



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

# **Medžio (CLT) ir betono kompozitinių perdangos lenkiamų elementų stiprumo ir deformacijų analizė**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Tomas Šalčiūnas**

Projekto autorius

**Lekt. Nerijus Adamukaitis**

Vadovas

---

**Kaunas, 2023**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

# **Medžio (CLT) ir betono kompozitinių perdangos lenkiamų elementų stiprumo ir deformacijų analizė**

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

---

**Tomas Šalčiūnas**

Projekto autorius

**Lekt. Nerijus Adamukaitis**

Vadovas

**Doc. Mindaugas Augonis**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2023**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

Tomas Šalčiūnas

## **Medžio (CLT) ir betono kompozitinių perdangos lenkiamų elementų stiprumo ir deformacijų analizė**

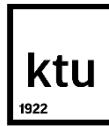
Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Tomas Šalčiūnas

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

**Magistro baigiamojo projekto užduotis**

**Studijų programa:** \_\_\_\_\_ Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija

**Baigiamojo projekto tematika (lietuvių k.):**

Medžio (CLT) ir betono kompozitinių perdangos lenkiamų elementų stiprumo ir deformacijų analizė

**Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanı potvarkiu Nr.:** \_\_\_\_\_ V25-09-16

**(lietuvių k.):** Medžio (CLT) ir betono kompozitinių perdangos lenkiamų elementų stiprumo ir deformacijų analizė

**(anglų k.):** Analysis of Strength and Deformations of Bending Elements of Wood (CLT) and Concrete Composite Floor

**Pradiniai duomenys darbui:**

--

**Baigiamojo projekto dalys:**

	<b>Atlikti</b>
Įvadas	<b>x</b>
Literatūros apžvalga	<b>x</b>
Metodologija	<b>x</b>
Eksperimentiniai tyrimai	<b>x</b>
Analitiniai tyrimai	<b>x</b>
Skaitiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Ekonominė dalis	<input type="checkbox"/>
Išvados	<b>x</b>

**Kita informacija (pagal poreikį):**

--

**Vadovas:** \_\_\_\_\_ lekt. Nerijus Adamukaitis  
*pareigos, vardas, pavardė*  
*Patvirtinta elektroniniu būdu*

**Konsultantas:** \_\_\_\_\_ INHUS Engineering Kauno projektavimo skyriaus vadovas Robertas Padleckis  
*pareigos, vardas, pavardė*

**Studentas:** \_\_\_\_\_ Tomas Šalčiūnas  
*vardas, pavardė*  
*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Šalčiūnas Tomas. Medžio (CLT) ir betono kompozitinių perdangos lenkiamų elementų stiprumo ir deformacijų analizė. Magistro baigiamasis projektas vadovas Lekt. Nerijus Adamukaitis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: CLT, betonas, kompozitas, Eurokodas 5, deformacijos, gama metodas.

Kaunas, 2022. 61 p.

### **Santrauka**

Medienos (CLT) ir betono kompozitinės konstrukcijos vis labiau aktualesnės šių dienų statyboje, tačiau skaičiavimo metodai ir elementų tarpusavio jungimo būdai ne visai gerai žinomi.

Baigiamajame magistro projekte analizuojama medienos (CLT) ir betono kompozitinė konstrukcija. Kompozitinės konstrukcijos tarpusavio sujungimui naudojamos įpjovos ir medsraigčių jungimo būdai. Atlikus literatūros analizės apžvalgą, nustatyta, kad kompozitinės perdangos pasižymi labai geru tarpusavio stiprumu galinčios išlaikyti didesnę apkrovą ir padidinti lenkiamąjį standumą jei abu elementai yra gerai sujungti. Elementų tarpusavio jungimo variantų yra daug, pagrindiniai jungimo būdai yra naudojant kaiščius, medsraigčius, įpjovas, kljus, plienines plokšteles ir įpjovas su kaiščiais kartu. Atlikti analitiniai rankiniai skaičiavimai pagal Eurokodą 5, B priedą, pateiktą gama metodą. Apskaičiuotas kompozitinės perdangos plokštės efektyvusis lenkiamasis standumas, įlinkis, pirmasis natūralusis dažnis ir normaliniai įtempiai. Analogiški skaičiavimai atlikti naudojant baigtinių elementų inžinerinę programą Dlubal RFEM 5.25. Atlikti skaičiavimo metodai palyginti su pasirinkto laboratorinio tyrimo atliktais skaičiavimais, nustatyta kodėl lyginamieji skaičiavimai skiriasi.

Darbo apimtis – 41 p. teksto be priedų, 35 iliustr., 7 lent., 47 bibliografinių šaltinių. Atskirai pridedami darbo priedai.

Šalčiūnas Tomas. Analysis of Strength and Deformations of Bending Elements of Wood (CLT) and Concrete Composite Floor / Supervisor Lekt. Nerijus Adamukaitis; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: CLT, concrete, composite, Eurocode 5, deformations, gamma method.

Kaunas, 2022. 61 p.

### **Summary**

Composite structures of wood (CLT) and concrete are increasingly relevant in today's construction, but the methods of calculation and methods of connecting elements to each other are not quite well known.

The final master's project analyzes the composite construction of wood (CLT) and concrete. For connecting composite structures to each other, notches and methods of connecting wood screws are used. As a result of a review of the literature analysis, it was found that composite overlays are characterized by very good mutual strength capable of withstanding a higher load and increasing the bending rigidity if both elements are well connected. There are many options for connecting elements to each other, the main connection methods are using dowels, screws, notches, glue, steel plates and notches with dowels together. Analytical manual calculations were carried out according to Eurocode 5, Annex B, the gamma method presented. The effective bending stiffness, deflection, first natural frequency and normal stresses of the composite overlay plate were calculated. Analogous calculations were carried out using the engineering program of finite elements Dlubal RFEM 5.25. The calculation methods carried out in comparison with the calculations made by the selected laboratory study, it was found why the comparative calculations differ.

Thesis is comprised of: 41 p. of text without appendixes, 35 pictures, 7 tables, 47 bibliographical entries. In addition, the appendixes are included.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>10</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>12</b>
<b>1. Literatūros apžvalga ir analizė.....</b>	<b>14</b>
1.1. Masinės medienos statyba .....	14
1.1.1. Poveikis aplinkai .....	14
1.1.2. Masinės medienos konstrukcijos .....	14
1.1.3. Medžiagos savybės.....	15
1.1.4. Klijuota laminuota mediena (LVL) .....	15
1.1.5. Kryžmai klijuota mediena (CLT) .....	15
1.2. Betono panaudojimas statyboje .....	16
1.2.1. Betono apžvalga .....	16
1.2.2. Betono rūšys kompozitinėse konstrukcijose .....	16
1.2.3. Betono drėgmės įtaka konstrukcijai .....	16
1.3. Medienos ir betono kompozitai .....	17
1.3.1. Istorija.....	17
1.3.2. Kompozitinių medienos ir betono konstrukcijų elementų charakteristikos .....	18
1.3.3. Mechaniniai principai .....	19
1.3.4. Medienos ir betono kompozito teigiamos savybės.....	20
1.4. Medinės jungtys / šlyties jungties tipai .....	20
1.4.1. Jungtis naudojant įpjovas medienos elemente.....	21
1.4.2. Jungtis naudojant stiklo pluošto sustiprinto polimero (GFRP) savisriegius varžtus .....	21
1.4.3. Jungtis naudojant inkaruojant strypus .....	22
1.4.4. Jungtis naudojant klijus .....	22
1.4.5. Jungtis naudojant plienines plokšteles.....	22
1.4.6. Jungtis naudojant sraiginius / savisriegius varžtus.....	23
1.4.7. Jungčių analizė Lietuvoje .....	24
1.5. Analitiniai skaičiavimo metodai .....	24
1.5.1. Gama skaičiavimo metodas .....	24
1.5.2. Šaldytos šlyties metodas (Frozen Shear Method) .....	25
1.5.3. Elasto-plastinis modelis (Elasto-Plastic Model).....	25
1.5.4. Inkrementinis metodas (Incremental Method) .....	25
1.6. Literatūros analizės apibendrinimas .....	25
<b>2. Medžio (CLT)-betono kompozitinių konstrukcijų skaičiavimo metodologija.....</b>	<b>26</b>
2.1. Skaičiavimai pagal Eurokodo 5 prielaidas .....	26
2.1.1. Natūraliojo dažnio ir įlinkio skaičiavimas.....	29
2.1.2. Normaliniai įtempiai.....	30
2.1.3. Jungės apkrova .....	31
2.2. Skaičiavimai pagal baigtinių elementų programa DLUBAL .....	32
2.2.1. Kompozitinės plokštės modeliavimo pasirinkimas RFEM pakete.....	33
2.2.2. Išsamus projektuojamo modelio aprašymas .....	34
<b>3. Medžio (CLT)-betono konstrukcijų analitinių skaičiavimų patikrinimas.....</b>	<b>40</b>
3.1. Skaičiavimai pagal ekvivalentinį gama metodą .....	40
3.2. Skaičiavimai pagal baigtinių elementų programa Dlubal RFEM.....	41

3.3. Analitiniai skaičiavimo rezultatai .....	42
3.4. Palyginimas .....	45
<b>Išvados .....</b>	<b>51</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>52</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>57</b>
1 priedas. Konferencijos sertifikatas .....	57
2 priedas. Skaičiavimai pagal ekvivalentinį gama metodą.....	57
3 priedas. Natūraliojo dažnio skaičiavimai .....	58
4 priedas. Normalinių įtempių skaičiavimas .....	58
5 priedas. Lyginamųjų tyrimų skaičiavimai .....	60



## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Skaičiavimų rezultatai pagal ekvivalentinį gama metodą .....	40
<b>2 lentelė.</b> Skaičiavimų rezultatai pagal inžinerinę programą Dlubal RFEM 5.25. ....	41
<b>3 lentelė.</b> Analitiniai pirmojo natūraliojo dažnio skaičiavimų rezultatai .....	42
<b>4 lentelė.</b> Analitiniai normalinių įtempių skaičiavimo rezultatai .....	43
<b>5 lentelė.</b> Lyginamųjų bandinių, normalinių įtempių skaičiavimo rezultatų palyginimas .....	45
<b>6 lentelė.</b> Kompozitinės plokštės charakteristikos .....	46
<b>7 lentelė.</b> Gautų rezultatų suvedimas .....	48

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Įvairios gamybos rūšies medienos gaminiai.....	14
<b>2 pav.</b> Klijuota laminuota mediena (LVL) ir kryžmai klijuota mediena (CLT) .....	15
<b>3 pav.</b> 28 dienų eksperimentinio tyrimo rezultatai.....	17
<b>4 pav.</b> Vihantasalmi - seniausias tiltas Mäntyharju.....	18
<b>5 pav.</b> CLT plokštės sluoksnių veikimo kryptys.....	19
<b>6 pav.</b> Sudėtinis veiksmas tarp medinės sijos ir betono plokštės – a) visas sudėtinis veiksmas, b) dalinis sudėtinis veiksmas ir c) nėra sudėtinio veiksmo.....	20
<b>7 pav.</b> Skirtingi kompozitinės konstrukcijos jungties tipai .....	21
<b>8 pav.</b> Jungtis naudojant įpjovas CLT plokštėje .....	21
<b>9 pav.</b> Jungtis naudojant (GFRP) savisriegius varžtus.....	22
<b>10 pav.</b> Jungtis naudojant plienines plokšteles .....	23
<b>11 pav.</b> Jungtis naudojant savisriegius varžtus įsuktus kampu .....	23
<b>12 pav.</b> Ekvivalentinių gama metodu naudojamų dydžių paaiškinimas. Paveikslėlis kairėje iliustruoja dviejų atskirų elementų geometriją, o paveikslėlis dešinėje iliustruoja sujungtus elementus į bendrą visumą (kompozitą). .....	26
<b>13 pav.</b> Skirtingi normalūs įtempiai ir įtempių pasiskirstymas TCC grindų aukštyje .....	30
<b>14 pav.</b> Medsraigčių jungties stiprumo charakteristikos.....	32
<b>15 pav.</b> Įpjovos jungties stiprumo charakteristikos.....	32
<b>16 pav.</b> Uždaro tūrio kontaktas naudojant nulinio paviršiaus parametrus .....	33
<b>17 pav.</b> Projektuojama kompozitinė perdangos plokštė Dlubal RFEM programoje .....	34
<b>18 pav.</b> Iškarpų pavyzdžiai iš skaičiavimo programos, rodantys kaip modeliuoti kietąją kontaktinę medžiagą.....	35
<b>19 pav.</b> Iškarpų pavyzdžiai iš skaičiavimo programos, rodantys kaip modeliuoti pasirinktą apkrovą .....	36
<b>20 pav.</b> Iškarpų pavyzdžiai iš skaičiavimo programos, rodantys natūraliojo dažnio skaičiavimo parametrus .....	37
<b>21 pav.</b> Iškarpų pavyzdžiai iš skaičiavimo programos, rodantys natūraliojo dažnio skaičiavimo parametrus, pasirenkant apkrovą .....	37
<b>22 pav.</b> Iškarpų pavyzdžiai iš skaičiavimo programos, rodantys natūraliojo dažnio skaičiavimo parametrus, pasirenkant dažnio parametrus.....	38
<b>23 pav.</b> Normalinių įtempių pasiskirstymo skaičiavimų nustatymai programos modulyje „RF-laminate“ .....	38
<b>24 pav.</b> Projektuojamo bandinio charakteristikų nustatymas programos modulyje „RF-laminate“. 39	
<b>25 Pav.</b> Trijų sudėtinių veikimo principų schemas ir atitinkamas deformacijų pasiskirstymas skerspjūviuose .....	44
<b>26 Pav.</b> Normalinių įtempių pasiskirstymo schema iš skaičiavimo programos.....	44
<b>27 Pav.</b> Kompozitinės plokštės apkrovimo schema, prilyginant laboratorinių tyrimų metu atliktiems bandymams.....	46
<b>28 Pav.</b> Laboratorinių tyrimų metu analizuojama kompozitinė perdangos plokštė.....	46
<b>29 Pav.</b> Kompozitinės plokštės laboratorinio tyrimo lenkimo bandymo rezultatai .....	47
<b>30 Pav.</b> Kompozitinės plokštės laboratorinio tyrimo efektyvaus lenkiamojo standumo skaičiavimų rezultatai .....	47
<b>31 Pav.</b> Kompozitinės plokštės rezultatai inžinerinėje skaičiavimo programoje Dlubal RFEM.....	47

<b>32 Pav.</b> Kompozitinės plokštės efektyviojo lenkiamojo standumo skaičiavimų rezultatai pagal gama metodą .....	48
<b>33 Pav.</b> Laboratorinio tyrimo metu naudotos skaičiavimo formulės .....	49
<b>34 Pav.</b> Gama metodu skaičiuojama neutralioji ašis pagal skirtingas formulės .....	49
<b>35 Pav.</b> Normalinių įtempių skaičiavimų palyginimas tarp laboratorinio tyrimo ir baigiamojo projekto metodikų.....	50

## Įvadas

### Temos aktualumas

Šiuo metu kompozitinės konstrukcijos medis-betonas ar plienas medis sulaukia vis daugiau dėmesio dėl ekonomiškumo ir ekologijos. Siekiant statybų rinkoje sumažinti anglies dvideginio (CO<sub>2</sub>) kiekį, kompozitinės konstrukcijos padeda žengti tvirtesnę žingsnį link šio rezultato. Medienos ir betono kompozitinės konstrukcijos yra gerai žinomas inžinerinis produktas, turintis pasaulinę reikšmę.

Medienos ir betono kompozitinės grindų sistemos pirmiausiai buvo sukurtos renovuoti senesnius pastatus, taip pat buvo pritaikytos tiltų statyboje, taisant esamas betonines ar medines konstrukcijas ar atliekant naujas statybas. Tuomet kompozitinę konstrukciją sudarė vientiso skerspjuvio medinė sija išdėstyta atitinkamu atstumu ir viršuje apjungta betonine perdangos plokšte, kai kuriais atvejais vietoj sijų buvo naudojamos medienos plokštės. Todėl vis labiau naudojant šio tipo konstrukcijas, buvo atliekami įvairūs tyrimai ir atrandama daugiau galimybių kaip sukurti tvirtesnę, didesnę ir ekonomišką kompozitinę konstrukciją.

Medienos (CLT) ir betono kompozitas pagerina konstrukcijos efektyvumą, tinkamai išnaudojant kiekvienos medžiagos palankias savybes. Viršutinis betono sluoksnis, pasižymintis dideliu gniuždymo stiprumu, o apatinis medienos sluoksnis, pasižymi dideliu tempimo stiprumu, kuomet konstrukcija yra apkrauta atitinkama apkrova. Kaip ir daugelyje atveju, naudojant medines konstrukcijas yra susiduriama su dinamika, kurią dažniausiai lemia tai, kad mediena yra lengvo tipo konstrukcija. Tačiau kompozitinės medienos ir betono perdangos plokštės yra efektyvesnis sprendimas, nes betonas yra viršutiniame konstrukcijos sluoksnyje ir tai padidina ne tik bendrą konstrukcijos dinamiką bet ir efektyvų lenkiamąjį standumą. Šio tipo konstrukcijos yra kur kas geresnės, nei tradicinės kompozitinės plieninės-betoninės konstrukcijos dėl savaiminio mažo svorio ir greitesnės statybos. CLT medienos ir betono perdangos plokštės pasižymi labai geru tarpusavio stiprumu, gali iki trijų kartų išlaikyti didesnę apkrovą ir iki šešių kartų padidinti lenkiamąjį standumą jei abu elementai yra gerai sujungti.

Šio tipo kompozitinės konstrukcijos yra universalus ir įprastas konstrukcinio dizaino sprendimas pastatų ar tiltų statyboje, taip pat vienas iš būdų sustiprinti esamus statinius. Tačiau statybų pramonėje trūksta žinių apie tokio tipo perdangos plokščių projektavimą ir taip pat dar nėra sukurta jokių tikslų kompozitinių medienos (CLT) ir betono projektavimo standartų. Kol kas kompozitinės konstrukcijos yra skaičiuojamos remiantis "Eurokodas 5. Medinių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios nuostatos. Bendrosios ir pastatų taisyklės". Šio standarto B priede yra pateikiamas gama metodas, pagal kurį galima suskaičiuoti kompozitinės konstrukcijos efektyvųjį lenkiamąjį standumą. Jeigu skaičiavimai yra atliekami teisingai, vadovaujantis gama metodo gautomis reikšmėmis gali būti apskaičiuojama projektuojamos konstrukcijos deformacija ir skerspjuvio įtempiai.

Todėl šiame baigiamajame magistro projekte bus atliekama medžio (CLT) ir betono kompozitinių perdangos lenkiamų elementų stiprumo ir deformacijų analizė sukurtiems kompozitiniams bandiniams, taikant analitinius ir baigtinių elementų programos skaičiavimus.

**Darbo tikslas** – išanalizuoti medžio (CLT) ir betono kompozitinės plokštės jungimo tipus bei skaičiavimo metodus ir pritaikyti juos atliekant lenkiamos kompozitinės plokštės stiprumo ir deformacijų analizę.

## **Uždaviniai**

1. Atlikti literatūros analizę, nustatant kompozitinės konstrukcijos charakteristikas ir elementų tarpusavio jungimo metodus;
2. Atlikti analitinius-rankinius skaičiavimus (gama metodu), remiantis Euro kodu 5, B priedu;
3. Atlikti analitinius-inžinerinius skaičiavimus (Dlubal RFEM 5.25 programa), remiantis šios programos tinklapyje pateikta informacija;
4. Palyginti analitinius-rankinius ir inžinerinės skaičiavimo programos tyrimo skaičiavimus su pasirinkto laboratorinio tyrimo atliktais skaičiavimais.

## 1. Literatūros apžvalga ir analizė

### 1.1. Masinės medienos statyba

#### 1.1.1. Poveikis aplinkai

Atsižvelgiant į pasaulio globalizaciją, išmetamą didelį CO<sub>2</sub> kiekį, svarbu yra naudoti tokias statybines medžiagas, kurios turi mažesnį indelį pasaulinei klimato kaitai, lyginant su tradicinėmis medžiagomis sunaudojančiomis daug energijos kiekio. Tradicinėmis medžiagomis yra laikomos betonas ir plienas, tai medžiagos, kurios palieka labai didelį anglies pėdsaką, net 5 procentus visos CO<sub>2</sub> emisijos. Siekiant išspręsti ir sustabdyti šią problemą, masinės medienos konstrukcijos gali tapti pakaitinėmis medžiagomis ir atlikti svarbu vaidmenį šių dienų statybose. Medinių konstrukcijų statyba yra kur kas lengvesnė ir greitesnė, todėl reikalauja mažiau darbo sąnaudų ir mechanizuotos technikos. Dėl mažesnės šiltnamio efekto sukeliančių dujų emisijos gamybos ir statybos metu bei anglies sekvestikacijos masinė mediena yra žinoma kaip aplinkai nekenksmingas gaminy [1].

#### 1.1.2. Masinės medienos konstrukcijos

Masinė medienos statyba – tai statyba, kurioje naudojami dideli kiekiai kompozitinės medienos. Tokios medžiagos yra didelės medžio masyvo grindų, sienų plokštės ir stogo konstrukcijos. Masinės medienos gaminiai lyginant su betoniniais ir plieniniais pastatų karkasais yra pranašesni atsparumui nuo žemės drebėjimo, turi geresnę estetiką, pasižymi geresniu CO<sub>2</sub> rodikliu. Nors medinės konstrukcijos turi pranašumu, tačiau dėl tam tikrų apribojimų kaip atsparumas ugniai ar stiprumas, šios konstrukcijos pirmiau buvo naudojamos tik mažaukštei pastatų statybai, ne aukštesniems kaip aštuonių aukštų pastatams. Tačiau didėjant masinės medienos gaminiu populiarumui, tokių kaip klijuota mediena (GLT), vinimis laminuota mediena (NLT), klijuota laminuota mediena (LVL), laminuota mediena (LSL) ir kryžmai sluoksniuota mediena (CLT), masinės medienos statyba išsiplėtė ir pritaikyta daugiaaukščių pastatų statybai. Dėl greitesnės ir lengvesnės statybos bei estetiškumo, masinės medienos statyba tapo didele alternatyva statybų rinkoje [1].



1 pav. Įvairios gamybos rūšies medienos gaminiai

### 1.1.3. Medžiagos savybės

Masinės medienos plokštės susideda iš lygiagrečių arba stačiakampių medienos sluoksnių, kurie susijungę veikia kaip bendra medienos plokštė. Gretimi medienos sluoksniai suteikia stabilumo ir leidžia plokštėms išlaikyti apkrovas tiek vertikalia, tiek horizontalia kryptimi. Taip pat dėl stačiakampės medienos sluoksnių išdėstymo, plokštės pasižymi maža deformacija ir dideliu šlyties stiprumu. Taip pat šios konstrukcijos pasižymi geromis akustinėmis ir seisminėmis savybėmis [1].

### 1.1.4. Klijuota laminuota mediena (LVL)

Statybinės klasės klijuota laminuota mediena turi nemažai privalumų. Esant natūraliems trukumams, kaip įtrūkimai, įdubimai ar kryžminiai grūdėliai, kurie atsitiktinai pasiskirsto ant faneros, nesumažina medienos stiprumo, jis išlieka vienodas. LVL plokštės yra atsparesnės oro sąlygoms, nes yra gaminamos laminuojant ir klijuojant medieną vandeniui atspariais klėjais. LVL plokščių matmenys yra laivai pasirenkami dėl savo specialaus gamybos būdo ir nėra ribojami kaip pavyzdžiui medinių rąstų skersmenys. Šių plokščių apdirbimo būdas yra patogus, jas kaip ir medieną galima kalti, gręžti, pjauti ir kt. Dėl savo sluoksniuoto tipo šios konstrukcijos turi mažesnę tikimybę išsikraipyti todėl padidėja stabilumas [2].

LVL tipo plokštės labiau naudojamos apkrovas laikyti išilgine jos kryptimi [3].

### 1.1.5. Kryžmai klijuota mediena (CLT)

Kryžmai klijuota mediena plačiai taikoma masinės medienos statyboje. Tokio tipo plokštės yra sudaromos nuo trijų iki penkių kryžmai klijuotų sluoksnių  $90^\circ$  kampu. Taip suklijuota plokštė suteikia elementui standumo bei įgalina plokštės darbą dvejomis kryptimis. Kai kuriais atvejais CLT plokštėms yra naudojama kelios medienos rūšys pavyzdžiui eglė-pušis-egle, plokštės savybės išlieka panašios, nes mišrios medienos ryšys sąlyginai yra vienodų savybių [4]. CLT plokštės yra tinkamos naudoti plokštumoje arba ne plokštumoje, pavyzdžiui, sienose, lubose, stoguose ar sijose. Būtent šio tipo medinės konstrukcijų pagalba buvo įmanoma pastatyti kur kas aukštesnius statinius. Didžioji dalis CLT plokščių gaminamos yra Europoje [5].

