Križno lamelirano drvo (CLT) - pregled stanja područja

Jeleč, Mario; Varevac, Damir; Rajčić, Vlatka

Source / Izvornik: **Građevinar, 2018, 70, 75 - 95**

Journal article, Published version
Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

https://doi.org/10.14256/JCE.2071.2017

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:091219

Rights / Prava: Attribution 4.0 International/Imenovanje 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

GRAĐEVINSKI I ARHITEKTONSKI FAKULTET OSIJEK
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Repository / Repozitorij:

Repository GrAFOS - Repository of Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Primljen / Received: 11.4.2017.
Ispravljen / Corrected: 13.10.2017.
Prihvaćen / Accepted: 30.10.2017.
Dostupno online / Available online: 10.3.2018.

Križno lamelirano drvo (CLT) - pregled stanja područja

Autori:



Mario Jeleč, dipl.ing.građ.
Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku
Građevinski fakultet
mjelec@gfos.hr



Izv.prof.dr.sc. Damir Varevac, dipl.ing.građ.
Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku
Građevinski fakultet
dvarevac@gfos.hr



Prof.dr.sc. Vlatka Rajčić, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
vrajcic@grad.hr

Pregledni rad

Mario Jeleč, Damir Varevac, Vlatka Rajčić

Križno lamelirano drvo (CLT) - pregled stanja područja

Križno lamelirano drvo (eng. *Cross Laminated Timber* – CLT) inovativni je pločasti proizvod slojevite strukture i izvrsnih fizikalno-mehaničkih svojstava. Zbog velike krutosti i nosivosti u ravnini i okomito na ravninu elementa najčešće se primjenjuje u obliku zidnih ili stropnih panela. Povoljna ekološka, estetska i energetska svojstva dodatno ga pospješuju. Rad prikazuje sumarni pregled dosad provedenih istraživanja CLT-a, s naglaskom na potrebnu harmonizaciju postojećih propisa i njegovo uključivanje u europsku normu za drvene konstrukcije Eurokod 5.

Ključne riječi:
križno lamelirano drvo, CLT, kompozitni materijal, materijalne karakteristike, analiza nosivosti, Eurokod 5

Subject review

Mario Jeleč, Damir Varevac, Vlatka Rajčić

Cross-laminated timber (CLT) – a state of the art report

Cross laminated timber is an innovative plate-shaped product presenting a laminated structure and excellent physicomechanical properties. Due to its high stiffness and in-plane and out-of-plane bearing capacity, it is most often used in form of wall or floor panels. Favourable environmental, aesthetic and energy properties further enhance its qualities. The paper is a summary of CLT research conducted so far, with an emphasis on the need to harmonise existing regulations and include this product in the European standard for timber structures Eurocode 5.

Key words:
cross laminated timber, CLT, composite material, material properties, carrying capacity analysis, Eurocode 5

Übersichtsarbeit

Mario Jeleč, Damir Varevac, Vlatka Rajčić

Brettsperrholz (CLT) – Verwendungsübersicht

Brettsperrholz (eng. *ross Laminated Timber* – CLT) ist ein innovatives plattenförmiges Produkt mit einer geschichteten Struktur und hervorragenden physikalisch-mechanischen Eigenschaften. Aufgrund der hohen Steifigkeit und Tragfähigkeit in Ebene und senkrecht zur Ebene des Elements wird es meistens in Form von Wand- oder Deckenpaneelen verwendet. Die günstigen ökologischen, ästhetischen und energiewirtschaftlichen Eigenschaften verbessern dieses noch zusätzlich. Die Abhandlung gibt eine zusammenfassende Übersicht über die bisherigen Untersuchungen des CLT mit Betonung auf der erforderlichen Harmonisierung der bestehenden Vorschriften und dessen Integration in die europäische Norm Eurocode 5 für Holzkonstruktionen.

Schlüsselwörter:
Brettsperrholz, CLT, Verbundmaterial, Materialeigenschaften, Analyse der Tragfähigkeit, Eurocode 5

1. Uvod

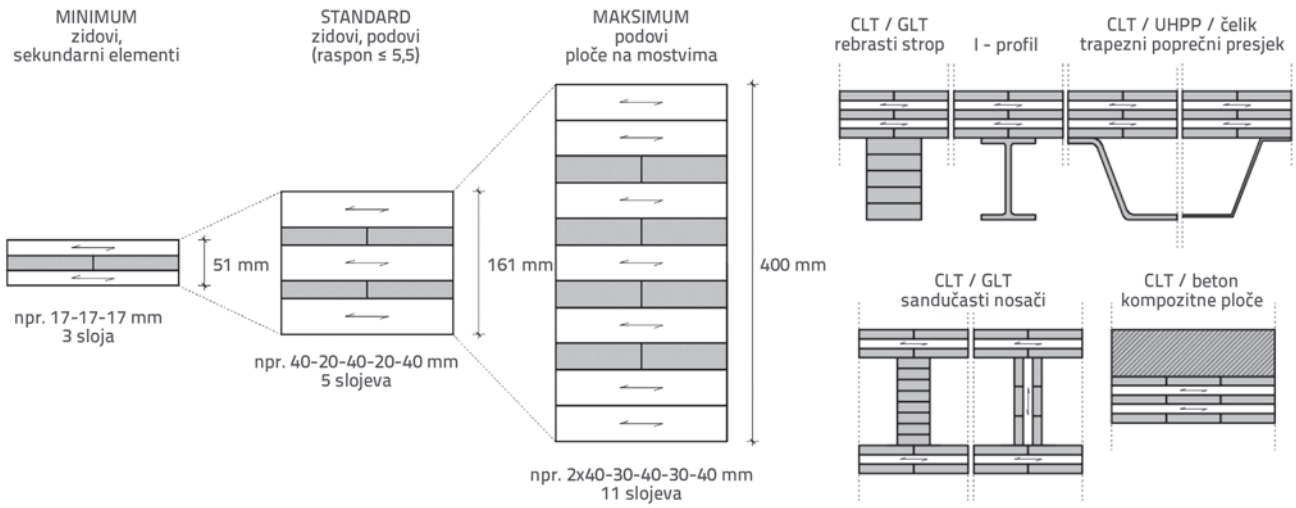
Tradicionalne drvene konstrukcije tijekom povijesti su se uglavnom izvodile kao lagani okvirni sustavi s linijskim elementima ograničenih raspona od punog drva. Početkom 20. stoljeća čelik i beton su postali dostupniji i ekonomski isplativiji pa je drvo zamijenjeno armiranim betonom. Intenzitet i zanimanje za drvene konstrukcije ponovno su porasli tek sredinom 60-ih godina prošlog stoljeća pojavom proizvoda na bazi drva (eng. *Engineered Wood Product* - EWP). Proizvodi poput lijepljenog lameliranog drva - LLD (eng. *Glued Laminated Timber* - GLT) omogućili su gradnju složenijih i robusnijih linijskih konstrukcija većih raspona. Prvi pločasti proizvodi poput lijepljenih furnirskih ploča (eng. *Laminated Veener Lumber* - LVL) ili ploča vlaknatica (eng. *Oriented Strand Board* - OSB) našli su uglavnom primjenu kao sekundarni elementi u funkciji obloga i zaštita konstrukcije. Slijedom daljnjeg razvoja, sredinom 90-ih patentiran je novi pločasti kompozitni proizvod pod nazivom križno lamelirano drvo (eng. *Cross Laminated Timber* - CLT). CLT predstavlja kruti pločasti proizvod, sastavljen od odgovarajućeg broja slojeva (uglavnom neparnog 3, 5 ili 7), gdje je svaki sloj načinjen od dasaka/lamela položenih jedna do druge i pri čemu su daske susjednih slojeva uglavnom lijepljene pod kutom 90° jedna na drugu. Uslojena i optimizirana struktura omogućuje nosivost u ravnini i okomito na ravninu elementa s primjenom u obliku zidnih nosača i stropnih ploča. Odlikuju se visokim stupnjem predgotovljenosti pa je rad na gradilištu ubrzan i uključuje uglavnom montažu i spajanje pojedinih panela. S aspekta građevinske fizike, materijal se odlikuje izvrsnim energetskim svojstvima i velikim kapacitetom pohrane vlažnosti i toplinske energije [1]. Mala vlastita težina olakšava mu temeljenje, a omogućuje i primjenu u seizmički aktivnim područjima [2]. Obradivost, vitkost i raznolika mogućnost izvedbe u panelima velikih dimenzija gotovo da ne stavljaju nikakva ograničenja arhitektonskom oblikovanju. Povoljna prirodna i ekološka svojstva praćena estetski lijepim površinama razlog su njegove povećane eksponiranosti u posljednjih nekoliko godina, o čemu svjedoče sve veće i kreativnije stambene i poslovne zgrade kao ponovni povratak drvenog materijala među gradske sredine [3], slika 1.

Osim u visokogradnji, CLT je vrlo prikladan i u mostogradnji, gdje se može primjenjivati samostalno ili u kombinaciji s drugim materijalima na bazi drva i/ili čelika u izvedbi rebrastih i/ili sandučastih nosača (slika 2.). Značajke CLT-a prepoznate su ubrzo i izvan granica Europe u zemljama poput Kanade ili SAD-a, ali isto tako i u zemljama izloženim učestalim seizmičkim aktivnostima poput Japana, Kine ili Novog Zelanda, što je posljednjih nekoliko godina rezultiralo progresivnim rastom njegove proizvodnje, s godišnjom stopom povećanja od 15 do 20 % [9].

Za ostvarenje punog potencijala potrebno je u doglednom vremenu intenzivirati rad na normizaciji i usklađivanju postojećih propisa i normi. Svojstva CLT-a isprva su bila definirana u nacionalnim (od 1998.), a od 2006. i u međunarodnim tehničkim odborima (eng. *International European Technical Approval* - ETA). Prva europska norma za CLT, EN16351 [10] izdana je 2015. Međutim, njome su zasad regulirana samo ograničenja vezana za proizvodnju i izvedbu, pri čemu jedinstvenog postupka proračuna još uvijek nema. Postupak proračuna moguće je pronaći u nekim nacionalnim dodacima europske norme poput [11, 12], iako ga sama europska norma za drvene konstrukcije EN 1995-1-1 (EC5) [13] još uvijek ne sadrži. U međuvremenu, za proračun CLT-a inženjeri se služe raznim tehničkim propisima i specifikacijama koje izdaju proizvođači. Postoji i nekoliko knjiga i priručnika



Slika 1. CLT element s 5 slojeva (gore lijevo) [4]; izložbeni paviljon "The Smile" u Londonu (gore u sredini) [4]; projekt "Brock Commons" u Vancouveru (gore desno) [5]; projekt "Dalston Lane" u Londonu (dolje lijevo) [6]; projekt "Wohnbau Wagramer Strasse" u Beču (dolje sredina) [7]; projekt "Treet" u Bergenu (dolje desno) [8]



Slika 2. Poprečni presjeci tipičnih CLT nosača (lijevo); primjeri kompozitnih konstrukcija na bazi CLT-a, LLD-a, čelika, betona ili visokoperformansnih šperploča (Ultra High Performance Plywood - UHPP) (desno) [14]

koji daju preporuke i postupke proračuna na osnovi rezultata velikog broja provedenih istraživanja, kao na primjer priručnik od Schickhofera iz 2010. [14] ili Wallner-Novaka iz 2013. [15] za primjenu u Europi te CLT-priručnici za kanadsko tržište [16] i tržište SAD-a [17].

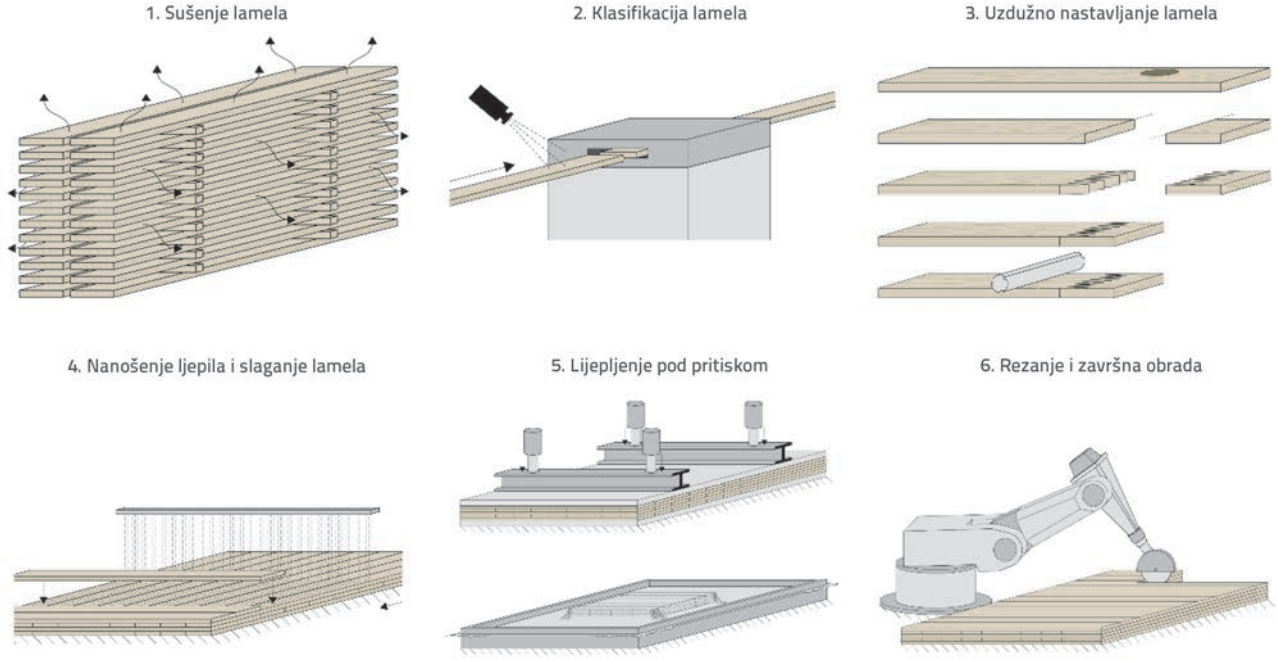
U nastavku rada prikazani su najvažniji aspekti CLT-a vezani za postupak njegove proizvodnje, metodologiju određivanja njegovih materijalnih karakteristika, postupak proračuna u određenim proračunskim situacijama, kao i osvrt na otvorena i još neistražena područja. Pri tome je rad usmjeren najviše na dostignuća u Europi s osvrtom na europske norme i europske vrste mekog drva u homogenoj strukturi CLT-a.

