



SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,
ARHITEKTURE I GEODEZIJE

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING,
ARCHITECTURE AND GEODESY

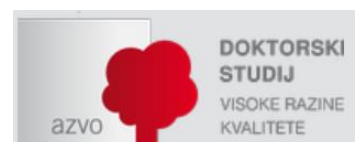
KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT

**Primjena nekih vrsta tvrdih listača za izradu lijepljenih
lameliranih nosača**

Jelena Lovrić Vranković

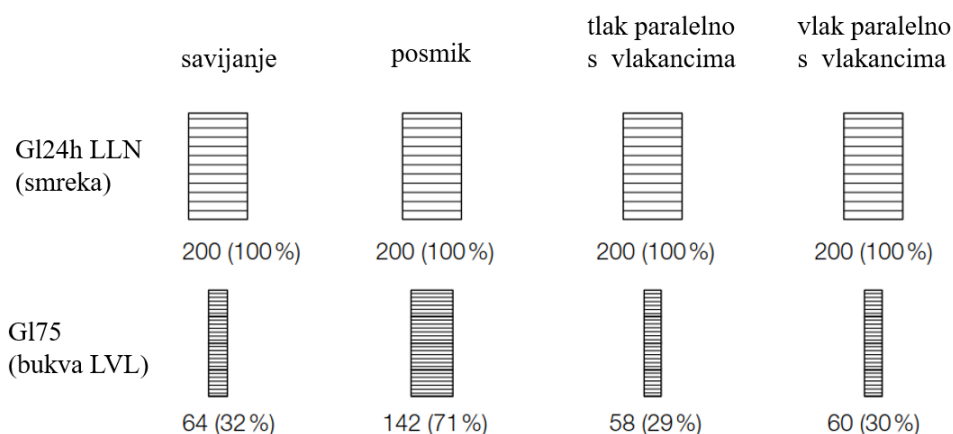
Split, prosinac 2023.

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
Sveučilište u Splitu
Matice hrvatske 15, 21000 Split



1. Uvod

Drvo je prirodan materijal i jedan od ključnih čimbenika u provođenju koncepta održive gradnje [1]. Primjena drva na uštrb materijala poput betona i čelika doprinosi redukciji emisije ugljičnog dioksida i lako zapaljivih organskih spojeva. Globalni porast temperatura i ekstremni vremenski fenomeni te klimatske promjene općenito mijenjaju distribuciju šuma, a posljedice za šume su još uvijek u potpunosti nepoznate zbog velikog broja parametara koji na njih utječu. Predviđa se daljnje širenje šuma listaća, osobito u srednjoj Europi, dok su nacionalne šumske politike također usmjerene na širenje šuma tvrdih listaća naspram šuma četinjača. Za proizvodnju nosivih konstrukcija do sada se u većini slučajeva primjenjivalo drvo četinjača. Sukladno navedenim promjenama, europska drvna industrija prepoznala je potencijal tvrdih listaća za proizvodnju nosivih konstrukcija i provela opsežna eksperimentalna istraživanja sa ciljem razvoja standarda za njihovu primjenu. Istraživanje tvrdih listaća započelo je 1960-ih u Njemačkoj, a nastavilo se 20 godina kasnije u Švicarskoj, gdje se mogu pronaći rani primjeri korištenja lijepljenih lameliranih elemenata od bukve u krovnim konstrukcijama crkvi. Kao odgovor na klimatske promjene, u posljednjih 15-tak godina intenzivirala su se istraživanja proizvoda na bazi tvrdih listaća. Do sada su se tvrde listaće koristile većinom kao izvor energije ili za uređenje interijera. Iako su drva četinjača u pravilu lakše obradiva i ekonomičnija u usporedbi sa drvom liščara, tvrđi liščari pokazuju bolje mehaničke karakteristike koje vode do vitkijih konstruktivnih elemenata manjih poprečnih presjeka i većih raspona (Slika 1. i 2). Trenutno, lamelirani furnir od bukve predstavlja najčešće korišten proizvod na bazi tvrdih listaća zbog velikih vrijednosti krutosti i čvrstoće. Kombinacija drva četinarara i liščara također otvara brojne mogućnosti u arhitekturi npr. postavljanje lamela veće čvrstoće u vanjske zone greda s većim naprežanjima ("composite build-ups"). Takvim kombiniranjem mogu se postići financijske uštede i sačuvati savojna nosivost. Osim mikrostrukturnih razlika, šumama listaća je potrebno više vremena za obnovu (cca 100 godina za hrast), dok šume četinjača imaju bržu stopu rasta i potrebno im je do cca 40 godina za obnovu.



Slika 1. Usporedba dimenzija poprečnih presjeka LLN-a od smreke i LVL-a od bukve [1]

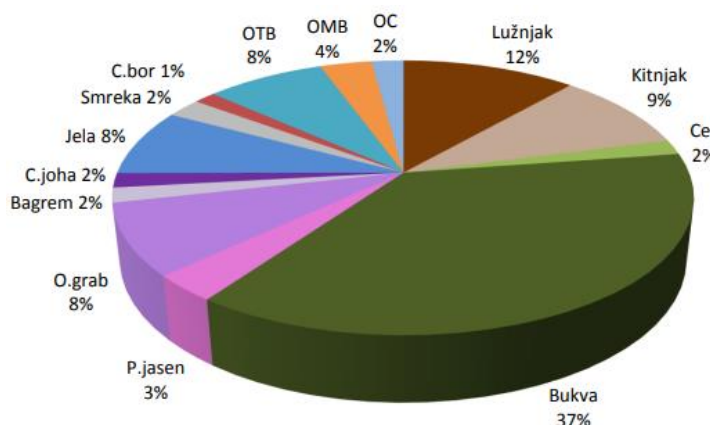
U kontekstu gore navedenog, 2017.g. pokrenut je projekt "European hardwoods for the building sector" (EU Hardwoods) od strane Holzforschung Austria, Sveučilišta u Ljubljani, MPA Stuttgart i FCBA Simonin Sas,

a kroz koji je procijenjena prikladnost primjene određenih vrsta tvrdih listača (bukva, hrast, kesten, jasen) za izradu nosivih elemenata [2].



Slika 2. a) zgrada Tamedia u Zurich-u, LVL bukva [3]; b) Lord's Cricket Ground u Londonu, hrast [1]

Prema uređajnom zapisniku Hrvatskih šuma najveći udio u ukupnoj drvnjoj zalihi na šumskogospodarskom području ima obična bukva (37,22%), zatim slijede hrast lužnjak (11,55 %), hrast kitnjak (9,38 %), obični grab (8,39 %), obična jela (7,90 %), ostala tvrda drva (3,46 %), poljski jasen (3,19 %), smreka (2,29 %), hrast cer (1,77 %), bagrem (1,74 %), crna joha (1,70 %) i crni bor (1,43 %) (Slika 3.) [4].



Slika 3. Udio vrsta drveća u drvnjoj zalihi šumskogospodarskog područja [4]

U ovom radu obrađeni su lijepljeni lamelirani nosači (LLN) kao jedni od najčešće korištenih proizvoda na bazi drva. Uzimajući u obzir kontrolu proizvodnje i redukciju varijabilnosti mehaničkih karakteristika, mogu se smatrati homogenijim elementima u odnosu na puno drvo. Jedno od bitnih svojstava LLN-a je 'lamination effect' na temelju kojeg se može zaključiti da je savojna čvrstoća LLN-a veća od savojne čvrstoće pojedinačne lamele s obzirom da su slabije mehaničke karakteristike lamele u nekom elementu 'nadoknadene' boljim mehaničkim svojstvima susjedne lamele. Isto tako, susjedne lamele sprječavaju bočne deformacije lamele do kojih dolazi prilikom ispitivanja pojedinačnih lamela. Kvaliteta lijepljenog spoja predstavlja preduvjet za korištenje LLN-a kao inženjerskih proizvoda. Vrste ljepila kao i tehnologija lijepljenja koje se koriste za četinjače ne daju zadovoljavajuću kvalitetu lijepljenog spoja kod vrsta tvrdih listača s obzirom na veću gustoću i manju poroznost te veću sklonost prema apsorpciji vlage u odnosu na četinjače. Jedan od razloga koji otežavaju formiranje europskog standarda za lijepljenje tvrdih listača leži u značajnoj

raznolikosti vrsti listača. To se posebno ogleda u postojanju cca 40000 vrsta listača naspram 650 četinjača [5]. Isto tako, raspon vrijednosti za gustoću tvrdih drva kreće se između 300 i 1000 kg/m³, dok se za meka drva kreće između 350 i 550 kg/m³.