Pirmasis 9 aukštų CLT pastatas buvo pastatytas Londone, 2009m. pavadintas Stadhaus building. Pastatas buvo suformuotas korinės struktūros, kuri atspari šoninėms apkrovoms ir gravitacijai. Pastatas yra vienos valandos ugniai atsparumo laipsnio, kuri padidina gipso kartono plokščių apsauga [6].



2 pav. Klijuota laminuota mediena (LVL) ir kryžmai klijuota mediena (CLT)

## **1.2. Betono panaudojimas statyboje**

### **1.2.1. Betono apžvalga**

Betonas yra plačiai naudojama medžiaga įvairiuose statybos darbuose, kadangi medžiaga turi daug privalumų, nuo prieinamų žaliavų skirtingose pasaulio vietose iki bendros priimtinos kainos rinkoje [7]. Betonas taip pat svarbus yra ir dėl savo didelio mechaninio stiprumo, medžiagos patvarumo, tankios mikro struktūros ir mažo pralaidumo. Tačiau, kad ir kiek ši medžiaga yra naudinga ji turi ir trūkumų. Betono gamybai sunaudojama labai daug gamtinių resursų, pradedant nuo žvyro, vandens ir cementui gaminti reikalingų medžiagų, kuomet vien tik cementui kasmet pagaminti reikia 2,7mlrd. tonų žaliavų [8]. Vien portlandcemenčio gamybą yra žaliava reikalaujanti daug energijos gamybai, kurios metų į atmosferą išmetamas didelis anglies dvideginio CO<sub>2</sub> kiekis. Skaičiuojama, kad pagaminti 1 tonai portlandcemenčio yra sunaudojama 2,8 tonų žaliavų, įskaitant įvairias kitas medžiagas ir kurą[9]. Įvairūs šaltiniai rodo, kad net 8% pasaulio metinio CO<sub>2</sub> kiekio sudaro cemento pramonė [10]. Kita problema susijusi su cemento gamyba, tai gamtos išteklių naudojimas ir jos ardymas, kadangi norint tiekti cementui svarbias žaliavas – molį ir klinkerį, tenka kasti naujus karjerus ir taip ardyti laisvus žemės plotus. Taip pat norint gaminti cementą tenka sunaudoti labai didelį energijos kiekį, norint pagaminti vieną toną cemento reikia 110-120kWh energijos. Toks platus betono panaudojimas statybose, gali būti labiau reikšmingas ateityje, todėl svarbu yra pagalvoti apie alternatyvas. Viena iš alternatyvų, kuri padėtų sumažinti betono kiekius statybose yra kompozitinės konstrukcijos, tokios kaip betonas-medis, betonas-plienas. Skirtingų medžiagų kompozitai gali sumažinti betono kiekį jose o tai reikštu mažesnes šios medžiagos sąnaudas statybose [11].

### **1.2.2. Betono rūšys kompozitinėse konstrukcijose**

Kompozitinėse konstrukcijose dažnai naudojamas normalaus svorio betonas, sutvirtintas nedidelių kiekiu plienine armatūra, kad betone neatsivertų plyšiai, nes betonas džiūdamas traukiasi [12]. Taip pat įrodyta, kad betonas armuotas plieno pluoštu, kompozitinėse konstrukcijose sumažina tikimybę, kad gaisro sąlygomis betonas atskilinės [13].

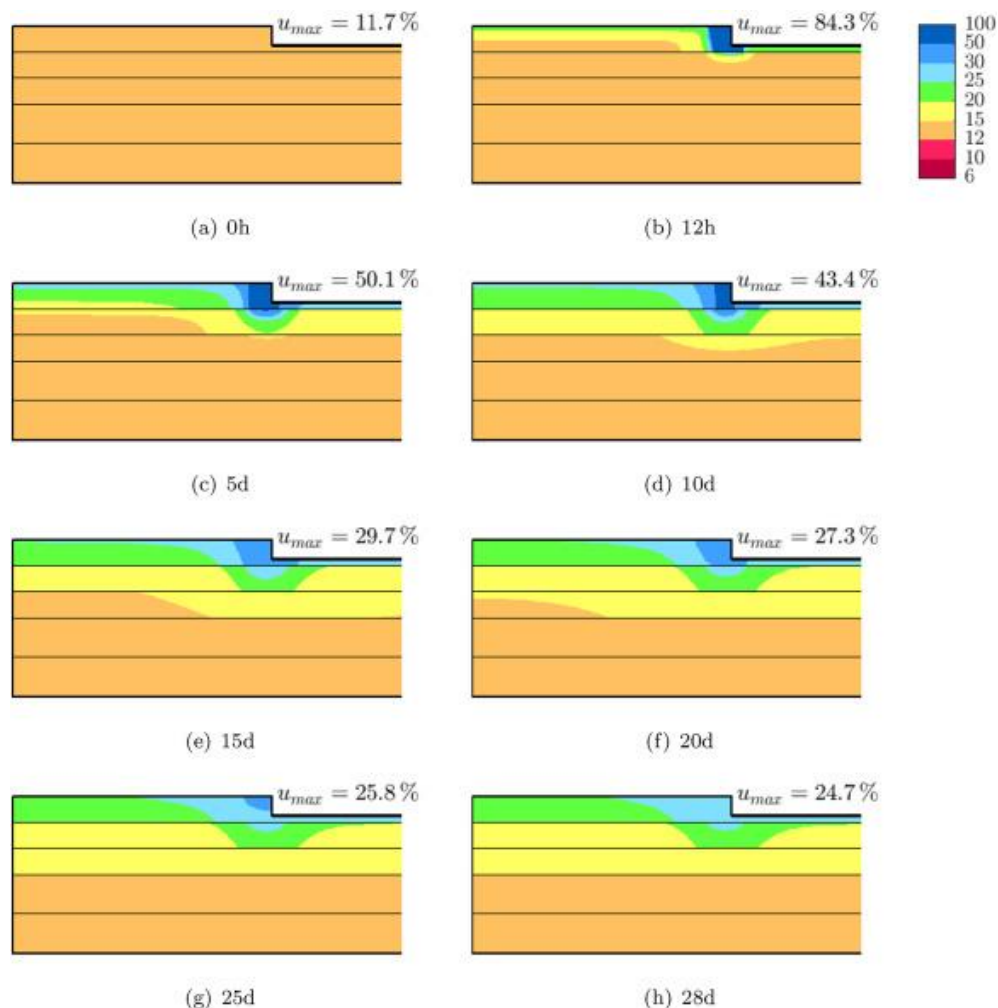
Ultra-High Performace Fiber Inforced Concrete (UHPFRC) - itin didelio našumo pluoštu armuotas betonas, kuris pasižymi dideliu jungo modulių  $E_c = 50-60$  GPa ir gniuždamuoju stipriu  $f_c = 120-180$  MPa. Dėl savo gerų charakteristinių savybių šio tipo betonas labai tinka kompozitinėms konstrukcijoms, nes užpilamas betono sluoksnis yra labai plonas ir lengvas, nereikalaujantis papildomos armatūros gaminyje [43]. Naudojamas ir lengvasis betono mišinys, kuris pagamintas iš cemento, silicio smėlio, natūralių ir dirbtinių stambių užpildų, silicio dioksido dulkių arba lakiųjų pelenų ir dideliu diapazonu vandens. Toks betonas labai gerai pasižymi lengvu apdirbamumu ir mažu tankiu. Kompozitinėms konstrukcijoms tinkamesnis yra C15-C35 klasės lengvasis betonas. Naudojant lengvąjį betoną, jungtys kompozitinėje konstrukcijoje privalo būti arti viena kitos, nes lengvojo betono lenkiamasis standumas yra kur kas mažesnis lyginant su normalaus svorio betonu [44].

### **1.2.3. Betono drėgmės įtaka konstrukcijai**

Dažnai norint suformuoti kompozitines konstrukcijas, betono masė yra liejama tiesiai ant paruošto gaminio, tokiu būdu yra suformuojama kompozitinė konstrukcija. Tačiau šviežiai užpiltas betonas išskiria drėgmę, kurią gali sugerti konstrukcija esanti po juo. Todėl siekiant apsaugoti gaminį yra dedama skiriamoji folija, kuri kiek sulėtina kompozitinės konstrukcijos gamybos laiką, o taip pat gali



paveikti neigiamai, naudojant tam tikras šlyties jungtis konstrukcijose. Buvo atliktas eksperimentinis tyrimas, kurio metu drėgmės kiekis matuojamas 28 dienas po betono mišinio užpylimo. Naudoti įvairūs betonai kaip savaime susitraukiantis betonas, įprastas betonas, mažai susitraukiantis betonas ir kt. Betonas pagamintas naudojant vandens ir cemento santyki 0,6 lėmė didžiausią drėgmės susigėrimą į medinę plokštę. Todėl padaryta išvada, kad naudoti įpjuvas medinėje konstrukcijoje kaip šlyties jungtis netinka, nes didesnis nei 20% medienos drėgnis pažeidžia šlyties charakteristikas [45].



**3 pav.** 28 dienų eksperimentinio tyrimo rezultatai

Žinoma drėgmės įtaka kompozitinėse konstrukcijose sumažinti galima, sumažinus cemento ir vandens santykį, santykinę betono drėgmę, naudojant įvairius superplacifikatorius arba greitai kietėjanti cementą betono liejimui. Tačiau dar nėra tiksliai žinoma kaip galima kontroliuoti vandens absorbciją į medines konstrukcijas, kuomet ant jų yra pilamas betonas, todėl ateityje yra labai svarbu atlikti šios srities tyrimus [44].

### 1.3. Medienos ir betono kompozitai

#### 1.3.1. Istorija

Medienos ir betono kompozitinės konstrukcijos dažniausiai yra projektuojami horizontalaus tipo elementai, galintys laikyti apkrovas viena kryptimi, veikiant vienašiam konstrukcijos lenkimui. Sujungiant šias dvi medžiagas viena iš jungčių tipų, siekiant bendro konstrukcijos darbo [14].

Kadangi betonas nepasižymi dideliu stipriu tempiant, medienos elementai dažniausiai yra apatinėje kompozito pusėje, kur perima didžiausias tempimo jėgas, o betonas pasižymintis stiprumu gniuždant yra viršutinėje kompozito dalyje. Tačiau yra atveju, kuomet kompozitinėje konstrukcijoje, betonas yra apačioje [15] .

Medienos ir betono kompozitinės konstrukcijos buvo pradėtos kurti maždaug prieš 100 metų Vokietijoje, siekiant rekonstruoti-sustiprinti senas medines grindis. Paulius Mülleris patentavo kompozitinių grindų sistemą, kurią sudarė vertikalios medinės lentos su betono sluoksniu viršuje. Kitas patentas buvo gautas 1939m. Otto Schaub autoriaus, kuris sukūrė kompozitinę plokštę, kurios elementai tarpusavyje buvo sujungti H arba Z tipo formos plieninėmis jungtimis [14]. Nors daugelyje Europos valstybių medienos-betono kompozitinės konstrukcijos buvo naudojamos ir plečiamos grindų srityje, 1930 m. Amerikoje buvo sukurti trumpo ir vidutinio tarpatramio kompozitiniai tiltai, kadangi tuo metu šalyje buvo plieno stygius gelžbetoniniams tiltams statyti. Kompozitinių tiltų statyba sparčiai plito ir jau 1960m. išplito ir kitose pasaulio šalyse kaip Naujoji Zelandija ir Australija, kuriose manoma, kad šio tipo tiltus pastatė JAV kariuomenė. Į Europą, kompozitinės tiltų konstrukcijos pasirodė tik 1990m [16] . Šaltinio duomenimis JAV vis dar eksploatuojama daugiau kaip 1400 medienos ir betono kompozitinių tiltų, o seniausiai eksploatuojamas tiltas yra 84-erių metų [46].



**4 pav.** Vihantasalmi - seniausias tiltas Mäntyharju

### **1.3.2. Kompozitinių medienos ir betono konstrukcijų elementų charakteristikos**

Estetika ir patogumas – medinės kompozitinės konstrukcijos elementų dalys dažniau yra paliekamos išorinėje pusėje, kur būtų labiau matomos, visa tai dėl to, kad architektūriniu požiūriu, medinės konstrukcijos yra labiau pageidaujamos dėl savo natūralumo, nei betono elementai. Lyginant betoninius ir medinius konstrukcinius elementus, jų mechaninės charakteristikos yra panašios, o bendras kompozito svoris yra mažesnis, lyginant su kitomis vienalytės medžiagos konstrukcijomis. Būtent ši savybė palengvina medžiagų transportavimą į statybvieta [17].

Stiprumas, standumas ir lankstumas – medienos ir betono kompozitinės konstrukcijos pasižymi labai geru tarpusavio stiprumu, gali iki trijų kartų išlaikyti didesnę apkrovą ir iki šešių kartų padidinti lenkiamąjį standumą jei abu elementai yra gerai sujungti. Konstrukcijos lenkiamasis standumas – tai elemento atsparumas deformacijoms lenkiant arba kitaip tariant nuo šio standumo priklauso kiek konstrukcija įlinks, veikiant skirtingai lenkimo apkrovai. Didesnis kompozitinės konstrukcijos elementų standumas pasiekiamas dėl to, kad betono skirtingai nei medienos tamprumo modulis yra didesnis. Taip pat užtikrinus tinkamą jungtį tarp dviejų konstrukcijos elementų galima pagerinti kompozito plastiškumą, tačiau ši jungtis turi būti standi ir tvirta [18].



5 pav. CLT plokštės sluoksnių veikimo kryptys

Garso izoliacija ir vibracijos –Kompozitinės konstrukcijos yra įvairių tipu, todėl būtent grindų tipo konstrukcijos pasižymi geromis garso izoliacijos charakteristikomis ir mažesniu jautrumu į vibracijas veikiančias grindis. Tiek garso, tiek vibracijos savybės yra geresnės todėl, kad kompozitinė konstrukcija pasižymi didesniu savo stiprumu ir standumu lenkiant [19].

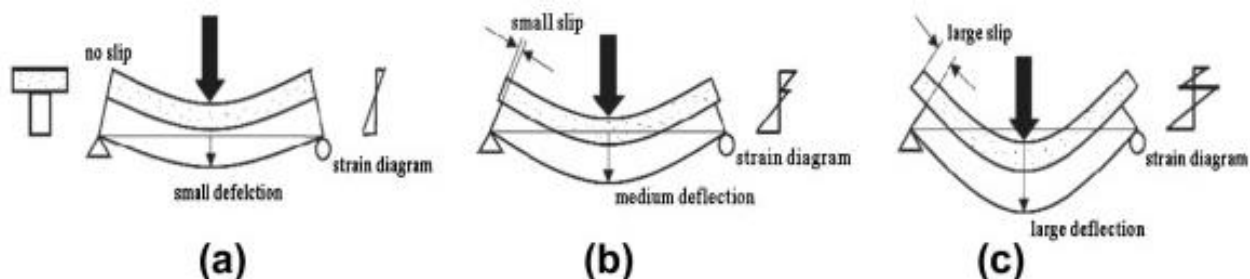
Gaisro sąlygos – kompozitinių konstrukcijų projektavime, gaisro sąlygos yra svarbus aspektas. Kompozitinės konstrukcijos skerspjūvis gaisro metu kinta, dėl medienos elementų apanglėjimo ir betono skilimo. Tai gali sumažinti elementų skerspjūvio šilumos izoliaciją ir skerspjūvio efektyvumą [20]. Medienos ir betono kompozitinėje konstrukcijoje labai svarbi jungtis tarp šių dviejų elementų, nes veikiama ugnies konstrukcija praranda savo standumą ir stiprumą. Todėl norint užtikrinti kompozitinės konstrukcijos atsparumą ugniai reikia net tik parinkti tinkamus elementų skerspjūvius, bet ir apskaičiuoti jungties stiprumo ir standumo jungtis veikiant gaisro metu [21].

Ekologiškumas – lyginant kompozitines medienos ir betono konstrukcijas su gelžbetoniniais konstrukciniais elementais, šiose konstrukcijose sunaudojama mažiau betono ir žinoma daugiau medienos, kurie suteikia ekologinius pranašumus: mediena yra atsinaujinantis gamtos išteklius, naudojant kompozitines konstrukcijas gaunamas mažesnis anglies dioksido CO<sub>2</sub> pėdsakas [17].

### 1.3.3. Mechaniniai principai

Norint užtikrinti bendrą medienos ir betono kompozitinės konstrukcijos darbą, reikia sumažinti praslydimą tarp medžio ir betono elementų, kai konstrukcija yra lenkiama. Naudojant skaitinę analizę, buvo atlikti tyrimai, siekiant nustatyti praslydimą kompozitinėse medienos ir betono konstrukcijose.

Kuomet nėra slydimo, tarp dviejų elementų susidaro nenutrūkstamas įtempių ir deformacijų profilis, laikoma, kad konstrukcija yra standi. Esant mažam slydimui, laikoma, kad konstrukcija yra dalinai standi. Kai įtempių ir deformacijų profiliai nebėra ištisiniai išilgai elementų skerspjūvio ir slydimas tarp elementų didelis, laikoma, kad konstrukcija nėra standi [22].



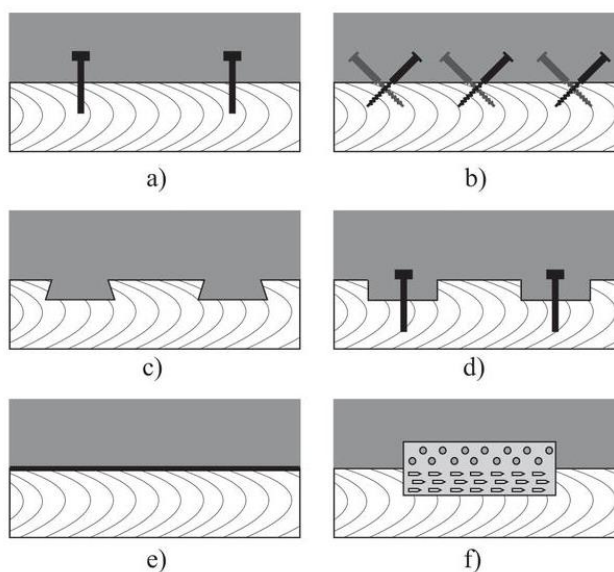
**6 pav.** Sudėtinis veiksmas tarp medinės sijos ir betono plokštės – a) visas sudėtinis veiksmas, b) dalinis sudėtinis veiksmas ir c) nėra sudėtinio veiksmo.

#### 1.3.4. Medienos ir betono kompozito teigiamos savybės

Yra nemažai medienos ir betono kompozito privalumų, lyginant su medinėmis ar gelžbetoninėmis grindų konstrukcijomis. Pagrindinės jų yra: padidėjęs grindų standumas, masė ir mažesnė vibracija, dėl ko sumažėja deformacijos. Naudojant izoliacinį sluoksnį tarp medienos ir betono, pagerinamos akustinės savybės. Didesnis atsparumas ugniai. Taip pat pagerina šiluminės pastato savybes, dėl ko pastatas mažiau sunaudoja šilumos energijos. Galimybė naudoti-taikyti medinės konstrukcijos apatinę dalį patalpų luboms, kaip architektūrinį privalumą. Mažesnės apkrovos numatytiems pamatams [23].

#### 1.4. Medinės jungtys / šlyties jungties tipai

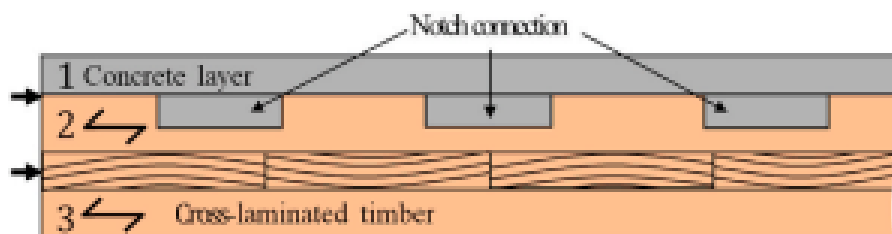
Medienos ir betono kompozitinės konstrukcijos susideda iš medinės konstrukcijos gaminio apačioje ir gelžbetoninės plokštės gaminio viršuje. Norint, kad abu elementai būtų standus ir užtikrintų bendrą konstrukcijos stiprumą, svarbu užtikrinti gerą šlyties jungtį, kuri apjungtu plokštes kaip bendrą kompozitinę konstrukciją. Tad iki šiol buvo sukurta nemažai skirtingų elementų būdu kuriuos galima analizuoti [24].



7 pav. Skirtingi kompozitinės konstrukcijos jungties tipai

#### 1.4.1. Jungtis naudojant įpjovas medienos elemente

Įpjovos medinėje konstrukcijoje, dažnai vadinamos dantyta jungtimi, kadangi šios jungtys padarytos išpjaunant arba išgręžiant griovelius medienos plokštės arba sijos viršuje, kuri vėliau yra užliejama betono mišiniu. Šio tipo jungtys, dažnai laikomos efektyvesnėmis konstrukcinėmis savybėmis ir reikalaujančios mažesnių išlaidų, nei dauguma plieninių tvirtinimo detalių. Prieš išsiunčiant medinius elementus į statybvieta, įpjovos yra išpjaunamos gamykloje naudojant kompiuterinio skaitmeninio valdymo stakles (CNC). Dantytos jungtys užtikrina mažą tarp sluoksnių slydimą ir atsparumą šlyčiai nuo betono ir medienos kontakto. Dėl to įpjovos dažnai yra išdėstomos išilgai sijos dideliu žingsniu [25]. Minimaliausias įpjovos plotis yra 150 mm, o gylis nuo 20 mm iki 30 mm [14]. Schönborn ir kiti, pasiūlė, kad įpjovos jungtys įpjovos jungtys kompozitinėje konstrukcijoje, turi būti bent 310 mm atstumu viena nuo kitos [26]. Medienoje išpjauti įpjovos grioveliai gali būti apvalios, stačiakampės, trikampio ar trapecinės formos [27]. Taip pat gali būti naudojamos ir mikro įpjovos technologija, kuomet medinio elemento paviršiuje išfrezuojami milimetru dydžio įdubimai [28].



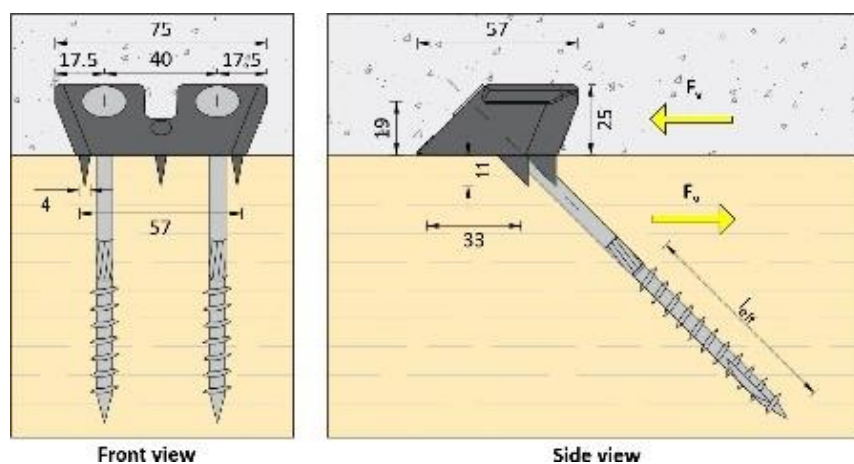
8 pav. Jungtis naudojant įpjovas CLT plokštėje

#### 1.4.2. Jungtis naudojant stiklo pluošto sustiprinto polimero (GFRP) savisriegius varžtus

Montuojant įvairius varžtus medinės konstrukcijos paviršiuje siekiant užtikrinti gerą dviejų elementų darbą dažnai pasitaiko įvairios problemos: montuojami varžtai sukami su netinkamu pokrypiu į medieną, paliekamas nepakankamas inkaravimo gylis betono sluoksnyje, neteisingas varžto



įsiskverbimas į medienos sluoksnį. Todėl buvo sukurti naujos kompozitinės konstrukcijos sujungimo elementai GFRP savisriegiai varžtai. Šio tipo varžtai užtikrina teisingą varžto įsukimo kampą ir ilgį į medinę konstrukciją ir sumažina įtempių koncentracijos sąsają tarp tvirtinamo elemento ir betono. GFRP elementai yra skirti jungti dviem savisriegiems 8 mm skersmens varžtams. Šio tipo elementai pasižymi tuo, kad yra pritaikyti kaip armatūros tinklelio laikiklis, nes elemente tarp varžtų yra paliktas 8 mm pločio tarpas, kad atsiremtu ir prisitvirtintu armatūros tinklelis [29].