2. Tehnologija proizvodnje CLT-a

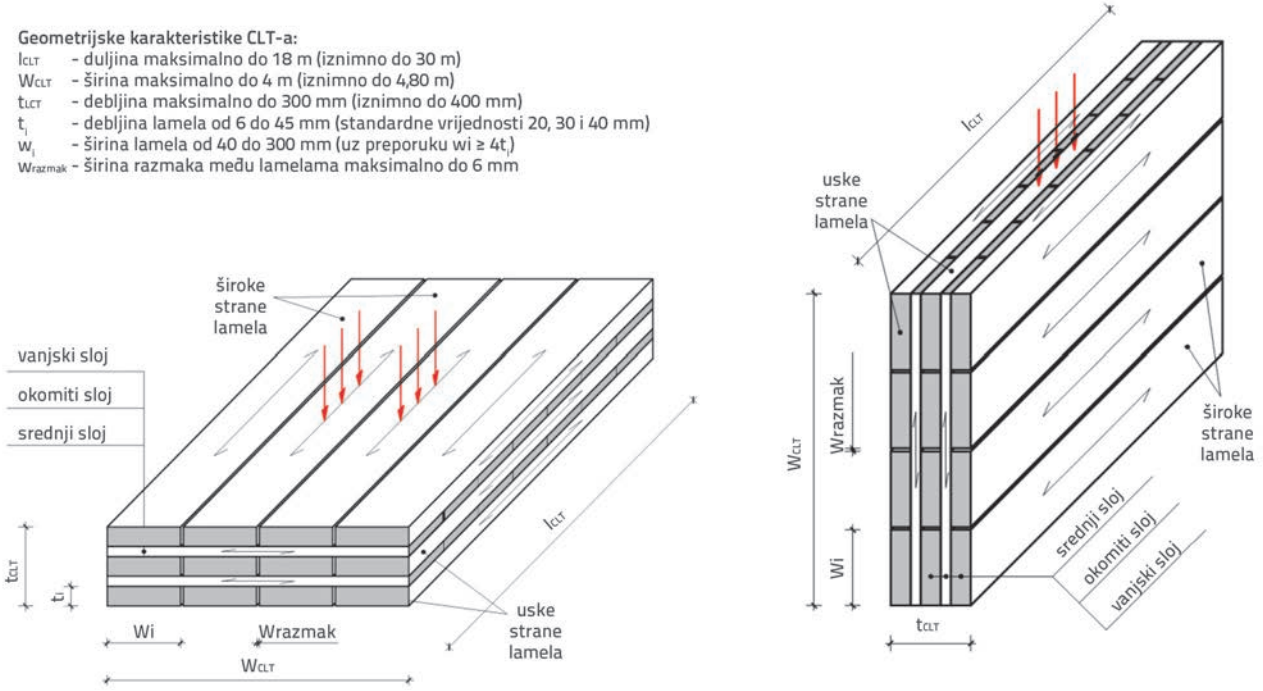
2.1. Općenito o postupku proizvodnje

Postupak i tehnologija proizvodnje CLT-a u mnogočemu je slična postupku kod LLD-a te je prikazana na slici 3. Terminologija i oznake kojima se koristi i kasnije kroz ovaj rad prikazani su zajedno sa standardnim geometrijskim podatcima na slici 4. Ugrubo bi se postupak proizvodnje mogao podijeliti na dva osnovna koraka:

- priprema i obrada osnovnog materijala (prve tri faze sa slike 3.)
- slaganje i lijepljenje osnovnog materijala (posljednje tri faze sa slike 3.).



Slika 3. Postupak proizvodnje CLT elementa [18]



Slika 4. Geometrijske karakteristike CLT elementa za djelovanje okomito na ravninu elementa (lijevo) i djelovanje u ravnini elementa (desno)

2.2. Prvi korak proizvodnje: priprema i obrada osnovnog materijala

Prvi korak proizvodnje uključuje sušenje i klasifikaciju materijala, a zatim blanjanje, rezanje i uzdužno nastavljanje zupčastim spojevima. Osnovni materijal treba biti vlažnosti u granicama od 12 ± 2 % nakon čega se strojno ili vizualno klasificira prema npr. normi EN14081-1 [19] ili DIN4074-1 [20]. Uobičajeno se za homogeni CLT presjek koristi klasa drva C24 sukladno normi EN 338 [21], a u slučaju kombiniranog presjeka u okomitim slojevima dopušta se i slabija klasa C16/18. Uglavnom se primjenjuju meke vrste drva, pri čemu i lokalne vrste sa slabijim mehaničkim svojstvima također mogu biti odgovarajuće iskorištene [22]. Po završetku klasifikacije materijala uzdužno se spajaju lamele izvedbom zupčastih spojeva jednake specifikacije i tehnike izvedbe kao i kod LLD nosača. Pojedini proizvođači nude mogućnost nastavljanja i čitavog CLT elementa izvedbom velikih zupčastih spojeva minimalne duljine 45 mm [9]. Takvi se spojevi izvode na prethodno napravljenom CLT elementu i kod njih je potrebno uzeti u obzir i moguće smanjenje mehaničkih karakteristika [23]. Kod izvedbe zupčastih spojeva potrebno je osigurati prikladno adhezivno sredstvo sukladno normi npr. EN 301 [24] ili EN 15425 [25] kao i tehničke zahtjeve za njegovo korištenje (vlažnost, temperaturu, količinu, trajanje i intenzitet pritiska pri nanošenju itd.). Preporuka je upotrebljavati adhezivna sredstva sličnih mehaničkih karakteristika osnovnom materijalu. Trenutačno se od ljepila najviše upotrebljava melanim-urea-formaldehid (MUF), jednokomponentno poliuretansko ljepilo (1K-PUR) ili emulzijsko polimerno izocijanitno ljepilo (EPI). Nakon izvedbe zupčastih spojeva obavlja se završno rezanje lamela na dimenzije potrebne za izradu CLT elementa.

2.3. Drugi korak proizvodnje: slaganje i lijepljenje osnovnog materijala

Drugi korak proizvodnje uključuje slaganje i lijepljenje prethodno obrađenih lamela u sastav CLT elementa. Načelno se kod proizvodnje razmaci među lamelama nastoje minimalizirati zbog zahtjeva fizike objekta (otpornosti na požar, zrakopropusnosti ili zvučne izolacije), estetike ili zbog same tehnike spajanja dasaka. Ipak, u mnogim tehničkim propisima među kojima je i norma EN 16351 [10], dopuštene su maksimalne vrijednosti razmaka do 6 mm. U slučaju proizvodnje CLT elementa bez razmaka, pojedini proizvođači najprije izvode pojedinačne slojeve CLT elementa lijepljenjem uskih rubova lamela, nakon čega tako izvedene slojeve lijepe međusobno po širokim stranama u cjelovitost konačnog elementa. Ipak, doprinos od nanošenja ljepila po uskim stranama lamela je upitan i načelno je preporuka da se može zanemariti ili u najboljem slučaju ograničiti samo na unutarnje slojeve elementa [9]. Razlog tomu je očekivana pojava nepravilnih pukotina na površini elementa kao posljedica skupljanja i bubrenja drva pri promjeni temperature i vlažnosti okoline. Ako postupak proizvodnje ne uključuje izvedbu pojedinačnih slojeva, onda se prethodno pripremljene lamele izravno slažu i lijepe samo po širokim stranama u cjelinu CLT elementa. Načelno se preporuke i zahtjevi koje daju proizvođači ljepila moraju slijediti gdje su najvažniji parametri poput tlaka lijepljenja, kvalitete, vlažnosti i debljine nanošenja ljepila vezani za iskustvo lijepljenja u LLD nosačima. U primjeni su iste vrste ljepila kao i kod izvedbe zupčastih spojeva. Lijepljenje dasaka ostvaruje se uz određeni tlak, pri čemu se hidrauličnim prešama doseže vrijednost od 0,10 do 1,0 N/mm², vakumskim prešama od 0,05 do 0,10 N/mm², a vijcima, klamficama i čavlima tlak

u iznosu 0,01 do 0,20 N/mm². Ipak, propisima još uvijek nije regulirana jedinstvena vrijednost tlaka pri lijepljenju, no više o tome u [9]. Po završetku lijepljenja obavlja se završno rezanje u konačne dimenzije proizvoda. Također, prije isporuke na elementu se izvode sve potrebne korekcije vezane za geometriju. Takav finalizirani proizvod propisno se zaštićuje od vanjskih vremenskih utjecaja, čime je spreman za transport i ugradnju.

3. Materijalne karakteristike CLT-a

3.1. Općenito

Pouzdan postupak proračuna CLT-a ovisi o pouzdano određenim materijalnim karakteristikama koje zasad nisu utvrđene normom EN 16351 [10], a nisu niti konzistentno regulirane među tehničkim propisima. Načelno postoje dva pristupa za njihovo određivanje [26]:

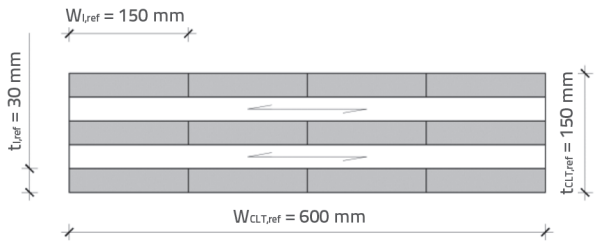
- pristup zasnovan na mehaničkim karakteristikama ispitanim na osnovnom materijalu u kombinaciji s nosivim modelom
- pristup zasnovan na mehaničkim karakteristikama ispitanim na čitavim CLT elementima.

Ovdje će biti prikazana dosad provedena istraživanja vezana za određivanje pojedinih mehaničkih karakteristika, pri čemu je na kraju poglavlja prikazan i sumarni pregled preporučenih nominalnih vrijednosti.

3.2. Djelovanje okomito na ravninu CLT elementa

3.2.1. Savijanje

Prijedlog modela nosivosti na savijanje okomito na ravninu elementa dali su Jöbstl i ostali [27] na osnovi rezultata usporedno provedenog eksperimentalnog ispitivanja CLT i LLD nosača. Predloženi model nosivosti zasnovan je na homogenom referentnom presjeku CLT-a, prikazanom na slici 5 prema kojem su definirane dvije klase čvrstoće CL 24 h i CL 28 h bazirane na lamelama klase čvrstoće T14 sukladno normi EN 14080 [28].



Slika 5. Oznake i dimenzije referentnog CLT presjeka [27]

Modelom je uzeta u obzir homogenizacija materijalnih karakteristika CLT-a koje se očituje u smanjenoj varijabilnosti mehaničkih karakteristika čitavog elementa u usporedbi s varijabilnosti osnovnog materijala. Predloženi model uzima u obzir četiri utjecajna faktora kojima se karakteristična vlačna čvrstoća u smjeru vlakana osnovnog materijala prevodi na karakterističnu čvrstoću od savijanja CLT-a sukladno izrazu (1) prema [27]:

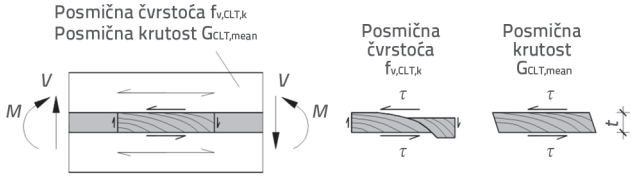
$$f_{m,CLT,k} = k_{m,CLT} \times f_{t,0,l,k}^{0,8}; \quad k_{m,CLT} = k_{sys,m} \times k_{CLT/GLT} \times k_{h,CLT} \times k_{CV_t} \qquad (1)$$

gdje je:

$f_{m,CLT,k}$ - karakteristična čvrstoća od savijanja CLT-a,
$f_{t,0,l,k}$ - karakteristična vlačna čvrstoća u smjeru vlakana osnovnog materijala,
$k_{sys,m}$ - koeficijent koji uzima u obzir sistemski efekt kod savijanja uslijed interaktivnog djelovanja većeg broja lamela,
$k_{CLT/GLT}$ - koeficijent koji uzima u obzir različit homogenizacijski utjecaj između CLT-a i LLD-a,
$k_{h,CLT}$ - koeficijent visine CLT-a u skladu s koeficijentom kod LLD-a,
k_{CV_t} - koeficijent koji ovisi o varijaciji osnovnog materijala.

3.2.2. Posmik

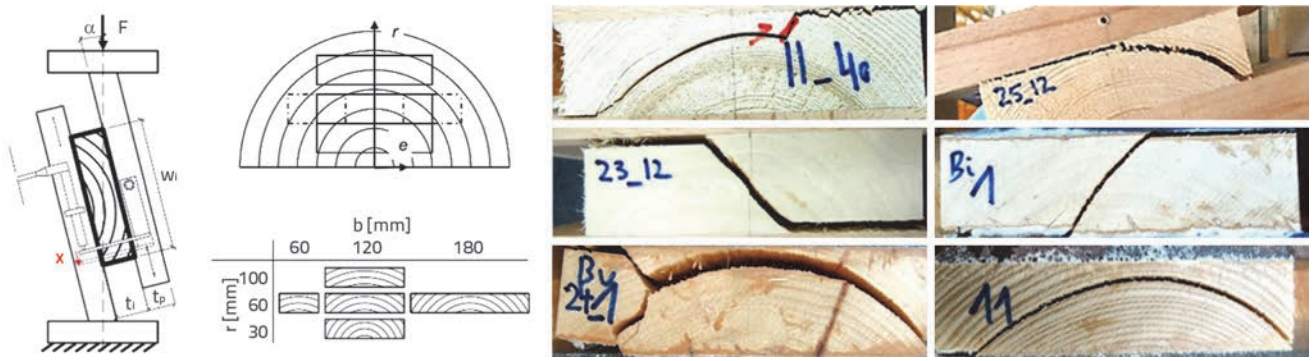
Zbog savijanja okomito na ravninu CLT elementa, u uzdužnim slojevima javljaju se posmična naprezanja u smjeru vlakana, a u poprečnim slojevima posmična naprezanja okomita na smjer vlakana (slika 6.). Za karakterističnu posmičnu čvrstoću $f_{v,CLT,k}$ i srednju posmičnu krutost $G_{CLT,mean}$ u smjeru vlakana, prema preporukama [26, 29], potrebno je koristiti vrijednost osnovnog materijala prema normi EN 14080 [28].



Slika 6. Oznake posmične čvrstoće pri djelovanju okomito na ravninu elementa

U pogledu definiranja karakteristične posmične čvrstoće $f_{r,CLT,k}$ i posmične krutosti $G_{r,CLT,mean}$ okomito na smjer vlakana, kao kritičnih parametara nosivosti i uporabivosti CLT-a, dosad je provedeno nekoliko istraživanja [30-37]. Većina istraživanja provedena je na standardnim europskim mekim vrstama drva [38, 39], pri čemu se u posljednjih nekoliko godina intenzivirao rad i na nestandardnim vrstama [40, 41] s naglašenim potencijalom primjene i tvrdih vrsta drva [42]. Opsežno eksperimentalno ispitivanje na više od 200 uzoraka proveli su Erhart i ostali 2015. [38]. Ispitivanje je provedeno standardnim postupkom prikazanim na slici 7. u skladu s normom EN 408 [43], analizirajući doprinos sljedećih parametara:

- vrstu drva
- geometriju lamela uzimajući u obzir omjer njihove širine i debljine w_l / t_l
- vrstu rezanja lamela u funkciji udaljenosti od sredine.