2. Europski standardi

U 2021. godini Europska organizacija za tehnička dopuštenja (EOTA) izdala je dokument EAD 130320-00-0304 'Glued laminated timber made of solid hardwood' [6], a koji pokriva lijepljeno lamelirano drvo od određenih vrsta tvrdih listača. Prethodno tomu, EOTA je privremeno odobrila pojedine LLN-e od tvrdih listača kao i ljepila za njihovu proizvodnju s obzirom da su postojeći europski propisi obrađivali zahtjeve za projektiranje, svojstva i potvrdu sukladnosti te označavanje LLN-a samo od drva četinjača i topole. Postojeća tehnička odobrenja su:

- za bukvu: Z-9,1-821; Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. [7]
- za hrast: Z-9,1-679; Holz Schiller GmbH [8] i ETA-13/0642; Elaborados y Fabricados Gámiz, S.A. [9]
- za pitomi kesten: ETA-13/0646; ETA-13/0646, SIERO LAM S.A. [10]
- za LVL od bukve: ETA-14/0354 [11]

Također, Europska komisija osnovala je tehničko povjerenstvo CEN/TC124/WG3/TG1 pri Europskom odboru za normizaciju (CEN), za razvoj dokumenta analognog EN 14080 [12] uzimajući u obzir različite vrste tvrdih listača i ograničenost u korištenju ljepila.

EAD 130320-00-0304 pokriva lijepljeno lamelirano drvo od cjelovitog hrasta (*Quercus robur* L., *Quercus petrae* L., *Quercus alba* L.), bukve (*Fagus sylvatica*), jasena (*Fraxinus excelsior*), kestena (*Castanea sativa*), breze (*Betula spec.*), svijetlo crvenog merantija (*Shorea spp*), tamno crvenog merantija (*Shorea spp*), keruing (*Dipterocarpus alatus* Roxb.), kempas (*Koompassia malaccensis*), kapur (*Dryobalanops spp.*), balau (*Shorea Laevis Ridl.*), eukaliptus (*Eucalyptus diversicolor*, *Eucalyptus marginata* i *Eucalyptus globulus*), Iroko (*Milicia spp.*) koje se klasificira prema EN 14081-1 [13]. Ljepila tipa I označena slovom "w" navedena u EN 301:2023 [14] i EN 15425:2023 [15] koriste se za proizvodnju nosivih elemenata od tvrdih listača uz klase uporabljivosti 1 do 3 prema EN 1995-1-1 [16]. U EAD-u su dane smjernice tijelima za tehničko ocjenjivanje (TAB) koje su temelj za donošenje tehničke ocjene za građevni proizvod. Dani su zadaci i odgovornosti proizvođača po pitanju kontrole tvorničke proizvodnje kao i zadaće odobrenog tijela. Isto tako, definirane su smjernice za sastavljanje izjave o svojstvima, označavanje proizvoda i identifikaciju proizvoda. Na osnovu EAD-a Institut IGH d.d., IGH HTO, donio je 2023. godine Hrvatsku tehničku ocjenu za lijepljeno lamelirano tvrdo drvo od graba (*Carpinus betulus* L.), cera (*Quercus cerris* L.) i javora (*Acer campestre* L.) za namjenu ugradnje nosive konstrukcije u razredima izloženosti 1 i 2. Za navedene vrste tvrdih drva nema saznanja o postojanju drugih tehničkih odobrenja u Europi za klase uporabivosti 1, 2 i 3.

Između ostalog, EAD 130320-00-0304 daje smjernice za određivanje savojne čvrstoće LLN-a preko čvrstoće lamela i zupčastih spojeva ili ispitivanjem LLN-a, te trajnosti čvrstoće lijepljenja lamela i zupčastih spojeva u pogledu provođenja posmičnih testova lijepljenog spoja u suhim i mokrim uvjetima i delaminacijom. Ispitivanja se provode prema EN 14080 i EN 408 [17], a karakteristične vrijednosti se računaju prema EN

384 [18] i EN 14358 [19]. Prethodno spomenuta savojna čvrstoća za LLN od tvrdog drva $f_{m,g,flat,k}$ određuje se preko formule [6]:

$$f_{m,g,flat,k} = a_1 + a_2 f_{t,0,l,k}^{e_1} + a_3 (f_{t,0,j,k} - f_{t,0,l,k} + a_4)^{e_2} \quad (1)$$

gdje $f_{t,0,l,k}^{e_1}$ predstavlja karakterističnu vlačnu čvrstoću lamela, dok je $f_{t,0,j,k}^{e_1}$ karakteristična vlačna čvrstoća zupčastog spoja. Parametri a_1 , a_2 , a_3 , e_1 i e_2 iz (1) određuju se iz materijalnog modela temeljenog na metodi konačnih elemenata i Monte Carlo simulacijama stohastičkih karakteristika lamela i zupčastih spojeva.

Općenito, prema EN 14080 proizvodnja LLN-a određene klase može se postići:

- prema karakteristikama lamela iz tablice;
- formulom sa vlačnom čvrstoćom lamela i zupčastih spojeva:

$$f_{m,g,k} = -2.2 + 2.5 f_{t,0,k}^{0.75} + 1.5 \cdot \left(\frac{f_{m,j,k}}{1.4} - f_{t,0,k} + 6 \right)^{0.65} \quad (2)$$

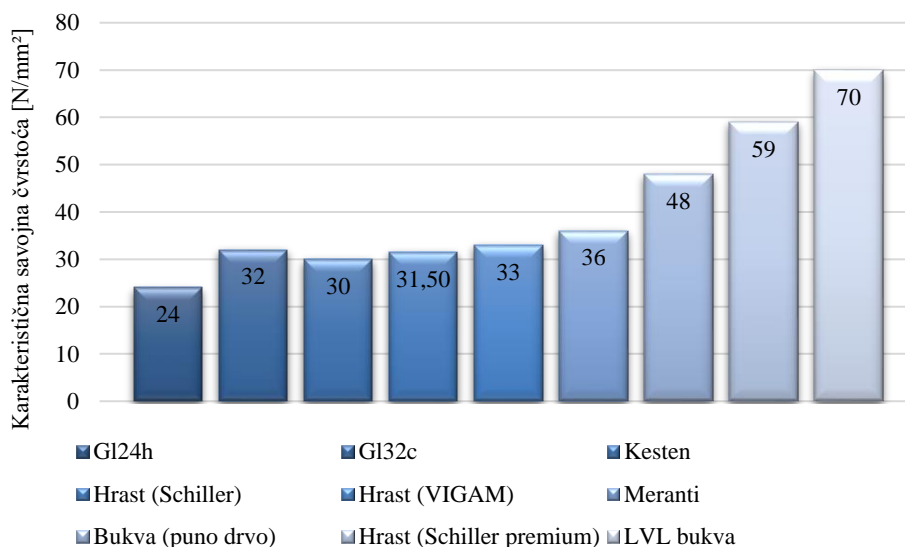
uz uvjet da je ispunjen uvjet:

$$1.4 \cdot f_{t,0,k} \leq f_{m,j,k} \leq 1.4 \cdot f_{t,0,k} + 12 \quad (3)$$

gdje $f_{m,g,k}$ predstavlja karakterističnu savojnu čvrstoću LLN-a, $f_{m,j,k}$ je karakteristična savojna čvrstoća zupčastog spoja, dok je $f_{t,0,k}$ karakteristična vlačna čvrstoća lamele;

- eksperimentalno određivanjem mehaničkih karakteristika LLN-a.