9 pav. Jungtis naudojant (GFRP) savisriegius varžtus

#### 1.4.3. Jungtis naudojant inkaruojant strypus

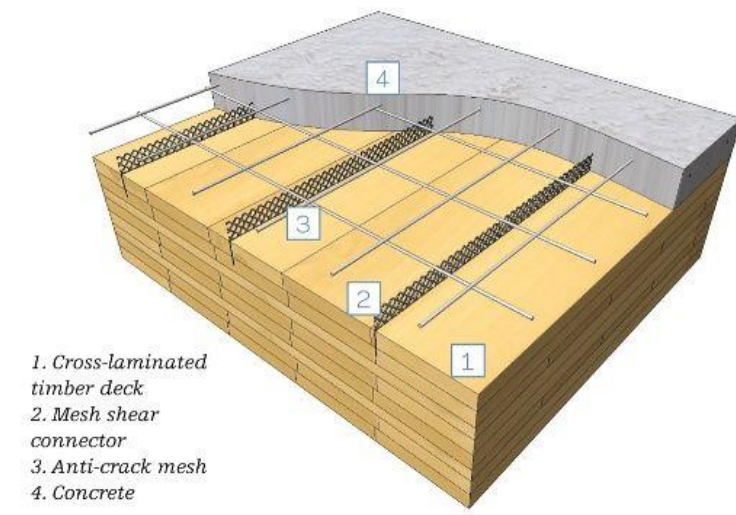
Šiame metode yra naudojami sriegti strypai M6 arba M12 dydžio arba plieninės armatūros strypai M10 dydžio. Atliekant tyrimą buvo sukurtos cilindrinės jungtys, išgręžiant medienos elemente cilindrinę skylę, ten įstačius plieninį strypą ir užpildant betonu. Plieninis strypas yra išsikišęs iš medinio elemento tiek, kad galėtų inkaruotis betono plokštėje ir mažindamas šlytį, stiprintu kompozito standumą. Atlikti tyrimai parodė, kad jungties standumas priklauso nuo išgręžtos skylės skersmens ir varžto dydžio [30].

#### 1.4.4. Jungtis naudojant klijus

Klijuotos kompozitinės medienos ir betono konstrukcijos turi didelius privalumus stiprumui ir standumui, reikalaujančios mažesnio apdirbimo ir pasižyminčios didesniu patvarumu. Teigiama, kad klijavimas yra tinkama alternatyva lyginant su mechaninėmis kompozito jungtimis. Tačiau šio tipo jungtys turi ir neigiamų savybių, kaip prastas sukibimas tarp konstrukcinių elementų, ribota informacija apie atsparumą ugniai, skirtingos reakcijos tarp elementu [31]. Buvo ištirta, kad gaminant klijuotą jungti kompozitinei konstrukcijai turi būti naudojamas standartinis betonas, kuris pilamas iš mažo aukščio vienodai keliose vietose, kad nesusidarytu per didelis klijų pasislinkimas [28].

#### 1.4.5. Jungtis naudojant plienines plokšteles

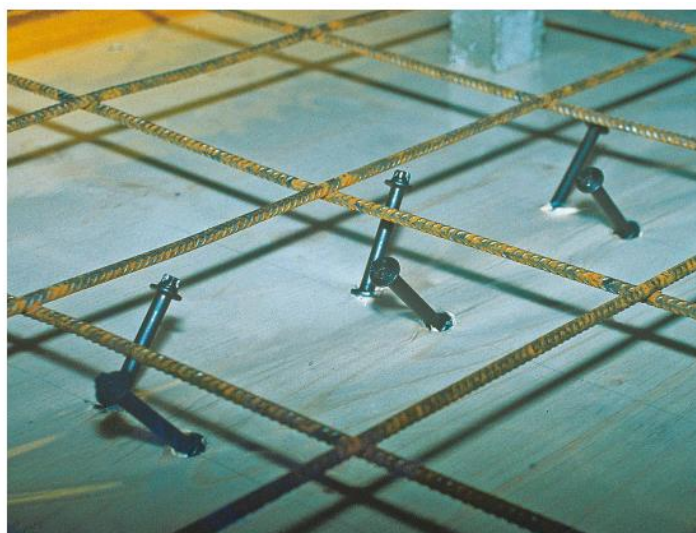
Taikant šį jungimo metodą, plieninės plokštelės gali būti klijuojamos į mediniame elemente padarytas įpjovas naudojant epoksidinius klijus. Šiame tyrime plokštelės naudojamos S235 plieno klasės, jos yra karštai cinkuotos, 5 mm storio su 10 mm skersmens skylėmis, kas 15 mm. Plokštelės įterpiamos į medinę įpjovą 40 mm, likęs 50 mm aukštis paliekamas inkaruotis kartu su betonu. Taikant šį metodą, galima naudoti plieninius armatūros strypus, praveriant juos per plieninės plokštelės ertmes, kad padidėtų plokštelių sukibimas su betonu [32].



**10 pav.** Jungtis naudojant plienines plokšteles

#### 1.4.6. Jungtis naudojant sraiginius / savisriegius varžtus

Medinėje statyboje dažnai yra naudojami sraiginiai varžtai. Šiuos varžtus nesunku įsigyti, jie yra įvairių dydžių ir nekainuoja didelių kaštų. Todėl dažnai yra naudojamos medienos ir betono konstrukcijose kaip jungiamasis elementas. Varžtai gali būti sukami nuožulniai arba statmenai medienos atžvilgiu. [34] Tyrimai rodo, kad kuo mažesniu kampu sukamas sraigtinis varžtas į medinį elementą, tuo jungties standumas didėja. Todėl daugiausiai praktikoje sutinkamas būdas, kuomet sraiginiai varžtai yra sukami  $45^\circ$  kampu. Taip pat yra būdas, kuomet sraiginiai varžtai yra sukami vienas priešais kitą, sudarant kryžminę tipo jungtį. Toks išdėstymas labiau padidina varžtų standumą ir atsparumą, kuomet vienas jų veikimas šlyties ir gniuždymo įtempių o kitas šlyties ir tempimo įtempių [33].



**11 pav.** Jungtis naudojant savisriegius varžtus įsuktus kampu

### 1.4.7. Jungčių analizė Lietuvoje

Lietuvoje taip pat yra atlikti tyrimai nustatant jungčių standumą ir stiprumą naudojant tam tikrus elementų jungimo metodus. Vilniaus Gedimino technikos universiteto dėstytojai atliko medienos ir betono jungčių su įžambiniais įsriegtais medsraigčiais analizę. Jos metu tyrėjai pagal Johanseno takumo teoriją atlikinėjo tyrimus, nustatyti kompozitinių bandinių jungties galios reikšmę ir lygino jas su teorinėmis apskaičiuotomis reikmėmis. Taip pat vienas iš tyrėjų Saulius Kavaliauskas yra parengęs daktaro disertaciją tema: „Kompozitinių medinių-betoninių sijų tarpsluoksniu įžambinės medsraigtinės jungties elgsena“. Galimai apie medienos ir betono jungčių analizę buvo rašoma ir Kauno technologijos universiteto dėstytojų: Algirdo Baltrušaičio ir Mindaugo Kasiulevičiaus straipsnyje. Jie 2001 m. betonas ir gelžbetonis konferencijos metu parengė pristatymą – kompleksinės medienos-gelžbetonio perdangos [35].

### 1.5. Analitiniai skaičiavimo metodai

Medienos ir betono kompozitinės konstrukcijos dėl savo jungimo būdų dažnai reikalauja įvairių skaičiavimo metodų. Toks jungčių skaičiavimas yra aprašomas Europos standarte Eurokodas 5, 1-1 dalies B priede. Taip pat yra nemažai teorijų, kurios apima skirtingus jungčių budus ir jų skaičiavimo metodus. Todėl šiame skyriuje bandysime apžvelgti kelis skaičiavimo metodus.

#### 1.5.1. Gama skaičiavimo metodas

Gama metodas kitaip dar vadinamas Möhler metodu, buvo analitiškai sprendžiamas darant prielaidą, kad šlyties ir slydimo ryšys yra tiesinis. Šis modelis buvo priimtas europos standarto Eurokodas 5, esančiame B priede, projektuojant kompozitines medines ir betonines konstrukcijas gama metodu [36]. Metodas yra taikomas skaičiuoti dviem ar trimis konstrukciniams sluoksniams sudarant kompozitą bei nusakant kompozitinės konstrukcijos standumą lenkiant [37]. Norint apskaičiuoti efektyvųjį lenkiamąjį standumą yra naudojama formulė:

$$EI_{eff} = \sum E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2 \quad (1.5.1.1)$$

Čia jungties efektyvumo koeficientas skaičiuojamas pagal kitas dvi formules:

$$\gamma_i = \left( 1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i \cdot S_i}{k_s \cdot l^2} \right)^{-1} \quad (1.5.1.2)$$

Jungties efektyvumo skaičiavimas pirmame-antrame sluoksnyje

$$\gamma_i = \left( 1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i \cdot h_i^*}{l^2 \cdot G_{90} \cdot b} \right)^{-1} \quad (1.5.1.3)$$

Jungties efektyvumo skaičiavimas trečiame sluoksnyje

Taikant šias formules yra apskaičiuojamas kompozitinės konstrukcijos efektyvusis lenkiamasis standumas ir laikomoji galia. Gama metodas yra paremtas tiesinio tamprumo teorija ir yra sukurtas naudojant diferencialines lygtis, gautas pačio Möhlerio 1956 metais [38]. yra nustatyta, kad skaičiuojant efektyvųjį lenkiamąjį standumą  $EI_{eff}$  yra gerai apskaičiuojamas įlinkis esant įvairiomis apkrovomis [39].



### **1.5.2. Šaldytos šlyties metodas (Frozen Shear Method)**

Užšaldytos šlyties jėgos metodas, skirtas apskaičiuoti kompozitiniu medienos ir betono konstrukcijų gedimo apkrovas, kuomet pirmosios jungtys elemente pasiekia plastiškumą. Pagrindinė šio metodo mintis yra užšaldyti šlyties jėgas jungtyse, kai pirmoji pradžioje esanti jungtis pradeda dirbti. Dėl to yra daroma prielaida, kad konstrukcijos tarpsluoksnius yra visiškai plastiškas, nors plastiškumas nustatomas skirtingai pagal kiekvieną jungtį veikiančia apkrova. Šis metodas buvo sukurtas Van Der Linden'o (1999) [40].

### **1.5.3. Elasto-plastinis modelis (Elasto-Plastic Model)**

Šis analitinis metodas buvo sukurtas medienos ir betono kompozitinių sijų kaištinių jungčių laikomajai galiai apskaičiuoti. Modelyje daroma prielaida, kad jungtis yra standi, todėl nereikia atsižvelgti į slydimo modulį atliekant skaičiavimus. Šis metodas yra analogiškas gamma metodui, kadangi projektuojant tempiamą medieną ir gniuždomą betoną yra daroma prielaida, kad medžiagų elgsena yra linijinė-elastinga. Taikant šį analitinį metodą galima įvertinti tris skirtingus atvejus, kai kompozito tarpsluoksnius yra iš dalies sujungtas, visiškai sujungtas ir tarpsluoksniai nesujungti [41].

### **1.5.4. Inkrementinis metodas (Incremental Method)**

Analitinis metodas buvo sukurtas nustatyti medinių ir betoninių kompozitinių konstrukcijų su kaliomis jungtimis jų šlyties ir deformacijų stiprumą esant daliniam gedimui ir sumažintam jungčių skaičiui [42].

## **1.6. Literatūros analizės apibendrinimas**

Išanalizavus įvairius literatūros šaltinius galima teigti, kad medienos CLT ir betono kompozitinės perdangos yra naudojamos daugelyje pasaulio šalių, tačiau kiek mažiau Lietuvoje. Atlikta nemažai tyrimų ir įvairių skaičiavimų kompozitinėms plokštėms, nustatant įvairius jungimo būdus lenkiant, tačiau norint tiksliau žinoti kaip veikia šio tipo kompozitinės plokštės reikia atlikti daugiau naujų bandymų. Lietuvoje, kol kas tokio tipo kompozitinės plokštės nėra nagrinėjamos, tačiau sąsajų nagrinėjant panašius kompozitus yra. Todėl norint integruoti šias kompozitines plokštes mūsų šalyje, pirmiausia reikia atlikti tyrimus o tuomet analitinius skaičiavimus.

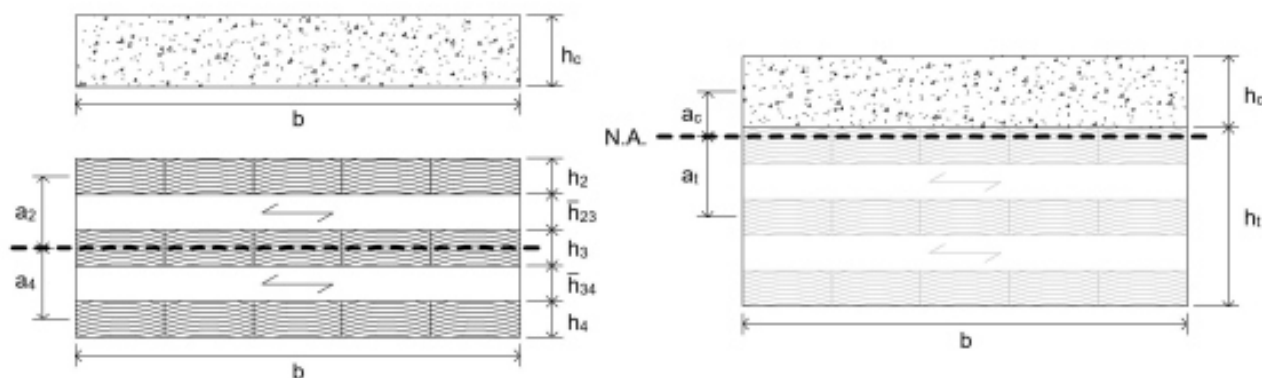
## 2. Medžio (CLT)-betono kompozitinių konstrukcijų skaičiavimo metodologija

### 2.1. Skaičiavimai pagal Eurokodo 5 prielaidas

Šiame standarte pateikiamas efektyviojo lenkiamojo standumo skaičiavimas, dar kitaip vadinamas gama metodu. Šis projektavimo metodas yra pagrįstas tiesinio tamprumo teorija pagal šias prielaidas (LST EN 1995-1-1):

1. Projektuojamos dviatramės karpytos sijos, kurių tarpatramis lygus  $l$ .
2. Atskiri elementų sluoksniai yra sujungti vienas su kitu mechaninėmis jungėmis, šių jungių standumo modulis apibrėžiamas  $K$ .
3. Tarpas tarp numatytų jungių apibrėžiamas  $s$  yra tolygus arba kintantis nuo skersinės jėgos,  $s_{min}, s_{max} \leq 4s_{min}$  (EN 1995-1-1).

Efektyvus kompozitinės plokštės lenkimo standumas yra analizuojamas atskiriant betoną nuo CLT medienos plokštės ir apskaičiuojamas efektyvusis lenkiamasis standumas kiekvienai daliai atskirai. Tuomet gavus rezultatus, kiekvienos dalies efektyvusis lenkimo standumas sujungiamas į ekvivalentinį lenkimo standumą, naudojant ekvivalentinį gama metodą dviem mechanškai sujungtiems elementams.



**12 pav.** Ekvivalentinių gama metodu naudojamų dydžių paaiškinimas. Paveikslėlis kairėje iliustruoja dviejų atskirų elementų geometriją, o paveikslėlis dešinėje iliustruoja sujungtus elementus į bendrą visumą (kompozitą).

#### Betonas

Betono sluoksnio lenkiamasis standumas  $(EI)_c$ , apskaičiuojamas pagal formulę:

$$(EI)_c = E_c \cdot I_c = E_c \cdot \frac{b \cdot h_c^3}{12} \text{ MNm}^2; \quad (2.1.1)$$

čia:  $E_c$  – betono tamprumo modulis [MPa];

$b$  – betono sluoksnio plotis (kitais, plokštės plotis) [m];

$h_c$  – betono sluoksnio aukštis [m].

## CLT medienos plokštė

CLT plokštės lenkiamasis standumas  $(EI)_t$ , apskaičiuojamas pagal gama metodą, pateiktą Eurokodo 5 B priede. Daroma prielaida, kad CLT sluoksniai, išilgai orientuoti į apkrovos kryptį, perima apkrovą, o skersai orientuoti į apkrovos kryptį nepaisomi, nes jų tamprumo modulis yra maždaug  $E_t/30$  ir todėl yra prilyginami nuliui. Gama metodas kaip minėta anksčiau, pagrįstas redukcijos koeficientu, kitaip vadinamu  $\gamma$  koeficientu, pabrėžiant bendrą veikimą tarp kompozitinės plokštės sluoksnių laipsni.  $\gamma$  koeficientas svyruoja nuo 0 iki 1. Kai  $\gamma$  koeficientas lygus 0 reiškia, kad nėra sudėtinio poveikio tarp laikančiųjų sluoksnių ir esami sluoksniai neša apkrovą visiškai nepriklausomai vienas nuo kito. Kai  $\gamma$  koeficientas lygus 1 vadinasi konstrukcija atlieka pilną sudėtinį sluoksnių veikimą, neslysta tarp gretimų išilginių sluoksnių ir esami sluoksniai kartu atlaiko esamą apkrovą.

$$(EI)_t = \sum_{i=1}^n (E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2); \quad (2.1.2)$$

čia:  $E_i$  – nagrinėjamų  $i$  – sluoksnių tamprumo modulis [MPa];

$I_i$  – nagrinėjamų  $i$  – sluoksnių inercijos momentas, kuris apskaičiuojamas taip:

$$I_i = \frac{b_i \cdot h_i^3}{12} [m^4]; \quad (2.1.3)$$

$\gamma_i$  – redukcijos koeficientas;

$A_i$  – nagrinėjamų  $i$  – sluoksnių skerspjūvio plotas, kuris apskaičiuojamas taip:

$$A_i = b_i \cdot h_i [m^2];$$

$b_i$  – nagrinėjamų sluoksnių plotis [m];

$h_i$  – nagrinėjamų sluoksnių aukštis [m];

$a_i$  – atstumas tarp  $i$  – sluoksnio geometrinio centro ir nagrinėjamo skerspjūvio neutralios ašies [m].

Koeficientas  $\gamma_i$  pabrėžia sudėtinį dviejų laikančiųjų sluoksnių veikimą, tačiau kiekvienam sluoksniui yra skiriamas atskiriamas koeficientas. Medienos sluoksnio koeficientas apskaičiuojamas taip:

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot h_i \cdot \bar{h}}{G_R \cdot L^2}}; \quad (2.1.4)$$

čia:  $\bar{h}$  – gretimo skersinio sluoksnio aukštis  $i$  – sluoksnio šone link skerspjūvio neutralios ašies [m];

$G_R$  – skersinio sluoksnio šlyties modulis [MPa];

$L$  – kompozitinės plokštės ilgis [m].

Norint nustatyti atstumą tarp skerspjūvio neutralios ašies ir dominančio sluoksnio centro, reikia žinoti CLT plokštės neutralios ašies vietą. Jeigu CLT plokštę sudaro lyginis kryžmai klijuotų lentų kiekis, neutrali ašis bus skerspjūvio centre. Todėl atstumas  $a_i$  kiekvienam išilginiam plokštės sluoksniui gali būti nustatomas taikant paprastą geometriją. Esant sudėtingesnei CLT konstrukcijai, kurią sudaro

nelyginis kryžmai klijuotų lentų skaičius, neutralią ašį galima nustatyti taip pat kaip kompozitiniai medienos ir betono konstrukcijai. Paaiškinta lygtyje (2.1.9)

### Kompozitas

Efektyvusis kompozitinės plokštės lekiamasis standumas  $EI_{eff}$ , apskaičiuojamas taikant gama metodą, pateiktą eurokodo 5 b priede. Atsižvelgiant į du išilginius sluoksnius - betono sluoksnį ir CLT medienos sluoksnį, sujungiant lanksčia šlyties jungtimi, CLT plokštės laikomi fiktyvūs tik 3 sluoksniai esantys išilgine kryptimi. Skersinių nelakančių sluoksnių galia yra ignoruojama, nes jų tamprumo modulis prilyginamas nuliui. Todėl skersinių sluoksnių plotas nėra įtraukiamas į bendrą CLT plokštės plotą, kurį sudaro tik išilginių laikančiųjų krypčių plotas. Todėl efektyvusis kompozitinės plokštės lekiamasis standumas yra apskaičiuojamas pagal formulę:

$$EI_{eff} = (EI)_c + \gamma_c \cdot E_c \cdot A_c \cdot a_c^2 + (EI)_t + \gamma_t \cdot E_t \cdot A_t \cdot a_t^2; \quad (2.1.5)$$

čia:  $\frac{(EI)_c}{(EI)_t}$  – betono ir CLT plokštės lenkiamasis standumas [MPa];

$\frac{\gamma_c}{\gamma_t}$  – betono ir CLT plokštės redukcijos koeficientai;

$\frac{E_c}{E_t}$  – betono ir CLT plokštės tamprumo moduliai [MPa];

$A_c$  – betono skerspjūvio plotas, kuris apskaičiuojamas taip:

$$A = b \cdot h_c [m^2]; \quad (2.1.6)$$

$A_t$  – CLT plokštės išilginių sluoksnių perimančių apkrovą skerspjūvio plotas, kuris apskaičiuojamas taip:

$$A_t = b \cdot (h_2 + h_3 + h_4) [m^2]; \quad (2.1.7)$$

$\frac{a_c}{a_t}$  – atstumas tarp betono ir medienos sluoksnių centro ir nagrinėjamo skerspjūvio neutralios ašies [m];

CLT plokštė yra laikoma pagrindiniu sluoksniu, todėl medienos sluoksnio koeficientas  $\gamma_t = 1$ . Betono sluoksnio  $\gamma_c$  koeficientas yra apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\gamma_c = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_c \cdot A_c \cdot s_{eff}}{K \cdot L^2}}; \quad (2.1.8)$$

čia:  $s_{eff}$  – efektyvus atstumas tarp šlyties jungčių [m];

$K$  – mechaninių jungių standumas [N/m].

Norint nustatyti atstumą tarp CLT plokštės išilginių sluoksnių centro ir kompozitinės plokštės skerspjūvio ašies, reikia žinoti neutralios ašies padėtį kompozitinėje plokštėje. Ekvivalentinis gama metodas nurodo, kad kompozitinės plokštės neutralios ašies padėtis turi būti CLT plokštės skerspjūvyje, nes tai yra svarbu efektyviajam lenkimo standumui. Jeigu neutrali ašis būtų betono sluoksnyje, skaičiavimai nėra tęsiami, nes reikia koreguoti elementų aukščius. Neutrali ašis  $NA$  yra apskaičiuojama pagal formulę:

$$NA = \frac{\gamma_c \cdot E_c \cdot A_c \cdot \left(h_t + \frac{h_c}{2}\right) + \gamma_t \cdot E_t \cdot A_t \cdot \left(\frac{h_t}{2}\right)}{\gamma_c \cdot E_c \cdot A_c + \gamma_t \cdot E_t \cdot A_t} [m]; \quad (2.1.9)$$

Kai yra suskaičiuota ir žinoma neutralios ašies vieta, galima apskaičiuoti atstumus tarp betono ir medienos sluoksnių centro ir kompozitinės plokštės neutralios ašies.  $\frac{a_c}{a_t}$  dydžiai apibūdinantys betono ir medienos sluoksnių atstumus iki neutralios ašies yra apskaičiuojami pagal formules:

$$a_c = h_t + \frac{h_c}{2} - NA [m];$$

$$a_t = NA - \frac{h_t}{2} [m];$$

čia:  $h_c$  – betono sluoksnio aukštis [m];

$h_t$  – medienos sluoksnio aukštis [m].

