Primljen / Received: 20.6.2019.
Ispravljen / Corrected: 30.12.2019.
Prihvaćen / Accepted: 16.5.2020.
Dostupno online / Available online: 10.8.2020.

Primjena tvrdih listača za izradu lameliranih nosača u Europi

Autori:

Doc.dr.sc. **Ivana Uzelac Glavinić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Splitu
Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
ivana.uzelac@gradst.hr
Autor za korespodenciju

Prof.dr.sc. **Ivica Boko**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Splitu
Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
ivica.boko@gradst.hr

Izv.prof.dr.sc. **Neno Torić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Splitu
Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
neno.toric@gradst.hr

Jelena Lovrić Vranković, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Splitu
Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
jelena.lovric@gradst.hr

Pregledni rad

Ivana Uzelac Glavinić, Ivica Boko, Neno Torić, Jelena Lovrić Vranković

Primjena tvrdih listača za izradu lameliranih nosača u Europi

Lijepljeni lamelirani nosači (LLN) od tvrdih listača predstavljaju suvremeni građevni proizvod razvijen u skladu s promjenama u šumarskoj industriji. U posljednjem desetljeću u Europi su se intenzivno provodila istraživanja na tvrdim listačama poput bukovine, hrastovine, pitome kestenovine i jasenovine. Rezultat su LLN povoljnih mehaničkih svojstava i privremena odobrenja za njihovu primjenu. Ovaj rad daje pregled dosad odobrenih vrsta LLN-a od tvrdih listača, vrste listača i ljepila korištena za njihovu proizvodnju, te stanje razvoja pripadajućih numeričkih modela LLN-a.

Ključne riječi:
LLN, tvrde listače, konstrukcijska ljepila, modeliranje drvenih konstrukcija

Subject review

Ivana Uzelac Glavinić, Ivica Boko, Neno Torić, Jelena Lovrić Vranković

Application of hardwood for glued laminated timber in Europe

Glued laminated timber (GLT) made of hardwood is a modern construction product developed in line with the current changes in the forestry industry. In the last decade studies on hardwoods (deciduous) such as beech, oak, chestnut and ash have been intensively conducted in Europe. The results of those studies are GLT with favourable mechanical characteristics and provisional approvals for their use in construction. This paper presents an overview of currently approved GLT made of hardwood, relevant wood species and adhesive types in their production, as well as currently applicable numerical models.

Key words:
GLT, hardwoods, adhesives for structural applications, design of timber structures

Übersichtsarbeit

Ivana Uzelac Glavinić, Ivica Boko, Neno Torić, Jelena Lovrić Vranković

Verwendung von Hartlaubholz bei der Herstellung von Verbundträgern in Europa

Geklebte Verbundträger (LLN) aus Hartlaubholz stellen ein modernes Bauprodukt dar, das gemäß den Veränderungen in der Forstwirtschaft entwickelt wurde. In den letzten Jahrzehnten wurden in Europa intensive Untersuchungen an Hartlaubholz wie Buchenholz, Eichenholz, Edelkastanie und Eschenholz durchgeführt. Die Ergebnisse sind geklebte Verbundträger mit günstigen mechanischen Eigenschaften und vorläufigen Genehmigungen für deren Anwendung. Diese Abhandlung gibt einen Überblick über die bisher genehmigten Arten von geklebten Verbundträger aus Hartlaubholz, die Laubholzarten und die Kleber, die bei deren Herstellung verwendet werden, wie auch den Stand der Entwicklung der dazugehörigen nummerischen Modelle der geklebten Verbundträger.