Kod tvrdih listača javljaju se velike vlačne čvrstoće lamela, zbog čega su zupčasti spojevi, uz nepravilnosti strukture, najslabije točke LLN-a.



Slika 5. Prikaz usporedbe karakterističnih savojnih čvrstoća različitih vrsta drva, prema [2]

Postupak svrstavanja drvene građe u razrede čvrstoće može se provoditi vizualnom klasifikacijom i strojnom klasifikacijom te destruktivnim metodama koje se zasnivaju na određivanju karakterističnih vrijednosti triju glavnih parametara: čvrstoće (vlačna ili savojna), krutosti i gustoće. Strojna klasifikacija obuhvaća mjerenje longitudinalne vibracije u svrhu dobivanja dinamičkog modula elastičnosti uz dodatnu primjenu lasera i skenera koji utvrđuju pogreške na uzorku. Gustoća, kvrge, lokalni i globalni nagib vlakancina te dinamički

modul elastičnosti mogu imati utjecaja na čvrstoću krutost. Vizualna i/ili strojna klasifikacija u kombinaciji s eksperimentalnim određivanjem mehaničkih karakteristika daje najpreciznije rezultate za svrstavanje lamela u razrede čvrstoće. Vizualna klasifikacija lamela za tvrda drva je jedino propisana normom DIN 4074-5:2009 [20] i sadrži kriterije za kvрге, odklon vlakancima, jezgru, nepravilnosti u srži drva, greške boje drva i vitoperenje. a prema kojima se lamele svrstavaju u razrede čvrstoće LS7, LS10 i LS13.

3. Pregled istraživanja

3.1. Eksperimentalno istraživanje lamela od tvrdih listača

Glavne karakteristike konstrukcijskog drva prikazane su u EN 338 [21]. Tablice u prethodno spomenutoj normi prikazuju dostupne razrede čvrstoće s pripadajućim karakteristikama i to razrede dobivene na osnovi testova na savijanje za četinjače i listače dok je 2016. god. u EN 338 uvedena i tablica s razredima čvrstoće dobivenim na osnovu ispitivanja na vlak za četinjače (Tablica 1.) [22, 23]. LLN je kompozit za koji je bitnije poznavanje razreda čvrstoće dobivenih iz testova na vlak s obzirom da se mehaničke karakteristike lijepljenih lameliranih nosača mogu preciznije predvidjeti poznavajući vlačne čvrstoće lamela od kojih se LLN izrađuje. Destruktivna ispitivanja odnosno laboratorijske metode za određivanje mehaničkih svojstava konstrukcijskog drva i lijepljenog lameliranog drva definirane su normom EN 408:2012.

Tablica 1.

Razredi čvrstoće za četinjače (na osnovu testova na savijanje)	C14, C16, C18, C20, C22, C24, C27, C30, C35, C40, C45, C50
Razredi čvrstoće za listače (na osnovu testova na savijanje)	D18, D24, D27, D30, D35, D40, D45, D50, D55, D60, D65, D70, D75, D80
Razredi čvrstoće za četinjače (na osnovu testova na vlak)	T8, T9, T10, T11, T12, T13, T14, T14.5, T15, T16, T18, T21, T22, T24, T26, T27, T28, T30

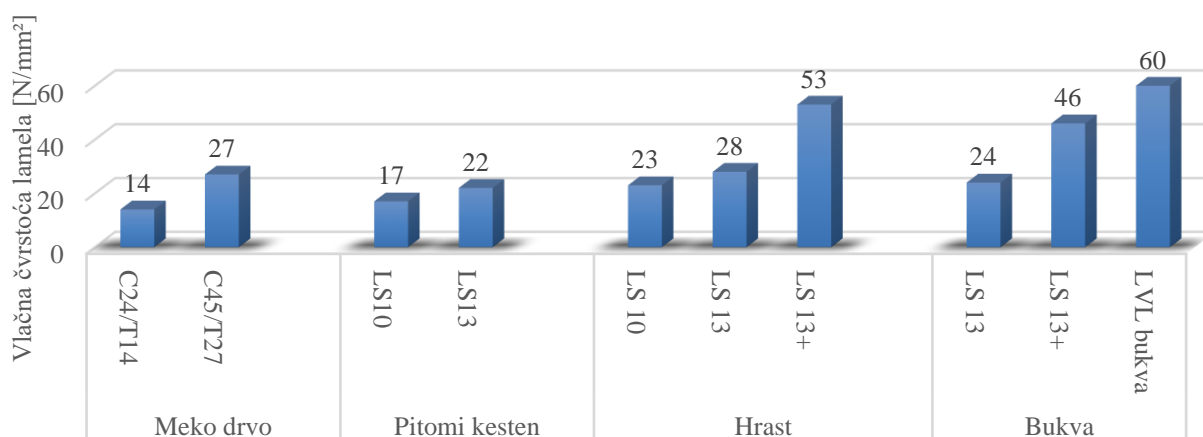
EN 338 daje mogućnost svrstavanja drvene građe listača sa sličnom čvrstoćom i gustoćom u postojeće vlačne razrede čvrstoće četinjača (oznaka T). Iako se određene vrste listača kao što su kesten i topola mogu svrstati u postojeće vlačne razrede čvrstoće, potrebno je uvesti novu tablicu u EN 338 s vlačnim razredima čvrstoće za ostale listače. Sukladno navedenom, u Europi su u posljednjem desetljeću provedena brojna istraživanja na uzorcima tvrdih listača, a dio je prikazan u tablici 2.

Tablica 2.

Tip ispitivanja	Vrsta drva	Referenca
Vlak paralelno s vlakancima	Jasen (F.excelsior)	Kovryga i dr. (2019) [24]
	Hrast	Tapia [25]
	Bukva (F.Sylvatica)	Blass i dr.(2005) [26], Ehrhart [27]
Savijanje	Jasen (F.excelsior)	Glos i Torno (2008) [28]
Tlak paralelno s	Jasen (F.excelsior)	Van de Kuilen, Torno (2014) [29]

vlakancima	Bukva (F.Sylvatica)	Blass i dr.(2005 [26], Ehrhart [27])
Vlak okomito na vlakanca	Jasen (F.excelisior)	Westermayr (2017) [30]
	Bukva (F.Sylvatica)	
Tlak okomito na vlakanca	Jasen (F.excelisior)	Westermayr (2017)
	Bukva (F.Sylvatica)	
Posmik	Jasen (F.excelisior)	Hunger, Van de Kuilen (2015) [31]
	Bukva (F.Sylvatica)	Aicher, Ohnesorg [32] Ehrhart [27]
	Hrast (Q.spp.)	Van de Kuilen (2017) [33]

Prethodno spomenutim istraživanjima dokazano je da tvrde listače pokazuju puno veće vlačne čvrstoće nego što su prikazane u trenutnoj tablici u EN 338 (Slika 6.). Ispitivanjem tlačne čvrstoće i modula elastičnosti paralelno sa vlakancima [27] na stupovima od lijepljenog lameliranog drva (bukve) dobivene su značajno veće vrijednosti u odnosu na meka drva. Također, pokazano je da krivulje izvijanja prema dosadašnjim europskim propisima nisu primjenjive na LLN-e od bukve zbog razlika u omjeru čvrstoće i krutosti. Uzorci listača pokazuju niže vrijednosti modula elastičnosti za istu savojnu čvrstoću za koju četinjače pokazuju više vrijednosti modula elastičnosti. Isto tako, gustoća uzoraka pokazuje veliku varijaciju vrijednosti za razne vrste listača zbog čega se navodi mogućnost izdvajanja gustoće kao bitnog parametra za klasifikaciju listača. Kovryga i dr. su u svom radu analizirali karakteristike bukve, jasena i javora i to vlačnu čvrstoću, modul elastičnosti u vlaklu i gustoću na oko 1300 uzoraka te je kao rezultat njihova istraživanja dan prijedlog budućih DT klasa točnije razreda vlačne čvrstoće za listače. Iz navedenog se može zaključiti kako su potrebni dodatni eksperimenti na uzorcima izrađenim od različitih vrsta listača kako bi se formirali novi europski propisi.



