. 330, 119916 [žiūrėta 2025-05-24]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029625003062?pes=vor&utm_source=scopus&getft_integrator=scopus
 11. BRIUKA, E.; SERDJUKS, D.; AKISHIN, P.; SAHMENKO, G.; PODKORITOV, A.; OZOLINS, R. Behaviour analysis of beam-type timber and timber-concrete composite panels. *Applied Sciences* [interaktyvus]. 2024, t. 14, 7403 [žiūrėta 2025-05-24]. ISSN 2076-3417. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/16/7403>
 12. FROHNMÜLLER, J.; FISCHER, J.; SEIM, W. Full-scale testing of adhesively bonded timber-concrete composite beams. *Materials and Structures* [interaktyvus]. 2021, t. 54, 187 [žiūrėta 2025-05-24]. ISSN 1359-5997. Prieiga per: https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-021-01766-y?utm_source=getftr&utm_medium=getftr&utm_campaign=getftr_pilot&getft_integrator=scopus
 13. SIDDIKA, A.; MAMUN, M. A. A.; ASLANI, F.; ZHUGE, Y.; ALYOUSEF, R.; HAJIMOHAMMADI, A. Cross-laminated timber–concrete composite structural floor system: A state-of-the-art review. *Engineering Failure Analysis* [interaktyvus]. 2021, t. 130, 105766 [žiūrėta 2025-05-24]. ISSN 1350-6307. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630721006270?via%3Dihub#f0005>
 14. BAEK, S.-Y.; SONG, Y.-J.; YU, S.-H.; KIM, D.-H.; HONG, S.-I. Bending performance of cross-laminated timber-concrete composite slabs according to the composite method. *BioResources* [interaktyvus]. 2021, t. 16, nr. 4, p. 8227–8238 [žiūrėta 2025-05-24]. Prieiga per: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/bending-performance-of-cross-laminated-timber-concrete-composite-slabs-according-to-the-composite-method/>
 15. JIANG, Y.; HU, X.; HONG, W.; ZHANG, J.; HE, F. Experimental study on notched connectors for glulam-lightweight concrete composite beams. *BioResources* [interaktyvus]. 2020, t. 15, nr. 2, p. 2171–2180 [žiūrėta 2025-05-24]. Prieiga per: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/experimental-study-on-notched-connectors-for-glulam-lightweight-concrete-composite-beams/>
 16. LIETUVOS STATYBOS INŽINIERIŲ SĄJUNGA. *Pastatų konstruktoriaus ir statybininko žinybas*. Kaunas: Naujasis lankas, 2009.
 17. CAO, J.; XIONG, H.; WANG, Z.; CHEN, J. Mechanical characteristics and analytical model of CLT-concrete composite connections under monotonic loading. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2022, t. 335, 127472 [žiūrėta 2025-05-24]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822011497?via%3Dihub>
 18. VALENTINAVIČIUS, A. *Klijuotinės medžio konstrukcijos*. Vilnius: Mintis, 1974.
 19. VALENTINAVIČIUS, A., Valiūnas, B. *Medinės konstrukcijos*. Mokslo ir enciklopedijų leidybos institutas, 2000. ISBN 9986-433-20-7.