Schlüsselwörter:
geklebte Verbundträger, Hartlaubholz, Kleberkonstruktion, Modellierung von Holzkonstruktionen

1. Uvod

Lijepljeni lamelirani nosači (LLN) predstavljaju proizvode kojima se kombiniraju prednosti drva kao prirodnog materijala i kontrolirane industrijske proizvodnje građevnog proizvoda. Za razliku od cjelovitog drva, koje karakteriziraju različitosti u mehaničkim svojstvima zbog prirodnog rasta, proces razvrstavanja lamela prema klasama čvrstoće omogućuje ujednačenost u svojstvima konačnog proizvoda - nosača. Na taj način uvedena je kontrola kvalitete građevnog proizvoda, što je i osnovni preduvjet za njegovo daljnje plasiranje na tržište. S tehničkog stajališta to podrazumijeva mehanički povoljniji proizvod, fleksibilnijeg izbora oblika i veličine poprečnog presjeka, odnosno elementa u cjelini. Nadalje, uporabom LLN-a pri projektiranju omogućeno je premošćivanje većih raspona s ravnim, zakrivljenim i prostornim konstrukcijama male vlastite mase.

Proces izrade LLN-a odvija se uzimajući u obzir tehničke zahtjeve kojima proizvod treba udovoljiti kao i praćenje trendova u šumarskoj industriji. Tijekom proteklog desetljeća LLN-i su se gotovo isključivo izrađivali od drva četinjača. Glavni su razlozi tome velika dostupnost četinjača u kontinentalnoj Europi, jer je to drvo velikih dimenzija i lake obradivosti. Mala gustoća i tvrdoća uz ujednačenost strukture i raspodjele mehaničkih svojstava rezultira povoljnim odnosom mase i čvrstoće. Brža stopa rasta četinjača kao i jednostavnija tehnologija proizvodnje (ponajprije lijepljenja i površinske obrade) omogućuju nižu cijenu sirovine i ekonomičniji proizvodni proces. Međutim, kontinuirano pošumljavanje stabala četinjača kao i klimatske promjene dovode do porasta udjela stabala tvrdih listača u europskim šumama [1-3]. Novijim pristupom gospodarenja sve više se smrekove i borove šume pretvaraju u mješovite šume s visokim udjelom tvrdih listača, prije svega bukve. S obzirom na to, istraživanja o primjeni tvrdih listača za izradu LLN-a u posljednjem desetljeću dobivaju snažan uspon [4]. Drva tvrdih listača, osim dostupnosti sirovine, pokazuju povećana mehanička svojstva u odnosu na drva četinjača, povoljnija svojstva sa stajališta trajnosti, otpornosti na požar i estetike (slike 1. i 2.).

Slika 1. LLN od jasenovine - Tribine hotela Kulm u St. Moritzu [5]

Slika 2. Hibridni LLN od smrekovine i jasenovine - garaža Innerarosa [5]

Europske norme za projektiranje drvenih konstrukcija [6, 7] obrađuju zahtjeve za projektiranje i svojstva pripadajućih LLN-a izvedenih od drva četinjača. Međutim, odluči li se na projektiranje LLN-a od tvrdih listača, naići će se na nedostatak pripadajućih normi. U okvirima Europske organizacije za tehničko ocjenjivanje (EOTA), koja predstavlja alternativu za građevne proizvode koji nisu obuhvaćeni usklađenim europskim normama, privremeno su odobreni pojedini LLN-i od tvrdih listača kao i ljepila za njihovu proizvodnju. Pojedine države u EU također su na nacionalnoj razini dopustile primjenu određenih tipova LLN-a od tvrdih listača. Međutim, za razvoj cjelovitih europskih normi potrebna su dodatna istraživanja kako bi se potpuno iskoristile prednosti tvrdih listača i osigurao kvalitetan građevni proizvod.