Slika 6. Prikaz usporedbe vlačnih čvrstoća lamela od različitih vrsta drva [2]

U svrhu preciznijeg numeričkog modeliranja, Tapia [25] je proveo višestruke vlačne testove kako bi se dobila lokalna i globalna distribucija vlačne čvrstoće i modula elastičnosti (MOE). Na svakoj lameli zabilježena je

podjela na nekoliko segmenata te je za svaki segment proveden ciklus opterećenje-rasterećenje u linearnom području. Pritom se za svaki segment mjerilo produljenje pomoću ekstenzometra na koji su dijagonalno spojena dva LVDT-a, a koji služe za izračun lokalnog MOE (Slika 7.). Za određivanje globalne vlačne čvrstoće proveden je test do loma, potom su provedeni vlačni testovi na preostala dva dijela lamele u svrhu dobivanja lokalnih vlačnih čvrstoća. Oko 70% testova je ponovljeno drugi put na ostatku lamele, dok su treći i četvrti test izvršeni na 43% i 2% uzoraka.



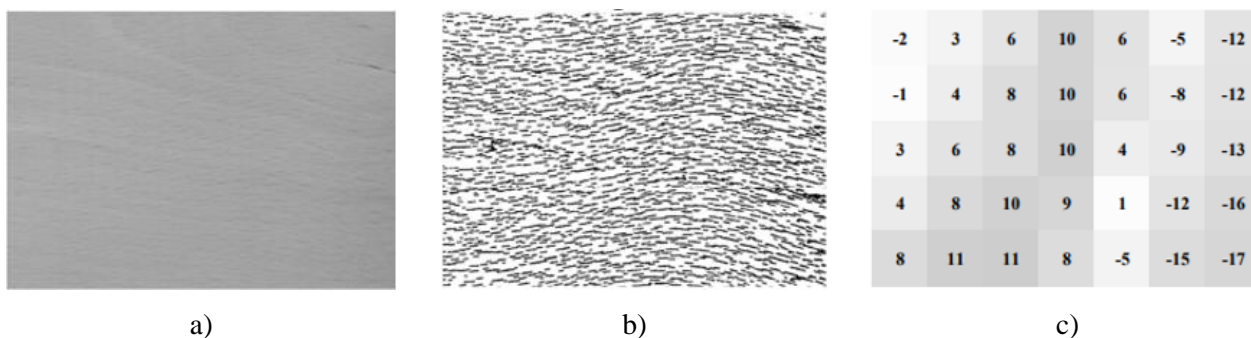
Slika 7. Ekstenzometar za mjerenje deformacija segmenata lamela [25]

Najčešći način otkazivanja prilikom provođenja vlačnih testova na lamelama je krto otkazivanje na mjestu čvora ili sjecištu vanjskog ruba lamele i vlakanaca pod kutom. Uočena je linearna veza između vlačne sile i produljenja (pomaka klipa). Linija loma je okomita na uzdužnu os lamele dok u nekim slučajevima prati nagib vlakanaca (Slika 8. a) i b)). Nije primijećen gubitak mehaničkih karakteristika preostalih dijelova lamele.



Slika 8. a) linija loma je okomita na uzdužnu os lamele; b) linija loma prati nagib vlakanaca

Prilikom provođenja eksperimentalnih istraživanja, potrebno je pratiti utjecaj devijacije vlakanaca i kvrgi s obzirom da imaju značajan utjecaj na mehanička svojstva [34-38]. Kvrge često nastaju na mjestu gdje je grana povezana sa stablom ili gdje su se razvijali bočni izdanci na drvu uzrokujući lokalnu devijaciju vlakanaca. Mnogo je istraživanja na temu negativnog utjecaja kvrgi na mehanička svojstva drva četinjača [39, 40] kao i drva listača [26]. Provedene su regresijske analize kako bi se kvantificirao utjecaj kvrgi na MOE i čvrstoću. Neke od metoda mjerenja kvrgi su direktno mjerenje dimenzija kvrgi manualno ili pomoću algoritama za obradu slika, analizom orijentacije vlakanaca na površini elementa pomoću laserskih skenera, korištenjem CT-a koji rekonstruira geometriju kvrgi na temelju razlike u gustoći drva i čvora (Slika 9).



Slika 9. Bezkontaktno generiranje polja vlaknaca uz pripadajuću orijentaciju [27]

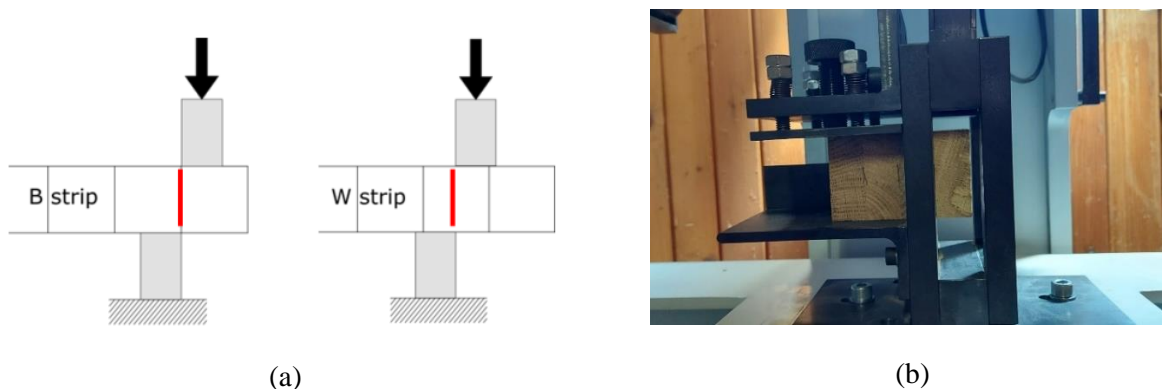
U okviru industrijske proizvodnje nastaju dodatni izvori varijacija u drvu kao što su načini rezanja, obrade, proces sušenja što dovodi do zaključka da su konačno proizvedene lamele produkt višestrukog procesa koji rezultira velikim brojem nesigurnosti u mehaničkim svojstvima. Statističkim obradama i različitim metodama klasifikacije moguće je minimizirati ove nesigurnosti.

3.2. Posmični testovi na lijepljenim površinama

Za bilo koji kompozitni element kvaliteta lijepljenog spoja ima značajnu ulogu u nosivosti. Dok su kod pločastih elemenata lokalna oslabljenja lijepljenih spojeva tolerantna u manjoj mjeri, u slučaju grednih elemenata kao što je lijepljeno lamelirano drvo, visoka kvaliteta lijepljenog spoja uvjetuje ispunjavanje uvjeta nosivosti i uporabljivosti. Postoji nekoliko primjera oštećenja lijepljenih lameliranih nosača kod kojih je loša kvaliteta lijepljenog spoja dovela do urušavanja konstrukcije sa smrtnim posljedicama kao što je krov klizališta u Bad Reichenhallu 2012. god. Dosad provedena istraživanja pokazala su da posmična čvrstoća lijepljenog spoja i postotak otkazivanja po drvu značajno ovise o gustoći odnosno vrsti drva i tehnologiji lijepljenja [6, 41, 42]. Također, skupljanje i bubrenje odnosno varijacije u vlažnosti drva stvaraju dodatna naprezanja u lijepljenom spoju što smanjuje kvalitetu lijepljenog spoja [43, 44].