### 2.1.1. Natūraliojo dažnio ir įlinkio skaičiavimas

Dinaminis kompozitinės plokštės elgesys priklauso nuo vibracijų ir impulso greičio poveikio. Dažniausiai tai yra tikrinama norint nustatyti pirmąjį natūralųjį dažnį. Grindims sudarytoms iš medienos ir betono kompozitinio junginio, toks natūralusis dažnis  $f_1$  apskaičiuojamas pagal Eurokodo 5 pateikiamą formulę:

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}} [Hz]; \quad (2.1.10)$$

čia:  $L$  – kompozitinės plokštės ilgis [m];

$(EI)_L$  – efektyvusis lenkiamasis standumas išilgine plokštės kryptimi [  $[MNm]^2$  ];

$m$  – kompozitinės plokštės savasis svoris [ $kg/m$ ].

Norint išvengti diskomforto, pirmasis natūralusis dažnis  $f_1$ , turėtų būti didesnis nei 8Hz. Tačiau net jei  $f_1$  bus daugiau nei 8Hz, vis vien grindys gali kelti diskomfortą, todėl pagal Eurokodo 5 7.3 skirsnį, gyvenamiesiems pastatams tokio tipo grindys turi būti tikrinamos atliekant skaičiavimus su taškine vertikalia apkrova, jos deformacija ir vienetine impulsine greičio reakcija. Čia, deformacija  $w$ , skaičiuojama nuo taškinės apkrovos dydžio, kuris yra 1 kN.

$$\frac{w}{F} \leq a \left[ \frac{mm}{kN} \right]; \quad (2.1.11)$$

čia:  $F$  – vertikali koncentruota apkrova, kurios dydis 1kN;

$a$  – koeficientas, kurį galima nustatyti pagal EN 1995-1-1 7.2 pav. koeficientas yra pasirenkamas  $\frac{1,5mm}{kN}$ .

Didžiausia deformacija  $w$  nuo vertikalios koncentruotos apkrovos  $F$ , yra apskaičiuojama taip:

$$w = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot EI} [mm]; \quad (2.1.12)$$

$$v \leq b f_1 \zeta^{-1}; \quad (2.1.13)$$

Čia:  $v$  – vienetinė impulsinė greičio reakcija, tai vertikalios grindų vibracijos, kurias sukelia idealus vienetinis impulsas ( $1 \text{ Ns}$ ), veikiantis didžiausią reakciją turinčioje grindų vietoje, greičio  $\left(\frac{m}{s}\right)$  didžiausioji pradinė reikšmė.

$b$  – koeficientas, kurį galima nustatyti pagal EN 1995-1-1 7.2 pav. koeficientas yra priimamas  $100 \left[\frac{m}{\text{Ns}^2}\right]$ ;

$\zeta$  – modalinio slopinimo koeficientas, kuris yra lygus 2,5%.

Laisvai paremtų visuose keturiuose kraštuose stačiakampių grindų, kurių gabaritiniai matmenys,  $b \cdot l$ ,  $v$  reikšmė apytiksliai gali būti apskaičiuojama taip:

$$v = \frac{4 \cdot (0,6 \cdot n_{40} + 0,4)}{m \cdot b \cdot L + 200} \left[\frac{m}{\text{Ns}^2}\right]; \quad (2.1.14)$$

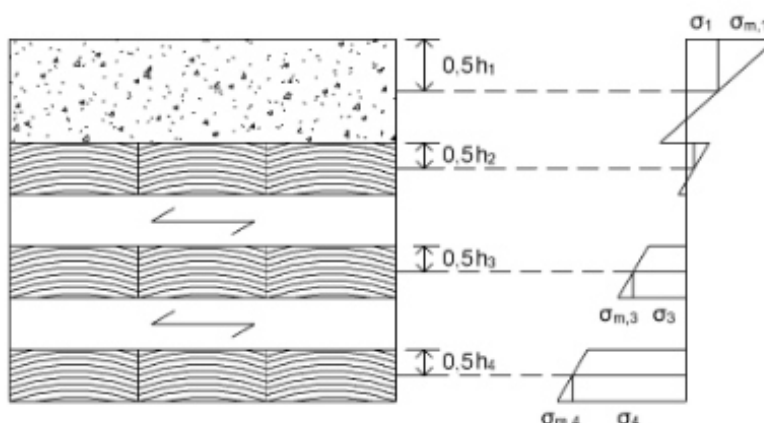
$$n_{40} = \left[ \left( \left[ \left( \frac{40}{f_1} \right) \right]^2 - 1 \right) \cdot \left[ \left( \frac{w}{L} \right) \right]^4 \cdot \frac{[(EI)_L]}{(EI)_w} \right]^{0,25}; \quad (2.1.15)$$

čia:  $(EI)_w$  – efektyvusis lenkiamasis standumas skersine plokštės kryptimi  $[[\text{MNm}^2]]$ .

Remiantis šiomis formulėmis, kompozitinės grindys, kurių natūralusis dažnis  $f_1 > 8 \text{ Hz}$  ir deformacijos  $w \leq \frac{L}{300}$  atitiks šiuos reikalavimus, vienetinė impulsinė greičio reakcija plokštės nepaveiks.

### 2.1.2. Normaliniai įtempiai

Normalinių įtempių pasiskirstymas betono sluoksnyje ir išilginiuose CLT sluoksniuose yra nustatomas atskirai, kuomet yra apskaičiuojami normaliniai įtempiai kiekvieno sluoksnio apačioje ir viršuje. Bendrą kompozitinės plokštės normalinių įtempių veikia normalusis įtempis  $\sigma_i$ , ir normalusis įtempis  $\sigma_{m,i}$ , atsižvelgiant į sujungimo būdą ir pasiskirstymą sluoksnio aukštyje.



13 pav. Skirtingi normalūs įtempiai ir įtempių pasiskirstymas TCC grindų aukštyje

Įtempiai apskaičiuojamai pagal Eurokodo 5, B priedo pateiktas formules:

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i \cdot E_i \cdot a_i \cdot M_d}{(EI)_{eff}} \text{ [MPa]}; \quad (2.1.2.1)$$

$$\sigma_{m,i} = \frac{0,5 \cdot E_i \cdot h_i \cdot M_d}{(EI)_{eff}} \text{ [MPa]}; \quad (2.1.2.2)$$

čia:  $\gamma_i$  – redukcijos koeficientas;

$E_i$  – nagrinėjamų  $i$  – sluoksnių tamprumo modulis [MPa];

$a_i$  – atstumas tarp  $i$  – sluoksnio geometrinio centro ir nagrinėjamo skerspjūvio neutralios ašies [m];

$h_i$  – nagrinėjamų sluoksnių aukštis [m];

$(EI)_{eff}$  – efektyvusis kompozitinės plokštės lekiamasis standumas [ $MNm^2$ ].

$M_d$  – maksimalus konstrukcijos lenkimo momentas [kNm], apskaičiuojamas taip:

$$M = \frac{q \cdot L^2}{8}; \quad (2.1.2.3)$$

čia:  $q$  – paskirstyta apkrova [kN], per tarpatramio ilgį  $L$  [m].

Didžiausieji šlyjamieji įtempiai veikia ten, kur normaliniai įtempiai yra lygūs nuliui. Didžiausias šlyjamasis įtempis sienelės elemente yra apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\tau_{2,max} = \frac{\gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot a_3 + 0,5 \cdot E_2 \cdot b_2 \cdot h_2^2}{b_2 \cdot (EI)_{eff}} \cdot V \text{ [MPa]}; \quad (2.1.2.4)$$

čia:  $h_2$  – atstumas nuo skerspjūvio apačios iki vietos, kur normaliniai įtempiai medienos dalyje lygūs nuliui;

$V$  – skersinė jėga.

### 2.1.3. Jungės apkrova

Kadangi kompozitinė perdangos plokštė yra dalinio sujungimo, sujungti du atskirus elementus į vieną bendrą kompozitą yra naudojami jungės. Jungę veikianti apkrova yra apskaičiuojama pagal formulę:

$$F_{jungės} = \frac{\gamma_1 \cdot E_c \cdot A_c \cdot a_1 \cdot s_{eff} \cdot V}{(EI)_{eff}} \text{ [kN]}; \quad (2.1.3.1)$$

čia:  $\gamma_1$  – gama koeficientas susijęs su betono sluoksniu;

$V$  – šlyties jėga, veikianti per efektyvų atstumo ilgį [kN].

Skaičiuojant projekte kompozitinės plokštės ekvivalentini lenkiamąjį standumą buvo naudojami du jungčių tipai, įpjovų ir medšraigčių jungtys. Šių jungčių stiprumo charakteristikos yra pasirinktos iš FPInnovations sukurtos knygos „Design Guide for Timber-Concrete Composite Floors in Canada“ [47].

**Table 3.1 Group 1 connection system: dowel-type fastener**

Description of the connection system	$V_{max}^*$ (kN)	$k_s^*$ (kN/mm)	Timber depth (mm)	Ref.
Nail, $\phi 3.4$ mm	5.7	5.9	35 mm	[31]
Dowel, $\phi 12$ mm	9.0, 9.5 and 11.4	22.8, 25.8 and 31.1	3 $\phi$ , 4 $\phi$ and 6 $\phi$	[32]
Dowel, $\phi 16$ mm, with 22 mm interlayer	8.8, 11.5 and 11.7	11.4, 16.6 and 13.1	3 $\phi$ , 4 $\phi$ and 6 $\phi$	[32]
Lag screws, $\phi 12-16$ mm	21.5 - 34.2	12.0 – 15.0	115 - 105	[33]
2 STS** at 45°, $\phi 8$ mm	18.5	14.4	100 mm at 45°	[33]
2 STS* at 45° in CLT, $\phi 8$ mm	24.8	21.2	100 mm at 45°	[34]
Rebar, $\phi 8-10$ mm, smooth	6.8-11.3	6.6-8.6	80-100	[35]
Rebar, $\phi 10$ mm, profiled	17.2	10.1	120	[35]
Rebar with hook, $\phi 8-10$ mm, profiled at 45°	32.8 – 33.8	28.2 – 84.9	88 – 110 mm at 45°	[36]
Tecnaria (Base)	17.2	17.9	70 à 120	[37, 38]

\*These are not design values, \*\*STS: Self-tapping screws

### 14 pav. Medsraigčių jungties stiprumo charakteristikos

Design Guide for Timber-Concrete Composite Floors in Canada  
First Edition 2020

**Table 3.2 Group 2 connection system: notched connectors**

Description of the connection system	$V_{max}^*$ (kN)	$k_s^*$ (kN/mm)	Timber depth (mm)	Ref.
Round notch $\phi 48.5$ mm	13.2	83.1	20	[33]
Round notch $\phi 48.5$ mm + lag screw $\phi 12$ mm	31.4	106	Notch: 20 Lag screw: 100	[33]
Round notch $\phi 48.5$ mm + steel pipe of 40 mm	32.6	66.6	20	[33]
Rectangular notch of 150 x 63 mm (Figure 3.7(a))	48.3	105	50	[42]
Rectangular notch of 150 x 63 mm + lag screw $\phi 12$ mm	66.0	77.9	Notch: 50 Lag screw: 100	[42]
Rectangular notch of 150 x 63 mm + lag screw $\phi 16$ mm	73.0	80.2	Notch: 50 Lag screw: 100	[42]
Triangular notch 30°_60° 137x63 (Figure 3.7(b))	40.2	101	60	[42]
Triangular notch 30°_60° 137x63 + lag screw $\phi 16$ mm	82.6	123	Notch: 60 Lag screw: $\approx 100$	[42]

\*These are not design values

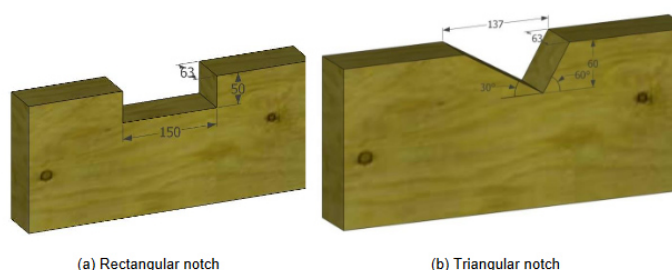


Figure 3.7 Dimension of the notches presented in Table 3.2

### 15 pav. Įpjovos jungties stiprumo charakteristikos

#### 2.2. Skaičiavimai pagal baigtinių elementų programa DLUBAL

Medienos (CLT) ir betono kompozitinė plokštė yra elementas sudarytas iš kelių komponentų, turinčių skirtingas charakteristikas, kuriems analizuoti reikalinga išsamesnė analizė. Naudojant baigtinių



elementų programinę įrangą galima analizuoti tokių struktūrų konstrukcijas. Tokios inžinerinės skaičiavimo programos yra pagrįstos baigtinių elementų skaičiavimo metodu, kuomet nagrinėjant konstrukciją yra analizuojama objektą veikianti jėga, įtempiai ir deformacijos. Šiame magistro baigiamajame darbe buvo naudojama inžinerinė skaičiavimo programa Dlubal RFEM 5.25. Kaip programa buvo modeliuojama ir skaičiuojama kompozitinė plokštė aprašoma sekančiuose poskyriuose.

### 2.2.1. Kompozitinės plokštės modeliavimo pasirinkimas RFEM pakete.

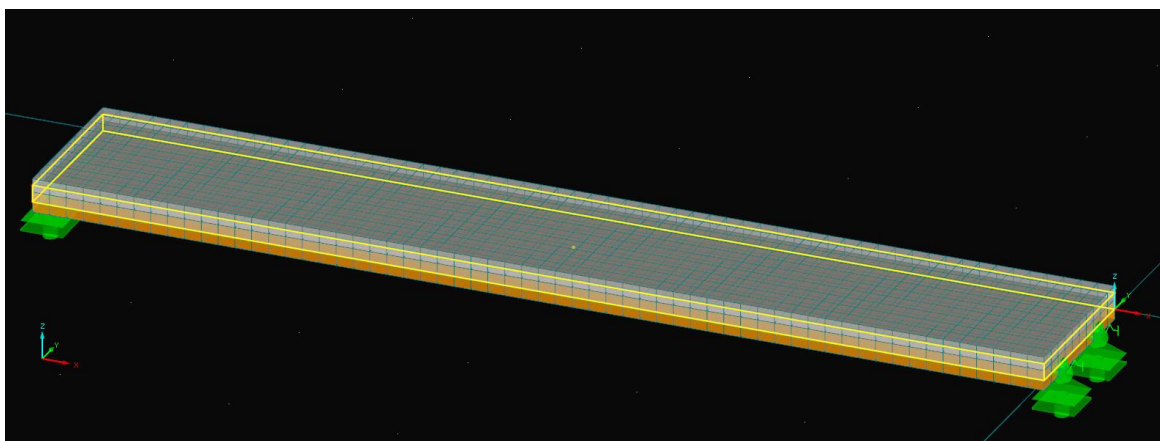
Įvairių metodų kaip modeliuoti kompozitinę perdangos plokštę RFEM programoje galima rasti Dlubal internetiniame puslapyje. Yra trys pasirenkami plokštės jungimo būdai, tačiau tik vienas jų yra labiausiai tinkamas naudoti. Kadangi likusiuose variantuose yra mažai informacijos ir galimybių, aprašant šlyties jungties reikalavimus tarp dviejų jungiamų elementų.

Modeliavimas pagrįstas dalinai sujungiant du projektuojamus paviršius, naudojant paviršiaus išleidimą (surface release) arba kontaktinę kietą medžiagą (contact solid) parametrus. Naudojant šiuos projektavimo metodus galima apibrėžti beveik bet kokią šlyties perdavimą tarp projektuojamų elementų.

RFEM modelyje paviršiai modeliuojami kaip dvimatės plokštumos, kurių storis yra pasirenkamas pagal kompozitinės plokštės sudėtį. Projektuojant betono ir CLT plokštės paviršius, jie yra atskiriami atstumu, nors iš tiesų jie tiesiogiai liečiasi vienas su kitu, todėl du paviršiai privalo būti sujungiami vertikaliai, kad betonas nesusiliėtų su CLT plokšte. Norint išvengti šios problemos ir sukurti dalinį standų ryšį tarp dviejų gretimų plokštumų yra naudojami du standūs paviršiai.

Kieta kontaktinė medžiaga ir nulinis paviršius (Contact solid and Null surfaces)

Contact solid-funkcija, kai kietos kontaktinės medžiagos įvedamos išilgai projektuojamos plokštės ilgio, atsižvelgiant į šlyties jungties standumą, jungčių vietose yra modeliuojamos kaip spyruoklinės konstantos. Spyruoklės konstanta, tai jungties tipas atitinkantis šlyties jungties standumą, taikomas kietai kontaktinei medžiagai ir aprašoma dydžiu kN/m<sup>3</sup>. Paprastai kontaktinės kietosios medžiagos ir kietosios medžiagos yra naudojamos tik uždariems tūriams, todėl betoninis ribinis paviršius ir CLT plokštės ribinis paviršius turi būti uždaryti visuose kraštuose. Tai atliekama įvedant funkcija Null surfaces, kuomet projektuojami paviršiai padalijami į mažesnius paviršius ir yra apribojami nuliniiais paviršiais visuose atviruose kraštuose. Nulinio paviršiaus paskirtis yra sukurti uždaro tūrio kontaktą.



16 pav. Uždaro tūrio kontaktas naudojant nulinio paviršiaus parametrus

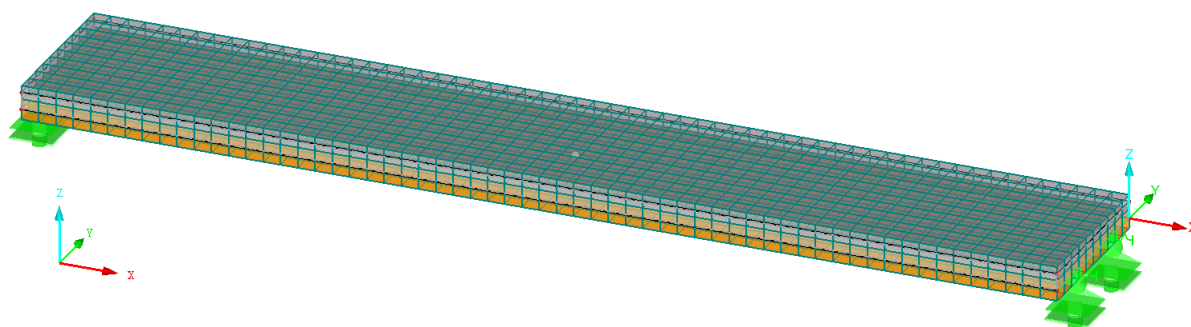
## 2.2.2. Išsamus projektuojamo modelio aprašymas

Kompozitinės plokštės modeliavimui yra naudojama kietosios kontaktinės medžiagos ir standūs paviršiai, kad pavyktų sumodeliuoti dalinai standžią jungtį tarp betono sluoksnio ir medžio CLT plokštės. Toliau yra pateikiama programinės įrangos Dlubal RFEM nustatymai ir projektavimo žingsniai norint sukurti skaičiuojamąjį kompozitinės plokštės modelį.

### Betonas ir CLT

Projektuojami betono ir medienos paviršiai yra lygiagretūs, kurių atstumas vienas kito atžvilgiu priklauso nuo pasirinktų medžiagų storių. Norint modeliuoti pasirinktus medžiagų paviršius pirmiausiai reikia sukurti ir aprašyti kiekvienos medžiagos savybes. Dažnu atveju tiesiog reikia tinkamai pasirinkti projektuojamų medžiagų klases. CLT medienos plokštei reikia nustatyti ortotropinį medžiagos modelį, nes plokštės sluoksniai yra skirtingų krypčių ir tai lemia skirtingas savybes.

Isometric



17 pav. Projektuojama kompozitinė perdangos plokštė Dlubal RFEM programoje

### Šlyties jungtys

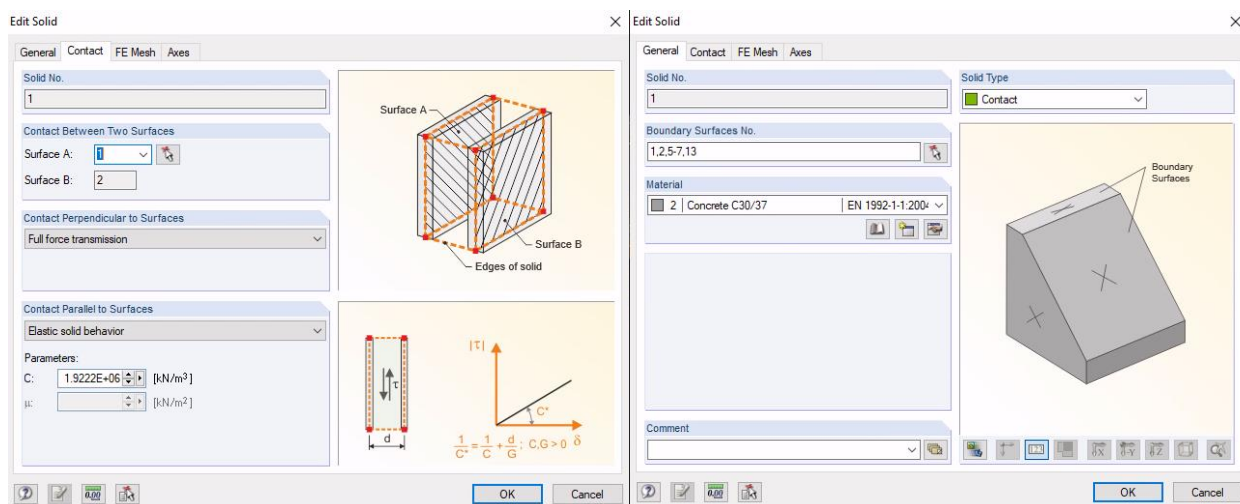
Dalinai standus kompozitinės plokštės sujungimas modeliuojamas tiek su įpjovomis, tiek su medsraigčiais, kuomet šlyties jungtys aprašomos naudojant anksčiau poskyryje minėtus metodus „Contact solid“ ir „Null surface“. Tokių projektuojamų plokščių su skirtingomis šlyties jungtimis, modeliai yra panašūs, kurie aprašomi yra sekančiuose skyriuose.

### Įpjovos jungtis

Šlyties jungčių modeliavimas įtraukiant įpjovas atliekamas naudojant kontaktinę kietąją medžiagą ir spyruoklinę konstantą, kad būtų atsižvelgta į modeliuojamos šlyties standumą. Įpjovos geometrija yra tokio paties dydžio kaip ir kietoji kontaktinė medžiaga. Šlyties jungties standumas aprašomas koeficientu  $K$  ir atitinkamai spyruoklės konstanta koeficientu  $C$ . Šlyties jungties standumui, didžiausią įtaką turi įpjovos ilgis ir gylis.

Kietoji kontaktinė medžiaga yra modeliuojama kaip nauja medžiaga, kuri apibrėžiama kieto tipo kaip kontaktas tarp dviejų projektuojamų ribinių paviršių, sukuriant uždarą tūrį. Nulinis paviršius yra

sukuriamas kaip vertikali plokštumos jungiančios CLT plokštės ir betono paviršių ribines linijas. Kontaktinės kietosios medžiagos charakteristinės savybės yra apibrėžiamos lygiagrečioms ir statmenoms paviršiams. Jėgos veikiančios plokštę yra perduodamos kontaktuoti statmenam paviršiui o lygiagrečioms paviršiams yra pasirenkamas kietasis elgesys. Visus šiuos parametrų nustatymus galima pamatyti žemiau pateiktuose paveikslėliuose.



**18 pav.** Iškarpų pavyzdžiai iš skaičiavimo programos, rodantys kaip modeliuoti kietąją kontaktinę medžiagą. Įpjovą atitinkančios spyruoklinės konstantos dydis  $C_{notch}$  yra nustatomas pagal formulę:

$$C_{notch} = \frac{K}{A_{notch}} \left[ \frac{kN}{m^3} \right]; \quad (2.2.2.1)$$

čia:  $K$  – šlyties jungties standumo modulis [kN/m];

$A_{notch}$  – projektuojamos įpjovos plotas [ $m^2$ ].

Kad būtų galima vertikalčiai sujungti projektuojamus kompozitinės plokštės paviršius per visą tarpatramį, plotai tarp įpjovų yra modeliuojami naudojant kontaktinę kietąją medžiagą. Tačiau skirtingai nei modeliuojant įpjovas, tarpiniai plotai tarp įpjovų nėra atsparūs praslydimui tarp projektuojamų paviršių, todėl atitinkamos kontaktinės kietosios medžiagos yra projektuojamos su labai mažo dydžio spyruokline konstanta.