20. BAJZECEROVÁ, V. Bending stiffness of CLT-concrete composite members - comparison of simplified calculation methods. *Procedia Engineering* [interaktyvus]. 2017, t. 190, p. 15–20 [žiūrėta 2025-05-26]. ISSN 1877-7058. Prieiga per: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817324414?pes=vor&utm_source=scopus&getft_integrator=scopus
21. SONG, Y.-J.; BAEK, S.-Y.; YU, S.-H.; KIM, D.-H.; HONG, S.-I. Evaluation of the bending performance of glued CLT-concrete composite floors based on the CFRP reinforcement ratio. *BioResources* [interaktyvus]. 2022, t. 17, nr. 2, p. 2243–2258 [žiūrėta 2025-05-26]. Prieiga per: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/evaluation-of-the-bending-performance-of-glued-clt-concrete-composite-floors-based-on-the-cfrp-reinforcement-ratio/>
22. TAO, H.; YANG, H.; ZHANG, J.; JU, G.; XU, J.; SHI, B. Nonlinear finite element analysis on timber-concrete composite beams. *Journal of Building Engineering* [interaktyvus]. 2022, t. 51, 104259 [žiūrėta 2025-05-26]. ISSN 2352-7102. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710222002728?via%3Dihub>
23. PANG, S.-J.; AHN, K.-S.; JEONG, S.-M.; LEE, G.-C.; KIM, H. S.; OH, J.-K. Prediction of bending performance for a separable CLT-concrete composite slab connected by notch connectors. *Journal of Building Engineering* [interaktyvus]. 2022, t. 49, 103900 [žiūrėta 2025-05-26]. ISSN 2352-7102. Prieiga per: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221017587?pes=vor&utm_source=scopus&getft_integrator=scopus#fig1
24. SHI, B.; ZHU, W.; YANG, H.; LIU, W.; TAO, H.; LING, Z. Experimental and theoretical investigation of prefabricated timber-concrete composite beams with and without prestress. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2020, t. 204, 109901 [žiūrėta 2025-05-26]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029619327683?via%3Dihub#f0030>
25. [TANNERT, T.; GERBER, A.; VALLÉE, T. Hybrid adhesively bonded timber-concrete-composite floors. *International Journal of Adhesion and Adhesives* [interaktyvus]. 2020, t. 97, 102490 [žiūrėta 2025-05-24]. ISSN 0143-7496. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749619302398>
26. BUKA-VAIVADE K.; SERDJUKS D.; PODKORITOVŠ A.; PAKRASTINS L.; MIRONOVŠ V. Rigid connection with granite chips in the timber-concrete composite. *Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Conference, Rezekne, Latvia* [interaktyvus]. 2021, t. 3, p. 36–39, Online ISSN 2256-070X [žiūrėta 2025-05-26]. Prieiga per: <https://journals.rta.lv/index.php/ETR/article/view/6552/5383>
27. BUKA-VAIVADE K.; SERDJUKS D.; SLISERIS J.; PODKORITOVŠ A.; OZOLINS R. Timber-concrete composite ribbed slabs with high-performance fibre-concrete. *Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Conference, Rezekne, Latvia* [interaktyvus]. 2021, Online ISSN 2256-070X, p. [nenurodyta] [žiūrėta 2025-05-26]. Prieiga per: <https://journals.rta.lv/index.php/ETR/article/view/6551/5384>
28. BAJZECEROVÁ, V., KANÓCZ, J., KORMANÍKOVÁ, E., KARĻA, V., OROLIN, P., VRANAY, F. Normal stress distribution of timber-concrete composite panels with an adhesive shear connection under thermal and humidity loadings. *BioResources* [interaktyvus]. 2021, 16(3), 4862-4875 [žiūrėta 2025-05-26]. Prieiga per:

- <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/normal-stress-distribution-of-timber-concrete-composite-panels-with-an-adhesive-shear-connection-under-thermal-and-humidity-loadings/>
29. HADIGHEH, S.A., MCDOUGALL, R., WISEMAN, C., REID, L. Evaluation of composite action in cross laminated timber-concrete composite beams with CFRP reinforcing bar and plate connectors using Digital Image Correlation (DIC). Engineering Structures [interaktyvus]. 2021, 232, 111791 [žiūrėta 2025-05-26]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029620343923?via%3Dihub#f0010>
 30. SONG Y.-J., BAEK S.-Y., YU S.-H., KIM D.-H., HONG S.-I. Evaluation of the bending performance of glued CLT-concrete composite floors based on the CFRP reinforcement ratio. BioResources [interaktyvus]. 2022, 17(2), 2243-2258 [žiūrėta 2025-05-26]. Prieiga per: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/evaluation-of-the-bending-performance-of-glued-clt-concrete-composite-floors-based-on-the-cfrp-reinforcement-ratio/>
 31. BOCCADORO L., ZWEIDLER S., STEIGER R., FRANGI A. Bending tests on timber-concrete composite members made of beech laminated veneer lumber with notched connection. Engineering Structures [interaktyvus]. 2017, 132, 14-28 [žiūrėta 2025-05-26]. Prieiga per: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029616312597?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=945a90782dd0b80f
 32. RODRIGUES, J. N., DIAS, A. M. P. G., PROVIDÊNCIA, P. Timber-concrete composite bridges: State-of-the-art review. BioResources [interaktyvus]. 2013, 8(4), 6630-6649 [žiūrėta 2025-05-26]. Prieiga per: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/timber-concrete-composite-bridges-state-of-the-art-review/>
 33. DERIKVAND, M., FINK, G. Bending properties of deconstructable cross-laminated timber-concrete composite floor elements. Wood Material Science & Engineering [interaktyvus]. 2022, 17(4), 253-260 [žiūrėta 2025-05-26]. Prieiga per: https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17480272.2022.2077658?src=getfr&utm_source=scopus&getft_integrator=scopus
 34. ŚLIWA-WIECZOREK, K.; LA SCALA, A.; DERKOWSKI, W.; BINDER, E. Longitudinal Shear in Timber-Concrete Composites with Flexible Adhesive Connections—Experimental and Numerical Investigations. Materials [interaktyvus]. 2024, t. 17, nr. 6055, p. 1-26 [žiūrėta 2025-10-22]. Prieiga per: <https://www.scopus.com/pages/publications/85213265576?origin=resultslist>
 35. ČIŽAS, A. *Medžiagų atsparumas: konstrukcijų elementų mechanika*. Vilnius: Technika, 1993.
 36. ZEMAN, M.; SEJKOT, P.; MIKES, K.; FRAGIACOMO, M.; ALOISIO, A. Glued-in steel plate and screwed connections in Timber-Concrete Composites systems: Mechanical performance and design implications. Journal of Building Engineering [interaktyvus]. 2024, t. 96, straipsnio nr. 110477 [žiūrėta 2025-10-22]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271022402045X?via%3Dihub#fig6>
 37. DU, H.; XU, R.; LIU, P.; YUAN, S.; WEI, Y. Experimental and theoretical evaluation of inclined screws in glued laminated bamboo and timber-concrete composite beams. Journal of Building Engineering [interaktyvus]. 2024, t. 91, straipsnio nr. 109579 [žiūrėta 2025-10-22]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224011471?via%3Dihub#fig2>
 38. GIV, A. N.; FU, Q.; YAN, L.; KASAL, B. The effect of adhesive amount and type on failure mode and shear strength of glued timber-concrete joints. Construction and Building