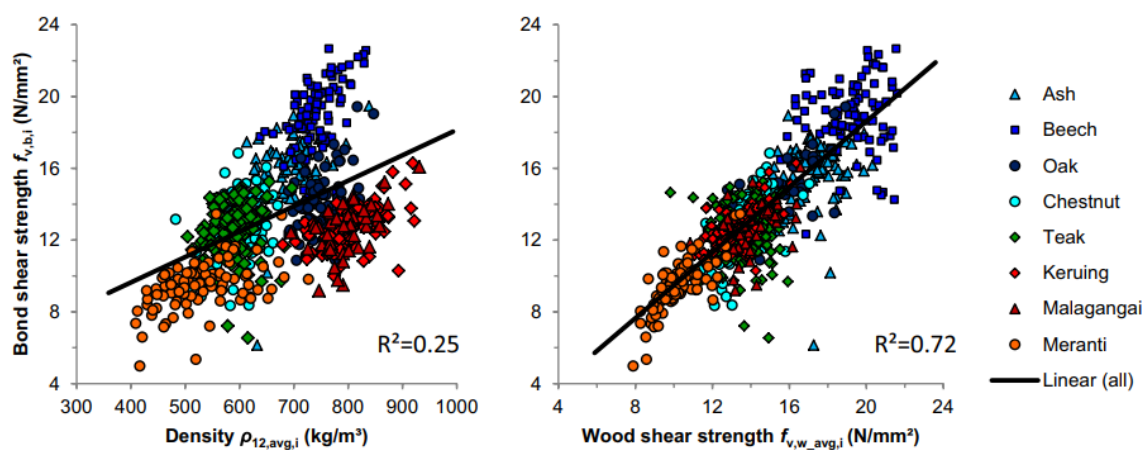
Sukladno dokumentu EAD [] posmični testovi na lijepljenim površinama u suhim uvjetima i testovi delaminacije predstavljaju metode koje osiguravaju dostatnu čvrstoću i integritet lijepljenih lameliranih nosača za klasu uporabivosti 1, dok je za klase uporabivosti 2 i 3 potrebno provesti i posmične testove u mokrim uvjetima. Uzorci, smješteni između čeljusti stroja, ispituju se na univerzalnom stroju s konstantnom brzinom nanošenja opterećenja (Slika 10. a) i b)).

EAD 130320-00-0304 definira uvjet za 5% kvantilu relativne posmične čvrstoće lijepljenog spoja, a koji glasi $rel f_{v,b,05} \geq 0.9$, dok je uvjet za 10% kvantilu postotka otkazivanja po drvu $WFP_{10} \geq 0.5$. Nadalje, u svrhu kontrole proizvodnje uvjeti se iskazuju preko srednjih vrijednosti i glase: $rel f_{v,b,mean} \geq 0.9$ i $WFP_{mean} \geq 0.8$.



Slika 10. (a) Skica uzoraka za ispitivanje posmične čvrstoće, (b) univerzalni stroj.

Provedena su brojna istraživanja koja su uključivala navedene testove i čiji su rezultati prikazani na slici 11 [5, 45-53].

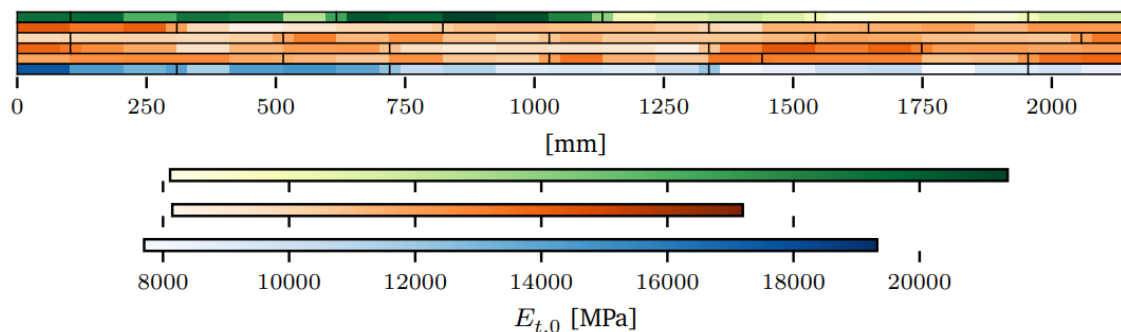


Slika 11. Ovisnost gustoće i posmične čvrstoće drva o posmičnoj čvrstoći lijepljenog spoja [5]

4. Numeričko modeliranje LLN-a

Drvo je anizotropan materijal koji zbog prirodnog rasta sadrži nepravilnosti u strukturi npr. kvrge, devijacije vlaknaca i dr. što se očituje značajnim varijabilnostima krutosti i čvrstoće unutar elementa u odnosu na druge materijale. Unatoč tomu što se u početnoj fazi klasifikacije određene strukturalne nepravilnosti uzrokovane rastom se otklanjaju, a detaljna informacija o drugim nepravilnostima kasnije se zanemaruje. Savojna čvrstoća LLN-a značajno ovisi o zasebnim defektima i njihovoj interakciji s drugim lamelama i unutar iste lamele. "The laminating effect" opisuje reduciranu varijancu čvrstoće grede u odnosu na čvrstoće lamela koje ju čine objašnjavajući navedeno kao ojačanje slabih područja u lameli sa susjednim lamelama. Efekt veličine utječe na smanjenje čvrstoće većih greda s obzirom na veću vjerojatnost pojave defekata u većem volumenu, a što se može objasniti s Weibull-ovom teorijom najslabije komponente. S obzirom na navedeno, razvijeni su različiti probabilistički modeli s konačnim elementima u koje su implementirane strukturalne nepravilnosti kako bi se što preciznije mogla predvidjeti savojna čvrstoća elementa (Slika 12). Provedena su brojna eksperimentalna istraživanja čiji su rezultati statistički obrađeni kako bi se odredila veza između distribucije mehaničkih karakteristika lamela i pripadajućih karakteristika proizvoda na bazi

drva.



Slika 12. Distribucija vlačne čvrstoće paralelno s vlakancima duž kombiniranog LLN-a

Veza između savojne čvrstoće LLN-a i mehaničkih karakteristika lamela i zupčastih spojeva datira još od 1980-ih. Prvi modeli lijepljenih lameliranih nosača uključivali su kompjuterske simulacije uzimajući u obzir stohastičku varijabilnost materijala [34]. Svaka lamela je podijeljena na nekoliko konačnih elemenata duljine kojima su pridruženi gustoća, kvrga, modul elastičnosti i čvrstoća. Prostorna raspodjela kvrgi i zupčasti spojevi nisu uzeti u obzir zbog manjka eksperimentalnih istraživanja. Kriterij otkazivanja temeljio se na Weibull-ovoj teoriji najslabije komponente odnosno sila pri kojoj prvi element otkáže predstavlja lomnu silu.

1985. godine razvijen je "Karlsruher Rechenmodel" temeljen na opsežnom istraživanju varijabilnosti mehaničkih karakteristika lamela i zupčastih spojeva smreke (*Picea abies* L.) [54]. Razmak između zupčastih spojeva generiran je slučajnim odabirom iz statističke distribucije [55], a elementima koji spajaju dvije lamele zadane su karakteristike zupčastih spojeva. Istraživanjem je utvrđeno nekoliko korelacija između čvrstoće, modula elastičnosti, gustoće i kvrgi omogućujući bolju simulaciju distribucija mehaničkih karakteristika uz korištenje regresijskog modela. Lamele u tlačnoj zoni definirane su karakteristikama plastičnog materijala, dok je kriterij otkazivanja omogućio preraspodjelu sila i otkazivanje više elemenata lokalno prije loma. Nekoliko godina kasnije razvijene su nove jednadžbe korelacije između mehaničkih karakteristika [56] te je implementirana poboljšana distribucija kvrgi i njihovog položaja. Kriterij otkazivanja proširen je u odnosu na prethodni model na način da je omogućavao otkazivanje na poziciji kvrgi i zupčastog spoja u najdonjoj lameli uz mogućnost raspodjele naprezanja. Nakon dugog procesa kalibriranja definirana je jednadžba (2) koja povezuje savojnu čvrstoću LLN-a sa čvrstoćom zupčastih spojeva i lamela, a koja je implementirana u europski standard EN 14080.