Slika 7. Eksperimentalna konfiguracija, varirani parametri i tipični oblik sloma prema [38] (slijeva na desno)

Na osnovi toga donijeti su zaključci koji su općenito u skladu s prijašnjim istraživanjima:

- posmična čvrstoća i krutost uvelike ovise o vrsti drva i osjetno su manje za meke vrste u odnosu na tvrde vrste drva,
- veliki je utjecaj omjera dimenzija lamela w_l / t_l na vrijednost čvrstoće i krutosti, gdje se smanjenjem omjera smjenjuje i nosivost uslijed povećanja iznosa vlačnih i posmičnih naprezanja okomito na smjer vlakana i
- povećanjem udaljenosti lamela od srca drva smanjuje se posmična krutost, pri čemu nema jasne promjene čvrstoće. Predložen je i bilinearni model u funkciji omjera širine i debljine w_l / t_l prikazan izrazima (2) i (3).

$$f_{r,CLT,k} = \min\begin{cases} 0{,}2 + 0{,}3 \times \dfrac{w_l}{t_l}; & w_l / t_l = 2 \rightarrow f_{r,CLT,k} = 0{,}80\ \mathrm{N/mm^2} \\ 1{,}40 & w_l / t_l = 4 \rightarrow f_{r,CLT,k} = 1{,}40\ \mathrm{N/mm^2} \end{cases} \quad (2)$$

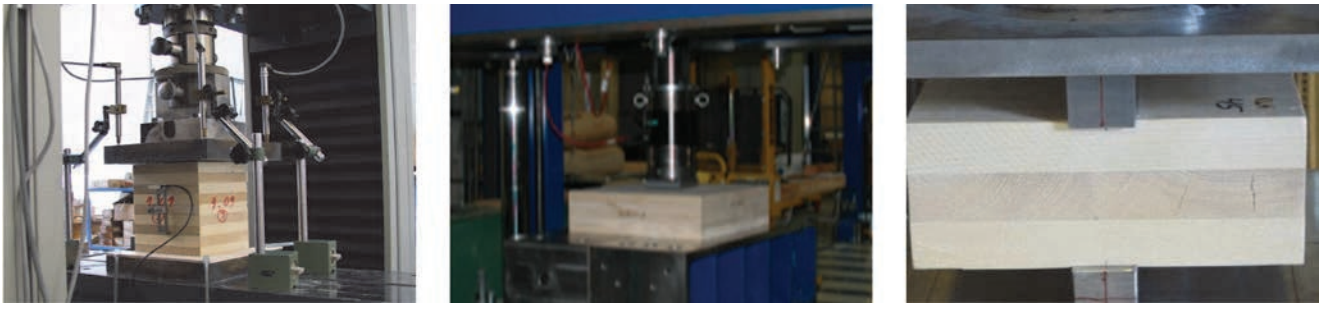
$$G_{r,CLT,mean} = \min\begin{cases} 30 + 17{,}5 \times \dfrac{w_l}{t_l}; & w_l / t_l = 2 \rightarrow G_{r,CLT,mean} = 65\ \mathrm{N/mm^2} \\ 100 & w_l / t_l = 4 \rightarrow G_{r,CLT,mean} = 100\ \mathrm{N/mm^2} \end{cases} \quad (3)$$

3.2.3. Vlak okomito na smjer vlakana

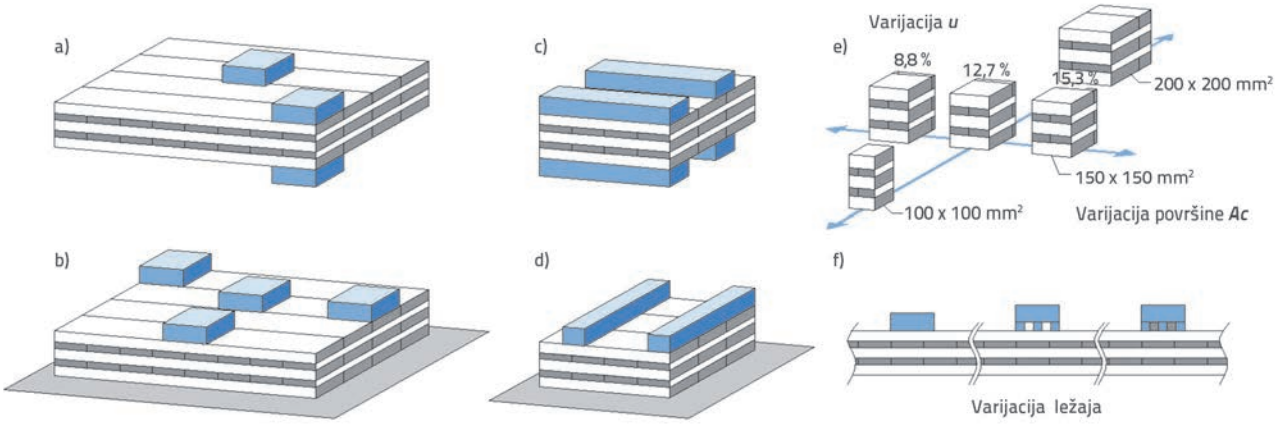
Budući da zasad nedostaju istraživanja u području vlaka okomito na smjer vlakana kod CLT-a, sukladno inženjerskoj prosudbi na temelju sličnosti CLT i LLD elemenata, za CLT se prema preporukama [26] predlaže primjenjivati jednaka vlačna čvrstoća okomita na smjer vlakana kao i kod LLD-a, odnosno $f_{t,90,CLT,k} = f_{t,90,k}$ prema normi EN 14080 [28].

3.2.4. Tlak okomito na smjer vlakana

Mehaničke karakteristike kod tlaka okomito na smjer vlakana dobivaju se na temelju eksperimentalnih ispitivanja malih uzoraka prizmi čije su površine pri ispitivanju izložene homogenom i jednolikom stanju naprezanja sukladno ispitivanju prema normi EN 408 [43] i EN 16351 [10]. Do sada je provedeno nekoliko istraživanja s ciljem određivanja referentne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti okomito na smjer vlakana [44-49], slika 8. Halili [44] je 2008. proveo eksperimentalno ispitivanje CLT i LLD prizmi na osnovi čega je zaključio da su dobivene veće vrijednosti čvrstoće i krutosti CLT prizmi posljedica tzv. "efekta zaključavanja" (eng. *locking effect*), gdje poprečni slojevi CLT uzorka djeluju poput ojačanja smanjujući bočne deformacije uzorka i preuzimajući vlačna naprezanja koja se pri tome javljaju. Salzmann [45] je 2010. proveo ispitivanja na referentnim prizmama i različitim konfiguracijama CLT elementa analizirajući utjecaj položaja točkastog i linijskog unosa opterećenja. Najveća nosivost ostvarena je kod središnje opterećenih CLT uzoraka jer je širenje naprezanja bilo omogućeno na sve četiri strane, a najmanju su nosivost pokazali uzorci opterećeni na uglovima jer je širenje naprezanja bilo onemogućeno na dvije slobodne strane uzorka. Serrano i Enquist [46] su 2010. analizirali linijski unos opterećenja kojim se htio simulirati spoj zidnih i stropnih elemenata. Bogensperger i ostali [47] su 2011. proveli opsežnu numeričku analizu CLT uzoraka bazirajući se na 3D numeričkom modelu, gdje je simulirano nekoliko različitih situacija točkastog i linijskog oslanjanja CLT elementa na osnovi čega je zapažena linearna ovisnost između debljine uzorka i dubine raspršivanja naprezanja.



Slika 8. Eksperimentalni uzorci za ispitivanja tlačne čvrstoće okomito na vlakna: Halili [44] (lijevo), Salzmann [45] (sredina) i Serrano [46] (desno)



Slika 9. Eksperimentalno ispitani parametri prema [49]: a) točkasti unos i točkasto oslanjanje; b) točkasti unos i plošno oslanjanje; c) linijski unos i linijsko oslanjanje; d) linijski unos i plošno oslanjanje; e) varijacija površine i vlažnosti ispitanih prizmi; f) varijacija ležaja kod linijskih opterećenja

Brandner i Schickhofer [49] su 2014. analizirali eksperimentalne rezultate u ovisnosti o parametrima prikazanim na slici 9.:
- utjecaj dimenzija kontaktne površine referentnog uzorka prizme
- razlike između ponašanja kod točkasto, linijski i plošno oslonjenih CLT elemenata
- utjecaj vlažnosti na čvrstoću i modul elastičnosti.

Na osnovi toga donijeti su sljedeći zaključci:
- linearno povećanje čvrstoće i krutosti s povećanjem kontaktne površine referentnih prizmi
- smanjenje čvrstoće i krutosti kod CLT elemenata opterećenih točkastim i linijskim opterećenjima uslijed povećanja kontaktne površine
- smanjenje čvrstoće i krutosti povećanjem vlažnosti materijala.

Na osnovi provedenih ispitivanja predložena je referentna vrijednost karakteristične tlačne čvrstoće okomito na smjer vlakana $f_{c,90,CLT,k,ref}$ = 3,0 N/mm² i srednjeg modula elastičnosti $E_{c,90,CLT,mean,ref}$ = 400 N/mm².

Sažeti pregled eksperimentalnih ispitivanja tlačne čvrstoće okomito na smjer vlakana na referentnim CLT prizmama prikazan je u tablici 1., gdje n predstavlja broj ispitanih uzoraka, l duljinu , b širinu i h visinu referentnih prizmi. Pri tome su karakteristične vrijednosti čvrstoće i modula dobivene primjenom lognormalne distribucije u skladu s normom EN 14358 [50].

3.3. Djelovanje u ravnini CLT elementa

3.3.1. Vlak u smjeru vlakana

Svojstva CLT-a na djelovanja vlaka u smjeru vlakana nisu do sada dovoljno istražena ni u teoretskom ni u eksperimentalnom smislu. Inženjerskim pristupom na strani sigurnosti kod proračuna se uzima samo neto površina presjeka A_{net}, uključujući u nosivost samo one slojeve nosača paralelne vanjskom djelovanju [14]. Ipak, uslijed paralelnog djelovanja većeg broja lamela unutar jednog sloja nosača, utjecaj homogenizacije potrebno je također uzeti u obzir. Prema [26], predložen je izraz (4) kojim se izračunava karakteristična vlačna čvrstoća CLT-a u smjeru vlakana:

Tablica 1. Mehaničke karakteristike CLT prizmi na tlak okomito na smjer vlakana

Autor/godina	n	l x b x h [mm]	$f_{c,90,CLT,mean}$ [N/mm²]	$f_{c,90,CLT,k}$ [N/mm²]	$E_{c,90,CLT,mean}$ [N/mm²]	$E_{c,90,CLT,k}$ [N/mm²]
Halili 2008. [44]	217	160 x 160 x 200	3,31	2,94	485	404
Salzmann 2010. [45]	15	160 x 160 x 150	3,52	3,01	440	346
	35	160 x 160 x 160	3,34	2,86	367	280
	27	160 x 160 x 165	3,33	2,69	435	338
	10	160 x 160 x 197	3,43	2,96	387	287
Serano i Enquist 2010. [46]	15	200 x 200 x 120	3,33	2,86	-	-
Brandner i Schickhofer 2014. [49]	10	100 x 100 x 150	3,26	2,97	380	325
	29	150 x 150 x 150	3,48	3,10	391	311
	10	200 x 200 x 150	3,87	3,51	436	382

$$f_{t,0,CLT,net,k} = k_{sys,t,0} \times f_{f,t,0,I,k};$$ (4)

$$k_{sys,t,0} = \begin{cases} \min(0,075 \times \ln N) + 1;\ 1,20 \ \rightarrow \ CV[f_{t,0,I}] = 25 \pm 5\% \\ \min(0,130 \times \ln N) + 1;\ 1,35 \ \rightarrow \ CV[f_{t,0,I}] = 35 \pm 5\% \end{cases}$$

gdje je:

$f_{t,0,CLT,net,k}$ - karakteristična vrijednost vlačne čvrstoće CLT-a u smjeru vlakana,

$k_{sys,t,0}$ - koeficijent koji uzima u obzir sistemski efekt kod vlaka uslijed interaktivnog djelovanja većeg broja lamela,

N - broj paralelno orijentiranih longitudinalnih lamela (za referentni presjek N = 12),

$CV[f_{t,0,I}]$ - koeficijent varijacije vlačne čvrstoće u smjeru vlakana osnovnog materijala.

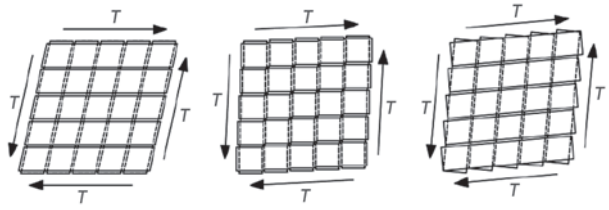
3.3.2. Tlak u smjeru vlakana

U pogledu tlačne čvrstoće u smjeru vlakana također je malo dosad provedenih istraživanja, pa je inženjerska praksa njezina određivanja slična analogiji vlačne čvrstoće u smjeru vlakana. Sukladno tome, predloženi su koeficijenti $k_{sys,c} \geq 1.0$ koji uzimaju u obzir interaktivno tlačno djelovanje većeg broja paralelno orijentiranih lamela [26]. Ipak, konzervativna je preporuka uzeti tlačnu čvrstoću u smjeru vlakana jednaku čvrstoći od savijanja okomito na ravninu elementa $f_{c,0,CLT,net,k} = f_{m,CLT,k}$.

3.3.3. Posmik

Kod CLT panela izloženih djelovanju u ravnini elementa načelno je potrebno provjeriti tri posmična mehanizma sloma (MS) prikazana na slici 10. [51, 52]:

- posmični slom po bruto presjeku CLT-a mjerodavan slučaju lijepljenja uskih strana lamela dosezanjem vrijednosti čvrstoće $f_{v,gross}$
- posmični slom po neto presjeku CLT-a mjerodavan ako ne postoji kontakt na uskim stranama lamela dosezanjem vrijednosti čvrstoće $f_{v,net}$
- posmični slom uslijed djelovanja torzije i jednoosnih posmičnih naprezanja na kontaktu dviju ortogonalno lijepljenih lamela dosezanjem vrijednosti f_{tor} i f_r.