### Medsraigčių jungtis

Medsraigčių jungčių modeliavimas yra gan panašus kaip ir įpjovų modeliavimas RFEM modelyje. Naudojama kontaktinė kietoji medžiaga ir spyruoklinė konstanta, kad būtų galima apskaičiuoti medsraigčių šlyties jungtį. Siekiant supaprastinti skaičiuojamąjį modelį, medsraigčių poros, kurios yra tame pačiame išilginiame grindų taške modeliuojamos kaip medsraigčių eilės. Pagal projektuojamos jungties skersmenį yra nustatomas eilių plotis. Naudojamų medsraigčių šlyties jungties standumas yra pagrįstas pagal gamintojo pateiktas charakteristikas. Medsraigčių eilę atitinkanti spyruoklinė konstanta yra apskaičiuojama pagal formulę:

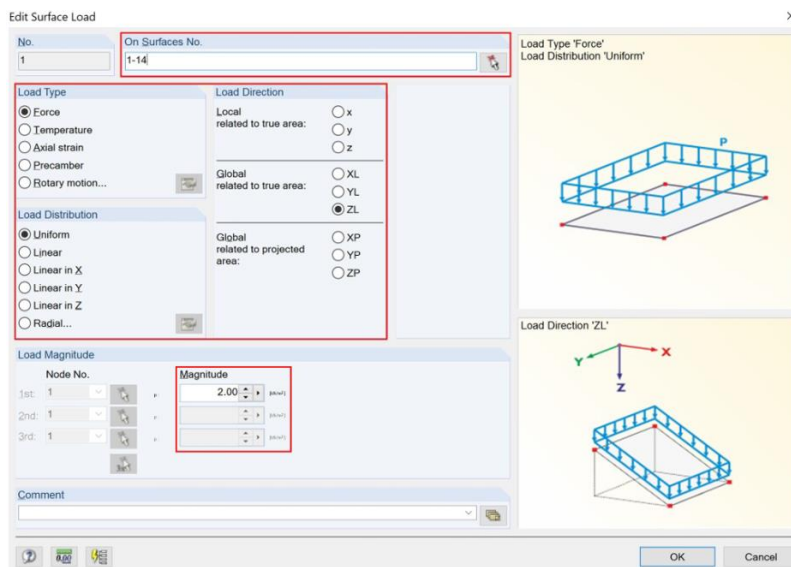
$$C_{screws} = \frac{K}{A_{screws}} \left[ \frac{kN}{m^3} \right]; \quad (2.2.2.2)$$

čia:  $K$  – šlyties jungties standumo modulis [kN/m];

$A_{screws}$  – projektuojamos varžtų eilės plotas [ $m^2$ ].

## Apkrovos

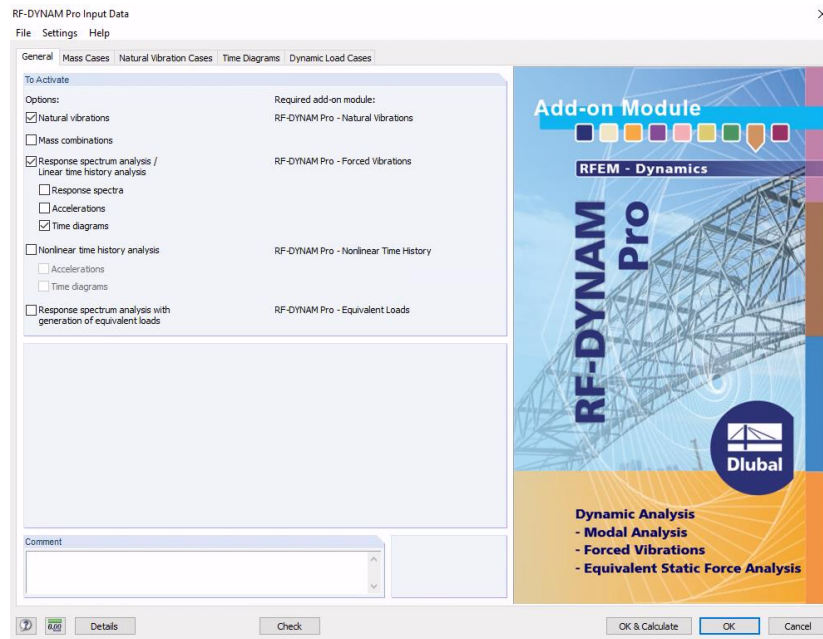
Apkrovų modeliavimas RFEM programoje nelabai kuo skiriasi nuo kitų baigtinių elementų skaičiavimo programų. Pirmiausia yra nustatomi apkrovos atvejai ir tik vėliau deriniai. Nustatytos apkrovos yra prisikariamoms modelyje suprojektuotai konstrukcijai, pasirenkat paviršiu ir uždedant apkrovą taip, kad atitiktų tolygiai paskirstytą apkrovą. Žemiau pateiktame paveikslėlyje pateiktas pavyzdys, nurodantis kaip Dlubal programoje yra nustatomi apkrovos parametrai projektuojamai kompozitinei plokštei.



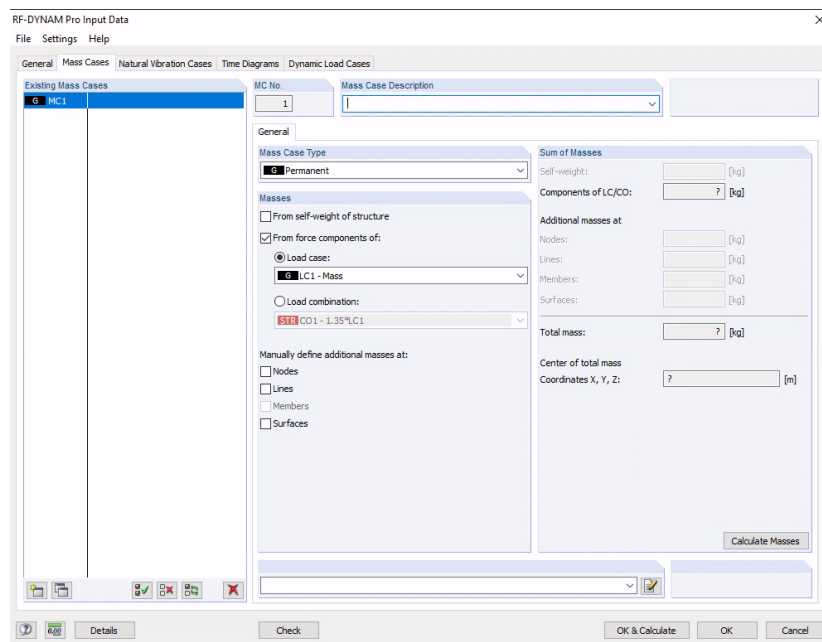
19 pav. Iškarpu pavyzdžiai iš skaičiavimo programos, rodantys kaip modeliuoti pasirinktą apkrovą

## Natūraliojo dažnio skaičiavimai

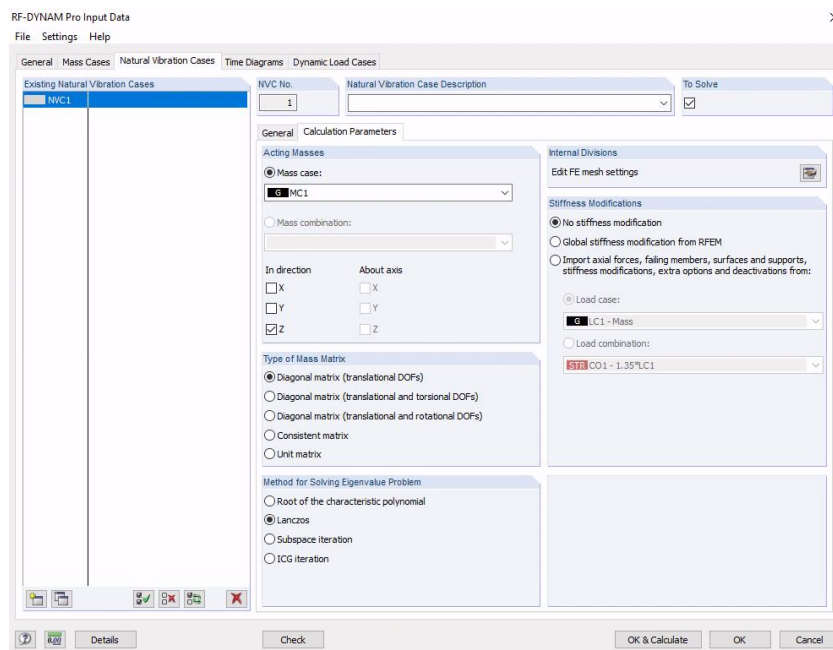
Dlubal RFEM programoje naudojantis papildomu moduliu „RF-Dynam Pro“ galima apskaičiuoti pirmąjį natūralųjį dažnį projektuojamai kompozitinei perdangos plokštei. Atsidarius modulio parametrus yra pateikiamos keturios skiltys, kuriose reikia atlikti nustatymus. Aktualiausia skiltis natūralaus dažnio skaičiavimams yra „Natural vibration cases“. Šioje skiltyje yra pasirenkami skaičiavimo parametrai ir juose modifikuojami atitinkami laukeliai. Parametrų nustatymai pateikiami žemiau esančiuose paveikslėliuose.



20 pav. Iškarpu pavyzdžiai iš skaičiavimo programos, rodantys natūraliojo dažnio skaičiavimo parametrus



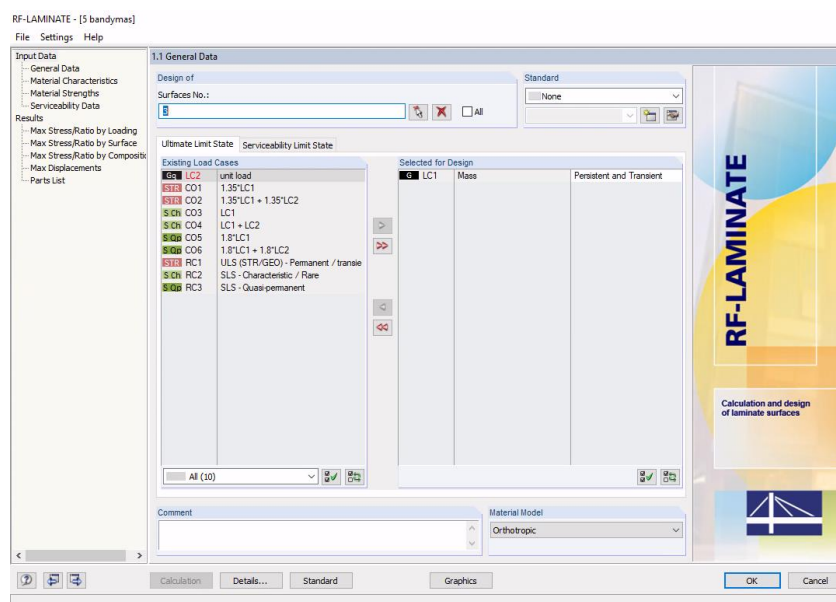
21 pav. Iškarpu pavyzdžiai iš skaičiavimo programos, rodantys natūraliojo dažnio skaičiavimo parametrus, pasirenkant apkrovą



22 pav. Iškarpų pavyzdžiai iš skaičiavimo programos, rodantys natūraliojo dažnio skaičiavimo parametrus, pasirenkant dažnio parametrus

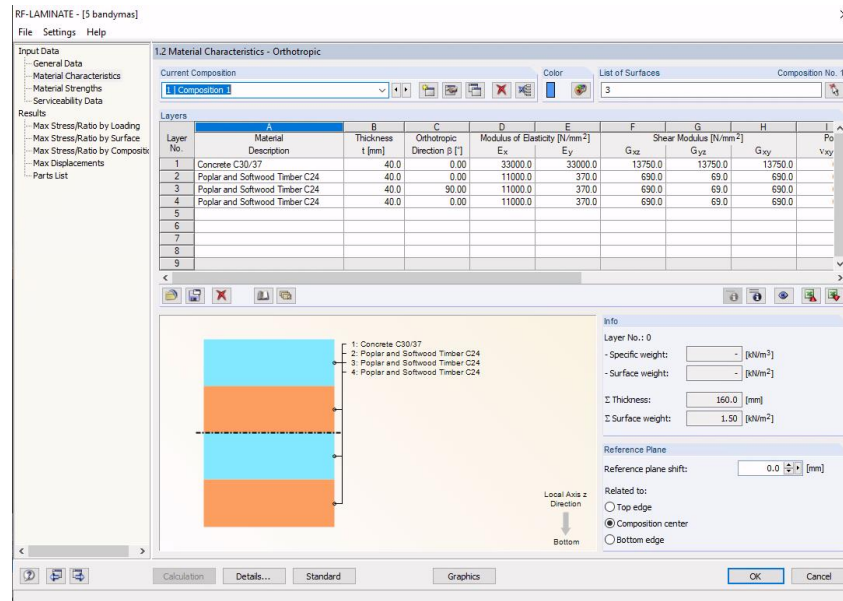
## Normalinių įtempių skaičiavimas

Baigtinių elementų programoje naudojantis papildomu moduliu „RF-laminate“ galima apskaičiuoti bandinių normalinius įtempius konstrukcijos skerspjūvio sluoksniuose. Tačiau yra viena sąlyga, kad parametruose nėra galimybės įrašyti šliejamos jungties dydžio, todėl programa skaičiuojant priima sąlygą, kad elementai yra dalinai sudėtinio veiksmo.



23 pav. Normalinių įtempių pasiskirstymo skaičiavimų nustatymai programos modulyje „RF-laminate“





24 pav. Projektuojamo bandinio charakteristikų nustatymas programos modulyje „RF-laminate“

### 3. Medžio (CLT)-betono konstrukcijų analitinių skaičiavimų patikrinimas

Baigiamajame magistro darbo projekte buvo atliekami rankiniai skaičiavimai vadovaujantis ekvivalentiniu gama metodu ir inžineriniai skaičiavimai naudojant baigtinių elementų skaičiavimo programą Dlubal RFEM 5.25. Atliekant skaičiavimus buvo sukurti keli kompozitinės plokštės variantai, betonas su 3-jų sluoksnių CLT plokštė ir betonas su 5-ių sluoksnių CLT plokštė, esant skirtingoms medžiagų charakteristikoms. Plokštės tarpusavyje sujungtos dviejų tipų jungtimis, naudojant įpjovas arba plieninius medsraigčius. Sekančiuose skyriuose išsamiai paaiškinama analitinių skaičiavimų patikrinimas pagal pasirinktus skaičiavimo būdus.

#### 3.1. Skaičiavimai pagal ekvivalentinį gama metodą

Ekvivalentinis gama metodas buvo patikrintas skaičiuojant efektyvųjį lenkimo standumą ir įlinkį, pagal parinktą kompozitinių plokščių geometriją ir medžiagų savybes. Skaičiavimai yra atliekami pagal 2.1 skirsnį, kurie išsamiau pateikiami priede nr.2. Skirtingų analizuojamų kompozitinių plokščių variantai ir efektyvusis standumas, pateikiami žemiau esančioje lentelėje.

1 lentelė. Skaičiavimų rezultatai pagal ekvivalentinį gama metodą

Bandinys	Betono klasė	Betono storis, mm	CLT medienos klasė	CLT sluoksnių skaičius	CLT plokštės storis, mm	Bendras kompozitinės plokštės storis, mm	Efektyvusis plokštės standumas, MNm <sup>2</sup>	Plokštės įlinkis gama metodu, mm
1 bandinys su įpjovomis	C20/25	80	C18	3	120	200	7,615	0,0111
1.1 bandinys su medsraigčiais	C20/25	80	C18	3	120	200	5,688	0,0148
2 bandinys su įpjovomis	C20/25	80	C18	5	150	230	11,527	0,00732
2.1 bandinys su medsraigčiais	C20/25	80	C18	5	150	230	8,620	0,00978
3 bandinys su įpjovomis	C25/30	80	C22	3	120	200	8,224	0,10259
3.1 bandinys su medsraigčiais	C25/30	80	C22	3	120	200	6,031	0,01399
4 bandinys su įpjovomis	C25/30	80	C22	5	150	230	12,494	0,00675
4.1 bandinys su medsraigčiais	C25/30	80	C22	5	150	230	9,202	0,09169
5 bandinys su įpjovomis	C30/37	80	C24	3	120	200	8,817	0,00956
5.1 bandinys su medsraigčiais	C30/37	80	C24	3	120	200	6,357	0,013272



### 3.2. Skaičiavimai pagal baigtinių elementų programa Dlubal RFEM

Kompozitinės plokštės inžineriniai skaičiavimai atliekami pagal 2.2 skirsnio modeliavimo nurodymus ir pateikiami priede nr.2. Kompozitinės plokštės buvo modeliuojamos tokio pat tipo kaip rankiniuose skaičiavimuose, siekiant gauti dviejų skaičiavimų rezultatų skirtumus. Plokštė buvo apkraunama išskirstyta apkrova per visą elemento plotą, kurios dydis yra  $q=5\text{kN/m}^2$ .

Skaičiuojamojo modelio efektyvusis lenkimo standumas buvo apskaičiuotas pagal plokštės įlinkio formulę, kuomet plokštė yra apkrauta išskirstyta apkrova.

$$w = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot EI} [mm]; \quad (3.2.1)$$

Iš šios formulės išreiškiamas, efektyvusis lenkimo standumas.

$$EI = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot w} [MNm^2]; \quad (3.2.2)$$

Skirtingų analizuojamų kompozitinių plokščių variantai ir efektyvusis standumas, pateikiami žemiau esančioje lentelėje.

**2 lentelė.** Skaičiavimų rezultatai pagal inžinerinę programą Dlubal RFEM 5.25.

Bandinys	Betono klasė	Betono storis, mm	CLT medienos klasė	CLT sluoksnių skaičius	CLT plokštės storis, mm	Bendras kompozitinės plokštės storis, mm	Plokštės įlinkis, mm pagal RFEM modelį	Efektyvusis plokštės standumas MNm <sup>2</sup> (pagal formulę 3.2.1)
1 bandinys su įpjovomis	C20/25	80	C18	3	120	200	8,66	9,74
1.1 bandinys su medsraigčiais	C20/25	80	C18	3	120	200	8,89	9,49
2 bandinys su įpjovomis	C20/25	80	C18	5	150	230	5,74	14,70
2.1 bandinys su medsraigčiais	C20/25	80	C18	5	150	230	5,91	14,28
3 bandinys su įpjovomis	C25/30	80	C22	3	120	200	8,01	10,53
3.1 bandinys su medsraigčiais	C25/30	80	C22	3	120	200	8,24	10,24
4 bandinys su įpjovomis	C25/30	80	C22	5	150	230	5,31	15,89
4.1 bandinys su medsraigčiais	C25/30	80	C22	5	150	230	5,48	15,4
5 bandinys su įpjovomis	C30/37	80	C24	3	120	200	7,38	11,43

Bandinys	Betono klasė	Betono storis, mm	CLT medienos klasė	CLT sluoksnių skaičius	CLT plokštės storis, mm	Bendras kompozitinės plokštės storis, mm	Plokštės įlinkis, mm pagal RFEM modelį	Efektyvusis plokštės standumas MNm <sup>2</sup> (pagal formulę 3.2.1)
5.1 bandinys su medsraigčiais	C30/37	80	C24	3	120	200	7,61	11,09

### 3.3. Analitiniai skaičiavimo rezultatai

#### Natūraliojo dažnio patikrinimas

Dinaminis kompozitinės plokštės elgesys buvo skaičiuojamas pagal pirminį natūralųjį dažnį. Šiam dažniui suskaičiuoti taikoma 2.1.1 poskirsnyje aprašyta formulė, kuomet rezultatams gauti naudojama ekvivalentinio gama metodo efektyviojo lenkiamojo standumo reikšmės pateiktos 3.1 skirsnyje. Skaičiuojamame modelyje kaip minėta anksčiau taip pat galima apskaičiuoti kompozitinės plokštės natūralųjį dažnį, naudojant papildomą modulį „RF-Dynam Pro“. Remiantis šiais dviem metodais, buvo nustatyta ar ekvivalentinis gama metodas lyginant su baigtinių elementų programos skaičiavimais sutampa ir pateikia vienodus natūralaus dažnio reikšmes. Tikrinimo metu buvo tikrinamos plokštės su dviejų tipų šlyties jungtimis, naudojant įpjovas arba medsraigčius. Atlikti skaičiavimai pateikiami priede nr.3. Gauti rezultatai pateikiami žemiau lentelėje.

3 lentelė. Analitiniai pirmojo natūraliojo dažnio skaičiavimų rezultatai

Bandinys ir jungties tipas	Betono klasė	Betono storis	CLT medienos klasė	CLT sluoksnių skaičius	CLT plokštės storis	Bendras kompozitinės plokštės storis	Pirminis natūralusis dažnis (rankinis)	Pirminis natūralusis dažnis (Dlupal)
1 bandinys su įpjovomis	C20/25	80	C18	3	120	200	6,318	6,096
1.1 bandinys su medsraigčiais	C20/25	80	C18	3	120	200	5,510	6,016
2 bandinys su įpjovomis	C20/25	80	C18	5	150	230	6,878	7,487
2.1 bandinys su medsraigčiais	C20/25	80	C18	5	150	230	5,963	7,374
3 bandinys su įpjovomis	C25/30	80	C22	3	120	200	6,501	6,338
3.1 bandinys su medsraigčiais	C25/30	80	C22	3	120	200	5,61	6,249
4 bandinys su įpjovomis	C25/30	80	C22	5	150	230	7,077	7,785
4.1 bandinys su medsraigčiais	C25/30	80	C22	5	150	230	6,083	7,660

Bandinys ir jungties tipas	Betono klasė	Betono storis	CLT medienos klasė	CLT sluoksnių skaičius	CLT plokštės storis	Bendras kompozitinės plokštės storis	Pirminis natūralusis dažnis (rankinis)	Pirminis natūralusis dažnis (Dlupal)
5 bandinys su įpjovomis	C30/37	80	C24	3	120	200	6,702	6,603
5.1 bandinys su medsraigčiais	C30/37	80	C24	3	120	200	5,740	6,503

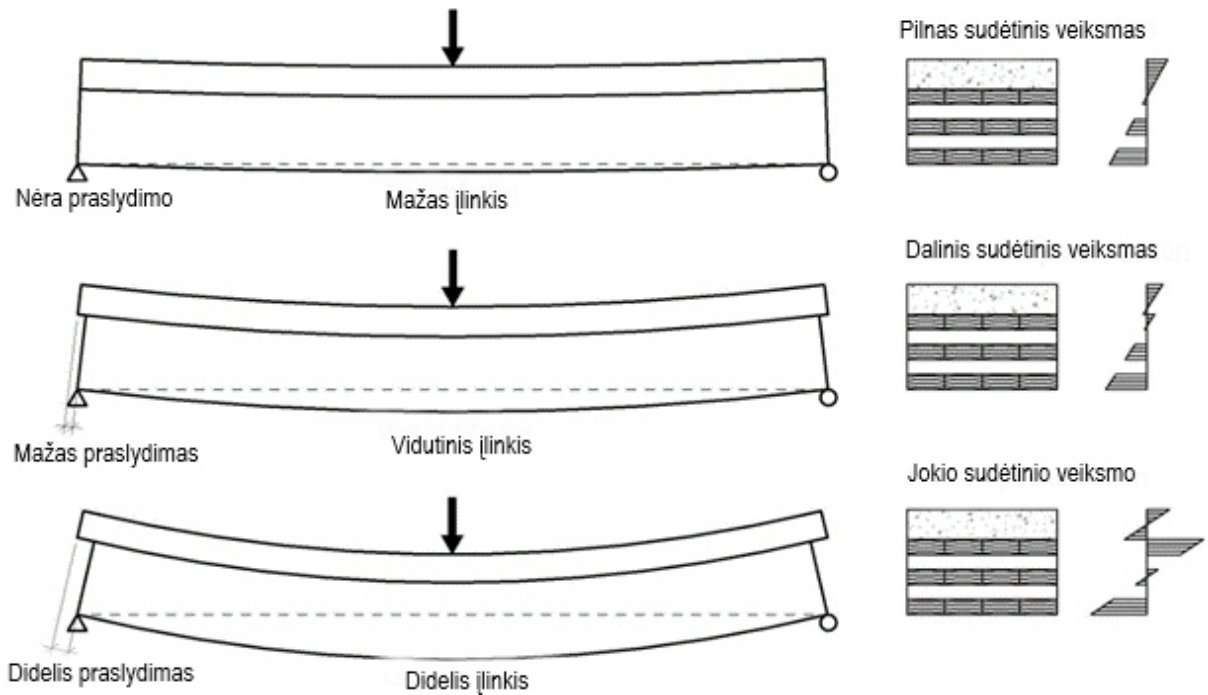
### Normalinių įtempių skaičiavimas

Bendras normalinių įtempių išilgai kompozitinės konstrukcijos sluoksnių buvo apskaičiuotas pagal 2.1.2 poskirsnį pateiktas formules. Apskaičiuojant normaliuosius įtempius dėl sukibimo efekto ir normaliuosius įtempius dėl pasiskirstymo per sluoksnio aukštį. Bendras normalių įtempių pasiskirstymas buvo apskaičiuotas kiekvieno sluoksnio viršuje ir apačioje. Skaičiavimai buvo atliekami pagal ekvivalentinį gama metodą įstatant jo reikšmę į formules ir lyginant su baigtinių elementų skaičiavimo Dlupal programos gautais įtempių pasiskirstymo rezultatais. Skaičiavimams buvo pasirinkta anksčiau skaičiavimuose nagrinėtas 4 bandinys. Atlikti skaičiavimai pateikiami priede nr.4. Bendri rezultatai pateikiami lentelėje.