1992. godine Hernandez i dr. razvili su PROLAM model, a koji se za razliku od dotadašnjih modela zasniva na pristupu s efektivnom krutosti [57]. Pozicija zupčastih spojeva definira se slučajnim generiranjem duljine lamela, a njihove karakteristike određene su regresijskim jednadžbama. Prostorna korelacija i kros-korelacija mehaničkih karakteristika je uzeta u obzir. Ovakav proračun bio je efikasniji u usporedbi s metodom konačnih elemenata, ali jedan od nedostataka je zasebna analiza svakog segmenta bez utjecaja karakteristika susjednih segmenata. Rezultati dobiveni ovim postupkom podcjenjuju karakterističnu savojnu čvrstoću za oko 5% dok se istodobno dobivaju veći rezultati za MOE za oko 14.5%.

Sukladno klimatskim promjenama i politici pošumljavanja koje vode sve većem udjelu tvrdih drva u šumama Europe, 2005. god. Blass [58] je razvio prvu verziju "Karlsruher Rechenmodel" primjenjivu na bukvu i kombinirani LLN od mekog i tvrdog drva [59]. Provedeno je opsežno eksperimentalno istraživanje s ciljem dobivanja distribucija i korelacija između materijalnih karakteristika lamela i zupčastih spojeva. Promjene u odnosu na prethodne modele su napravljene u vidu uvođenja novih regresijskih jednažbi materijalnih karakteristika. Korišten je konzervativniji pristup kod definiranja kriterija otkazivanja odnosno lom grede nastaje u slučaju da bilo koji element u najdonjoj lameli otkáže što dovodi do nemogućnosti preraspodjele unutarnjih sila.

2014. god. Fink je razvio model koristeći Matlab, a koji se u mnogo aspekata razlikuje od prethodnih modela [60]. Varijabilnost duž grede ogledala se u prisutnosti kvrgi dok je materijal između kvrgi imao nepromjenjiva svojstva ("clear wood"). Zupčasti spojevi su definirani kao segmenti s vrijednostima za kvрге između 0.2 i 0.3. Materijal je definiran kao izotropan, dok duktilnost nije uzeta u obzir prilikom definiranja tlačne zone. Kriterij otkazivanja omogućavao je otkazivanje više elemenata prije dosezanja konačne čvrstoće uz uvjet smanjenja krutosti do 1%. Model je potvrđen dobrim poklapanjem rezultata s provedenim eksperimentalnim testovima na gredama uz detaljno poznavanje pozicije svakog čvora, zupčastog spoja i dinamičkog modula elastičnosti. Ovaj model je proširen istraživanjem [61] uključujući mehaniku loma koristeći energiju loma i koncept razmazanih pukotina.

2017. god. Kandler i Fussl predstavili su model koji generira MOE preko Karhunen-Loeve teorema i uz pomoć laserskih skenera definira nagib vlakana, ali ne uzima u obzir zupčaste spojeve prilikom modeliranja [62].

U ovim modelima precizno određivanje mehaničkih karakteristika lamela i zupčastih spojeva ima veliku važnost u simuliranju ponašanja LLN-a. Promjene u strukturi drva će uvijek biti prisutne i treba ih uzeti u obzir prilikom proizvodnje LLN-a. Istraživanje varijacije mehaničkih karakteristika duž lamela pretpostavlja specifične testove i preciznu statističku analizu empirijskih rezultata [34, 56, 60, 63, 64]. Opsežna baza podataka o ponašanju lijepljenih lameliranih nosača proizašla iz istraživanja [65-68] služila je kao temelj za razvoj modela Tapia-e [25]. Tapia je u svom istraživanju ("Stuttgart Stochastic Strength Glulam Model S3GluM") uveo mehaniku loma u vidu XFEM metode kako bi simulirao početak i propagaciju pucanja u gredi. Novije verzije modela koriste autokorelaciju materijalnih karakteristika unutar lamele. Materijal u tlačnoj zoni modelira se kao idealno-plastičan nakon dosegnutog von Mises kriterija popuštanja, a globalno otkazivanje događa se kada vanjska lamela u vlačnoj zoni otkáže. Metoda konačnih elemenata u kombinaciji s mehanikom loma je implementirana u Abaqus.

Vida (2022) [69] je istraživao grede različite klase i veličine koristeći efektivnu krutost. U odnosu na prethodne modele, prvi put je korišten 3D model u koji su implementirana dva tipa diskretnih pukotina i to vertikalna pukotina unutar lamele i horizontalna pukotina između lamela ('traction-separation law'), a koje omogućavaju kontinuiranu pukotinu. Numerički model je validiran eksperimentalnim ispitivanjem na gredama s unaprijed analiziranom morfologijom lamela odnosno definiranim pozicijama grupa kvrgi koje se modeliraju reduciranom krutosti i čvrstoćom na istim pozicijama. Generiranjem ovih profila automatski

se uzimaju u obzir 'the laminating effect' i efekt veličine. Ovaj model nije uključivao zupčaste spojeve.

5. Smjernice za istraživanje i temu doktorata

Globalno povećanje temperatura i nacionalne šumske politike mijenjaju distribuciju šuma u korist šuma listača. Drvo četinjača je dosad prevladavalo u proizvodnji nosivih konstrukcija, ali sukladno navedenim promjenama i s ciljem dugoročno održivog gospodarenja šumama, istraživanja proizvoda na bazi tvrdih listača su se intenzivirala posljednja dva desetljeća. Brojna eksperimentalna ispitivanja pokazala su bolja mehanička svojstva tvrdih listača naspram četinjača što bi moglo dovesti do povećanja upotrebe drva kao nosivog materijala naspram manje ekološki prihvatljivih materijala.

Uzevši u obzir navedeni pregled literature i trenutno stanje područja, planirano istraživanje uključivati će ispitivanje određenih vrsta tvrdih listača iz Hrvatskih šuma. Navedeno podrazumijeva ispitivanje materijalnih karakteristika lamela od određenih vrsta listača, lijepljenih lameliranih nosača od istih vrsta listača na savijanje, posmičnih testova lijepljenog spoja i lamela te dugotrajne testove, koji će nam dati dodatne spoznaje o stvarnom ponašanju LLN-a od nekih vrsta tvrdih listača. S obzirom da će promjene u strukturi drva uvijek biti prisutne i treba ih uzeti u obzir prilikom proizvodnje LLN-a, istraživanje će biti usmjereno na analizu varijacije mehaničkih karakteristika lamela od tvrdih listača, posebno lokalnog drva grab (*Carpinus betulus* L.). Navedeno pretpostavlja specifične testove, a cilj je dobiti distribuciju mehaničkih karakteristika unutar lamele i njihove korelacije. Navedeno je složeno odrediti zbog utjecaja brojnih parametara od mikrostrukturnih do većih defekata.

S obzirom da će se promatrati utjecaj različite površinske obrade lamela na mehanička svojstva lijepljenih lameliranih nosača, provesti će se potrebna statistička obrada rezultata sukladno europskim propisima. Kvaliteta lijepljenog spoja kod inženjerskih proizvoda uvjetovana je vrstom ljepila i tehnologijom lijepljenja te se ista ne može primijeniti na četinjače i listače zbog razlike u strukturi. Ovo istraživanje uključivati će suradnju s privrednim sektorom kako bi se razvila zadovoljavajuća tehnologija lijepljenja za primijenjene vrste tvrdih listača i to za sve tri klase uporabivosti. Također, planiran je razvoj novog poboljšanog modela lijepljenog lameliranog drva izloženog savijanju, a koji će uključivati definiranje mehaničkih karakteristika uz poznavanje pripadajućih distribucija i provođenje Monte Carlo simulacija.