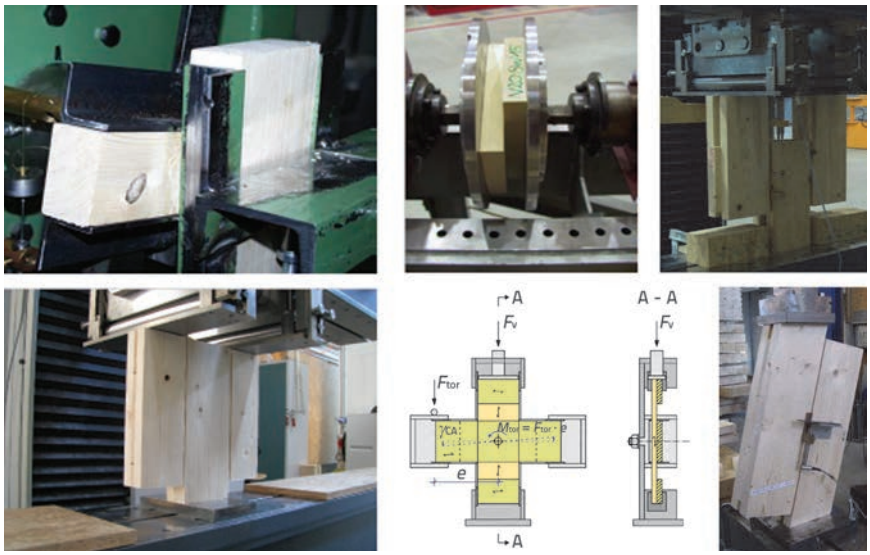


Slika 10. Posmični mehanizmi sloma u ravnini CLT elementa [52]: MS I (lijevo), MS II (sredina), MS III (desno)

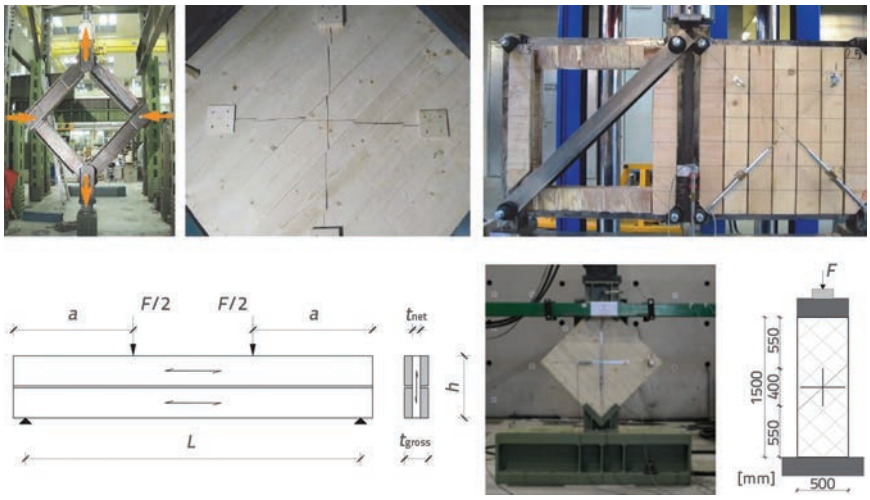
Složeno stanje naprezanja i interakcija pojedinih mehanizama sloma razlog je zašto ne postoji jedinstvena eksperimentalna konfiguracija ni referentni uzorak za određivanje posmične nosivosti CLT-a. U slučaju lijepljenja uskih strana lamela, preporuka je da se u dokazu nosivosti MS I za posmičnu čvrstoću uzima karakteristična vrijednost $f_{v,gross,k}$ = 3,5 N/mm² i srednji modul posmika $G_{CLT,mean}$ = 650 N/mm² u skladu s normom EN 14080 [28]. Ako ne postoji kontakt između uskih strana susjednih lamela, što je i najčešći slučaj kod CLT-a, dokaz nosivosti nije jednoznačan i potrebno je odvojeno provjeriti MS II i MS III. U tu je svrhu do sada provedeno nekoliko istraživanja, pri čemu se općenita podjela može napraviti između ispitivanja provedenih na malim uzorcima načinjenim od individualnih čvorova ortogonalno lijepljenih lamela te ispitivanja na velikim uzorcima CLT-a. Ispitivanja na malim uzorcima uglavnom su provedena u svrhu određivanja MS II [51, 53, 54], odnosno MS III [31, 55, 56]. Ispitivanja na velikim uzorcima bila su usmjerena na određivanje MS II [57-59]. Na slici 11. prikazani su eksperimentalni uzorci malih modela, a na slici 12. uzorci velikih modela. Sažeti rezultati s kratkim opisom provedenih eksperimentalnih ispitivanja prikazani su u tablicama 2. i 3., pri čemu se tablica 2. odnosi na male modele i verifikaciju MS III, a tablica 3. na velike modele i MS II.

Tablica 2. Eksperimentalni rezultati ispitivanja CLT-a (MS III)

Autor/godina	Opis ispitivanja i varirani parametri	n	$f_{tor,mean}$ [N/mm²]	$f_{tor,k}$ [N/mm²]	$f_{r,mean}$ [N/mm²]	$f_{r,k}$ [N/mm²]
Blaß i Görlacher 2002. [31]	Jedna kontaktna površina dimenzija: 40 x 40 mm, 62 x 95 mm, 62 x 75 mm, 64 x 64 mm, 64 x 100 mm	57	3,59	2,82	-	-
Jöbstl 2004. [55]	Jedna kontaktna površina dimenzija: 100 x 145 mm, 150 x 145 mm, 200 x 145 mm	81	3,46	2,71	-	-
Walner 2004. [60]	Dvije kontaktne površine dimenzija: 100 x 150 mm, 150 x 150 mm, 200 x 150 mm	122	-	-	1,51	1,18
Blaß i Flaig 2010. [52]	Savijanje CLT grede visine 150 mm, debljine 27-27-27 mm i 30-20-30 mm	12	4,67	2,68	1,99	1,15
Blaß i Flaig 2013. [52]	Dvije kontaktne površine dimenzija: 75 x 150 mm	6	-	-	1,43	1,18
Blaß i Flaig 2014. [56]	Jedna kontaktna površina dimenzija: 165 x 165 mm	24	3,03	-	1,28	-



Slika 11. Eksperimentalne konfiguracije malih CLT uzoraka: Blaß [31] (gore lijevo), Jöbstl [55] (gore sredina), Walner [60] (gore desno), Jöbstl [53] (dolje lijevo), Flaig [56] (dolje sredina), Brandner [51] (dolje desno)



Slika 12. Eksperimentalne konfiguracije velikih CLT uzoraka: Bosl [61] (gore lijevo), Bogensperger [57] (gore desno), Jöbstl [53] (dolje lijevo), Andreolli [58] (dolje sredina), Brandner [59] (dolje desno)

Opsežno eksperimentalno ispitivanje proveli su Brandner i ostali [59] godine 2015. na tlačno opterećenim prizmama prikazanim na slici 12. Rezultati i varirani eksperimentalni parametri prikazani su u tablici 3., a glavni zaključci ispitivanja su:

- povećanjem razmaka među lamelama posmična nosivost opada
- širina lamela malo doprinosi i nema jasan utjecaj na posmičnu čvrstoću
- povećanje debljine slojeva osjetno smanjuje nosivost
- broj slojeva nosača nema veliki utjecaj
- za CLT elemente s omjerom debljine uzdužnih i poprečnih slojeva većim od 0,80 potrebno je odvojeno provjeriti nosivost svakog od njih.

Na osnovi dobivenih rezultata autori predlažu usvajanje referentne karakteristične neto vrijednosti od $f_{v,net,k,ref}$ = 5,5 N/mm^2 za debljinu lamela do t_l = 40 mm i razmak među njima do w_{razmak} = 6 mm. Za debljine lamela t_l između 20 i 40 mm predlažu izraz (5) kako bi se povećala čvrstoća, ali u maksimalnom iznosu do 20 %:

$$f_{v,net,k} = f_{v,net,k,ref} \times \min \begin{cases} (40 / t_l)^{0.3} \\ 1,20 \end{cases} \quad (5)$$

3.4. Preporučene referente vrijednosti mehaničkih karakteristika CLT-a

Budući da u europskoj normi EN 16351 [10] još uvijek nisu dane referentne vrijednosti mehaničkih karakteristika CLT-a, preporučene vrijednosti za djelovanja u ravnini i okomito na ravninu CLT-a mogu se pronaći u [26, 29] i prikazane su u tablici 4. Prikazane vrijednosti dane su na osnovi dosad provedenih istraživanja, i u nedostatku normiranih vrijednosti namijenjene su korištenju inženjerima u praksi. Vrijednosti u tablici odnose se na homogene presjeke CLT-a od standardne europske vrste mekog drva.

4. Dimenzioniranje CLT elemenata

4.1. Općenito

Postupak dimenzioniranja CLT-a zasad nedostaje u europskoj normi EC5 [13], osim u pojedinim nacionalnim dodatcima poput [11, 12]. Sada u Europi postoji i nekoliko priručnika, poput [14, 15], kojima se regulira dimenzioniranje prateći poznati europski koncept pouzdanosti. S tim u skladu potrebno je definirati koeficijent sigurnosti materijala γ_M i koeficijent modifikacije svojstava k_{mod} kako bi se dobile računske materijalne karakteristike materijala. Za CLT je predložen koeficijent sigurnosti materijala u iznosu γ_M = 1,25, pri čemu se za vrijednosti modifikacijskog faktora k_{mod} kojim se uzimaju u obzir mikroklima prostora i trajanje opterećenja predlažu iste vrijednosti kao i za puno drvo i LLD s ograničenjem primjene CLT-a na uporabnu klasu 1 i 2 [26].

Tablica 3. Eksperimentalni rezultati ispitivanja CLT-a (MS II)

Autor/godina	Opis ispitivanja i varirani parametri	n	$f_{v,gross,mean}$ [N/mm²]	$f_{v,net,mean}$ [N/mm²]
Bosl 2002. [61]	Dijagonalni vlak u rotiranom CLT uzorku pod 45°, dimenzije: 1200 x 1200 x 85 mm³ (debljine 5 x 17 mm). Slom nije nastupio dosezanjem neto posmične čvrstoće.	4	2,30	5,60
Bogensperger i ostali 2007. [57]	Savijanje kvadratnog CLT uzorka, dimenzije: 560 x 560 x 120 mm³ (debljine 30 + 60 + 30 mm). Slom nije nastupio dosezanjem neto posmične čvrstoće.	5	-	6,00
Jöbstl 2008. [53]	Ispitivanje CLT grede na savijanje, ispitano 7 serija greda visine od 260 do 400 mm. Slom nije nastupio dosezanjem neto posmične čvrstoće.	90	-	8,40
Jöbstl 2008. [53]	Mali posmični uzorak s dvije posmične površine 200 x 200 mm. Slom dosezanjem neto posmične čvrstoće.	20	-	12,8
Andreolli i Tomasi 2012. [62]	Ispitivanje 4 serije CLT greda na savijanje raspona od 3000 mm, visine 600 mm i debljine varirane od 90 mm (30-30-30), 130 mm (29-21-29-21-29), 135 mm (5 x 27) i 144 mm (34-21-34-21-34). Slom nije nastupio dosezanjem neto posmične čvrstoće.	4	4,74	9,04
Andreolli i Tomasi 2014. [58]	Dijagonalni tlak u rotiranom CLT uzorku pod 45°. Samo jedan uzorak otkazao dosezanjem neto posmične čvrstoće.	4	-	12,7
Brandner i ostali 2013. [51]	Mali posmični uzorak zarotiran pod 14 ° s variranom širinom lamela (150 i 200 mm), debljinom lamela (10, 20 i 30 mm) i razmakom lamela (1,5, 5 i 25 mm). Slom dosezanjem neto posmične čvrstoće.	80	-	8,98
Brandner i ostali 2015. [59]	CLT prizma s lijepljenim slojevima pod 45° ispitana na tlak, dimenzije: 1500 x 500 x t mm³, širina lamela (80, 160 i 240 mm), debljina lamela (20, 30 i 40 mm) i broj slojeva (3, 5 i 7). Slom dosezanjem neto posmične čvrstoće.	112	3,80	7,44

Tablica 4. Preporučene referentne vrijednosti čvrstoće i modula u N/mm² i gustoće u kg/m³

Razred čvrstoće osnovnog materijala T14, $f_{t,0,l,k}$ = 14,0 , $E_{0,l,mean}$ = 11000		CV [$f_{t,0,l}$], 25 ± 5 %	
Autor/godina	**Materijalne karakteristike CLT-a**	**Razred čvrstoće CLT-a**	
		CL 24h	**CL 28h**
Unterwieser i Schickhofer 2013. [26]	Čvrstoća na savijanje $\mathbf{f_{m,CLT,k}}$ * vrijednosti određene na referentnom uzorku	**24***	**28***
Unterwieser i Schickhofer 2013. [26]	Vlačna čvrstoća u smjeru vlakana $\mathbf{f_{t,0,CLT,net,k}}$ * vrijednosti određene na referentnom uzorku	**16***	**18***
EN 14080 [28]	Vlačna čvrstoća okomito na smjer vlakana $\mathbf{f_{t,90,CLT,k}}$	**0,5**	
EN 14080 [28]	Tlačna čvrstoća u smjeru vlakana $\mathbf{f_{c,0,CLT,net,k}}$	**24**	**28**
Brandner i Schickhofer 2014. [49]	Tlačna čvrstoća okomito na smjer vlakana $\mathbf{f_{c,90,CLT,k}}$	**3,0**	
Brandner i ostali 2015. [59]	Posmična čvrstoća neto presjeka u ravnini nosača $\mathbf{f_{v,net,k,ref}}$	**5,5**	
Flaig i Blaß 2013. [52]	Posmična čvrstoća bruto presjeka u ravnini nosača $\mathbf{f_{v,gross,k}}$	**3,5**	
Blaß i Görlacher 2002. [31]	Torzijska čvrstoća u ravnini nosača $\mathbf{f_{v,tor,k}}$	**2,5**	
EN 14080 [28]	Posmična čvrstoća u smjeru vlakana nosača $\mathbf{f_{v,CLT,k}}$	**3,5**	
Ehrhart i ostali 2015. [38]	Posmična čvrstoća okomito na smjer vlakana $\mathbf{f_{r,CLT,k}}$	**0,8 - 1,4**	
EN 14080 [28]	Modul elastičnosti u smjeru vlakana $\mathbf{E_{0,CLT,mean}}$ $E_{0,CLT,mean} = 1.05 \cdot E_{0,l,mean}$; $E_{05,CLT} = 5/6 \cdot E_{0,CLT,mean}$	**11600**	
EN 14080 [28]	Modul elastičnosti okomito na smjer vlakana $\mathbf{E_{90,CLT,mean}}$	**300**	
Brandner i Schickhofer 2014. [49]	Modul elastičnosti na tlak okomito ravninu elementa $\mathbf{E_{c,90,CLT,mean}}$	**450**	
Brandner i ostali 2015. [58]	Modul posmika u smjeru vlakana $\mathbf{G_{CLT,mean}}$ (* bez lijepljenja uskih strana lamela [59], ** uz lijepljenje uskih strana lamela)	**450*** **650****	
Ehrhart i ostali 2015 [38]	Modul posmika okomito na smjer vlakana $\mathbf{G_{r,CLT,mean}}$	**65 - 100**	
EN 14080 [28]	Gustoća $\rho_{CLT,mean}$ $\rho_{CLT,mean} = \rho_{l,mean}$, $\rho_{CLT,k} = 1.10\ \rho_{l,k}$	**420**	

4.2. Granično stanje nosivosti – djelovanje okomito na ravninu elementa

4.2.1. Savijanje

Kada se dokazuje nosivost na savijanje okomito na ravninu elementa, posmična fleksibilnost okomitih slojeva nosača mora se odgovarajuće uzeti u obzir. S obzirom na ograničenje Euler-Bernoullijeve teorije koja ne uzima u obzir posmične deformacije, analiza nosivosti zahtijeva primjenu drugih metoda poput γ - metode [63], "Shear analogy" metode [64] ili Timoshenkove egzaktne metode [65]. Usporednu analizu navedenih metoda dali su Bogensperger i ostali [66]. Na osnovi toga zaključeno je da za praktične raspone $l_{CLT} / t_{CLT} \geq 15$ nema velikih razlika i da svaka od metoda nudi mogućnost primjene. Unatoč tomu što su CLT elementi nosivi u dva smjera, općenito se u svakoj od metoda u postupku proračuna dimenzioniranju kao trakasti nosači jedinične širine. Modificirana γ -metoda bliska je inženjerima i često u upotrebi jer je nastala prilagodbom osnovne γ -metode koja je već prisutna u EC 5 [13]. Metoda primjenjuje Euler-Bernoulijevu teoriju uključujući posmičnu fleksibilnost indirektno u proračun putem efektivne krutosti na savijanje. Metoda je primjenjiva za CLT elemente s 3 i 5 slojeva, uz mogućnost proširenja i na 7 i 9 slojeva. Efektivna krutost na savijanje EI_{eff} računa se prema izrazu (6), a koeficijent popustiljivosti γ_i prema izrazu (7):

$$EI_{eff} = \sum_i \left(E_i \times b_i \times t_i^3 / 12\right) + \sum_i \left(\gamma_i \times E_i \times b_i \times t_i \times z_i\right) \quad (6)$$

$$\gamma_i = \left(1 + \frac{\pi^2 \times E_i \times b_i \times t_i}{L_{eff}^2 \times \left(G_{j,90} \times b_j\right) / t_j}\right)^{-1} \quad (7)$$

gdje je:

E_i - modul elastičnosti pojedinog sloja nosača (za uzdužne slojeve $E_i = E_0$, a za okomite slojeve $E_i = E_{90} = 0$)

b_i - jedinična širina nosača (1 m)

t_i - debljina pojedinog sloja nosača *i*

z_i - udaljenost težišta pojedinog sloja nosača od težišta cijelog presjeka

γ_i - koeficijent popustljivosti koji za srednji uzdužni sloj ima jediničnu vrijednost

L_{eff} - efektivni razmak nultih točaka nosača

$G_{j,90}$ - modul posmika okomito na smjer vlakana

j - predstavlja okomiti sloj između *i*-tog i srednjeg uzdužnog sloja nosača.