- Materials [interaktyvus]. 2022, t. 345, straipsnio nr. 128375 [žiūrėta 2025-10-22]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822020359?via%3Dihub#f0030>
39. DENG, Y.; HAO, Y.; MOHAMED, A.; WONG, S. H. F.; TANG, Y.; YUEN, T. Y. P.; SUKONTASUKKUL, P.; SHEN, M.; FERNANDO, N.; SAINT, R.; ZHANG, H. Experimental investigation of mechanically laminated straight or curved-and-tapered bamboo-concrete T-beams. Engineering Structures [interaktyvus]. 2023, t. 283, straipsnio nr. 115896 [žiūrėta 2025-10-22]. Prieiga per: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029623003103?pes=vor&utm_source=scopus&getft_integrator=scopus#f0015
40. DENG, Y., HAO, Y., MOHAMED, A., WONG, S. H. F., TANG, Y., YUEN, T. Y. P., SUKONTASUKKUL, P., SHEN, M., FERNANDO, N., SAINT, R. ir ZHANG, H. Experimental investigation of mechanically laminated straight or curved-and-tapered bamboo-concrete T-beams. Engineering Structures [interaktyvus]. 2023, t. 283, straipsnio nr. 115896 [žiūrėta 2025-10-22]. Prieiga per: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509525012161?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=992709f7f87acc32
41. JOKŪBAITIS, V., JURKŠA, A., KAMAITIS, Z., KIVILŠA, J., KUDZYS, ALG., KUDZYS, ANT., MARČIUKAITIS, G., PUKELIS, P., VADLŪGA, R. IR VAINIŪNAS, P. *Gelžbetoninės ir mūrinės konstrukcijos*. Vilnius: Mokslas, 1992. ISBN 5-420-00000-0.

Priedai

1 priedas. Literatūros apžvalgos protokolas

Timber concrete composites" OR " timber concrete beam" OR " timber concrete slab") AND TITLE-ABS-KEY(bending)

Lukas Maslovas

timber concrete composites bending elements

Planning

Timber-concrete composites

PICOC

Population: Timber

Intervention: Concrete

Comparison:

Outcome: Bending

Context:

Research Questions

How timber-concrete composites are joined

How it resist bending

Keywords and Synonyms

Keyword

Synonyms

timber concrete beam

timber concrete slab

timber concrete composites

wood concrete composites

timber concrete composites bending

Search String

(TITLE-ABS-KEY ("timber concrete composites" OR " timber concrete beam" OR " timber concrete slab") AND TITLE-ABS-KEY (bending)) AND PUBYEAR > 2014 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Timber-concrete Composites") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Bending Tests") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Concrete Slabs"))

Sources

Scopus (<http://www.scopus.com>)

Selection Criteria

Inclusion Criteria:

English

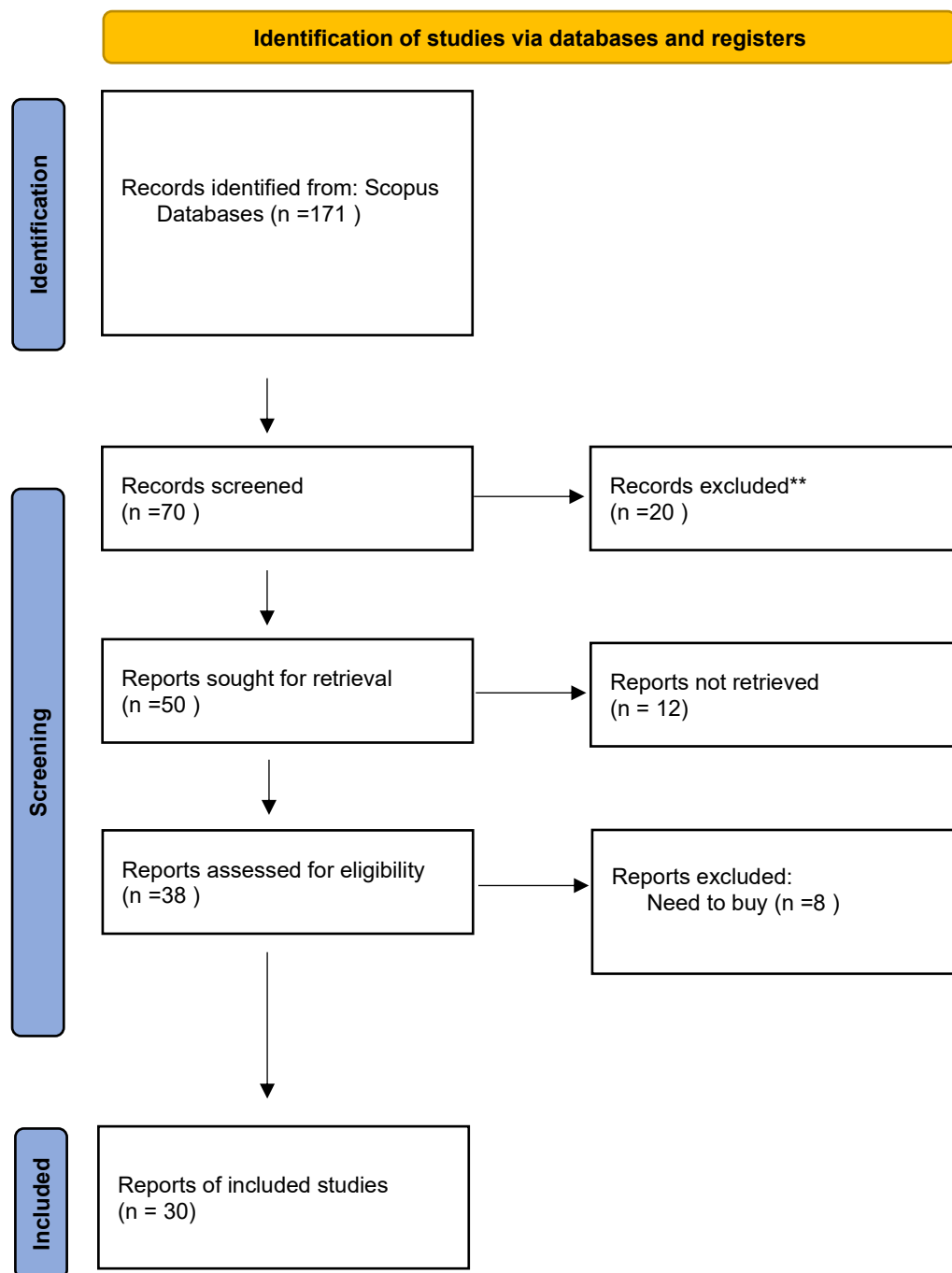
Newer than 2015

Exclusion Criteria:

Older than 2015

Conducting

2 priedas. Prisma stūktura



3 priedas. Skaičiavimai

Skaičiavimams naudojamos sijos parametrai:

Naujasis skerspjūvis apskaičiuojamas pagal formulę. Aukštis turi nepakisti. Keičiamas tik medienos plotis (b_2).

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{31000MPa}{11500MPa} = 2,70$$

Naujasis medienos plotis apskaičiuojamas

$$b_{2,1} = \frac{b_2}{n} = \frac{80mm}{2,7} = 29,68mm$$

Apskaičiuojami konstrukcijos sluoksnių paviršiaus plotai

$$A_1 = b_1 h_1 = 800 \cdot 60 = 48000mm^2$$

$$A_2 = b_2 h_2 = 29,68 \cdot 200 = 5935,5mm^2$$

$$y_1 = h_2 + \frac{h_1}{2} = 200 + \frac{60}{2} = 230mm$$

$$y_2 = \frac{h_2}{2} = \frac{200}{2} = 100mm$$

Neutralios ašies nustatymo skaičiavimai

$$\bar{y} = \frac{A_1 y_1 + A_2 y_2}{A_1 + A_2} = \frac{48000mm^2 \cdot 230mm + 5935,5mm^2 \cdot 100mm}{48000mm^2 + 5935,5mm^2} = 215,69mm$$