**4 lentelė.** Analitiniai normalinių įtempių skaičiavimo rezultatai

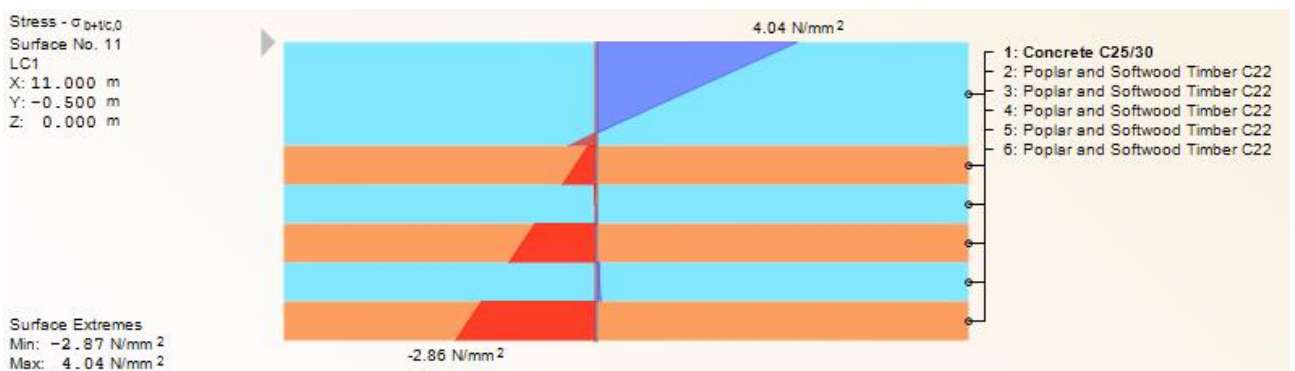
Įtempių pasiskirstymas	Jungtis naudojant įpojovas	Jungtis naudojant medsraigčius	Dlupal RFEM 5.25. modelis
	Rankiniai skaič. MPa	Rankiniai skaič. MPa	RFEM skaič. MPa
$\sigma_{1,top}$	-3,775	-4,251	-4,040
$\sigma_{1,bottom}$	0,691	1,813	0,560
$\sigma_{2,top}$	-0,549	-0,736	0,160
$\sigma_{2,bottom}$	-0,009	-0,002	0,700
$\sigma_{3,top}$	1,101	0,717	1,240
$\sigma_{3,bottom}$	1,641	1,450	1,780
$\sigma_{4,top}$	2,089	2,088	2,330
$\sigma_{4,bottom}$	2,629	2,821	2,870

Atlikus normalinių įtempių skaičiavimus pagal gama metodą ir RFEM sukurtą modelį matoma, kad skaičiavimai tarpusavyje kiek skiriasi. Skaičiuojant gama metodu dviejų tipų jungtis galima teigti, kad pagal įtempių pasiskirstymo diagramą šių jungčių rezultatai atitinka pusiau standžios jungties tipą.



**25 Pav.** Trijų sudėtinių veikimo principų schemas ir atitinkamas deformacijų pasiskirstymas skerspjūviuose

RFEM programoje sumodeliuotos plokštės rezultatai skiriasi labai daug, kadangi pati programa skaičiuojant/tikrinant kompozitinės plokštės įtempius neleidžia aprašyti šlyties jungties charakteristikų. Programoje įtempiai yra skaičiuojami įvertinant, kad dviejų elementų sujungimas yra dalinai standus, neleidžiant įvesti jungiamos jungties charakteristikas, tai parodo programoje gaunama įtempių pasiskirstymo diagrama.



**26 Pav.** Normalinių įtempių pasiskirstymo schema iš skaičiavimo programos

Norint labiau išsiaiškinti normalinių įtempių pasiskirstymą, buvo atlikti skirtingai išdėstytų šlyties jungčių įtempių pasiskirstymo skaičiavimai, kad sužinoti/pamatyti kaip keičiasi įtempiai esant vis tankesnėms betono ir CLT medienos plokštės šlyties jungtims. Skaičiavimai buvo atlikti pagal 2.1.2 poskirsnyje pateiktas formules, vadovaujantis gamma metodu.

**5 lentelė.** Lyginamųjų bandinių, normalinių įtempių skaičiavimo rezultatų palyginimas

Įtempių pasiskirstymas	Jungtis naudojant įpjovas, kas 1,5m	Jungtis naudojant įpjovas, kas 1,2m	Jungtis naudojant įpjovas, kas 1,0m	Jungtis naudojant įpjovas, kas 0,8m	Jungtis naudojant įpjovas, kas 0,5m	Jungtis naudojant įpjovas, kas 0,3m
	Rankiniai skaič. MPa	Rankiniai skaič. MPa	Rankiniai skaič. MPa	Rankiniai skaič. MPa	Rankiniai skaič. MPa	Rankiniai skaič. MPa
$\sigma_{1,top}$	-2,745	-2,634	-2,585	-2,511	-2,386	-2,290
$\sigma_{1,bottom}$	1,857	1,854	1,881	1,899	1,940	1,978
$\sigma_{2,top}$	-0,503	-0,527	-0,549	-0,569	-0,598	-0,618
$\sigma_{2,bottom}$	0,054	0,016	-0,009	-0,035	-0,075	-0,102
$\sigma_{3,top}$	1,068	1,080	1,101	1,114	1,134	1,148
$\sigma_{3,bottom}$	1,625	1,623	1,641	1,648	1,658	1,665
$\sigma_{4,top}$	2,089	2,074	2,089	2,089	2,089	2,089
$\sigma_{4,bottom}$	2,645	2,617	2,629	2,623	2,612	2,605

### 3.4. Palyginimas

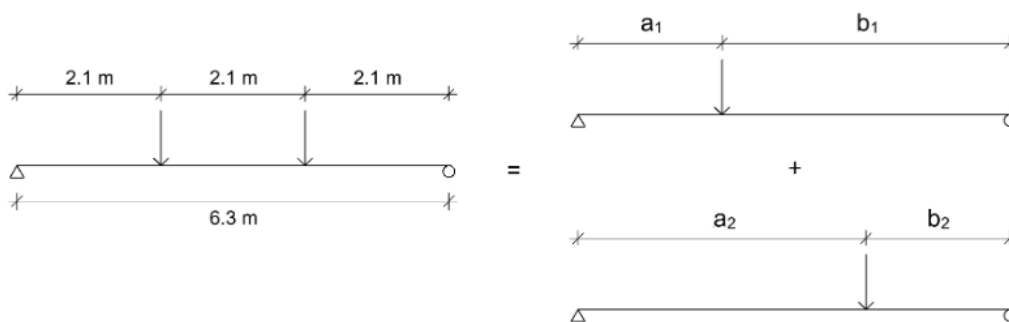
Norint išsiaiškinti ar analitinio projektavimo metodas ir RFEM programos Dlubal modelis yra gerai parengti skaičiuoti, buvo pasirinkta realiai atliktų eksperimentinių laboratorinių darbų tyrimai ir palyginti skaičiavimo rezultatai.

Kompozitinės plokštė buvo modeliuojama tokio pat tipo kaip laboratoriniame tyrime, siekiant gauti dviejų skaičiavimų rezultatų skirtumus. Plokštė buvo apkraunama taip, kad atitiktų realius laboratorijos tyrimo metu atliekamus bandymus, todėl modelyje buvo pasirinkta ir uždėta taškinė apkrova  $P = \frac{23,5kN}{m}$ . Skaičiuojamojo modelio efektyvusis lenkimo standumas buvo apskaičiuotas pagal formulę, kuri išvesta pagal dviejų taškų apkrovų superpoziciją ir žinant, kad didžiausia deformacijos vieta  $x = \frac{L}{2}$ .

$$w = w_1 + w_2 = \frac{P \cdot L a_1 \cdot (L-x)}{6 \cdot EI} \cdot \left( \frac{2 \cdot x}{L} - \frac{a_1^2}{L^2} - \frac{x^2}{L^2} \right) + \frac{P \cdot L \cdot b_2 \cdot x}{6 \cdot EI} \cdot \left( 1 - \frac{b_2^2}{L^2} - \frac{x^2}{L^2} \right) = \frac{1127 \cdot P \cdot L}{800 \cdot EI} [mm]; \quad (3.2.3)$$

Iš šios formulės išreiškiamas, efektyvusis lenkimo standumas.

$$EI = \frac{1127 \cdot P \cdot L}{800 \cdot w} [MNm^2]; \quad (3.2.4)$$



**27 Pav.** Kompozitinės plokštės apkrovimo schema, prilyginant laboratorinių tyrimų metu atliktiems bandymams

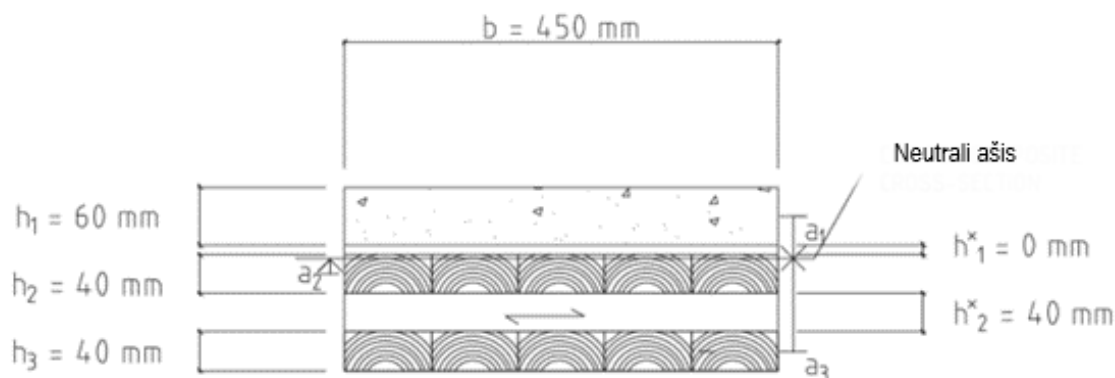
Apkrovos atvejo schema, pagal deformacijos lygties išraišką.

Taip pat laboratoriniame tyrime buvo apskaičiuotas plokštės efektyvusis lenkiamasis standumas pagal ekvivalentinį gama metodą, taikant šį metodą pagal ankstesnius skaičiavimus buvo paskaičiuotas pakartotinis efektyvusis lenkiamasis standumas ir lyginama ar atsakymai sutampa su tyrime atliktais skaičiavimais.

Laboratorinių tyrimų metu buvo bandoma kompozitinė plokštė:

**6 lentelė.** Kompozitinės plokštės charakteristikos

Geometrija		
L	6300	mm
b	450	mm
Betonas		
H1	60	mm
E <sub>cm</sub>	20	GPa
CLT		
H2	40	mm
H2,3	40	mm
H3	40	mm
E <sub>t</sub>	12	GPa
G90	80	MPa
Įpjova su varžtu		
K	1000	kN/mm
Seff	1050	mm
Apkrova		
q	0,912	kN/m <sup>2</sup>
F <sub>max</sub>	53	kN



**28 Pav.** Laboratorinių tyrimų metu analizuojama kompozitinė perdangos plokštė

Atliktuose laboratoriniuose tyrimuose ir analitiniuose skaičiavimuose buvo gauti atitinkami rezultatai. Kompozitinės plokštės lenkimo bandymų metu buvo nustatyta, kad apkraunant plokštę maksimalia 24kN jėga, plokštės įlinkis yra 41,79mm. Rezultatai pateikiami paveikslėlyje.

Table 6.6: Results from bending test of the TCC.

Specimen	$F_{max}$ [kN]	$w$ at $F_{max}$ [mm]	Displacement [mm]	$EI$ [MNm <sup>2</sup> ]
180-1 glue	56	30.1	0.01	16.51
180-2 notch	53	31.41	0.23	14.98
120-1 glue	27	40.34	0.02	5.94
120-2 notch	24	41.79	0.27	5.1

**29 Pav.** Kompozitinės plokštės laboratorinio tyrimo lenkimo bandymo rezultatai

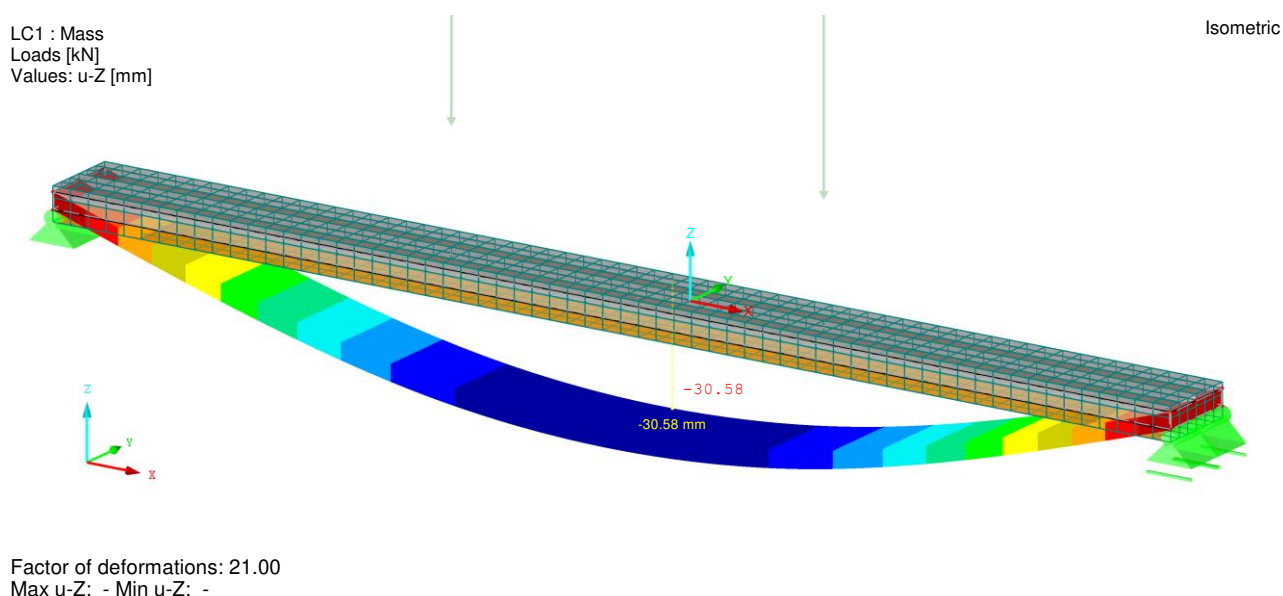
Atlikus kompozitinės plokštės analitinius skaičiavimus gama metodu gauta, kad efektyvusis lenkiamasis standumas kompozitinei plokštei yra 2,65 MNm<sup>2</sup>. Rezultatai pateikiami paveikslėlyje.

Table 5.1: Presentation of the expected results of the TCC bending test.

Specimen	$EI_{eff}$ [MNm <sup>2</sup> ]	$E_{comparison}$ [GPa]	Expected $\eta$
180-1 (glued)	8.36	12.68	1
180-2 (notched)	7.85	11.91	0.91
120-1 (glued)	2.76	12.62	1
120-2 (notched)	2.65	12.12	0.94

**30 Pav.** Kompozitinės plokštės laboratorinio tyrimo efektyvaus lenkiamojo standumo skaičiavimų rezultatai

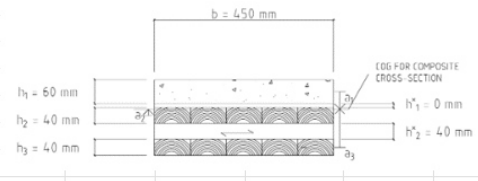
Sumodeliavus kompozitinę plokštę Dlubal RFEM 5.25. modelyje pagal laboratorinių tyrimų situaciją ir apkrovus ją maksimalia 24kN jėga, gauta, kad plokštės įlinkis yra 30,58mm. Rezultatai pateikiami paveikslėlyje.



**31 Pav.** Kompozitinės plokštės rezultatai inžinerinėje skaičiavimo programoje Dlubal RFEM

Atlikus kompozitinės plokštės analitinius skaičiavimus pagal ekvivalentinį gama metodą gauta, kad efektyvusis lenkiamasis standumas kompozitinei plokštei yra 2,04 MNm<sup>2</sup>. Rezultatai pateikiami žemiau esančiame paveikslėlyje.

**Eurocode 5: Part 1-1 annex B**



Ekvivalentinis gama metodas		Skaičiavimai		
Geometrija		Betonas		
L	6,30 m	(EI)c	0,162 MNm <sup>2</sup>	1.
b	0,45 m	CLT		
m	272,00 kg/m <sup>2</sup>	a2	0,06 m	2.
Betonas C25/30		a3	0 m	
h1	0,06 m	a4	0,06 m	3.
Ec	20,00 MPa	γ2	0,943734856	4.
Ecm	20,00 Gpa	γ3	1	
CLT plokštė C22		γ4		5.
h2	0,04 m	I2	0,0000024 m <sup>4</sup>	6.
h2,3	0,04 m	I3	0,0000024 m <sup>4</sup>	6.
h3	0,04 m	I4	m <sup>4</sup>	6.
h3,4	m	(EI)t	0,762648224 MNm <sup>2</sup>	7.
h4	m	TCC (Kompozitas)		
ht	0,12 m	γc	0,876538325	8.
At	0,036 m	γt	1	
Et	12000,00 MPa	At	0,036 m <sup>2</sup>	9.
Gr	80,00 MPa	NA	0,12379782 m	10.
Jungtis			70999604,31	
K	1000,0 kN/mm		11664000	
Seff	1,05 m		473330695,4	
Kscrew	60 kN/mm		194400000	
Seff	0,30 m	ac	0,02620218 m	11.
		at	0,06379782 m	12.
		(EI)eff, Eq	2,040854879 MNm <sup>2</sup>	13.

**A.1.1 Equivalent gamma method**

**32 Pav.** Kompozitinės plokštės efektyviojo lenkiamąjo standumo skaičiavimų rezultatai pagal gama metodą

**7 lentelė.** Gautų rezultatų suvedimas

Kompozitinė plokštė	Laboratorijos atlikti rezultatai	Tyrimo analitiniai skaičiavimai gama metodu	Dlubal modelio rezultatai	Analitiniai skaičiavimai Gama metodu
	Kai Fmax, tai w [mm]	EIeff [MNm <sup>2</sup> ]	Kai Fmax, tai w [mm]	EIeff [MNm <sup>2</sup> ]
CLT (120) + Betonas (60)	41,79	2,65	30,58	2,04

Atlikti rezultatai skiriasi dėl to, kad Dlubal RFEM programoje yra nemažai ne atitinkamų modelių tokio tipo kompozitines konstrukcijas. Nėra įvertinamos sluoksnių charakteristikos t.y nors medienos sluoksnis yra aprašomas kaip ortotropinė medžiaga ir taip vertinamas atskirų sluoksnių veikimas, tai vis tiek nėra CLT medienos plokštė, kuri yra atitinkamai suskirstyta į skirtingų aukščių sluoksnius. Negalima aprašyti jungiamų jungčių išdėstymo atstumų. Taip pat negalima patikrinti, pagal kokias sąlygas yra skaičiuojama programoje, nes nėra galimybės peržiūrėti skaičiavimus pagal formules. Skaičiuojant pagal analitinį ekvivalentinį gama metodą, neatitinkamas įvyko skaičiuojant kompozitinės plokštės neutralią ašį. Naudojama formulė nesutapo su laboratorinių tyrimų metu skaičiuota formule. Žr 33 pav.



$$(EI)_{eff} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad (2)$$

where

$$A_i = b_i h_i, \quad I_i = b_i h_i^3 / 12 \quad (3)$$

$$\gamma_2 = 1 \quad (4)$$

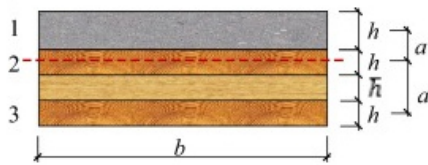
$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{s^2 E_1 A_1 s_{eff}}{k^2}} \quad (5)$$

$$\gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{s^2 E_1 A_1 \bar{h}}{G_R b^2}} \quad (6)$$

$$a_1 = \frac{h_1 + h_2}{2} - a_2 \quad (7)$$

$$a_3 = \frac{h_2 + h_3 + 2\bar{h}}{2} + a_2 \quad (8)$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2) - \gamma_3 E_3 A_3 (h_2 + h_3 + 2\bar{h})}{2 \sum_{i=1}^3 (\gamma_i E_i A_i)} \quad (9)$$



**33 Pav.** Laboratorinio tyrimo metu naudotos skaičiavimo formulės

Taip pat laboratorinio tyrimo analitiniuose skaičiavimuose yra rasta skaičiavimo klaidų, tai taip pat padidina skaičiavimų neatitikimą.

$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_c \cdot A_c \cdot (h_1/2 + h_1^* + h_2/2) - \gamma_3 \cdot E_t \cdot A_t \cdot (h_2/2 + h_2^* + h_3/2)}{\gamma_1 \cdot E_c \cdot A_c + \gamma_2 \cdot E_t \cdot A_t + \gamma_3 \cdot E_t \cdot A_t}$$

$$NA = \frac{\gamma_c E_c A_c (h_t + \frac{h_c}{2}) + \gamma_t E_t A_t (\frac{h_t}{2})}{\gamma_c E_c A_c + \gamma_t E_t A_t}$$

**34 Pav.** Gama metodu skaičiuojama neutralioji ašis pagal skirtingas formulės

Atliktame laboratoriniame tyrime buvo skaičiuojama kompozitinės plokštės normaliniai įtempiai pagal ULS derinį. Kadangi skaičiuojamas efektyvusis lenkiamasis standumas neatitinka laboratorinių tyrimų skaičiavimų, buvo naudojama tyrimo metu gauti parametrai. Skaičiavimai pateikiami 35 pav.

$$M = \frac{q_d \cdot l^2}{8} = \frac{4095 \cdot 6.3^2}{8} = 20.3 \text{ kNm} \quad (\text{A.21})$$

$$\sigma_{c,bending} = \frac{0.5 \cdot E_c \cdot h_c \cdot M}{EI_{eff}} = \frac{0.5 \cdot 20 \cdot 10^9 \cdot 0.06 \cdot 20300}{2.65 \cdot 10^6} = 4.6 \text{ MPa} \quad (\text{A.22})$$

$$\sigma_{c,normal} = \frac{\gamma_1 \cdot E_c \cdot a_1 \cdot M}{EI_{eff}} = \frac{0.876 \cdot 20 \cdot 10^9 \cdot 0.0418 \cdot 20300}{2.65 \cdot 10^6} = 5.6 \text{ MPa} \quad (\text{A.23})$$

$$\sigma_{c,top} = \sigma_{c,bending} + \sigma_{c,normal} \leq f_{c,d} = 4.6 \text{ MPa} + 5.6 \text{ MPa} \leq 30 \text{ MPa} \quad (\text{A.24})$$

$$\sigma_{c,bottom} = \sigma_{c,bending} - \sigma_{c,normal} \geq -f_{c,t,d} = 4.6 \text{ MPa} - 5.6 \text{ MPa} = -1 \text{ MPa} \geq -2 \text{ MPa} \quad (\text{A.25})$$

$$\sigma_{t,bending} = \frac{0.5 \cdot E_t \cdot h_t \cdot M}{EI_{eff}} = \frac{0.5 \cdot 12 \cdot 10^9 \cdot 0.04 \cdot 20300}{2.65 \cdot 10^6} = 1.84 \text{ MPa} \quad (\text{A.26})$$

$$\sigma_{t,normal} = \frac{\gamma_3 \cdot E_t \cdot a_3 \cdot M}{EI_{eff}} = \frac{0.94 \cdot 12 \cdot 10^9 \cdot 0.0882 \cdot 20300}{2.65 \cdot 10^6} = 7.62 \text{ MPa} \quad (\text{A.27})$$

$$\text{Degree of use} = \frac{\sigma_{t,bending}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{t,normal}}{f_{t,0,d}} \leq 1.0 \quad (\text{A.28})$$

$$\text{Degree of use} = \frac{1.84}{15.36} + \frac{7.62}{8.96} = 0.97 \leq 1.0 \quad (\text{A.29})$$

Įtempiai	
El eff	2,650
y1 su Ec	0,876
y2 su Et	1,000
y3 su Et	0,940
y4 su Et	0,000
a1	0,042 m
a2	0,008 m
a3	0,088 m
a4	0,000 m
qd	4,095 kN/m
Md	20,316 kNm
Ec	20,000
Et	12000,000
σ1	5,614 MPa
σ2	0,754 MPa
σ3	7,627 MPa
σ4	0,000 MPa
σm,1	4,600 MPa
σm,2	1,840 MPa
σm,3	1,840 MPa
σm,4	0,000 MPa
h1	0,060 m
h2	0,040 m
h3	0,040 m
h4	0,000 m
σ1,top	-10,214 MPa
σ1,bottom	-1,015 MPa
σ2,top	-2,594 MPa
σ2,bottom	1,086 MPa
σ3,top	5,787 MPa
σ3,bottom	9,467 MPa
σ4,top	0,000 MPa
σ4,bottom	0,000 MPa

**35 Pav.** Normalinių įtempių skaičiavimų palyginimas tarp laboratorinio tyrimo ir baigiamojo projekto metodikų

Naudojantis laboratorinių tyrimų metu gautais rezultatais ir skaičiuojant pagal 2.1.2 poskirsnyje pateiktas formules ir taikytą skaičiavimų metodą skirsnyje 2.1. Buvo apskaičiuoti normaliniai įtempiai, gauti rezultatai pateikiami lentelėje. Geltonai pažymėtuose langeliuose pateiktoje rezultatų lentelėje matome, kad rezultatai sutampa, kadangi buvo skaičiuojama pagal tas pačias formules ir pasirinkti vienodi dydžiai.