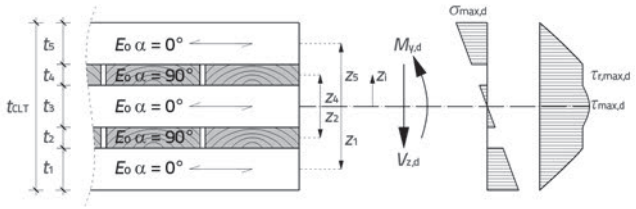
Daljnji postupak proračuna uključuje izračun naprezanja i dokaz nosivosti, a s obzirom na to da je isti kao i kod osnovne γ- metode dane u EC5 [13], ovdje nije detaljnije prikazivan. Primjenom Timoshenkove teorije, krutost na savijanje se također može dobiti prema izrazu (7), uzimajući vrijednost $\gamma_i = 1,0$ za sve slojeve nosača i vrijednost $E_i = E_{90} \neq 0$ za okomite slojeve nosača. Prednost Timoshenkove metode je ta što nije ovisna o broju slojeva, a niti o broju raspona nosača pa je stoga primjenjiva i na statičke sustave kontinuiranih nosača. Vjerojatno najtočnija, ali i vremenski najzahtjevnija je "Shear analogy" metoda proračuna koja je koncipirana na kombinaciji dviju povezanih greda s jednakim vertikalnim deformacijama u svakoj točki duž raspona nosača. Prva greda (A) uzima u obzir krutost na savijanje svakog sloja posebno, što predstavlja prvi dio izraza (6) uz uvjet $E_i = E_{90} \neq 0$ za okomite slojeve nosača. Krutost na savijanje druge grede (B) odgovara drugom dijelu izraza (6) uz uvjet da je $\gamma_i = 1,0$ za sve slojeve nosača, pa stoga zbroj krutosti obiju greda odgovara krutosti po Timoshenkovoj teoriji. Njezina prednost je u tome što kroz interakciju dviju greda uzima u obzir i složenije fenomene kod raspodjele naprezanja čak i ako nema direktnog vanjskog opterećenja. Dokaz nosivosti po ovoj metodi nije dalje raspisivan, a pobliže o tome u [16]. Pojednostavljeni model nosivosti prema Timoshenkovoj teoriji predložili su Schickhofer i ostali [14]. Efektivna krutost nosača EI_{eff} računa se prema izrazu (8), gdje se pojednostavljeno zanemaruje modul elastičnosti okomitih slojeva nosača $E_{90} \approx 0$ zbog visokog omjera modula elastičnosti u smjeru vlakana i okomito na smjer vlakana $E_0/E_{90} \approx 30$.

$$EI_{eff} = \sum_i \left(E_i \times b_i \times t_i^3 / 12\right) + \sum_i \left(E_i \times b_i \times t_i \times z_i\right) \quad (8)$$

Raspodjela normalnih naprezanja $\sigma(z)$ po visini CLT-a od momenta savijanja duž raspona nosača M(x) prikazana na slici 13. i računa se izrazom (9), a dokaz nosivosti koji uključuje provjeru maksimalnih računskih normalnih naprezanja $\sigma_{max,d}$ dan je izrazom (10).

$$\sigma(z) = \frac{M(x)}{EI_{eff}} \times z_i \times E_i(z_i) \quad (9)$$

$$\frac{\sigma_{max,d}}{f_{m,CLT,d}} \leq 1,0 \quad (10)$$



Slika 13. Raspodjela naprezanja za CLT element opterećen okomito na ravninu elementa

4.2.2. Posmik

Kad je djelovanje okomito na ravninu elementa dokaz nosivosti na posmik provodi se odvojeno za uzdužne i poprečne slojeve nosača. Raspodjela posmičnih naprezanja po visini poprečnog presjeka τ_d (z) prikazana je na slici 13., a računa se primjenom izraza (11) uz dokaz nosivosti dan izrazom (12) [67]:

$$\tau_d(z) = \frac{V_{z,d} \times \int_A E_i(z) \times S_i(z)}{EI_{eff} \times b} \quad (11)$$

$$\frac{\tau_{max,d}}{f_{v,CLT,d}} \le 1,0; \quad \frac{\tau_{r,max,d}}{f_{r,CLT,d}} \le 1,0 \quad (12)$$

gdje je:

$V_{z,d}$ - računska poprečna sila

$S_i(z)$ - statički moment otpora po visini nosača

$\tau_{max,d}$ - maksimalno računsko posmično naprezanje u smjeru vlakana

$\tau_{r,max,d}$ - maksimalno računsko posmično naprezanje okomito na smjer vlakana.

4.2.3. Tlak okomito na smjer vlakana

Kod točkasto ili linijski oslonjenih CLT nosača potrebno je dokazati nosivost na tlak okomito na smjer vlakana sukladno izrazu (13) [67]:

$$\frac{\sigma_{c,90,CLT,d}}{k_{c,90,CLT} \times f_{c,90,CLT,ref,d}} \le 1,0; \quad \frac{F_{c,90,d}}{A_c \times k_{c,90,CLT} \times f_{c,90,CLT,ref,d}} \le 1,0 \quad (13)$$

gdje je:

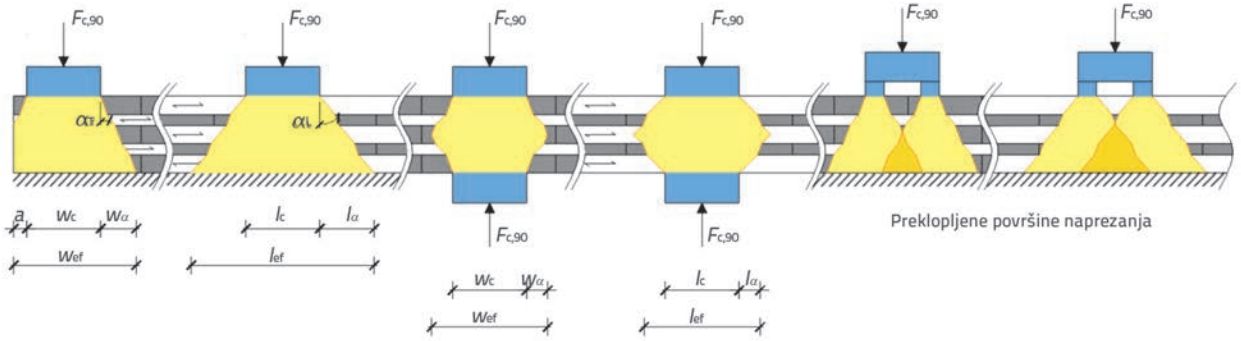
$\sigma_{c,90,CLT,d}$ - računsko tlačno naprezanje okomito na smjer vlakana

$F_{c,90,d}$ - računska tlačna sila okomito na smjer vlakana

A_c - tlačna površina unosa opterećenja

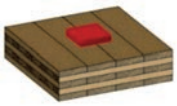
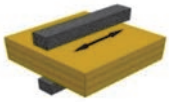
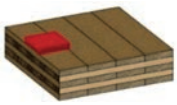
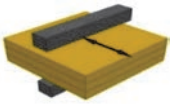
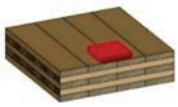
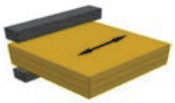
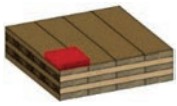
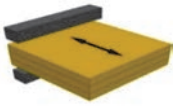
$k_{c,90,CLT}$ - faktor disperzije naprezanja

$f_{c,90,CLT,ref,d}$ - računska tlačna čvrstoća okomita na smjer vlakana, određena na referentnim prizmama.



Slika 14. Raspodjela tlačnih naprezanja okomito na smjer vlakana za točkasti unos opterećenja i točkasto, linijsko ili plošno oslanjanje CLT elementa uz $\alpha L = 45°$ i $\alpha T = 15°$ prema [49]

Tablica 5. Predložene vrijednosti koeficijenta $k_{c,90,CLT}$ za različite slučajeve opterećenja i oslanjanja [68]; točkasto ili linijsko oslanjanje i plošno kontinuirano oslanjanje

Broj slojeva	Točkasto opterećenje	$k_{c,90,CLT}$ [1]	$k_{c,90,CLT}$ [2]	Linijsko opterećenje	$k_{c,90,CLT}$ [1]	$k_{c,90,CLT}$ [2]
3		1,14 - 1,37	1,27 - 1,76		1,04 - 1,14	1,08 - 1,27
5		1,29 - 1,63	1,49 - 2,26		1,09 - 1,25	1,18 - 1,46
7		1,52 - 1,88	2,04 - 2,77		1,17 - 1,35	1,33 - 1,62
3		1,11 - 1,29	1,23 - 1,57		1,09 - 1,21	1,18 - 1,38
5		1,19 - 1,47	1,38 - 1,91		1,14 - 1,30	1,27 - 1,55
7		1,41 - 1,64	1,79 - 2,24		1,25 - 1,40	1,46 - 1,71
3		1,09 - 1,26	1,18 - 1,51		1,02 - 1,07	1,04 - 1,14
5		1,17 - 1,44	1,33 - 1,86		1,05 - 1,13	1,09 - 1,23
7		1,35 - 1,61	1,68 - 2,20		1,09 - 1,17	1,16 - 1,31
3		1,07 - 1,18	1,13 - 1,35		1,05 - 1,10	1,09 - 1,19
5		1,12 - 1,30	1,23 - 1,57		1,07 - 1,15	1,13 - 1,28
7		1,25 - 1,41	1,48 - 1,78		1,13 - 1,20	1,23 - 1,36

Brandner i ostali [49] predlažu model disperzije naprezanja s kutom unosa naprezanja pod 45° u uzdužnim i 15° u poprečnim slojevima CLT-a, gdje se modificirana tlačna čvrstoća CLT-a okomito na smjer vlakana $f_{c,90,CLT}$ računa prema izrazu (14) i oznakama sa slike 14.

$$f_{c,90,CLT,d} = f_{c,90,CLT,ref,d} \times \sqrt{\frac{A_{ef}}{A_c}} = f_{c,90,CLT,ref,d} \times \sqrt{\frac{l_{ef} \times w_{ef}}{l_c \times w_c}} \rightarrow k_{c,90,CLT} = \sqrt{\frac{A_{ef}}{A_c}} \quad (14)$$

gdje je:
w_c i l_c - širina i duljina ležaja
w_{ef} i l_{ef} - efektivna širina i efektivna duljina naprezanja.

Thiel i Brandner [68] daju preporuke i raspone za vrijednosti koeficijenta $k_{c,90,CLT}$ prikazane u tablici 5. Ipak, autori predlažu detaljniji proračun prema analitičkom modelu [49] i izrazu (14) u slučaju da su tlačna naprezanja okomito na vlakna mjerodavna s aspekta nosivosti.

4.3. Granično stanje nosivosti – djelovanje u ravnini elementa

4.3.1. Vlak u smjeru vlakana

Kad djeluje vlak u smjeru vlakana, preporučuju se uzeti u obzir samo oni slojevi nosača koji su orijentirani u smjeru vanjskog djelovanja, odnosno računati s neto površinom presjeka A_{net} [14]. Dokaz nosivosti provodi se prema izrazu (15):

$$\frac{\sigma_{t,0,net,d}}{f_{t,0,CLT,net,d}} \le 1,0; \quad \frac{N_{t,d}}{A_{net} \times f_{t,0,CLT,net,d}} \le 1,0 \quad (15)$$

gdje je:
$\sigma_{\tau,0,net,d}$ - računsko vlačno naprezanje u smjeru vlakana
$N_{t,d}$ - računska vlačna sila u smjeru vlakana.

4.3.2. Tlak u smjeru vlakana

Dokaz nosivosti na tlak u smjeru vlakana potrebno je provesti na razini presjeka prema izrazu (16), uz neto površinu presjeka A_{net}, uključujući samo one slojeve u smjeru djelovanja [14].

$$\frac{\sigma_{c,0,net,d}}{f_{c,0,CLT,net,d}} \le 1,0; \quad \frac{N_{c,d}}{A_{net} \times f_{c,0,CLT,net,d}} \le 1,0 \quad (16)$$

gdje je:
$\sigma_{c,0,net,d}$ - računsko tlačno naprezanje u smjeru vlakana
$N_{c,d}$ - računska tlačna sila u smjeru vlakana.

Osim dokaza na razini presjeka, potrebno je provjeriti i stabilnost nosača na razini elementa. Dokaz izvijanja može se provesti po ekvivalentnoj štapnoj teoriji određivanjem koeficijenta izvijanja ili primjenom teorije II. reda na deformiranom sustavu, o čemu se više može pronaći u [69, 70].

4.3.3. Posmik

Dokaz nosivosti na posmik provodi se na osnovi dvaju različitih analitičkih modela od kojih je jedan namijenjen analizi zidnih nosača, a drugi analizi grednih nosača. Oba modela predlažu provjeru prije opisanih triju mehanizama sloma sa slike 10. Moosbruger i ostali [71] su 2006. predložili analitički model baziran na reprezentativnom volumnom elementu (eng. *Representative Volume Element* - RVE) koji predstavlja najmanji referentni presjek kroz debljinu CLT elementa i koji se dodatno može reducirati na reprezentativni volumni podelement (eng. *Representative Volume Sub Element* - RVSE) sastavljen od presjeka samo dviju ortogonalno lijepljenih lamela prikazanih na slici 15. Tri su pretpostavke modela:
- jednoliko stanje posmičnih naprezanja
- jednaka debljina svih slojeva nosača
- ne postojanje kontakta na uskim stranama lamela.

Proračun naprezanja koncipiran je na idealiziranom nominalnom posmičnom naprezanju τ_0 koje je mjerodavno jedino u slučaju lijepljenih uskih strana lamela kako slijedi:

$$\tau_{0,d} = \frac{n_{xy,RVSE,d}}{a \times t_l} \quad (17)$$

$$\tau_{net,d} = 2 \times \tau_{0,d} \quad (18)$$

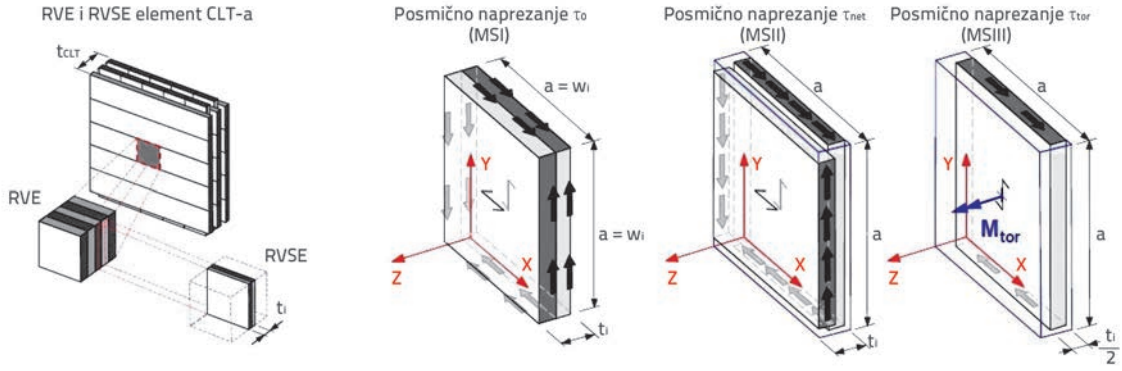
$$\tau_{tor,d} = \frac{M_{tor,d}}{I_p} \times \frac{a}{2} = 3 \times \tau_{0,d} \times \frac{t_l}{a} \quad (19)$$

gdje je:
$n_{xy,RVSE,d}$ - računsko vanjsko opterećenje svedeno na jedan RVSE
a - širina lamele RVSE-a
t_l - debljina RVSE-a
$M_{tor,d}$ - računska vrijednost torzijskog momenta na lijepljenom kontaktu ortogonanih lamela
I_p - polarni moment torzije lijepljenog kontakta ortogonalnih lamela.