Apskaičiuojamas inercijos momentas kompozitinėje sijoje pagal metodiniuose pasirinktą išraišką:

$$I = \sum I_i b_i h_i^3 + A_i a_i^2 = 123455760mm^4$$

Nustatomos kompozitą sudarančių medžiagų atstumai nuo neutralios ašies:

$$a_1 = y_1 - \bar{y} = 230 - 215,69 = 14,31mm$$

$$a_2 = \bar{y} - y_2 = 215,69 - 100 = 115,69mm$$

Atskirai kiekvienos dalies inercijos momento apskaičiavimas

$$I_1 = \frac{1}{12} \cdot 800mm \cdot 60^3mm + 48000mm^2 \cdot 14,31^2 = 24224061mm^4$$

$$I_2 = \frac{1}{12} \cdot 29,68mm \cdot 200^3mm + 5935,5mm^2 \cdot 115,69^2mm = 99231699mm^4$$

$$I = I_1 + I_2 = 24224061mm^4 + 99231699mm^4 = 123455760mm^4$$

Noramliniai įtempiai

Apskaičiuojami normaliniai įtempiai betono viršuje:

$$\sigma_1 = \frac{21120000Nmm \cdot 44,31mm}{123455760mm^4} = 7,58MPa$$

Kontakto zonoje veikiantys įtempiai betono dalyje:

$$\sigma_2 = \frac{21120000 Nmm \cdot 15,69 mm}{123455760 mm^4} = 2,68 MPa$$

Kontakto zonoje veikiančys įtempiai medienos dalyje:

$$\sigma_3 = \frac{21120000 Nmm \cdot 15,69 mm}{123455760 \cdot 2,7 mm^4} = 1,00 MPa$$

Įtempiai medienos apačioje:

$$\sigma_4 = \frac{21120000 Nmm \cdot 215,69 mm}{123455760 \cdot 2,7 mm^4} = 13,69 MPa$$

Betono maksimalus normaliniai įtempiai ir išnaudojimas

Betono maksimalus įtempiai gniuždant:

$$f_{cd} = \frac{a_{cc} \cdot a \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{1,0 \cdot 0,9 \cdot 25 MPa}{1,8} = 12,5 MPa$$

Efektyvus kompozitinio skerspjūvio lenkimo standumas $(EI)_{eff}$ nustatomas pagal išraišką:

$$(EI)_{eff} = \sum_i (E_i I_i) + \sum_i (E_i A_i a_i^2) = 3.8271 \cdot 10^{12} Nmm^2$$

Medinės sijos maksimalūs normaliniai įtempiai ir išnaudojimas

Medinės sijos maksimalūs įtempiai tempimui:

$$f_{m,z,d} = \frac{k_{mod} \cdot k_h \cdot f_m}{\gamma} = \frac{0,8 \cdot 1,1 \cdot 24 MPa}{1,25} = 16,89 MPa$$

- γ – koeficientas parenkamas klijuotajai medienai 1,25
- k_{mod} – priimtas nuo derinių tipo. skaičiavimuose buvo naudojamos nuolatinės ir kintamosios apkrovos todėl pasirinktas
- k_h – apskaičiuotas pagal formulę ir priimtas mažiausioji leistina reikšmė

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1} = \left(\frac{600}{200} \right)^{0,1} = 1,12 \right.$$

Pagal apskaičiuotus normalinius įtempius ir maksimalia jų galima reikšme sudaroma lygtis:

$$\sigma_4 = 13,69 MPa < f_{m,z,d} = 16,89 MPa$$

Apskaičiuojamas išnaudojimas:

$$\frac{\sigma_4}{f_{m,z,d}} = \frac{13,69 MPa}{16,89 MPa} = 0,81$$

Šlyties standumas

Daugiasluoksnio skerspjūvio efektyvus šlyties standumas $(GA)_{eff}$ apskaičiuojamas pagal [20] pateiktą išraišką:

$$(GA)_{eff} = \frac{e^2}{\left(\frac{h_1}{2G_1b}\right) + \left(\sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i b_i}\right) + \left(\frac{h_n}{2G_n b}\right)} = 9,72 \cdot 10^6 Nmm^2$$

kur

- e - atstumas tarp viršutinio ir apatinio sluoksnių svorio centrų,
- h_i - i -tojo sluoksnio storis,
- G_i - i -tojo sluoksnio kirpimo modulis,
- b_i - i -tojo sluoksnio plotis.