Uzimajući u obzir prikaz rezultata dosadašnjeg istraživanja mehaničkih karakteristika tvrdih listača, očita je potreba za daljnim nastavkom eksperimentalnih ispitivanja kako bi se stvorila baza podataka s parametrima koji utječu na pojedinu vrstu listača. S obzirom da se inženjerski proizvodi od drva proizvode uglavnom od četinjača, predviđena ispitivanja dati će rezultate za određene vrste tvrdih listača iz Hrvatskih šuma za koje prema saznanjima autora dosad ne postoje objavljeni rezultati. Razumijevanje varijabilnosti karakteristika drva i njihovih uzroka i važnosti omogućava bolje gospodarenje šumama. Također, ovim istraživanjima nastoji se dokazati potencijal primjene lokalnih tvrdih listača za izradu LLN-a što za cilj ima stvaranje temelja i tehničkog okvira za upotrebu LLN-a od nekih vrsta tvrdih listača.

Zahvala

Provođenje dijela eksperimenata planira se na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu u okviru Laboratorija za konstrukcije, a sve u sklopu IRI projekta (Faza 2) KK.01.2.1.02.0330, "Povećanje razvoja novih proizvoda drvne industrije koji se koriste u građevini", a koji je sufinanciran od strane Europske unija iz Europskog fonda za regionalni razvoj, operativni program Konkurentnost i kohezija 2014. – 2020.

Literatura

- [1] Merz, K.; Niemann, A.; Torno, S.: Building with hardwood, Grafisches Centrum Cuno GmbH i Co.KG, Calbe, 2021
- [2] Linsenmann, P.: EU Hardwoods, European Hardwoods for the Building Sector, Reality of today – possibilities for tomorrow, Holzforschung Austria, 2016.
- [3] <https://www.archdaily.com/478633/tamedia-office-building-shigeru-ban-architects>
- [4] Hrvatske šume: "Šumskogospodarska Osnova," uredajni zapisnik, 2016. - 2025.
- [5] Aicher S.; Ahmad Z.; Hirsch M.: Bondline shear strength and wood failure of European and tropical hardwood glulams. European Journal of Wood and Wood Products, 76, 1205-1222, 2018.
- [6] European assessment document 130320-00-0304 „Glued laminated timber made of solid hardwood“, European organization for technical assessment, 2018.
- [7] Z-9.1-679, BS-Holz aus Buche und BS-Holz Buche-Hybridträger, Deutsches Institut für Bautechnik, 2014.
- [8] Z-9.1-821, Holz Schiller Eiche-Pfosten-Riegel-Brettschichtholz, Deutsches Institut für Bautechnik, 2018.
- [9] ETA-13/0642, VIGAM - Glued laminated timber of oak, European Organisation for Technical Assessment, 2018.
- [10] ETA 13/0646, SIEROLAM - Glued laminated timber of chestnut, European Organisation for Technical Assessment, 2018.
- [11] ETA-14/0354, Structural laminated veneer lumber made of beech, European Organisation for Technical Assessment, 2015.
- [12] EN 14080 Timber structures -- Glued laminated timber and glued solid timber – Requirements, European Committee for Standardization, Brussels, 2013.
- [13] HRN EN 14081-1: Drvene konstrukcije -- Konstrukcijsko drvo pravokutnoga poprečnog presjeka razvrstano prema čvrstoći – 1.dio: Opći zahtjevi, 2016.
- [14] EN 301:2023 - Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing timber structures - Classification and performance requirements, European Committee for Standardization, Brussels, 2023.
- [15] EN 15425:2023 Adhesives - One component polyurethane (PUR) for load-bearing timber structures -

- Classification and performance requirements, European Committee for Standardization, Brussels, 2023.
- [16] EN 1995-1-1 Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussels, 2015.
- [17] EN 408 Timber structures -- Structural timber and glued laminated timber -- Determination of some physical and mechanical properties, European Committee for Standardization, Brussels, 2012.
- [18] EN 384 Structural timber -- Determination of characteristic values of mechanical properties and density, European Committee for Standardization, Brussels, 2018.
- [19] EN 14358 Timber structures -- Calculation and verification of characteristic values, European Committee for Standardization, Brussels, 2016.
- [20] DIN 4074-5 Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 5: Laubschnittholz, 2008.
- [21] EN 338 Structural timber – Strength classes, CEN European Committee for Standardization, Brussels, 2016.
- [22] Denzler, J. K.: Harmonised tensile strength classes, Paper 45-5-1, In Proceedings of the 45th CIB-W18 Meeting, Växjö, Sweden, 2012.
- [23] Bacher, M.; Krzosek, S.: Bending and tension strength classes in European standards, Forestry and Wood Technology, 88, 14–22, 2014.
- [24] Kovryga A.; Stapel P.; Van de Kuilen J.W.: Mechanical properties and their interrelationships for medium-density European hardwoods, focusing on ash and beech, Wood Material Science and Engineering, 2019.
- [25] Tapia C. Variation of mechanical properties in oak boards and its effect on glued laminated timber, PhD thesis, Cuvillier Verlag Gottingen, Universitat Stuttgart, 2022.
- [26] Blass, H. J.; Denzler, J. K.; Frese M.; Glos, P.; Linsenmann, P.: Materialkennwerte von Eschenholz für den Einsatz in Brettschichtholz, Universitätsverlag Karlsruhe, 2005.
- [27] Ehrhart T.: European beech glued laminated timber. Doctoral thesis, 2019.
- [28] Glos, P.; Torno, S.: Allocation of ash and poplar of German origin to EN 1912, Holzforschung München, Technischen Universität München, TG1 / 0508 / 16 (Report 06517_B), 2008.
- [29] Van de Kuilen, J.W.G.; Torno, S.: Materialkennwerte von Eschenholz für den Einsatz in Brettschichtholz, Holzforschung München, Technische Universität München, Report Nr. 11508, 2014.
- [30] Westermayr, M.; Hunger, F.; Van de Kuilen, J.W.G.: Strength and stiffness perpendicular to the grain of ash (*Fraxinus e.*) and beech (*Fagus s.*) in comparison to spruce (*Picea a.*), In Proc. Of 6th International Scientific Conference on Hardwood Processing, Finland, September 25–28, 2017.
- [31] Hunger, F.; Van de Kuilen, J.W.G.: Festigkeitsprofile von heimischen Laubhölzern, Holzforschung München, Technische Universität München, Report Nr. 13508/ “X40”, 2015.
- [32] Aicher, S.; Ohnesorg, D.: Shear strength of glued laminated timber made from European beech timber. European Journal of Wood and Wood Products, 69:143–154, 2011.
- [33] Van de Kuilen, J.W.G; Gard, W.; Ravenshorst, G.; Antonelli, V.; Kovryga, A.: Paper 50-6-1. In Proc. of the 50th INTER & CIB Meeting, Japan, 2017.