U dokazu nosivosti svako od naprezanja treba usporediti s odgovarajućom čvrstoćom prema mjerodavnim mehanizmima sloma kako slijedi:

$$\textbf{(MS I)} \frac{\tau_{0,d}}{f_{v,gross,d}} \le 1,0; \ \textbf{(MS II)} \frac{\tau_{net,d}}{f_{v,net,d}} \le 1,0; \ \textbf{(MS III)} \frac{\tau_{tor,d}}{f_{v,tor,d}} \le 1,0 \quad (20)$$

Numeričkom parametarskom analizom na RVSE-u, Bogensperger i ostali [54, 57] dodatno su definirali izraze za posmičnu krutost CLT panela u funkciji posmične krutosti osnovnog materijala varirajući dimenzije, debljinu i razmak lamela.
Drugu analitičku metodu proračuna namijenjenu analizi grednih nosača predložili su Flaig i Blass [52] godine 2013. primjenom teorije kompozitnih nosača. Za dokaz MS I i MS II autori predlažu



Slika 15. Raspodjela posmičnih naprezanja kod RVSE elementa [71]

primjenu Euler-Bernoulijeve teorije uzimajući u obzir bruto odnosno neto posmičnu debljinu kod proračuna posmičnih naprezanja τ_{xy} sukladno oznakama na slici 16. i izrazima (21) i (22):

$$\tau_{xy,gross,d} = \frac{V_{y,d} \times S_{z,gross}}{I_{z,gross} \times t_{gross}} \Rightarrow \tau_{xy,gross,max,d} = 1{,}50 \times \frac{V_{y,d}}{h \times t_{gross}} \quad (21)$$

$$\tau_{xy,net,d} = \frac{V_{y,d} \times S_{z,net}}{I_{z,net} \times t_{net}} \Rightarrow \tau_{xy,net,max,d} = 1{,}50 \times \frac{V_{y,d}}{h \times t_{net}} \quad (22)$$

gdje je:

$V_{y,d}$ - računska poprečna sila
S_z - statički moment površine oko osi z-z
I_z - aksijalni moment tromosti oko osi z-z
h - visina grede
t - debljina grede
gross - bruto presjek nosača
net - neto presjek nosača.

Dokaz nosivosti MS I i MS II uključuje provjeru izraza (23):

$$\textbf{(MS I)}\ \frac{\tau_{xy,gross,max,d}}{f_{v,gross,d}} \le 1.0;\ \textbf{(MS II)}\ \frac{\tau_{xy,net,max,d}}{f_{v,net,d}} \le 1.0 \quad (23)$$

Kod dokaza MS III primjenom teorije kompozitnih nosača računaju se tri komponente posmičnih naprezanja u skladu s izrazima (24), (25) i (26):

$$\tau_{zx,d} = \frac{6 \times V_{y,d}}{b^2 \times n_{CA}} \times \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{m^3} \right) \quad (24)$$

$$\tau_{zy,d} = \frac{q_{y,d}}{m \times b} \quad (25)$$

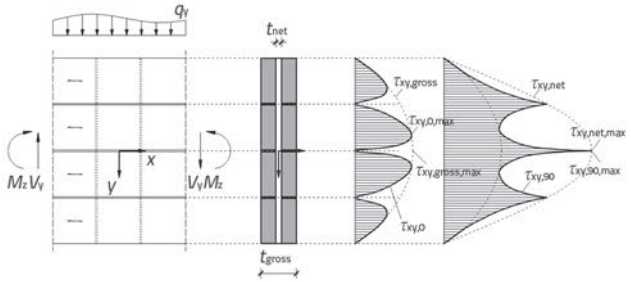
$$\tau_{tor,d} = \frac{3 \times V_{y,d}}{b^2 \times n_{CA}} \times \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m^3} \right) \quad (26)$$

gdje je:

$\tau_{zx,d}$ - računsko jednoosno posmično naprezanje u smjeru osi nosača
$\tau_{zy,d}$ - računsko jednoosno posmično naprezanje okomito na os nosača
$\tau_{tor,d}$ - torzijska naprezanja na lijepljenom kontaktu ortogonalnih lamela
b - širina lamela
n_{CA} - broj lijepljenih površina na kontaktu uzdužnih i poprečnih slojeva u smjeru debljine nosača
m - broj lamela u smjeru visine nosača
$q_{y,d}$ - proračunsko vanjsko opterećenje u kN/m.

Dokaz nosivosti MS III uključuje provjeru dviju interakcija u skladu s izrazom (27):

$$\textbf{(MS III - A)}\ \frac{\tau_{tor,d}}{f_{v,tor,d}} + \frac{\tau_{zx,d}}{f_{r,d}} \le 1{,}0;\ \textbf{(MS III - B)}\ \frac{\tau_{tor,d}}{f_{v,tor,d}} + \frac{\tau_{zy,d}}{f_{r,d}} \le 1{,}0 \quad (27)$$



Slika 16. Raspodjela posmičnih naprezanja τxy po visini CLT presjeka po uzdužnim slojevima (lijevo) i okomitim slojevima nosača (desno) [52]

Predložena analitička metoda pretpostavlja ravnomjernu raspodjelu torzijskih naprezanja τ_{tor} po visini i debljini CLT nosača, pri čemu novija istraživanja provedena na 3D numeričkim modelima upućuju na nejednoliku raspodjelu po visini [72, 73], odnosno po debljini CLT nosača [74].

4.4. Granično stanje uporabivosti

4.4.1. Progibi i deformacije

Kod CLT nosača opterećenih okomito na ravninu elementa, dokaz uporabivosti češće je mjerodavan u odnosu dokaza

nosivosti, čime je provjera progiba i vibracija od velike važnosti. Posmična fleksibilnost okomitih slojeva nosača razlog je što se posmična krutost nosača mora uključiti kod proračuna progiba i deformacija. Efektivna posmična krutost GA_{eff} se računa prema izrazu (28), a koeficijent krivljenja poprečnog presjeka prema izrazu (29) [67]:

$$GA_{ef} = \kappa \times GA = \kappa \times \sum_i (G_i \times b_i \times t_i) \quad (28)$$

$$\kappa = \frac{EI_{eff}^2}{GA \times \int_z \frac{S^2(z,E(z))}{G(z) \times b(z)} dz} \quad (29)$$

gdje je:

G_i - modul posmika pojedinih slojeva nosača (za uzdužne slojeve $G_i = G_0$, a za okomite slojeve $G_i = G_{90}$)

κ - faktor posmičnih naprezanja koji uzima u obzir krivljenje poprečnog presjeka i iznosi od 0,25 do 0,35 [2].

Kod dugotrajnih djelovanja, utjecaj puzanja i uporabne klase dodatno se uzima u obzir koeficijentom deformacija k_{def}, gdje se u nedostatku istraživanja preporuča vrijednost od šperploča [75].

4.4.2. Vibracije

Kod CLT elemenata koji imaju raspon veći od 4,0 m vibracije često mogu biti mjerodavan parametar proračuna [67]. Postoji nekoliko različitih proračunskih metoda poput metode dane u normi EC5 [13], prijedloga od Hamma i Richtera [76], modificirana metoda Hamma i Richtera [77] ili metoda Hua [16]. GenUglavnomeralno sve metode provjeravaju prirodne frekvencije, kriterij krutosti i ubrzanje od vibracija. Kad se dokazuju vibracije, dodatno treba razlikovati i vrstu kontakta između zglobno oslonjenih, djelomično upetih ili potpuno upetih ploča. U tom slučaju važan je intenzitet opterećenja koje se preko zidova prenosi na niže etaže i utječe na krutost spoja među pločama. Prirodna frekvencija slobodno oslonjenog CLT nosača, za koji se može smatrati da je zglobno oslonjen na svoja dva ruba, računa se prema izrazu (30) [67] i ovisno o zahtjevu građevine mora biti veća od minimalne vrijednosti dane u tablici 6.

$$f_{l,beam} = \frac{k_m}{2\pi \times l^2} \sqrt{\frac{(EI)_{l,ef}}{m}} \ [Hz] \quad (30)$$

gdje je:

$f_{l,beam}$ - prirodna fekvencija CLT elementa statičkog sustava slobodno oslonjene grede,

$(EI)_{l,ef}$ - efektivna krutost na savijanje u uzdužnom smjeru CLT-a,

k_m - koeficijent koji uzima u obzir vlastite oblike oscilacija i različite rubne uvjete oslanjanja CLT-a,

m - masa CLT-a

l - raspon CLT nosača

Ako se CLT element oslanja na sva četiri ruba prirodna frekvencija se može dobiti pomoću izraza (31) [67]:

$$f_{l,plate} = f_{l,beam} \times \sqrt{1 + \frac{2D_{xy}^*}{(EI)_{l,ef}} \times \frac{l^2}{b^2} + \frac{(EI)_{b,ef}}{(EI)_{l,ef}} \times \frac{l^4}{b^4}} \ [Hz] \quad (31)$$

gdje je:

$f_{l,plate}$ - prirodna fekvencija CLT elementa oslonjenog na sva četiri ruba,

$(EI)_{b,ef}$ - efektivna krutost na savijanje u poprečnom smjeru CLT-a,

b - raspon CLT nosača u okomitom smjeru,

D_{xy}^* - reducirana krutost krivljenja CLT nosača za slučaj bez lijepljenja uskih strana lamela.

Prema kriteriju krutosti, potrebno je dokazati da vertikalni progib od sile F = 1 kN na bilo kojem području CLT nosača nije veći od dopuštene vrijednosti prikazane u tablici 6. Pri tome se posmična fleksibilnost GA_{ef} kao i raspodjela opterećenja b_f moraju odgovarajuće uzeti u obzir. Za slobodno oslonjeni CLT element, maksimalni progib u sredini raspona može se dobiti prema izrazu (32), pri čemu je raspodjela opterećenja uzeta u obzir izrazom (33) prema [67].

Tablica 6. Kritične vrijednosti graničnog stanja uporabivosti s aspekta dokaza vibracija

Kriterij provjere	Primijenjena metoda	Visoki zahtjevi	Normalni zahtjevi
Prirodna frekvencija f_{crit}	EN 1995-1-1 [13]	8 Hz	
	Hamm/Richter [76]	8 Hz	6 Hz
	Modificirani Hamm/Richter [77]	8 Hz	6 Hz
Kriterij krutosti $w_{crit,1kN}$	EN 1995-1-1 [13]	1 mm	2 mm
	Hamm/Richter [76]	0,25 mm	0,25 mm
	Modificirani Hamm/Richter [77]		
Kriterij ubrzanja vibracija a_{crit}	EN 1995-1-1 [13]	0,05 m/s^2	0,05 m/s^2
	Hamm/Richter [76]		
	Modificirani Hamm/Richter [77]		

$$w = \frac{F \times l^3}{48 \times (EI)_{l,ef} \times b_f} + \frac{F \times l}{4 \times (GA)_{ef} \times b_f} \quad (32)$$

$$b_f = \frac{l}{1,1} \times \sqrt{\frac{(EI)_{b,ef}}{(EI)_{l,ef}}} \quad (33)$$

Ako se prirodna frekvencija f_l nalazi između kritične vrijednosti dane u tablici 6. i minimalne vrijednosti f_{min} = 4,5 Hz, kriterij ubrzanja od vibracija također se mora provjeriti. U tom slučaju dobivena akceleracija mora biti manja od kritične vrijednosti a_{crit} dane u tablici 6. Ubrzanje od vibracija se može dobiti pomoću izraza (34) [67]:

$$a = \frac{0,4 \times \left(\frac{F_0 \times \alpha_{i,fl}}{M_{gen}} \right)}{\sqrt{\left(\left(\frac{f_l}{f_f} \right)^2 - 1 \right)^2 + \left(2 \times \zeta \times \frac{f_l}{f_f} \right)^2}} \quad (34)$$

gdje je:

M_{gen} - efektivna generalizirana masa CLT ploče
f_f - frekvencija uzbude
f_l - prirodna frekvencija
$\alpha_{i,fl}$ - Fourierov koeficijent prevladavajuće harmonijske oscilacije
F_0 - vlastita težina uzbudnog opterećenja (700 kN)
ζ - koeficijent prigušenja koji za CLT stropove može biti od 2,5 do 3,5 %.

5. Posebna poglavlja CLT-a

5.1. Požarna otpornost CLT-a

Dimenzioniranje na požarno opterećenje zasad se radi prema metodi reduciranog poprečnog presjeka, danoj u normi EN 1995-1-2 [78]. Metoda se bazira na određivanju dubine pougljenja d_{char} koja u slučaju CLT-a ovisi o nekoliko faktora:

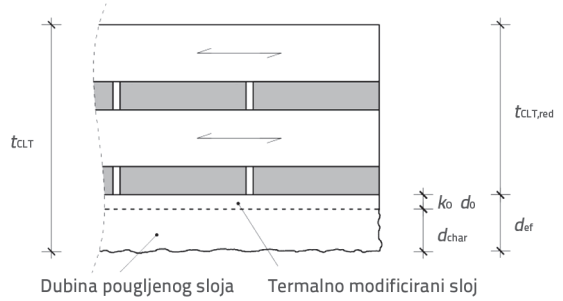
- brzini pougljenja β
- vrsti adhezivnog sredstva
- postojanju i vrsti protupožarne zaštite.

Definirane su dvije vrijednosti brzine pougljenja ovisno o tome postoje li razmaci među lamelama unutar slojeva nosača:

- za CLT bez razmaka, odnosno do maksimalno 2 mm razmaka vrijedi β = 0,65 mm/min
- za CLT s razmacima između 2 i 6 mm vrijedi β = 0,80 mm/min.