Ilinkio skaičiavimas

Tolygiai apkrautos, paprastai remiamos sijos vidurio nuokrypis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$w = w_M + w_V = \frac{5qL^4}{384(EI)_{eff}} + \frac{qL^2}{8\left(\frac{GA}{\kappa}\right)_{eff}} = 6,445 + 1,269 = 7,714mm$$

Skersinių jėgų skaičiavimas pagal tinkamumo ribinį būvį (TRB):

$$V_{SLS} = \frac{q_{SLS} \cdot l \cdot a}{2} = \frac{7,4kN/m^2 \cdot 4m \cdot 1m}{2} = 14,8kN$$

Skersinių jėgų skaičiavimas pagal saugos ribinį būvį (SRB):

$$V_{ULS} = \frac{q_{SLS} \cdot l \cdot a}{2} = \frac{21,12kN/m^2 \cdot 4m \cdot 1m}{2} = 15,56kN$$

Apskaičiuojami tangentiniai įtempiai nuo TRB ir SRB apkrovų kombinacijų į kompozitinės sijos kontakto zoną.

$$\tau_{SLS} = \frac{14800N \cdot 31000N/mm^2 \cdot 48000mm^2 \cdot 14,31mm}{2,38121 \cdot 10^{12}Nmm^2 \cdot 80mm} = 1,03MPa$$

$$\tau_{SLS} = \frac{21120N \cdot 31000N/mm^2 \cdot 48000mm^2 \cdot 14,31mm}{2,38121 \cdot 10^{12}Nmm^2 \cdot 80mm} = 1,47MPa$$

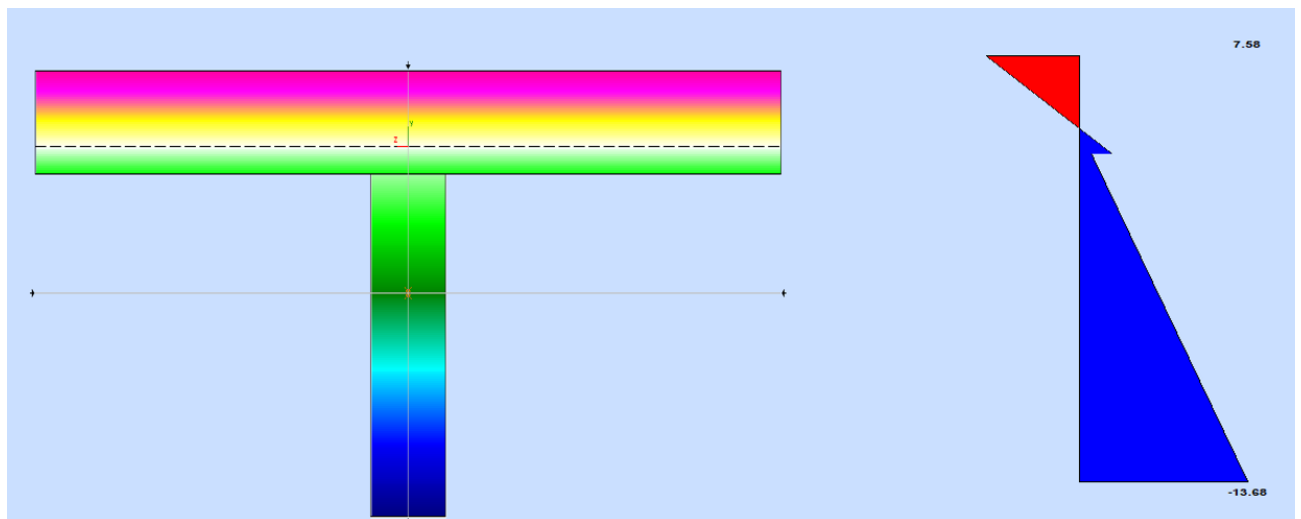
Apskaičiuotos apkrovos gautos į ploto vienetą turi būti išdalintos per visą plotą. Plotas yra parinktas vėliau bandymuose naudojamos sijos matmenis:

$$F_{SLS} = \tau(x, z)_{SLS} \cdot A = 1,03N/mm^2 \cdot 200 \cdot 80 = 16,48kN$$

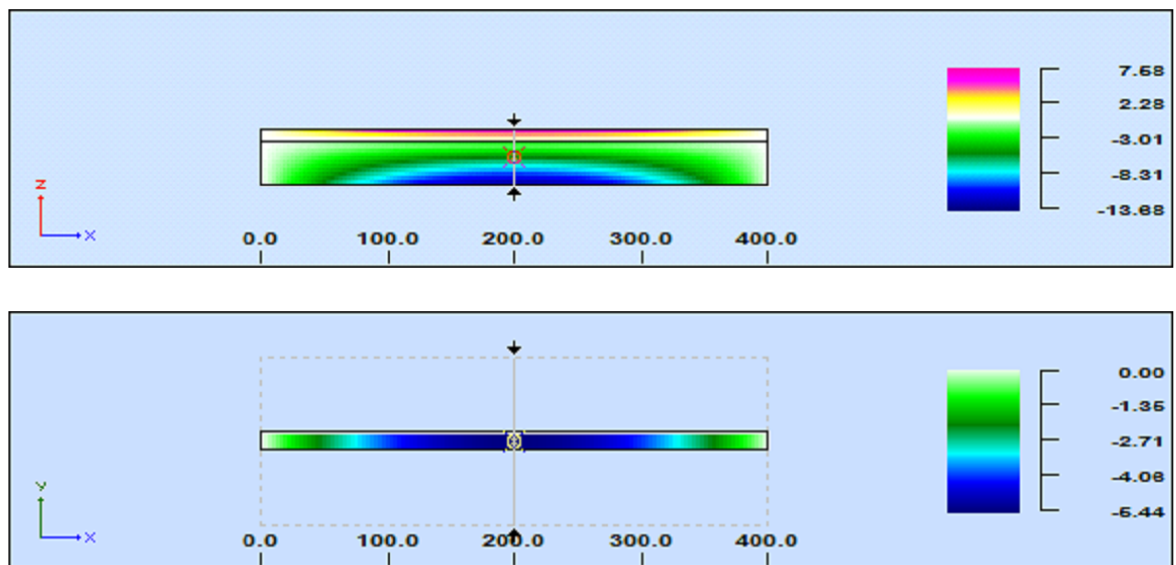
$$F_{ULS} = \tau(x, z)_{ULS} \cdot A = 1,47N/mm^2 \cdot 200 \cdot 80 = 23,52 kN$$