- [34] Foschi, R. O.; J. D. Barrett: "Glued-laminated beam strength: A model.", *ASCE J. Struct. Div.* 106, pp. 1735–1754, 1980.
- [35] Ehlbeck, J.; Colling, F.: Biegefestigkeit von Brettschichtholz in Abhängigkeit von Rohdichte, Elsatizitätsmodul, Ästigkeit und Keilzinkung der Lamellen, der Lage der Keilzinkung sowie von der Trägerhöhe. Tech. Rep. Karlsruhe, Germany: Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Fridericiana Karlsruhe, 1987.
- [36] Lam, F.; J. D. Barrett; Nakajima, S.: "Influence of knot area ratio on the bending strength of Canadian Douglas fir timber used in Japanese post and beam housing." In: *Journal of Wood Science* 51.1, pp. 18–25. doi: 10.1007/s10086-003-0619-6, 2005.
- [37] Fink, G.; Deublein, M.; Kohler, J.: "Assessment of different knot-indicators to predict strength and stiffness properties of timber boards." In: *Proceedings of the 44th Meeting, International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 – Timber Structures*, Paper No. 44–1, 2011.
- [38] Lukacevic, M.; Kandler, G.; Hu, M.; Olsson, A., Füssl, J.: "A 3D model for knots and related fiber deviations in sawn timber for prediction of mechanical properties of boards." In: *Materials & Design* 166, p. 107617. issn: 0264-1275. doi: 10.1016/j.matdes.2019.107617, 2019.
- [39] Isaksson, T.: "Modelling the Variability of Bending Strength in Structural Timber – Length and Load Configuration Effects." PhD thesis. Lund Institute of Technology – Division of Structural Engineering, 1999.
- [40] Fink, G.: "Influence of varying material properties on the load-bearing capacity of glued laminated timber." PhD thesis. Zürich, Switzerland: ETH Zürich. doi: 10.3929/ethz-a-010108864, 2014.
- [41] Jiang, Y.; Schaffrath, J.; Knorz, M.; Winter, S.; Van de Kuilen, J.W.: Applicability of various wood species in glued laminated timber - Parameter study on delamination resistance and shear strength. In: *Proc World Conf Timber Eng*, Quebec, Canada, 2014.
- [42] Knorz, M.; Schmidt, M.; Torno, S.; Van de Kuilen, J.W.: Structural bonding of ash (*Fraxinus excelsior* L.): resistance to delamination and performance in shearing tests. *Eur J Wood Prod* 72:297–309, 2014.
- [43] Frihart, C.R.; Yelle, D.J.; Ibach, R.E. Wood properties influence bond durability. *Proc 5th Int Scientific Conf Hardwood Processing*. Quebec City, Canada, pp 78–84, 2015.
- [44] Ammann, S.; Schlegel, S.; Beyer, M.; Aehlig, K.; Lehmann, M.; Jung, H.; Niemz, P.: Quality assessment of glued ash wood for construction engineering. *Eur J Wood Prod* 74(1):67–74, 2016.
- [45] Alamsyah, E.M.; Nan, L.C.; Yamada, M.; Taki, K.; Yoshida, H.: Bondability of tropical fast-growing tree species I: Indonesian wood species. *J Wood Sci* 53:40–46, 2007.
- [46] Alamsyah, E.M.; Yamada, M.; Taki, K.: Bondability of tropical fast-growing tree species III: curing behavior of resorcinol formaldehyde resin adhesive at room temperature and effects of extractives of *Acacia mangium* wood on bonding. *J Wood Sci* 54:208–213, 2008.
- [47] Herawati, E.; Massijava, M.Y.; Nugroho, N.: Performance of glued-laminated beams mad from small diameter fast-growing tree species. *J Biological Sci* 10:37–42, 2010.
- [48] Frihart, C.R.; Yelle, D.J.; Ibach, R.E.: Wood properties influence bond durability. *Proc 5th Int Scientific*

Conf Hardwood Processing. Quebec City, Canada, pp 78–84, 2015.

[49] López-Suevos, F.; Richter, K.: Hydroxymethylated resorcinol (HMR) and novolak-based HMR (n-HMR) primers to enhance bond durability of Eucalyptus globulus glulams. *J Adhes Sci Technol* 23:1925–1937, 2009.

[50] Castro, G.; Paganini, F.: Mixed glued laminated timber of poplar and Eucalyptus grandis clones. *Eur J Wood Prod* 61:291–298, 2003.

[51] Zisi, N.; Aicher, S.: Shear and delamination tests of glue lines in glulam beams made of keruing, Series 2. Test Rep 9029945000/2, MPA University of Stuttgart, Germany, 2015.

[52] Tan, Y.E.; Midon, M.S., Ujang, M.Z.: Bonding quality as a means for assessing Malaysian timbers for structural glue-lamination. *J Tropical For Sci* 4(4):331–339, 1992.

[53] Nadir, Y.; Nagarajan, P.: The behavior of horizontally glued laminated beams using rubber wood. *Constr Build Mater* 55:398–405, 2014.

[54] Ehlbeck, J., F.; Colling, R. Görlacher.: “Einfluß keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern.”, *Holz als Roh- und Werkstoff* 43.8, pp. 333–337, doi: 10.1007/ "02607817, 1985.

[55] Larsen, H. J. Strength of glued laminated beams. Part 5. Report No. 8004. Aalborg, Denmark: Institute of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, 1980.

[56] Ehlbeck, J.; Colling, F.: Biegefestigkeit von Brettschichtholz in Abhängigkeit von Rohdichte, Elsatizitätsmodul, Ästigkeit und Keilzinkung der Lamellen, der Lage der Keilzinkung sowie von der Trägerhöhe. Tech. Rep. Karlsruhe, Germany: Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Fridericiana Karlsruhe, 1987.

[57] Hernandez, R.; Bender, D.A.; Richburg, B.A.; Kline, K. S.: “Probabilistic Modeling of Glued-Laminated Timber Beams.” In: *Wood and Fiber Sciences* 24 (3), pp. 294–306, 1992.

[58] Blaß, H. J.; Frese, M.; Glos, P.; Linsenmann, P.; Denzler, J.: Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche. German. Tech. rep. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). 141 pp. doi: 10.5445/8ZS/1000001371, 2005.

[59] Blaß, H. J.; Frese, M.: Biegefestigkeit von Brettschichtholz-Hybridträgern mit Randlamellen aus Buchenholz und Kernlamellen aus Nadelholz. German. Tech. rep. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). 55 pp. doi: 10.5445/ 8ZS/1000005148, 2006.

[60] Fink, G.: “Influence of varying material properties on the load-bearing capacity of glued laminated timber.” PhD thesis. Zürich, Switzerland: ETH Zürich. doi: 10.3929/ethz-a-010108864, 2014.

[61] Blank, L.; Fink, G.; Jockwer, R.; Frangi, A.: “Quasi-brittle fracture and size effect of glued laminated timber beams.” In: *European Journal of Wood and Wood Products*, pp. 667–681. issn: 1436-736X. doi: 10.1007/s00107- 017-1156-0, 2017.

[62] Kandler, G.; Fussl, J.; Eberhardsteiner, J.: Stochastic finite element approaches for wood-based products: theoretical framework and review of methods, *Wood Science and Technology*, 49, p.p. 1055–1097, 2015.

[63] Frese, M.: “Brettschichtholz aus Buche – Ein leistungsfähiger Baustoff.” German. In: *Ingenieurholzbau*,

Karlsruher Tage 2006. Forschung für die Praxis; 5. und 6. Oktober 2006; Tagungsband. Universität Karlsruhe, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen. Bruderverlag, Karlsruhe, pp. 28–39, 2006.

[64] Olsson, A.; Oscarsson, J.; Serrano, E.; Källsner, B.; Johansson, M.; Enquist, B.: “Prediction of timber bending strength and in-member cross-sectional stiffness variation on the basis of local wood fibre orientation.” In: *European Journal of Wood and Wood Products* 71.3, pp. 319–333. issn: 1436-736X. doi: 10.1007/s00107-013-0684-5, 2013.

[65] Showalter, K.; F. Woeste; Bendtsen, B.: *Effect of Length on Tensile Strength in Structural Lumber*. Research Report FPL-RP-482. Madison, USA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1987.

[66] Taylor, S.; Bender, D.: “Stochastic model for localized tensile strength and modulus of elasticity in lumber.” In: *Wood and Fiber Science* 23(4), pp. 501– 519, 1991.

[67] Lam, F.; Varoglu, E.: “Variation of tensile strength along the length of lumber – Part 1: Experimental.” In: *Wood Science and Technology* 25.5, pp. 351– 359. doi: 10.1007/ "00226174, 1991.

[68] Isaksson, T.: “Modelling the Variability of Bending Strength in Structural Timber – Length and Load Configuration Effects.” PhD thesis. Lund Institute of Technology – Division of Structural Engineering, 1999.

[69] Vida, C.; Lukacevic, M.; Eberhardsteiner, J.; Fussl, J.: *Modelling approach to estimate the bending strength and failure mechanisms of glued laminated timber beams*. *Engineering Structures*, 255, 2022.