Skica reduciranog presjeka CLT-a prikazana je na slici 17. gdje je debljina nosača t_{CLT} umanjena za dubinu pougljenja d_{char} sukladno izrazu (30), gdje se k_0 linearno mijenja od 0 do 1 u prvih 20 minuta požara. Nakon 20 minuta usvaja se puna vrijednost od d_0 = 7 mm za sloj termalno modificiranog materijala bez nosivosti i dodaje dubini pougljenja d_{char}.

$$d_{ef} = d_{char} + k_0 \times d_0; \quad k_0 = \min \begin{cases} t/20 \\ 1,0 \end{cases} \quad (35)$$



Slika 17. Oznake reduciranog presjeka CLT-a uslijed požarnog djelovanja

Za CLT nosače izložene požaru i djelovanju okomito na ravninu elementa detaljnu su analizu i pregled stanja područja dali Klippel i ostali [79]. Predložena je modificirana metoda proračuna "efektivnog poprečnog presjeka" koristeći termalno modificirani sloj materijala d_0 čija vrijednost nije konstantna kao u metodi danoj u EN 1995-1-2 [75]. Na osnovi provedenih eksperimentalnih istraživanja Frangi i ostali [80] dodatno ističu važnost odabira adhezivnog sredstva. Naime, kad se upotrebljavaju ljepila koja nisu otporna na visoke temperature uočeno je odvajanje nagorenog dijela nosača na mjestu lijepljenog kontakta među slojevima, pa je preporučeno u proračunu koristiti dvostruku vrijednost brzine pougljenja β. Ipak, u slučaju CLT nosača opterećenih u ravnini elementa, takva pretpostavka ne vrijedi [79]. Dodatna istraživanja radi definiranja brzine pougljenja β i debljine termalno modificiranog sloja materijala d_0 proveli su Schmidt [81] i Fragiacomo [82] za slučaj CLT ploča, odnosno Schmidt i ostali [83] u slučaju CLT panela. Pri tome se zaključilo kako u dogledno vrijeme treba raditi na optimizaciji vrijednosti d_0, u pogledu zahtijevanog vremena požarne otpornosti CLT-a (30, 60 i 90 minuta) ili vezano za odabranu kompoziciju CLT-a (debljina, raspored i broj slojeva). U slučaju požarne otpornosti kod spojeva CLT nosača, stanje područja prikazali su Werther i ostali [84], gdje je istaknuta ključna uloga spojeva u sprečavanju protoka topline tijekom osiguranja požarne otpornosti cjelokupne građevine.

5.2. Seizmička otpornost CLT-a

Velika krutost u ravnini elementa i relativno mala vlastita težina glavni su razlozi izvrsnog ponašanja CLT-a i kod seizmičkog djelovanja. Prema europskoj normi EN 1998-1-1 [85] i postupku proračuna otpornosti na potres pomoću faktora ponašanja *q*, do sada su u svrhu njegova određivanja kod CLT-a provedena brojna eksperimentalna i numerička ispitivanja. Načelno bi to mogla biti ispitivanja na zidnim panelima i ispitivanja na čitavim CLT konstrukcijama. Ispitivanjem zidnih panela bavili su se Dujič

i ostali [86], Ceccotti i ostali [87], Popovski i ostali [88], Seim i ostali [89], Flatscher i ostali [90], Gavrić i ostali [91], Tomasi i ostali [92]. Pri tome je variran velik broj parametara od koji su najvažniji sljedeći:
- dimenzije, sastav i kompozicija CLT-a
- rubni uvjeti i vrsta spojeva
- eksperimentalna konfiguracija i način unosa opterećenja.

Općenito je zaključak taj da neovisno o sastavu, broju panela i kompoziciji CLT-a kapacitet nosivosti nije bio ograničen nosivošću materijala, već svaki put nosivošću i duktilnošću spojeva. Spojevi su u većini slučajeva izvođeni kao točkasti ili linijski pomoću kutnih metalnih pločica i držača u kombinaciji sa spojnim sredstvima poput čavala, vijaka ili samobušećih vijaka za drvo. Spojevi su se pokazali kritičnim i kod seizmičke otpornosti hibridnih sustava CLT-nosivo staklo [93]. Radi dimenzioniranja i optimiziranja spojeva, dosad su mnoga istraživanja, kako za normalne tako i za seizmičke proračunske situacije, proveli Uibel i ostali [94], Schneider i ostali [95], Ringhofer i ostali [96], Gavrić i ostali [97, 98] i Izzija i ostali [99]. Osim primjene standardnih tipova spojeva, u posljednje vrijeme provedeno je i nekoliko istraživanja na inovativnim novim vrstama spojeva koji su pokazali visok potencijal primjene (Kraler i ostali [100] i Polastri i ostali [101]). Općenito ponašanje čitavih CLT konstrukcija ispitivali su dosad na potresnim stolovima u sklopu projekta SOFIE (*Sistema Costruttivo Fiemme*) Ceccotti i ostali [102], a u sklopu projekta SERIES (eng. *Seismic Engineering Research Infrastructures for European Synergies*) Flatscher i Schickhofer [103]. Na osnovi takvih ispitivanja predložen je faktor ponašanja CLT-a *q* u vrijednosti između 2,0 i 3,0. Bez obzira na razlike među ispitanim eksperimentalnim modelima, u oba slučaja se utjecaj spojeva pokazao kritičnim parametrom nosivosti. Stoga, ako ne postoje podaci o korištenim spojnim sredstvima i načinu izvođenja spojeva, preporučuje se ipak niža vrijednost faktora ponašanja q u iznosu 2,0 [104].

5.3. Otvorena i nedovoljno istražena područja

Iako je dosad provedeno mnogo istraživanja vezano za različite proračunske situacije CLT-a, još uvijek postoji nekoliko otvorenih ili slabo istraženih područja, među kojima su neka vezana za specifična djelovanja, a neka za specifične konfiguracije i sastav CLT-a kako slijedi:
- koncentrirana opterećenja na CLT pločama (Mestek [34], Bogensperger [48])
- koncentrirana opterećenja na CLT zidnim nosačima (Thiel i Brandner [68])
- rebrasti stropovi kao kompoziti CLT i GLT nosača (Thiel i Brandner [68])
- veliki otvori u CLT zidnim i stropnim nosačima (Dujič [105], Kawai [106])
- otvori i zasjeci u CLT grednim nosačima (Flaig [56], Bejtka [107])
- heterogeni sastavi CLT-a uz primjenu tvrdih vrsta drva
- problemi stabilnosti
- spojevi i ojačanja
- interakcije naprezanja.

6. Zaključak

Inovativni kompozitni proizvod poput CLT-a nedvojbeno je u posljednjih desetak godina najviše doprinio popularizaciji i povećanoj uporabi drvenih konstrukcija, mijenjajući tradicionalno uvriježene linijske sustave novim i modernim punostjenim oblicima. Uzimajući u obzir dosadašnji razvoj kao i povećani interes svih sudionika gradnje, u skoroj budućnosti očekuje se daljnja globalizacija CLT- a uz dodatno jačanje utjecaja i u izvaneuropskim zemljama poput Kanade, SAD-a i Japana. Stoga je za ostvarenje punog potencijala CLT-a u doglednom vremenu potrebno ostvariti dodatne napore na njegovoj normizaciji, uključujući usklađivanje postojećih propisa vezanih za proizvodnju, referentna ispitivanja, postupak proračuna, rješenje detalja, izvedbu objekta i u konačnici njegovu upotrebu. S aspekta proizvodnje očekuje se daljnje usklađivanje među proizvođačima koje bi u budućnosti rezultiralo normiziranim predgotovljenim modularnim elementima. Vezano za mehaničke karakteristike, posljednjih godina intenziviran je rad na utvrđivanju njihovih referentnih vrijednosti i referentnih postupaka ispitivanja. Nedavno izdana europska norma EN 16351 [10] daje samo dio postupaka ispitivanja, ali bez referentnih vrijednosti. U doglednom vremenu potiče se daljnji rad na definiraju pojedinih razreda čvrstoće CLT-a. Hibridne sustave namijenjene optimizaciji CLT-a primjenom tvrdih vrsta ili lokalnih mekih vrsta drva također treba normirati jer su pokazali na ograničenom broju ispitivanja velike mogućnosti primjene. S aspekta proračuna CLT-a, u budućoj verziji europske norme za drvene konstrukcije Eurokod 5 (EN 1995-x-x) koja je upravo na reviziji, očekuje se uključivanje CLT-a s postupkom proračuna na sva mjerodavna stanja naprezanja od djelovanja u ravnini i okomito na ravninu elementa. U međuvremenu je potrebno poraditi na još nekoliko otvorenih ili nedovoljno istraženih područja. Posebno pri tome treba obratiti pažnju na spojeve, koji najčešće određuju ponašanje čitave konstrukcije, i to posebno u izvanrednim proračunskim situacijama poput potresa ili požara. Ističe se i nedostatak adekvatnog tipa spoja prilagođenog CLT elementu, jer su dosad uglavnom upotrebljavani točkasti tipovi poput metalnih kutnih L- profila preuzetih od okvirnih drvenih sustava. Uporabljivost i vibracije kod CLT-a također su otvoreno pitanje i malo je provedenih istraživanja posebno kod primjene u visokim zgradama. Sadašnji propisi i ograničenja nisu dovoljni i traže dopunu. Vremenske prilike poput vlažnosti, puzanja i skupljanja CLT-a također imaju velik utjecaj, a u nedostatku provedenih istraživanja uglavnom im se propisuju vrijednosti drugih sličnih materijala. Ponašanje u izvanrednim situacijama poput potresa ili požara dosad je provedeno uglavnom na pojedinim individualnim elementima te je stoga upitno u

kojoj se mjeri ono može preslikati na čitavu CLT konstrukciju. Spoznaje o ponašanju spojeva na kontaktu zidova i ploča pri tome su od iznimne važnosti, a zasad nedostaju.
Zaključno gledano, inovativni kompozit poput CLT- a pridonosi razvitku i proširenju mogućnosti gradnje ne samo drvenih konstrukcija već i općenito čitavoga graditeljskog sektora. Zasad se njegove mogućnosti najviše ostvaruju u primjeni kod ekološki i energetski učinkovitih višeetažnih stambenih i poslovnih zgrada. Na taj način CLT kao predstavnik drvenih konstrukcija nudi kvalitetno alternativno rješenje betonskim ili zidanim konstrukcijama, čime se u skoroj budućnosti očekuje dodatno jačanje njegove pozicije.

LITERATURA

[1] Ferk, H.: Some building science aspects for building with CLT, Focus solid timber solutions - European conference on cross laminated timber (CLT), Bath, pp. 207-250 , 2013.

[2] Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., Thiel, A.: Cross laminated timber (CLT): overview and development, European Journal of Wood and Wood Products, 74 (2016) 3, pp. 331-351.

[3] Ringhofer, A., Schickhofer, G.: Timber in town - current examples for residentail buildings in CLT, Focus solid timber solutions - European conference on cross laminated timber (CLT), Bath, pp. 185-206 , 2013.

[4] London Design Festival - The Smile, www.londondesignfestival.com/smile, 04.04.2017.

[5] Brock Commons Tallwood House, www.actonostry.ca/project/brock-commons-tallwood-house/, 04.04.2017.

[6] Dalston Lane - The world's largest CLT building, www.waughthistleton.com/dalston-lane/, 04.04.2017.

[7] Wohnbau Wagramer Strasse, www.binderholz.com/bauloesungen/wohnbau/wohnbau-wagramer-strasse-wien-oesterreich/, 04.04.2017.

[8] Treet: The tallest timber-framed building in the world, http://treetsameie.no/, 04.04.2017.

[9] Brandner, R.: Production and technology of cross laminated timber (CLT): State-of-the-art-report, Focus solid timber solutions - European conference on cross laminated timber (CLT), Bath, pp. 3-36, 2013.

[10] EN 16351 Timber Structures - Cross Laminted Timber - Requirements, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2015.

[11] DIN EN 1995-1-1/NA National Annex - Nationally determined parameters - Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings, Deutsches Institut für Normung (DIN), 2013.

[12] ÖNORM B 1995-1-1/NA Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings - National specifications for the implemntation of ÖNORM B 1995-1-1, national comments and national supplements, Austrian Standards Institute (ASI), Vienna, Austria, 2014.

[13] EN 1995-1-1 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2004.

[14] Schickhofer, G., Bogensperger, T., Moosbrugger, T.: BSPhandbuch: Holz- Massivbauweise in Brettsperrholz: Nachweise auf Basis des neuen europäischen Normenkonzepts, Graz University of Technology, Graz, 2010.

[15] Wallner-Novak, M., Koppelhuber, J., Pock, K.: Cross-Laminated Timber Structural Design - Basic design and engineering principles according to Eurocode, proHolz Austria, Vienna, 2013.

[16] Gagnon, S., Pirvu, C.: CLT Handbook: cross laminated timber - Canadian edition, FPInnovations, Quebec, 2011.

[17] Karacabeyli, E., Douglas, B.: CLT Handbook: cross laminated timber - U.S. edition, FPInnovations, Pointe-Claire, 2013.

[18] Mestek, P., Werther, N., Winter, S.: Building with Cross Laminated Timber - Load-bearing solid wood components for walls, ceilings and roofs, Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V., Wuppertal, 2010.

[19] EN 14081-1 Timber structures - Strength gradaed structural timber with rectangular cross section - Part 1: General Requirements, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2005.

[20] DIN 4074-1 Strength grading of wood - Part 1: Coniferous sawn timber, 2012.

[21] EN 338 Structural timber - strength classes, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2009.

[22] Crawford, D., Hairstans, R., Smith, R.E.: Feasibility of cross laminated timber production from UK sitka spruce, Focus solid timber solutions - European conference on cross laminated timber (CLT), Bath, pp. 37-52, 2013.

[23] Blaß, H.J., Flaig, M.: Keilgezinkte Rahmenecken und Satteldachträger aus Brettsperrholz, KIT Scientific Publication, Karlsruhe, 2015.

[24] EN 301 Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing timber structures - Classification and performance requirements, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2006.

[25] EN 15425 Adhesives - One component polyurethane adhesives for load-bearing timber structures - Classification and performance requirements, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2008.

[26] Unterwieser, H., Schickhofer, G.: Characteristic values and test configurations of CLT with focus on selected properties, Focus solid timber solutions - European conference on cross laminated timber (CLT), Bath, pp. 53-73, 2013.

[27] Jöbstl, R., Moosburger, T., Bogensperger, T., Schickhofer, G.: A contribution to the design and system effect of cross laminated timber (CLT), Proceedings of 39th CIB-W18 Meeting, Florence, 2006.

[28] EN 14080 Timber structures - glued laminated timber and glued solid timber - requirements, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2013.

[29] Schickhofer, G., Brandner, R., Bauer, H.: Introduction to CLT - product properties - strength classes, Proceedings of the Joint Conference of COST Actions FP1402 & FP1404, Cross laminated timber - a competitive wood product for visionary and fire safe buildings, Stockholm, pp. 9-32 , 2016.

[30] Aicher, S., Dill-Langer, G.: Basic consideration to rolling shear modulus in wooden boards, Otto-Graf-Journal, 11, 2000.

[31] Blaß, H.J., Görlacher, R.: Zum Trag- und Verformungsverhalten von LIGNOTREND Elementen bei Beanspruchung in Plattenebene, Bauen mit Holz, 104 (2002) 11, pp. 34-41.

[32] Görlacher, R.: Ein Verfahren zur Ermittlung des Rollschubmoduls von Holz, Holz als Roh- und Werkstoff, 60 (2002) 5, pp. 317-322.

[33] Fellmoser, P., Blaß, H.J.: Influence of rolling shear modulus on strength and stiffness of structural bonded timber elements, Proceedings of 37th CIB-W18 Meeting, Edinburgh, 2004.

[34] Mestek, P., Kreuzinger, H., Winter, S.: Design of Cross Laminated Timber CLT, Proceedings of 10th World Conference on Timber Engineering (WCTE2008), Miyazaki, 2008.