Gautuose rezultatuose matome kokias apkrovas turi atlaikyti mūsų projektuojamas bandinys atitinkantis mūsų skaičiuojamą perdangą.

Skaitmeniniai skaičiavimai

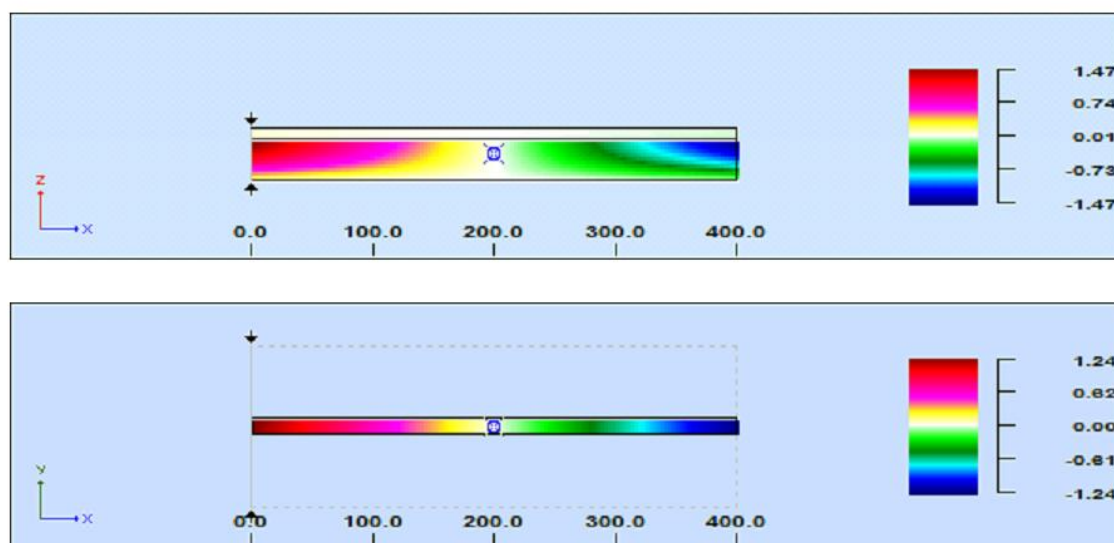


32 pav. Normalinių įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje.

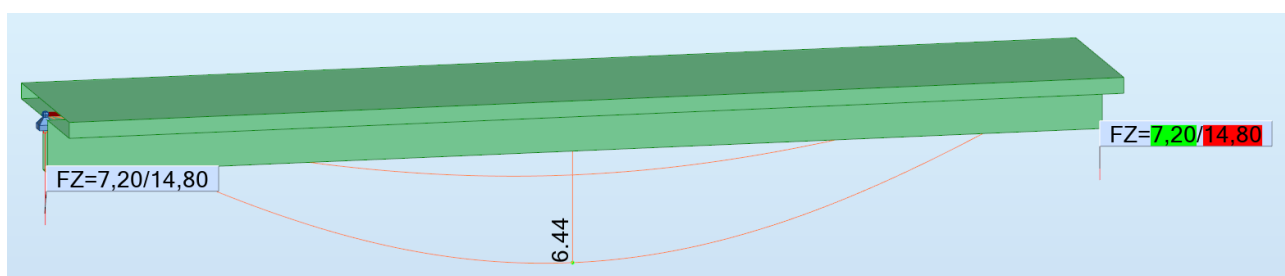


33 pav. Normalinių įtempių pasiskirstymas išilgai pjūvyje.