## Išvados

1. Išanalizavus įvairius literatūros šaltinius nustatyta, kad medienos CLT ir betono kompozitinės perdangos pasižymi labai geru tarpusavio stiprumu, gali iki trijų kartų išlaikyti didesnę apkrovą ir iki šešių kartų padidinti lenkiamąjį standumą jei abu elementai yra gerai sujungti. Didesnis kompozito elementų standumas pasiekiamas dėl to, kad betono skirtingai nei medienos tamprumo modulis yra didesnis. Elementų tarpusavio pagrindiniai jungimo būdai yra naudojant kaiščius, medsraigčius, įpjovas, ir plienines plokšteles.
2. Sukūrus penkis skirtingus kompozitinės konstrukcijos perdangos plokštės variantus su dvejais skirtingais jungimo būdais, buvo atlikti analitiniai rankiniai skaičiavimai pagal Eurokodo 5, B priedą. Atlikti skaičiavimai parodė, kad atliktuose skaičiavimų variantuose kompozitinės perdangos plokštės sujungtos įpjovų jungtimis buvo pranašesnės už kompozitines perdangos plokštes, kai šios sujungtos medraigčiais.
3. Baigtinių elementų programoje Dlubal RFEM 5.25 buvo sumodeliuotos penkios kompozitinės perdangos plokštės su dvejais skirtingais jungimo būdais. Modeliavimas pagrįstas dalinai sujungiant du projektuojamus paviršius, naudojant kontaktinės kietos medžiagos (contact solid) parametrus. Atlikti skaičiavimai parodė, kad kompozitinės perdangos plokštės sujungtos įpjovomis, yra pranašesnės už kompozitinius bandinius sujungiant medsraigčiais.
4. Atlikus analitinių ir baigtinių elementų programos skaičiavimų palyginimą su pasirinkto laboratorinio tyrimo atliktais skaičiavimais, nustatyta, kad skaičiuojant pagal gama metodą skaičiavimų rezultatai nesutapo, nes skirtingi literatūros šaltiniai pateikia skirtingus gama skaičiavimo metodus ir tie patys dydžiai yra apskaičiuojami naudojant skirtingas skaičiavimo formules, todėl gauti rezultatai skiriasi per 23%.
5. Skaičiuojant baigtinių elementų skaičiavimo programa Dlubal RFEM 5.25 buvo sukurtas analogiškas skaičiavimo modelis laboratorinių tyrimo metu apkrautai plokštei, gauti rezultatai skiriasi per 27%, kadangi inžinerinėje skaičiavimo programoje nėra galimybės tinkamai charakterizuoti CLT plokštės savybių, ir aprašyti išdėstytų jungčių atstumų per plokštės ilgį.

## Literatūros sąrašas

1. Shafayet Ahmed ir Ingrid Arocho. Mass timber building material in the U.S. construction industry: Determining the existing awareness level, construction-related challenges, and recommendations to increase its current acceptance level. *Cleaner Engineering and Technology* [interaktyvus]. 2020, **1** [žiūrėta 2022-03-15]. ISSN 2666-7908. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790820300070>
2. ChenZi-xiang, LeiQiong, HeRui-lin, Zhang, Zhong-feng, Ahmed Jalal Khan ir Chowdhury. Review on antibacterial biocomposites of structural laminated veneer lumber. *Saudi Journal of Biological Sciences*. [interaktyvus]. 2016, **23**(1), 142-147 [žiūrėta 2022-03-15]. ISSN 1319-562X . Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319562X1500220X>
3. Lorenzo Boccadoro, Simon Zweidlerb, René Steigerc ir Andrea Frangia. Bending tests on timber-concrete composite members made of beech laminated veneer lumber with notched connection. *Engineering Structures*. [interaktyvus]. 2017, **132**, 14-28 [žiūrėta 2022-03-15]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029616312597>
4. Hao Lia, Brad Jianhe Wang, Libin Wanga ir Yang Weia. An experimental and modeling study on apparent bending moduli of cross-laminated bamboo and timber (CLBT) in orthogonal strength directions. *Case Studies in Construction Materials*. [interaktyvus]. 2022, **16**, [žiūrėta 2022-03-15]. ISSN 2214-5095. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522000067>
5. Laurent Corpataux, Shinya Okudaa ir Harn Wei Kuab. Panel and plate properties of Cross-laminated timber (CLT) with tropical fast-growing timber species in compliance with Eurocode 5. *Construction and Building Materials*. [Interaktyvus]. 2020, **261**, [žiūrėta 2022-03-15]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820316779>
6. Shafayet Ahmed ir Ingrid Arocho. Analysis of cost comparison and effects of change orders during construction: Study of a mass timber and a concrete building project. *Journal of Building Engineering*. [interaktyvus]. 2021, **33**, [žiūrėta 2022-03-15]. ISSN 2352-7102. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710220334896>
7. Azad A. Mohammeda ir Othman K. Mohammedb. Composite concrete – Unregularized timber section for flat roof construction. *Structures*. [interaktyvus]. 2020, **27**, 1324-1334, ISSN 2352-0124. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012420303295>
8. P. kumar mehta. Greening of the concrete industry for sustainable development. *Concrete international*. [interaktyvus] 2002, **9**, [žiūrėta 2022-03-15]. Prieiga per: <http://maquinamole.net/EcoSmartConcrete.com/docs/trmehta02.pdf>
9. Xiaolu Guoa, Huisheng Shia ir Warren A. Dick. Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*. [interaktyvus]. 2020, **32**(2), 142-147 [žiūrėta 2022-03-15]. ISSN 0958-9465. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095894650900167X>
10. Panjaitan, Togar WS, et al. Toward the best practice emissions reduction in an emerging economy: an analysis of cement manufacturing in Indonesia. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*. [interaktyvus] 2020, **8**(1) 103 [žiūrėta 2022-03-15]. ISSN 2345-0282. Prieiga per: [http://jssidoi.org/jesi/uploads/articles/29/Panjaitan\\_Toward\\_the\\_best\\_practice\\_emissions\\_reduction\\_in\\_an\\_emerging\\_economy\\_an\\_analysis\\_of\\_cement\\_manufacturing\\_in\\_Indonesia.pdf](http://jssidoi.org/jesi/uploads/articles/29/Panjaitan_Toward_the_best_practice_emissions_reduction_in_an_emerging_economy_an_analysis_of_cement_manufacturing_in_Indonesia.pdf)
11. Mejeoumov, Gleb Gennadievich. Improved cement quality and grinding efficiency by means of closed mill circuit modeling. *Texas A&M University ProQuest Dissertations Publishing*. [interaktyvus]. 2007. [žiūrėta 2022-03-16]. Prieiga per:

- <https://search.proquest.com/openview/95eb16488835e1ddb48934989b0a74dc/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750>
12. Eric Steinberg, Ricky Selle ir Thorsten Faust. Connectors for Timber–Lightweight Concrete Composite Structures. *Journal of Structural Engineering*. [interaktyvus]. 2013, 129(11) [žiūrėta 2022-03-16]. ISSN (online): 1943-541X. Prieiga per: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9445%282003%29129%3A11%281538%29>
  13. Lukáš Blesák, Eva Caldová, František Wald. Unprotected timber- fibre reinforced concrete slab in fire. *Wood research*. [interaktyvus]. 2015, **60**(4), 605-616 [žiūrėta 2022-03-16]. ISSN 1336-4561. Prieiga per: <http://www.woodresearch.sk/wr/201504/08.pdf>
  14. Alfredo Dias, Massimo Fragiaco, Kiril Gramatikov, Benjamin Kreis, Frank Kupferle, Sandra Monteiro, Jaroslav Sandanus, Jörg Schänzlin, Kay-Uwe Schober, Wendel Sebastian, Kristian Sogel. Design of timber-concrete composite structures. *A state-of-the-art report by COST Action FP1402 / WG 4*. [interaktyvus]. 2018, [žiūrėta 2022-03-16]. ISSN 0945-067X. Prieiga per: <https://www.cost.eu/uploads/2018/11/Design-of-Timber-Concrete-Composite-Structures.pdf>
  15. Meena, Rahul & Schollmayer, Martin & Tannert, Thomas. Experimental and Numerical Investigations of Fire Resistance of Novel Timber-Concrete-Composite Decks. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. [interaktyvus]. 2013, **28**(6), [žiūrėta 2022-03-16]. 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000539. Prieiga per: [https://www.researchgate.net/publication/259946739\\_Experimental\\_and\\_Numerical\\_Investigations\\_of\\_Fire\\_Resistance\\_of\\_Novel\\_Timber-Concrete-Composite\\_Decks](https://www.researchgate.net/publication/259946739_Experimental_and_Numerical_Investigations_of_Fire_Resistance_of_Novel_Timber-Concrete-Composite_Decks)
  16. Rodrigues, João Nuno & Dias, A. & Providencia, Paulo. Timber-Concrete Composite Bridges: State-of-the-Art Review. *Bioresources*. [interaktyvus]. 2013, 8(4), 6630-6649 [žiūrėta 2022-03-16]. DOI 10.15376/biores.8.4.6630-6649. Prieiga per: [https://www.researchgate.net/publication/277289271\\_Timber-Concrete\\_Composite\\_Bridges\\_State-of-the-Art\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/277289271_Timber-Concrete_Composite_Bridges_State-of-the-Art_Review)
  17. Ogrin, A., & Hozjan, T. Timber-Concrete Composite Structural Elements. In (Ed.), *Engineered Wood Products for Construction*. [interaktyvus]. 2021, [žiūrėta 2022-03-16]. DOI: 10.5772/intechopen.99624. Prieiga per: <https://www.intechopen.com/online-first/78247#B1>
  18. Ario Ceccotti. Composite concrete-timber structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*. [interaktyvus]. 2012, **4**(3), 264-275 [žiūrėta 2022-03-16]. Prieiga per: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pse.126>
  19. Xiaoyu Zhang, Xiamin Hu, Hongwei Gong, Jing Zhang, Zhicheng Lv, Wan Hong. Experimental study on the impact sound insulation of cross laminated timber and timber-concrete composite floors. *Applied Acoustics*. [interaktyvus]. 2020, **161** [žiūrėta 2022-03-16]. ISSN 0003-682X. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X19309545#b0075>
  20. Treven, Anita & Hozjan, Tomaz. Fire resistance of timber-concrete composite slabs: A simplified method. *Materials and Structures*. [interaktyvus]. 2020, **53**(4) [žiūrėta 2022-03-16]. DOI 10.1617/s11527-020-01540-6. Prieiga per: [https://www.researchgate.net/publication/343778391\\_Fire\\_resistance\\_of\\_timber-concrete\\_composite\\_slabs\\_A\\_simplified\\_method](https://www.researchgate.net/publication/343778391_Fire_resistance_of_timber-concrete_composite_slabs_A_simplified_method)
  21. Andrea Frangi, Ph.D.; Markus Knobloch, Ph.D.; and Mario Fontana, Ph.D. Fire Design of Timber-Concrete Composite Slabs with Screwed Connections. *Journal of Structural Engineering*. [interaktyvus]. 2010, **136**(2), 219-228 [žiūrėta 2022-03-16]. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000101. Prieiga per: <https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0000101>

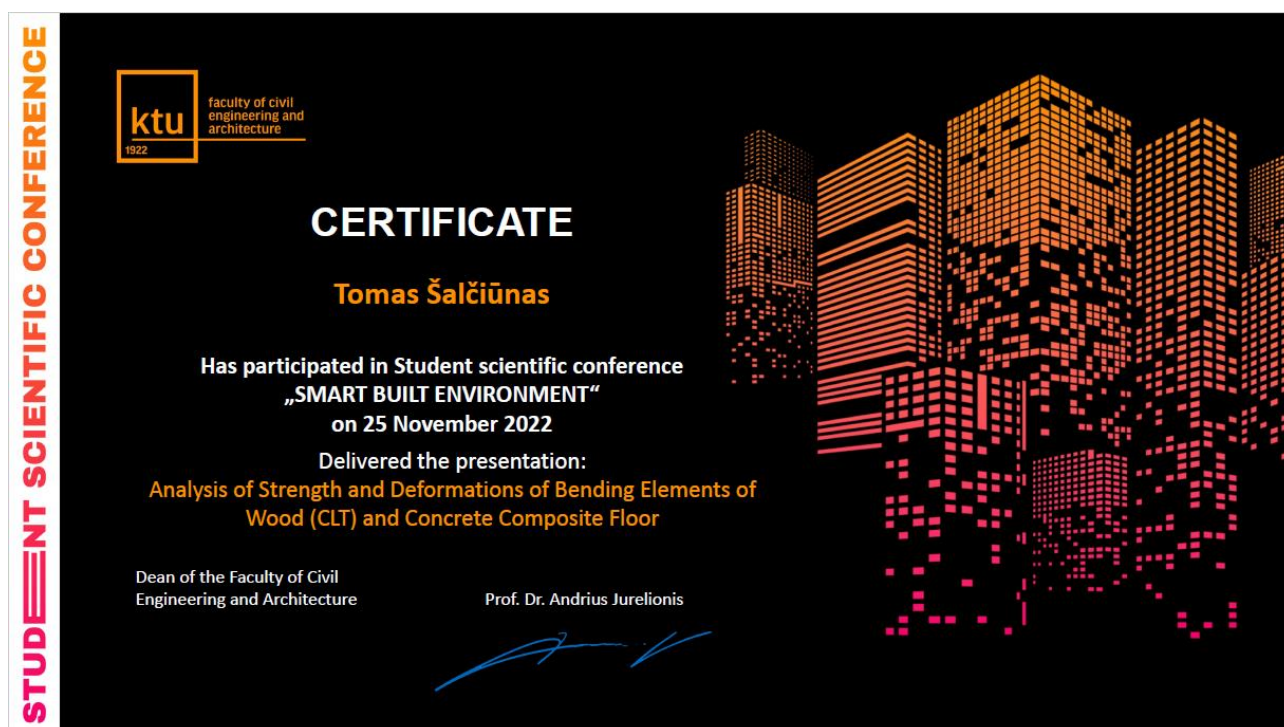
22. David Yeoh, Massimo Fragiaco, David Carradine. Fatigue behaviour of timber–concrete composite connections and floor beams. *Engineering Structures*. [interaktyvus]. 2013, **56**, 2240-2248 [žiūrėta 2022-03-16]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029613004094#b0010>
23. Yeoh, David Eng Chuan. Behaviour and Design of Timber-Concrete Composite Floor System, Ph.D. thesis. [interaktyvus]. 2010 [žiūrėta 2022-03-17]. Prieiga per: <http://hdl.handle.net/10092/4428>
24. Massimo Fragiaco, Amedeo Gregori, Junqing Xue, Cristoforo Demartino, Matteo Toso. Timber-concrete composite bridges: Three case studies. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. [interaktyvus]. 2018, **5**(6), 429-438 [žiūrėta 2022-03-17]. ISSN 2095-7564. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756418304574>
25. Lei Zhang, Sigong Zhang, Ying Hei Chui. Analytical evaluation to the timber-concrete composite beam connected with notched connections. *Engineering Structures*. [interaktyvus]. 2021, **227**, [žiūrėta 2022-03-17]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029620340670>
26. Schönborn, F., Flach, M. and Feix, J. Bemessungsregeln und Ausführungshinweise für Schubkerven im Holz-Beton-Verbundbau. *Beton- und Stahlbetonbau*, [interaktyvus]. 2011, **106**(6), 385-393 [žiūrėta 2022-03-17]. <https://doi.org/10.1002/best.201100013>. Prieiga per: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/best.201100013>
27. Lei Zhang, Ying Hei Chui, Douglas Tomlinson. Experimental investigation on the shear properties of notched connections in mass timber panel-concrete composite floors. *Construction and Building Materials*. [interaktyvus]. 2020, **234** [žiūrėta 2022-03-17]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819328272#b0015>
28. Katharina Müller, Andrea Frangi. Micro-notches as a novel connection system for timber-concrete composite slabs. *Engineering Structures*. [interaktyvus]. 2021, **245** [žiūrėta 2022-03-17]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029621008385>
29. Luca Marchi, Luca Pozza. Timber-concrete composite connections using GFRP notches fastened with self-tapping screws: Conceiving, numerical modelling and testing. *Construction and Building Materials*. [interaktyvus]. 2021, **294** [žiūrėta 2022-03-17]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821013398>
30. Samuel C. Auclair, Luca Sorelli, Alexander Salenikov. A new composite connector for timber-concrete composite structures. *Construction and Building Materials*. [interaktyvus]. 2016, **112**, 84-92 [žiūrėta 2022-03-17]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816300848>
31. T. Tannert, B. Endacott, M. Brunner, T. Vallée. Long-term performance of adhesively bonded timber-concrete composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. [interaktyvus]. 2017, **72**, 51-61 [žiūrėta 2022-03-17]. ISSN 0143-7496. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749616302019>
32. Dolores Otero-Chans, Javier Estévez-Cimadevila, Félix Suárez-Riestra, Emilio Martín-Gutiérrez. Experimental analysis of glued-in steel plates used as shear connectors in Timber-Concrete-Composites. *Engineering Structures*. [interaktyvus]. 2018, **170**, 1-10 [žiūrėta 2022-03-17]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029617340117>
33. S. Di Nino, A. Gregori, M. Fragiaco. Experimental and numerical investigations on timber-concrete connections with inclined screws. *Engineering Structures*. [interaktyvus]. 2020, **209**

- [žiūrėta 2022-03-17]. ISSN 0141-0296. Prieiga per:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029619309691>
34. Marchi, L., Scotta, R. & Pozza, L. Experimental and theoretical evaluation of TCC connections with inclined self-tapping screws. *Mater Struct.* [interaktyvus]. 2018, **50**(180) [žiūrėta 2022-03-17]. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1047-1>. Prieiga per:  
<https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-017-1047-1>
35. Saulius Kavaliauskas. Kompozitinių medinių-betoninių sijų tarp sluoksnių išžambinės medstraigtinės jungties elgsena. Daktaro disertacija [interaktyvus]. Vilniaus gedimino technikos universitetas, 2010 [žiūrėta 2022-03-18]. Prieiga per:  
<https://vb.vgtu.lt/object/elaba:1929768/1929768.pdf>
36. Truong-Thanh Nguyen, Luca Sorelli, Eugen Brühwiler. An Analytical Method to Predict the Structural Behavior of Timber-Concrete Structures With Brittle-to-Ductile Shear Connector Laws. *Engineering Structures.* [interaktyvus]. 2020, **221** [žiūrėta 2022-03-18]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029619347443>
37. EN 1995-1-1: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General – Common. [žiūrėta 2022-03-18]. Prieiga per: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1995.1.1.2004.pdf>
38. Sung-Jun Pang, Kyung-Sun Ahn, Seok-man Jeong, Gun-Cheol Lee, Hyeon Soo Kim, Jung-Kwon Oh. Prediction of bending performance for a separable CLT-concrete composite slab connected by notch connectors. *Journal of Building Engineering.* [interaktyvus]. 2022, **49** [žiūrėta 2022-03-18]. ISSN 2352-7102. Prieiga per:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221017587#bib32>
39. Samuel Cuerrier-Auclair. Design-guide-for-timber-concrete-composite-floors-in-canada.[interaktyvus]. 2020, [žiūrėta 2022-03-18], ISBN 978-0-86488-594-4 (digital). Prieiga per: <https://pdfcoffee.com/design-guide-for-timber-concrete-composite-floors-in-canada-pdf-free.html>
40. Mario van der Linden. Timber-concrete composite beams. *TNO Building & Construction Research.* [interaktyvus]. 1999 **44**(3), 215-239 [žiūrėta 2022-03-18] ISSN 0046-7316. Prieiga per:  
<http://heronjournal.nl/44-3/5.pdf>
41. Andrea Frangi, Mario Fontana. Elasto-Plastic Model for Timber-Concrete Composite Beams with Ductile Connection. *Structural Engineering International.* [interaktyvus]. 2018, **13**(1), 47-57 [žiūrėta 2022-03-18]. Prieiga per:  
[https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.2749/101686603777964856?casa\\_token=oxiJVoG1K0IAAAAA:gHrZmDWQ-BdjjZ-VqNYnWXm1HfzsJ5SOFEuYdN-kCjrn-9UDKYi5fokIDmwpHvAqiUzUzzltwMKbcA](https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.2749/101686603777964856?casa_token=oxiJVoG1K0IAAAAA:gHrZmDWQ-BdjjZ-VqNYnWXm1HfzsJ5SOFEuYdN-kCjrn-9UDKYi5fokIDmwpHvAqiUzUzzltwMKbcA)
42. Zhang Chao, Gauvreau Paul. Timber-Concrete Composite Systems with Ductile Connections. *American Society of Civil Engineers.* [interaktyvus]. 2015, **141**(7) [žiūrėta 2022-03-18]. DO - 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001144. Prieiga per:  
[https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0001144?casa\\_token=SDUzjLkw9GwAAAAA%3Arx3174amuTzrE9EyLzzdp1bRBxpw8BZ0XA2mzxemqd1mp58AAyFRisSY0YOx38S0VDjB1IVvWn4wKrg](https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0001144?casa_token=SDUzjLkw9GwAAAAA%3Arx3174amuTzrE9EyLzzdp1bRBxpw8BZ0XA2mzxemqd1mp58AAyFRisSY0YOx38S0VDjB1IVvWn4wKrg)
43. Serge Lamothe, Luca Sorelli, Pierre Blanchet, Philippe Galimard. Lightweight and slender timber-concrete composite floors made of CLT-HPC and CLT-UHPC with ductile notch connectors. *Engineering Structures.* [interaktyvus]. 2021, **243** [žiūrėta 2022-05-24]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029621005599>