[35] Flores, E.I.S., Saavedra, K., Hinojosa, J., Chandra, Y., Das, R.: Multi-scale modelling of rolling shear failure in cross-laminated timber structures by homogenisation and cohesive zone models, International Journal of Solids and Structures, 81 (2016), pp. 219-232, https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.11.027

[36] Franzoni, L., Lebee, A., Lyon, F., Foret, G.: Influence of orientation and number of layers on the elastic response and failure modes on CLT floors: modeling and parameter studies, European Journal of Wood and Wood Products, 74 (2016) 5, pp. 671-684.

[37] Blaß, H.J., Görlacher, R.: Zum Trag- und Verformungsverhalten von LIGNOTREND Decken und Wandsystemen aus Nadel-schnittholz, Bauen mit Holz, 103 (2001) 4, pp. 37-40.

[38] Ehrhart, T., Brandner, R., Schickhofer, G., Frangi, A.: Rolling shear properties of some european timber species with focus on cross laminated timber (CLT): Test configuration and parameter study, Proceedings of 2nd INTER-Meeting, Sibenik, 2015.

[39] Sikora, K.S., McPolin, D.O., Harte, A.M.: Effects of the thickness of cross-laminated timber (CLT) panels made from Irish Sitka spruce on mechanical performance in bending and shear, Construction and Building Materials, 116 (2016), pp. 141-150, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.145

[40] Zhou, Q., Gong, M., Chui, Y.H., Mohammad, M.: Measurement of rolling shear modulus and strength of cross laminated timber fabricated with black spruce, Construction and Building Materials, 64 (2014), pp. 379-386, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.039

[41] Li, M., Lam, F., Li, Y.: Evaluating rolling shear strength properties of cross laminated timber by torsional shear tests and bending tests, Proceedings of 13th World Conference on Timber Engineering (WCTE2014), Quebec, 2014.

[42] Aicher, S., Hirsch, M., Christian, Z.: Hybrid cross-laminated timber plates with beech wood cross-layers, Construction and Building Materials, 124 (2016), pp. 1007-1018, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.051

[43] EN 408 Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2012.

[44] Halili, Y.: Versuchstechnische Ermittlung von Querdruckkenngrößen für Brettsperrholz, Master Thesis, Institute of Timber Engineering and Wood Technology, Graz University of Technology, Graz, Austria, 2008.

[45] Salzmann, C.: Ermittlung von Querdruckkenngrößen für Brettsperrholz (BSP), Master Thesis, Institute of Timber Engineering and Wood Technology, Graz University of Technology, Graz, Austria, 2010.

[46] Serrano, E., Enquist, B.: Compression strength perpendicular to grain in cross-laminated timber (CLT), Proceedings of 11th World Conference on Timber Engineerig (WCTE2010), Riva del Garda, 2010.

[47] Bogensperger, T., Augustin, M., Schickhofer, G.: Properties of CLT-panels exposed to compression perpendicular to their plane, Proceedings of 44th CIB-W18 Meeting, Alghero, 2011.

[48] Bogensperger, T., Jöbstl, R.: Concentrated load introduction in CLT elements perpendicular to plane, Proceedings of 1st INTER-Meeting, Bath, 2014.

[49] Brandner, R., Schickhofer, G.: Properties of cross laminated timber (CLT) in compression perpendicular to grain, Proceedings of 1st INTER-Meeting, Bath, 2014.

[50] EN 14358 - Timber structures - Calculation and verification of characteristic values, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2006.

[51] Brandner, R., Bogensperger, T., Schickhofer, G.: In plane shear strength of cross laminated timber (CLT): test configuration, quantification and influencing parameters, Proceedings of 46th CIB-W18 Meeting, Vancouver, 2013.

[52] Flaig, M., Blaß, H.J.: Shear strength and shear stiffness of CLT-beams loaded in plane, Proceedings of 46th CIB-W18 Meeting, Vancouver, 2013.

[53] Jöbstl, R., Bogensperger, T., Schickhofer, G.: In plane shear strength of cross laminated timber, Proceedings of 41th CIB-W18 Meeting, St. Andrews, 2008.

[54] Bogensperger, T., Moosbrugger, T., Silly, G.: Verification of CLT-plates under loads in plane, Proceedings of 11th World Conference on Timber Engineerig (WCTE2010), pp. 885-898, Riva del Garda, 2010.

[55] Jöbstl, R., Bogensperger, T., Schickhofer, G., Jeitler, G.: Mechanical behaviour of two orthogonally glued boards, Proceedings of 8th World Conference on Timber Engineering (WCTE2004), Portland, 2004.

[56] Flaig, M.: Design of CLT beams with rectangular holes or notches, Proceedings of 1st INTER-Meeting, Bath, 2014.

[57] Bogensperger, T., Moosbrugger, T., Schickhofer, G.: New test configuration for CLT wall elements under shear load, Proceedings of 40th CIB-W18 Meeting, Bled, 2007.

[58] Andreolli, M., Rigamonti, M.A., Tomasi, R.: Diagonal compression test on cross laminated timber panels, Proceedings of 13th World Conference on Timber Engineering (WCTE2014), Quebec, 2014.

[59] Brandner, R., Dietsch, P., Dröscher, J., Schilte-Wrede, M., Sieder, M.: Scheibenschub von Brettsperrholz: Verifizierung einer Prüfkonfiguration und Parameterstudie, Bautechnik, 92 (2015) 11, pp. 759-769.

[60] Wallner, G.: Versuchstechnische Ermittlung der Verschiebungskenngrößen von orthogonal verklebten Brettlamellen, Master Thesis, Graz University of Technology, Graz, Austria, 2004.

[61] Bosl, R.: Zum Nachweis des Trag- und Verformungsverhaltens von Wandschiben aus Brettsperholz, PhD Thesis, Institute for structural engineering, Military University of Munich, 2002.

[62] Andreolli, M., Tomasi, R.: Experimental investigation on in-plane behaviour of cross-laminated timber elements, Proceedings of 45th CIB-W18 Meeting, Växjö, 2012.

[63] Möhler, K.: Die Bemessung der Verbindungsmittel bei zusammengesetzten Biege- und Druckgliedern im Holzbau, Bauen mit Holz, 68 (1966), pp. 162-164.

[64] Kreuzinger, H.: Verbundkonstruktionen aus nachgiebig miteinander verbundenen Querschnittsteilen, Proceedings of Ingenieurholzbau Karlsruher Tage, Bruderverlag Karlsruhe, 2000.

[65] Timoshenko, S.P.: On the correction factor for shear of the differential equation for transverse vibrations of bars of uniform cross-section, Phil Mag, 41 /1921), pp. 744-746.

[66] Bogensperger, T., Silly, G., Schickhofer, G.: Comparison of methods of approximate verification procedures for cross laminated timber, Research report, holz.bau forschungs gmbh: Graz, Austria, 2012.

[67] Thiel, A.: ULS and SLS design of CLT and its implementation in the CLT designer, Focus solid timber solutions - European conference on cross laminated timber (CLT), University of Bath, Bath, pp. 77-102, 2013.

[68] Thiel, A., Brandner, R.: Ultimate limit states design of CLT elements - Basis and some special topics, Proceedings of the Joint Conference of COST Actions FP1402 & FP1404, Cross laminated timber - a competitive wood product for visionary and fire safe buildings, Stockholm, 2016.

[69] Thiel, A., Krenn, H.: Buckling loads for cross-laminated timber elements under uniaxial in-plane compression, Proceedings of 14th World Conference on Timber Engineering (WCTE2016), Vienna, 2016.

[70] Perret, O., Lebee, A., Douthe, C., Sab, K.: The Bending-Gradient theory for the linear buckling of thick plates: Application to Cross Laminated Timber panels, International Journal of Solids and Structures, 87 (2016), pp. 139-152, https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2016.02.021

[71] Moosbrugger, T., Guggenberger, W., Bogensperger, T.: Cross-laminated timber wall segments under homogeneous shear - with and without openings, Proceedings of 9th World Conference on Timber Engineering (WCTE2006), Portland, 2006.

[72] Jeleč, M., Strukar, K., Rajčić, V.: Structural analysis of in-plane loaded CLT beams, Electronic Journal of the Faculty of civil engineering Osijek - e-GFOS, 14, pp. 30-40, 2017.

[73] Jeleč, M., Rajčić, V., Danielsson, H., Serrano, E.: Structural analysis of in plane loaded CLT beams with holes: FE-analyses and parameter studies, Proceedings of 3rd INTER-Meeting, Graz, 2016.

[74] Danielsson, H., Serrano, E., Jeleč, M., Rajčić, V.: In-plane loaded CLT beams - Tests and analysis of element lay-up , Proceedings of 4th INTER-Meeting, Kyoto, 2017.

[75] Jöbstl, R., Schickhofer, G.: Comparative examination of creep of GLT and CLT slabs in bending, Proceedings of 40th CIB-W18 Meeting, Bled, 2007.

[76] Hamm, P., Richter, A., Winter, S.: Floor vibrations – new results, Proceedings of 11th World Conference on Timber Engineerig (WCTE2010), Riva del Garda, 2010.

[77] Thiel, A., Schickhofer, G.: Design methods for Cross Laminated timber concering floor vibrations: a comparability study, Research report, holz.bau forschungs gmbh, Graz, Austria, 2012.

[78] EN 1995-1-2 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2004.

[79] Klippel, M., Schmidt, J., Frangi, A.: Fire Design of CLT – comparison of design concepts, Proceedings of the Joint Conference of COST Actions FP1402 & FP1404, Cross laminated timber - a competitive wood product for visionary and fire safe buildings, Stockholm, 2016.

[80] Frangi, A., Fontana, M., Knobloch, M., Bochicchio, G.: Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire, Fire Safety Journal, 44 (2009) 8, pp. 1078-1087.

[81] Schmid, J., König, J., Kohler, J.: Fire-exposed cross-laminated timber – modelling and tests, Proceedings of 11th World Conference on Timber Engineerig (WCTE2010), Riva del Garda, 2010.

[82] Fragiacomo, M., Menis, A., Clemente, I., Bochicchio, G.: Fire Resistance of Cross-Laminated Timber Panels Loaded Out of Plane, Journal of Structural Engineering, 139 (2013) 12, https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000787

[83] Schmid, J., Menis, A., Fragiacomo, M., Clemente, I., Bochicchio, G.: Behaviour of Loaded Cross-Laminated Timber Wall Elements in Fire Conditions, Fire Technology, 51 (2015) 6, pp. 1341-1370.

[84] Werther, N., Denzel, J.K., Stein, R., Winter, S.: Detailing of CLT with respect to fire resistance, Proceedings of the Joint Conference of COST Actions FP1402 & FP1404, Cross laminated timber - a competitive wood product for visionary and fire safe buildings, Stockholm, 2016.

[85] EN 1998-1:2004 + AC + A1 Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance -part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2013.

[86] Dujič, B., Zarnić , R., Aicher, S., Racking of wooden walls exposed to different boudary conditions, Proceedings of 38th CIB-W18 Meeting, Karlsruhe, 2005.

[87] Ceccotti, A.: SOFIE Project - Cyclic Tests on Cross-Laminated Wooden Panels, Proceedings of 9th World Conference on Timber Engineering (WCTE2006), Portland, 2006.

[88] Popovski, M., Schneider, J., Schweinsteiger, M.: Lateral load resistance of cross-laminated wood panels, Proceedings of 11th World Conference on Timber Engineerig (WCTE2010), Riva del Garda, 2010.

[89] Seim, W., Hummel, J., Vogt, T.: Earthquake design of timber structures - Remarks on force-based design procedures for different wall systems, Engineering Structures, 76 (2014), pp. 124-137, https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.06.037

[90] Flatscher, G., Bratulić, K., Schickhofer, G.: Experimental tests on cross-laminated timber joints and walls. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings,168 (2015) 11, pp. 868-877, https://doi.org/10.1680/stbu.13.00085

[91] Gavrić, I., Fragiacomo, M., Ceccotti, A.: Cyclic Behavior of CLT Wall Systems: Experimental Tests and Analytical Prediction Models, Journal of Structural Engineering, 141 (2015) 11, https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001246

[92] Tomasi, R., Smith, I.: Experimental Characterization of Monotonic and Cyclic Loading Responses of CLT Panel-To-Foundation Angle Bracket Connections, Journal of Materials in Civil Engineering, 27 (2015) 6, https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001144

[93] Stepinac, M., Rajčić, V., Žarnić, R.: Timber structural glass composite systems in earthquake environment, Građevinar, 68 (2016) 3, pp. 211-219.

[94] Uibel, T., Blaß, H.J.: Joints with dowel type fasteners in CLT structures, Focus solid timber solutions - European conference on cross laminated timber (CLT), Bath, pp. 119-136 , 2013.

[95] Schneider, J., Shen, Y., Stiemer, S.F., Tesfamariam, S.: Assessment and comparison of experimental and numerical model studies of cross-laminated timber mechanical connections under cyclic loading, Construction and Building Materials, 77 (2015), pp. 197-212, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.029

[96] Ringhofer, A., Brandner, R., Schickhofer, G.: Withdrawal resistance of self-tapping screws in unidirectional and orthogonal layered timber products, Materials and Structures, 48 (2015) 5, pp. 1435-1447.

[97] Gavrić, I., Fragiacomo, M., Ceccotti, A.: Cyclic behaviour of typical metal connectors for cross-laminated (CLT) structures, Materials and Structures, 48 (2015) 6, pp. 1841-1857.

[98] Gavrić, I., Fragiacomo, M., Ceccotti, A.: Cyclic behavior of typical screwed connections for cross-laminated (CLT) structures, European Journal of Wood and Wood Products, 73 (2015) 2, pp. 179-191.

[99] Izzi, M., Flatscher, G., Fragiacomo, M., Schickhofer, G.: Experimental investigations and design provisions of steel-to-timber joints with annular-ringed shank nails for Cross-Laminated Timber structures, Construction and Building Materials, 122 (2016), pp. 446-457, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.072

[100] Kraler, A., Kögl, J., Maderebner, R.: Sherpa-clt-connector for cross laminated timber (CLT) elements, Proceedings of 13th World Conference on Timber Engineering (WCTE2014), Quebec, 2014.

[101] Polastri, A., Angeli, A., Gianni, D.R.: A new construction system for clt structures, Proceedings of 13th World Conference on Timber Engineering (WCTE2014), Quebec, 2014.

[102] Ceccotti, A., Sandhaas, C., Okabe, M., Yasamura, M., Minowa, C., Kawai, N.: SOFIE project-3D shaking table test on a seven-storey full-scale cross-laminated timber building, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 42 (2013) 13, pp. 2003-2021.

[103] Flatscher, G., Schickhofer, G.: Shaking-table test of a cross-laminated timber structure, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, 168 (2015) 11, pp. 878-888, https://doi.org/10.1680/stbu.13.00086

[104] Follesa, M., Fragiacomo, M., Lauriola, M.P.: A proposal for revision of the current timber part (Section 8) of Eurocode 8 Part 1, 42th CIB-W18 Meeting, Alghero, 2011.

[105] Dujič, B., Klobčar, S. Zarnić, R.: Influence of openings on shear capacity of wooden walls, Proceedings of 40th CIB-W18 Meeting, Bled, 2007.

[106] Kawai, N., Tsuchimoto, T., Tsuda, C., Murakami, S., Miura, S., Isoda, H., Miyake, T.: Lateral loading tests on CLT shear walls by assembly of narrow panels and by a large panel with an opening, Proceedings of 13th World Conference on Timber Engineering (WCTE2014), Quebec, 2014.

[107] Bejtka, I.: Cross (CLT) and Diagonal (DLT) Laminated Timber as Innovative Material for Beam Elements, Research report, KIT Scientific Publication, Karlsruhe, Germany, 2011.