LONGITUDINAL SECTION



34 pav. Tangentiniai įtempiai išilgai kompozito (vaizdas iš šono ir viršaus)



35 pav. Įlinkiai pagal programinius skaičiavimus.

LOADS:

Governing Load Case: 5 ULS /1/ 1*1.35 + 2*1.35 + 3*1.50 + 4*1.50

MATERIAL

GL24h/C25/30
 $gM = 1.25$ $f_{m,0,k} = 24.00 \text{ MPa}$ $f_{t,0,k} = 19.20 \text{ MPa}$ $f_{c,0,k} = 0.00 \text{ MPa}$
 $f_{y,k} = 3.50 \text{ MPa}$ $f_{t,90,k} = 0.50 \text{ MPa}$ $f_{c,90,k} = 2.50 \text{ MPa}$ $E_{0,moyen} = 11500.00 \text{ MPa}$
 $E_{0,05} = 9600.00 \text{ MPa}$ $G_{moyen} = 650.00 \text{ MPa}$ Service class: 1 Beta c = 0.10

SECTION PARAMETERS: TB 800x260x80

$h_t = 80.0 \text{ cm}$ $A_y = 969.28 \text{ cm}^2$ $A_z = 969.28 \text{ cm}^2$ $A_x = 1453.91 \text{ cm}^2$
 $b_f = 26.0 \text{ cm}$ $I_y = 690940.29 \text{ cm}^4$ $I_z = 33279.38 \text{ cm}^4$ $I_x = 0.0 \text{ cm}^4$
 $t_w = 0.0 \text{ cm}$ $W_y = 17273.51 \text{ cm}^3$ $W_z = 7511.22 \text{ cm}^3$

STRESSES

$\text{Sig}_{m,z,d} = MZ/W_z = -21.11/1542.90 = -13.68 \text{ MPa}$

ALLOWABLE STRESSES

$f_{m,z,d} = 16.70 \text{ MPa}$

Factors and additional parameters

$kh_z = 1.09$ $k_{mod} = 0.80$ $K_{sys} = 1.00$



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:



BUCKLING PARAMETERS:

About Y axis:



About Z axis:

VERIFICATION FORMULAS:

$\text{Sig}_{m,z,d}/f_{m,z,d} = 2.81/16.70 = 0.82 < 1.00 \text{ (6.12)}$

Section OK !!!

36 pav. Sijos išnaudojimas dėl didžiausių ją veikiančių įtempių

Bandiniai

Bandinio reikšmėse gautų rezultatais apskaičiuojamaos reikšmės tolimesnėms skaičiavimams pagal

$$\gamma_i = \left[1 + \frac{\pi^2 E_i A_i}{k_s L b} \right]^{-1} = \left[1 + \frac{9,86 \cdot 31000 \text{ MPa} \cdot 48000 \text{ mm}^2}{264,6 \text{ N/mm/mm}^2 \cdot 4000 \text{ mm} \cdot 80} \right]^{-1} = 0,103$$

Atstumas nuo bendros neutralios ašies iki medinės sijos svorio centro.

$$a_m = \frac{\gamma_c E_c A_c}{\gamma_c E_c A_c + E_T A_T} = \frac{0,103 \cdot 31000 \text{ MPa} \cdot 48000 \text{ mm}^2}{0,103 \cdot 31000 \text{ MPa} \cdot 48000 \text{ mm}^2 + 11500 \text{ MPa} \cdot 16000 \text{ mm}^2} = 59,13 \text{ mm}$$

$$(EI)_{eff} = 2,47417 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2$$

Ilinkiai

$$w = \frac{5qL^4}{384(EI)_{eff}} = \frac{5 \cdot 7,4 \text{ N/mm} \cdot (4000 \text{ mm})^4}{384 \cdot 2,47417 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2} = 9,97 \text{ mm}$$

Tangentiniai įtempiai

Apskaičiuojamos naujos įtempių reikšmės jungtyje pagal gama metodo pritaikymą. Gautais rezultatais matysime kokios maksimalios jėgos veikia bandinius.

$$\tau = \frac{V_{TRB} \gamma_i E_i A_i a_i}{EI \cdot b} = \frac{14800 \text{ N} \cdot 0,103 \cdot 31000 \text{ N/mm}^2 \cdot 48000 \text{ mm}^2 \cdot 70,86 \text{ mm}}{2,47417 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2 \cdot 80 \text{ mm}} = 0,81 \text{ MPa}$$
$$\tau = \frac{V_{SRB} \gamma_i E_i A_i a_i}{EI \cdot b} = \frac{21120 \text{ N} \cdot 0,103 \cdot 31000 \text{ N/mm}^2 \cdot 48000 \text{ mm}^2 \cdot 70,86 \text{ mm}}{2,47417 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2 \cdot 80 \text{ mm}} = 1,16 \text{ MPa}$$