44. Ayesha Siddika, Md. Abdullah Al Mamun, Farhad Aslani, Yan Zhuge, Rayed Alyousef, Ailar Hajimohammadi. Cross-laminated timber–concrete composite structural floor system: A state-of-the-art review. *Engineering Failure Analysis*. [interaktyvus]. 2021, **130** [žiūrėta 2022-05-24]. ISSN 1350-6307. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630721006270>
45. Markus Lukacevic, Maximilian Autengruber, Thomas Raimer, Josef Eberhardsteiner, Josef Füssl. Effect of cast-in-place concrete application on moisture distribution in timber-concrete composite floors with notched connections, investigated via finite element simulations. *Journal of Building Engineering*. [interaktyvus]. 2021, **42** [žiūrėta 2022-05-24]. ISSN 2352-7102. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221008639>
46. Wacker James P. Dias Alfredo M. P. G. Hosteng Travis K. 100-Year Performance of Timber–Concrete Composite Bridges in the United States. *Journal of Bridge Engineering*. [interaktyvus]. 2020, **25**(3) [žiūrėta 2022-05-24]. 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001513. Prieiga per: <https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0001513>
47. Samuel Cuerrier-Auclair, M.Sc., P.Eng.. Design Guide for Timber-Concrete Composite Floors in Canada. *Special Publication SP-540E*. [interaktyvus]. 2020, [žiūrėta 2022-12-05]. ISBN 978-0-86488-594-4 (digital). Prieiga per: [https://research.thinkwood.com/en/permalink/catalogue2460?utm\\_term=&utm\\_campaign=&utm\\_source=adwords&utm\\_medium=ppc&hsa\\_acc=4890703031&hsa\\_cam=19109494552&hsa\\_grp=&hsa\\_ad=&hsa\\_src=x&hsa\\_tgt=&hsa\\_kw=&hsa\\_mt=&hsa\\_net=adwords&hsa\\_ver=3&gclid=Cj0KCQiAkMGcBhCSARIsAIW6d0AkX8He0HLXtGWUoR1hPqoJxt-Mtq6kX3unckcJ4zOUHa\\_80XOoeSYaAm2fEALw\\_wcB](https://research.thinkwood.com/en/permalink/catalogue2460?utm_term=&utm_campaign=&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=4890703031&hsa_cam=19109494552&hsa_grp=&hsa_ad=&hsa_src=x&hsa_tgt=&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gclid=Cj0KCQiAkMGcBhCSARIsAIW6d0AkX8He0HLXtGWUoR1hPqoJxt-Mtq6kX3unckcJ4zOUHa_80XOoeSYaAm2fEALw_wcB)



1 priedas. Konferencijos sertifikatas



2 priedas. Skaičiavimai pagal ekvivalentinį gama metodą

2 bandymo skaičiavimai, efektyvusis standumas:

**Betonas**

$$(EI)_c = E_c \cdot I_c = E_c \cdot \frac{b \cdot h_c^3}{12} = 30 \cdot 10^9 \cdot \frac{1 \cdot 0,08^3}{12} = 1,28 \text{ MNm}^2; \quad (2.1)$$

**CLT**

$$a_2 = h_2 + \bar{h}_{2,3} + \frac{h_3}{2} = 0,03 + 0,03 + 0,015 = 0,075 \text{ m}; \quad (2.2)$$

$$a_3 = 0 \text{ m}; \quad (2.3)$$

$$a_2 = h_4 + \bar{h}_{3,4} + \frac{h_3}{2} = 0,03 + 0,03 + 0,015 = 0,075 \text{ m}; \quad (2.4)$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{1 + \frac{\pi \cdot E_t \cdot h_2 \cdot \bar{h}_{2,3}}{G_R \cdot L^2}} = \frac{1}{1 + \frac{3,14 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 0,03 \cdot 0,03}{56 \cdot 10^8 \cdot 6,0^2}} = 0,962; \quad (2.5)$$

$$\gamma_3 = 0; \quad (2.6)$$

$$\gamma_4 = \frac{1}{1 + \frac{\pi \cdot E_t \cdot h_4 \cdot \bar{h}_{3,4}}{G_R \cdot L^2}} = \frac{1}{1 + \frac{3,14 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 0,03 \cdot 0,03}{56 \cdot 10^8 \cdot 6,0^2}} = 0,962; \quad (2.7)$$

$$I_2 = \frac{b \cdot h_2^3}{12} = \frac{1,0 \cdot 0,03^3}{12} = 2,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4; \quad (2.8)$$

$$I_3 = \frac{b \cdot h_3^3}{12} = \frac{1,0 \cdot 0,03^3}{12} = 2,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4; \quad (2.9)$$

$$I_4 = \frac{b \cdot h_4^3}{12} = \frac{1,0 \cdot 0,03^3}{12} = 2,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4; \quad (2.10)$$

$$(EI)_t = \sum_{i=1}^n (E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2) = (E_t \cdot I_2 + \gamma_2 \cdot E_t \cdot b \cdot h_2 \cdot a_2^2) + (E_t \cdot I_4 + \gamma_4 \cdot E_t \cdot b \cdot h_4 \cdot a_4^2) = (9 \cdot 10^9 \cdot 2,25 \cdot 10^{-6} + 0,962 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 1,0 \cdot 0,03 \cdot 0,075^2) + (9 \cdot 10^9 \cdot 2,25 \cdot 10^{-6} + 0,962 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 1,0 \cdot 0,03 \cdot 0,075^2) = 2,962 \text{ MNm}^2; \quad (2.11)$$

### Kompozitas

$$\gamma_c = \frac{1}{1 + \frac{\pi \cdot E_c \cdot A_c \cdot s_{eff}}{K \cdot L^2}} = \frac{1}{1 + \frac{3,14^2 \cdot 30 \cdot 10^9 \cdot 1,0 \cdot 0,08 \cdot 1,05}{1666,7 \cdot 10^6 \cdot 6,0^2}} = 0,717; \quad (2.12)$$

$$\gamma_t = 1; \quad (2.13)$$

$$A_t = A_2 + A_3 + A_4 = b \cdot (h_2 + h_3 + h_4) = 1,0 \cdot (0,03 + 0,03 + 0,03) = 0,09 \text{ m}^2; \quad (2.14)$$

$$NA = \frac{\gamma_c \cdot E_c \cdot A_c \cdot (h_t + \frac{h_c}{2}) + \gamma_t \cdot E_t \cdot A_t \cdot (\frac{h_t}{2})}{\gamma_c \cdot E_c \cdot A_c + \gamma_t \cdot E_t \cdot A_t} = \frac{0,717 \cdot 30 \cdot 10^9 \cdot 0,08 \cdot (0,15 + \frac{0,08}{2}) + 1 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 0,09 \cdot (\frac{0,15}{2})}{0,717 \cdot 30 \cdot 10^9 \cdot 0,08 + 1 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 0,09} = 0,153 \text{ m}; \quad (2.15)$$

$$a_c = h_t + \frac{h_c}{2} - NA = 0,15 + \frac{0,08}{2} - 0,153 = 0,0368 \text{ m}; \quad (2.16)$$

$$a_t = NA - \frac{h_t}{2} = 0,153 - \frac{0,15}{2} = 0,0782 \text{ m}; \quad (2.17)$$

$$EI_{eff} = (EI)_c + \gamma_c \cdot E_c \cdot A_c \cdot a_c^2 + (EI)_t + \gamma_t \cdot E_t \cdot A_t \cdot a_t^2 = 1,28 \cdot 10^6 + 0,717 \cdot 30 \cdot 10^9 \cdot 0,08 \cdot 0,0368^2 + 2,962 \cdot 10^6 + 1 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 0,09 \cdot 0,0782^2 = 11,527 \text{ MNm}^2; \quad (2.18)$$

### Įlinkio skaičiavimas

$$w = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot EI_{eff}} = \frac{5 \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 6^4}{384 \cdot 11,527 \cdot 10^6} = 0,00732 \text{ m}; \quad (2.19)$$

### 3 priedas. Natūraliojo dažnio skaičiavimai

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}} = \frac{3,14}{2 \cdot 6^2} \cdot \sqrt{\frac{6,393}{257,00}} = 6,878 \text{ Hz}; \quad (3.1)$$

Čia:  $(EI)_L$  – efektyvusis lenkiamasis standumas išilgai elementų sluoksnių.

### 4 priedas. Normalinių įtempių skaičiavimas

4 bandinio su įpjovomis normalinių įtempių skaičiavimas:

$$EI_{eff} = 12,494 \text{ MNm}^2; \quad (4.1)$$

$$\gamma_1 = 0,710; \quad (4.2)$$

$$\gamma_2 = 0,962; \quad (4.3)$$

$$\gamma_3 = 1,0; \quad (4.4)$$

$$\gamma_4 = 0,962; \quad (4.5)$$

$$o_1 = h_t + \frac{h_1}{2} = 0,15 + \frac{0,08}{2} = 0,190 \text{ m}; \quad (4.6)$$

$$o_2 = h_t - \frac{h_2}{2} = 0,15 - \frac{0,03}{2} = 0,135\text{m}; \quad (4.7)$$

$$o_3 = h_4 + \bar{h}_{3,4} + \frac{h_3}{2} = 0,03 + 0,03 + 0,015 = 0,075 \text{ m}; \quad (4.8)$$

$$o_4 = \frac{h_4}{2} = \frac{0,03}{2} = 0,015 \text{ m}; \quad (4.9)$$

$$NA = \frac{E_c \cdot b \cdot h_1 \cdot o_1 + E_t \cdot b \cdot (h_2 \cdot o_2 + h_3 \cdot o_3 + h_4 \cdot o_4)}{E_c \cdot b \cdot h_1 + E_t \cdot b \cdot (h_2 + h_3 + h_4)} = \frac{31 \cdot 10^9 \cdot 1,0 \cdot 0,08 \cdot 0,190 + 10000 \cdot 10^6 \cdot 1,0 \cdot (0,03 \cdot 0,135 + 0,03 \cdot 0,075 + 0,03 \cdot 0,015)}{31 \cdot 10^9 \cdot 1,0 \cdot 0,08 + 10000 \cdot 10^6 \cdot 1,0 \cdot (0,03 + 0,03 + 0,03)} = 0,159 \text{ m}; \quad (4.10)$$

$$a_1 = NA - o_1 = 0,159 - 0,190 = 0,039 \text{ m}; \quad (4.11)$$

$$a_2 = NA - o_2 = 0,159 - 0,135 = 0,016 \text{ m}; \quad (4.12)$$

$$a_3 = NA - o_3 = 0,159 - 0,075 = 0,076 \text{ m}; \quad (4.13)$$

$$a_4 = NA - o_4 = 0,159 - 0,015 = 0,136 \text{ m}; \quad (4.14)$$

$$M = \frac{q_d \cdot l^2}{8} = \frac{5 \cdot 6,0^2}{8} = 22,5 \text{ kNm}; \quad (4.15)$$

$$\sigma_1 = \frac{\gamma_1 \cdot E_c \cdot a_1 \cdot M_d}{(EI)_{eff}} = \frac{0,710 \cdot 31 \cdot 10^9 \cdot 0,039 \cdot 22500}{12,494 \cdot 10^6} = 1,542 \text{ MPa}; \quad (4.16)$$

$$\sigma_2 = \frac{\gamma_2 \cdot E_t \cdot a_2 \cdot M_d}{(EI)_{eff}} = \frac{0,962 \cdot 10 \cdot 10^9 \cdot 0,016 \cdot 22500}{12,494 \cdot 10^6} = 0,279 \text{ MPa}; \quad (4.17)$$

$$\sigma_3 = \frac{\gamma_3 \cdot E_t \cdot a_3 \cdot M_d}{(EI)_{eff}} = \frac{1,0 \cdot 10 \cdot 10^9 \cdot 0,076 \cdot 22500}{12,494 \cdot 10^6} = 1,371 \text{ MPa}; \quad (4.18)$$

$$\sigma_4 = \frac{\gamma_4 \cdot E_t \cdot a_4 \cdot M_d}{(EI)_{eff}} = \frac{0,962 \cdot 10 \cdot 10^9 \cdot 0,136 \cdot 22500}{12,494 \cdot 10^6} = 2,359 \text{ MPa}; \quad (4.19)$$

$$\sigma_{m,1} = \frac{0,5 \cdot E_c \cdot h_1 \cdot M_d}{(EI)_{eff}} = \frac{0,5 \cdot 31 \cdot 10^9 \cdot 0,08 \cdot 22500}{12,494 \cdot 10^6} = 2,233 \text{ MPa}; \quad (4.20)$$

$$\sigma_{m,2} = \frac{0,5 \cdot E_t \cdot h_2 \cdot M_d}{(EI)_{eff}} = \frac{0,5 \cdot 10 \cdot 10^9 \cdot 0,03 \cdot 22500}{12,494 \cdot 10^6} = 0,270 \text{ MPa}; \quad (4.21)$$

$$\sigma_{m,3} = \frac{0,5 \cdot E_t \cdot h_2 \cdot M_d}{(EI)_{eff}} = \frac{0,5 \cdot 10 \cdot 10^9 \cdot 0,03 \cdot 22500}{12,494 \cdot 10^6} = 0,270 \text{ MPa}; \quad (4.22)$$

$$\sigma_{m,4} = \frac{0,5 \cdot E_t \cdot h_2 \cdot M_d}{(EI)_{eff}} = \frac{0,5 \cdot 10 \cdot 10^9 \cdot 0,03 \cdot 22500}{12,494 \cdot 10^6} = 0,270 \text{ MPa}; \quad (4.23)$$

$$\sigma_{1,top} = -\sigma_1 - \sigma_{m,1} = -1,542 - 2,233 = -3,775 \text{ MPa}; \quad (4.24)$$

$$\sigma_{1,bottom} = -\sigma_1 + \sigma_{m,1} = -1,542 + 2,233 = 0,691 \text{ MPa}; \quad (4.25)$$

$$\sigma_{2,top} = -\sigma_2 - \sigma_{m,2} = -0,279 - 0,270 = -0,549 \text{ MPa}; \quad (4.26)$$

$$\sigma_{2,bottom} = -\sigma_2 + \sigma_{m,2} = -0,279 + 0,270 = -0,009 \text{ MPa}; \quad (4.27)$$

$$\sigma_{3,top} = \sigma_3 - \sigma_{m,3} = 1,371 - 0,270 = 1,101 \text{ MPa}; \quad (4.28)$$

$$\sigma_{3,bottom} = \sigma_3 + \sigma_{m,3} = 1,371 - 0,270 = 1,641 \text{ MPa}; \quad (4.29)$$

$$\sigma_{4,top} = \sigma_4 - \sigma_{m,4} = 2,359 - 0,270 = 2,089 \text{ MPa}; \quad (4.30)$$

$$\sigma_{4,bottom} = \sigma_4 + \sigma_{m,4} = 2,359 + 0,270 = 2,629 \text{ MPa}; \quad (4.31)$$

$$\sigma_{c,top} = \sigma_{m,1} + \sigma_1 \leq f_{c,d} = 2,233 \text{ MPa} + 1,542 \text{ MPa} \leq 16,67 \text{ MPa}; \quad (4.32)$$

$$\sigma_{c,bottom} = \sigma_{m,1} - \sigma_1 \geq -f_{ctd} = 2,233 \text{ MPa} - 1,542 \text{ MPa} = 0,691 \text{ MPa} \geq -1,2 \text{ MPa}; \quad (4.33)$$

$$\text{Išnaudojimas} = \frac{\sigma_{m,2}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_4}{f_{t,0,d}} \leq 1,0; \quad (4.34)$$

$$\text{Išnaudojimas} = \frac{0,270}{10,15} + \frac{2,359}{5,54} = 0,457 \leq 1,0; \quad (4.35)$$

### Sąlygos tenkinamos

## 5 priedas. Lyginamųjų tyrimų skaičiavimai

Laboratorinių tyrimo metu atlikti analitiniai skaičiavimai:

$$\gamma_1 = \left(1 + \frac{\pi^2 \cdot E_{cm} \cdot A_c \cdot s_i}{k_s \cdot l^2}\right)^{-1} = \left(1 + \frac{\pi^2 \cdot 20 \cdot 10^9 \cdot 0,027 \cdot 1,05}{10 \cdot 10^8 \cdot 6,3^2}\right)^{-1} = 0,876; \quad (5.1)$$

$$\gamma_3 = \left(1 + \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot A_t \cdot h_2^*}{l^2 \cdot G_{90} \cdot b}\right)^{-1} = \left(1 + \frac{\pi^2 \cdot 12 \cdot 10^9 \cdot 0,018 \cdot 0,04}{80 \cdot 10^8 \cdot 6,3^2 \cdot 0,45}\right)^{-1} = 0,94; \quad (5.2)$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_c \cdot A_c \cdot \left(\frac{h_1}{2} + h_1^* + \frac{h_2}{2}\right) - \gamma_3 \cdot E_t \cdot A_t \cdot \left(\frac{h_2}{2} + h_2^* + \frac{h_3}{2}\right)}{\gamma_1 \cdot E_c \cdot A_c + \gamma_2 \cdot E_t \cdot A_t + \gamma_3 \cdot E_t \cdot A_t} = \frac{0,761 \cdot 33 \cdot 10^9 \cdot 0,027 \cdot 0,1 - 0,94 \cdot 12 \cdot 10^9 \cdot 0,018 \cdot 0,08}{0,81 \cdot 20 \cdot 10^9 \cdot 0,027 + 1 \cdot 12 \cdot 10^9 \cdot 0,018 + 0,94 \cdot 12 \cdot 10^9 \cdot 0,018} = 0,0082 \text{ m}; \quad (5.3)$$

$$a_1 = \frac{h_1}{2} + h_1^* + \frac{h_2}{2} - a_2 = \frac{0,06}{2} + 0 + \frac{0,04}{2} - 0,0082 = 0,0418 \text{ m}; \quad (5.4)$$

$$a_3 = \frac{h_2}{2} + h_2^* + \frac{h_3}{2} - a_2 = \frac{0,04}{2} + 0,04 + \frac{0,04}{2} + 0,0082 = 0,0882 \text{ m}; \quad (5.5)$$

$$EI_{eff} = \Sigma E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2; \quad (5.6)$$

$$EI_{eff} = \frac{20 \cdot 10^9 \cdot 0,45 \cdot 0,06^3}{12} + 0,876 \cdot 20 \cdot 10^9 \cdot 0,027 \cdot 0,0418^2 + \frac{11 \cdot 10^9 \cdot 0,45 \cdot 0,04^3}{12} + 1 \cdot 12 \cdot 10^9 \cdot 0,018 \cdot 0,0082^3 + \frac{12 \cdot 10^9 \cdot 0,45 \cdot 0,04^3}{12} + 0,94 \cdot 12 \cdot 10^9 \cdot 0,018 \cdot 0,0882^2 = 2,65 \text{ MNm}^2; \quad (5.7)$$

Palyginamieji skaičiavimai pagal ekvivalentinį gama metodą:

$$\gamma_c = \frac{1}{1 + \frac{\pi \cdot E_c \cdot A_c \cdot s_{eff}}{K \cdot L^2}} = \frac{1}{1 + \frac{3,14^2 \cdot 20 \cdot 10^9 \cdot 0,027 \cdot 1,05}{10 \cdot 10^8 \cdot 6,3^2}} = 0,876; \quad (5.8)$$

$$\gamma_t = \frac{1}{1 + \frac{\pi \cdot E_t \cdot h_2 \cdot h_{2,3}}{G_R \cdot L^2}} = \frac{1}{1 + \frac{3,14^2 \cdot 12 \cdot 10^9 \cdot 0,04 \cdot 0,04}{80 \cdot 10^8 \cdot 6,3^2}} = 0,940; \quad (5.9)$$

$$NA = \frac{\gamma_c \cdot E_c \cdot A_c \cdot \left(h_t + \frac{h_c}{2}\right) + \gamma_t \cdot E_t \cdot A_t \cdot \left(\frac{h_t}{2}\right)}{\gamma_c \cdot E_c \cdot A_c + \gamma_t \cdot E_t \cdot A_t} = \frac{0,876 \cdot 20 \cdot 10^9 \cdot 0,027 \cdot \left(0,12 + \frac{0,06}{2}\right) + 0,940 \cdot 12 \cdot 10^9 \cdot 0,018 \cdot \left(\frac{0,12}{2}\right)}{0,876 \cdot 20 \cdot 10^9 + 0,940 \cdot 12 \cdot 10^9 \cdot 0,018} = 0,12379 \text{ m}; \quad (5.10)$$

$$EI_{eff} = (EI)_c + \gamma_c \cdot E_c \cdot A_c \cdot a_c^2 + (EI)_t + \gamma_t \cdot E_t \cdot A_t \cdot a_t^2 = 0,162 \cdot 10^6 + 0,876 \cdot 20 \cdot 10^9 \cdot 0,027 \cdot 0,0262 + 0,7626 \cdot 10^6 + 0,940 \cdot 12 \cdot 10^9 \cdot 0,018 \cdot 0,06379 = 2,0408 \text{ MNm}^2; \quad (5.11)$$

Laboratorinių tyrimo metu atlikti analitiniai normalinių įtempių skaičiavimai:

$$M = \frac{q_d \cdot l^2}{8} = \frac{4095 \cdot 6,3^2}{8} = 20,3 \text{ kNm}; \quad (5.12)$$

$$\sigma_{c,bending} = \frac{0,5 \cdot E_c \cdot h_c \cdot M}{EI_{eff}} = \frac{0,5 \cdot 20 \cdot 10^9 \cdot 0,06 \cdot 20300}{2,65 \cdot 10^6} = 4,6 \text{ MPa}; \quad (5.13)$$

$$\sigma_{c,normal} = \frac{\gamma_1 \cdot E_c \cdot a_1 \cdot M}{EI_{eff}} = \frac{0,876 \cdot 20 \cdot 10^9 \cdot 0,0418 \cdot 20300}{2,65 \cdot 10^6} = 5,6 \text{ MPa}; \quad (5.14)$$

$$\sigma_{c,top} = \sigma_{c,bending} + \sigma_{c,normal} \leq f_{c,t} = 4,6 \text{ MPa} + 5,6 \text{ MPa} \leq 30 \text{ MPa}; \quad (5.15)$$

$$\sigma_{c,bottom} = \sigma_{c,bending} - \sigma_{c,normal} \geq -f_{c,t,d} = 4,6 \text{ MPa} - 5,6 \text{ MPa} = -1 \text{ MPa} \geq -2 \text{ MPa}; \quad (5.16)$$

$$\sigma_{t,bending} = \frac{0,5 \cdot E_t \cdot h_t \cdot M}{EI_{eff}} = \frac{0,5 \cdot 12 \cdot 10^9 \cdot 0,04 \cdot 20300}{2,65 \cdot 10^6} = 1,84 \text{ MPa}; \quad (5.17)$$

$$\sigma_{t,normal} = \frac{\gamma_3 \cdot E_t \cdot a_3 \cdot M}{EI_{eff}} = \frac{0,94 \cdot 12 \cdot 10^9 \cdot 0,0882 \cdot 20300}{2,65 \cdot 10^6} = 7,62 \text{ MPa}; \quad (5.18)$$

$$\text{Išnaudojimas} = \frac{\sigma_{t,bending}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{t,normal}}{f_{t,0,d}} \leq 1,0; \quad (5.19)$$

$$\text{Išnaudojimas} = \frac{1,84}{15,35} + \frac{7,62}{8,96} = 0,97 \leq 1,0; \quad (5.20)$$

Lyginamieji normalinių įtempių skaičiavimai

$$\sigma_1 = \frac{\gamma_1 \cdot E_c \cdot a_1 \cdot M_d}{(EI)_{eff}} = \frac{0,876 \cdot 20 \cdot 10^9 \cdot 0,0418 \cdot 20300}{2,65 \cdot 10^6} = 5,60 \text{ MPa}; \quad (5.21)$$

$$\sigma_{m,1} = \frac{0,5 \cdot E_c \cdot h_c \cdot M_d}{(EI)_{eff}} = \frac{0,5 \cdot 20 \cdot 10^9 \cdot 0,06 \cdot 20300}{2,65 \cdot 10^6} = 4,60 \text{ MPa}; \quad (5.22)$$

$$\sigma_2 = \frac{\gamma_3 \cdot E_t \cdot a_3 \cdot M_d}{(EI)_{eff}} = \frac{0,94 \cdot 12 \cdot 10^9 \cdot 0,0882 \cdot 20300}{2,65 \cdot 10^6} = 7,62 \text{ MPa}; \quad (5.23)$$

$$\sigma_{m,2} = \frac{0,5 \cdot E_t \cdot h_t \cdot M_d}{(EI)_{eff}} = \frac{0,5 \cdot 12 \cdot 10^9 \cdot 0,04 \cdot 20300}{2,65 \cdot 10^6} = 1,84 \text{ MPa}; \quad (5.24)$$

$$\sigma_{1,top} = -\sigma_1 - \sigma_{m,1} = -5,60 - 4,60 = -10,20 \text{ MPa}; \quad (5.25)$$

$$\sigma_{1,bottom} = -\sigma_1 + \sigma_{m,1} = -5,60 + 4,60 = -1,0 \text{ MPa}; \quad (5.26)$$

$$\sigma_{2,top} = -\sigma_2 - \sigma_{m,2} = -7,62 - 1,84 = -9,46 \text{ MPa}; \quad (5.27)$$

$$\sigma_{2,bottom} = -\sigma_2 + \sigma_{m,2} = -7,62 + 1,84 = -5,78 \text{ MPa}; \quad (5.28)$$