Cilj je ovog rada skrenuti pozornost projektantima-inženjerima u praksi na to kako je do sada slabo iskorišten potencijal tvrdih listača za izradu LLN-a te istaknuti njegove prednosti i potencijal primjene u izgradnji građevnih objekata. Unatoč nedvojbenim mehaničkim prednostima, nedostatak praktičnog znanja u proizvodnji takve vrste LLN-a i dugogodišnje iskustvo uporabe četinjača kao uobičajenog drva glavni su razlozi zašto potencijal LLN-a od tvrdih listača nije iskorišten. U ovom će se radu prikazati zasad relevantne vrste tvrdih listača za izradu LLN-a, kao i aktualna znanstvena istraživanja koja služe razvoju pripadajuće tehnologije izrade. Budući da tehnologija proizvodnje LLN-a od tvrdih listača još uvijek nije potpuno i jednoznačno definirana, njezine bitne odrednice bit će također ovdje prikazane. Razmatrat će se i mogućnosti modeliranja ponašanja LLN-a od drva tvrdih listača, te sadašnje tehničke dopusnice za primjenu LLN-a od tvrdih listača u graditeljskoj praksi.

2. Izbor tvrdih listača za proizvodnju lijepljenih lameliranih nosača (LLN-a)

Donedavno je izrada LLN-a u Europi bila gotovo isključivo ograničena na drvo četinjača. S više od 90 % udjela smrekovina i jelovina predstavlja najznačajnije vrste drva u proizvodnji

Tablica 1. Srednje vrijednosti mehaničkih svojstava različitih vrsta listača i usporedba sa smrekom [18]

Vrsta drva	Gustoća pri 12 % sadržaja vode [kg/m³]	Modul elastičnosti paralelno s vlakancima [N/mm²]	Čvrstoća na savijanje [N/mm²]	Vlačna čvrstoća [N/mm²]	Tlačna čvrstoća [N/mm²]	Tvrdoća prema Brinellu [N/mm²]	
						Uzdužno	Poprečno
Smreka	460	11 000	80	95	45	32	12
Bukva	710	14 000	120	135	60	70	28-40
Hrast	710	13 000	95	110	52	50-65	23-42
Pitomi kesten	590	9 000	80	135	49	32-39	15-23
Jasen	700	13 000	105	130	50	64	28-40

Tablica 2. Pridruživanje razreda čvrstoće četinjačama i različitim vrstama listača vizualnim razvrstavanjem i prema vrsti u skladu s HRN EN 1912 [9]

	Četinjače	Bukva	Hrast	Jasen
Razvrstavanje prema DIN-u 4074-1, DIN-u 4074-5 [19, 20]	S10	LS10 i više	LS10 i više	LS10 i više
Razredi čvrstoće prema HRN EN 338 [21]	C24	D35	D30	D40

LLN-a, a ostatak uglavnom pripada boru, arišu i duglaziji [8]. Primjena takvih nosača na velikim rasponima i opterećenjima, uz arhitektonske trendove vitkih geometrija s tehničkog stajališta zahtijeva veću čvrstoću drva od one koju imaju smrekovina i borovina. Kao moguće rješenje nameće se upotreba lamela od tvrdih listača, ponajprije od drva bukve, hrasta, pitomog kestena i jasena. Razlozi za odabir tih vrsta tvrdih listača nalaze se u njihovoj širokoj rasprostranjenosti u središnjoj Europi (naročito bukovine), visokoj postojanosti (hrastovina i pitoma kestenovina) kao i visokim vrijednostima mehaničkih svojstava (tablica 1.). Unatoč navedenim prednostima, manjak tehnoloških rješenja u izradi LLN-a od tvrdih listača znatno je odgodio njihovu širu primjenu. Tu se ponajprije misli na tehnologiju lijepljenja, jer nisu bili poznati parametri s kojima bi se mogla postići zahtijevana otpornost na raslojavanje i adhezivna čvrstoća lamela. Njezinim razvojem u zadnjem desetljeću dolazi do učestalije konstrukcijske primjene LLN-a od drva tvrdih listača i proizvođači se sve više uključuju u njihovu proizvodnju. Neki nedostatci koji prate LLN-e od tvrdih listača jesu velika vlastita masa, visoka cijena, teška obradivost i ograničena dostupnost sortimenata velikih dimenzija. Međutim, superiornija mehanička svojstva drva tvrdih listača vidljiva su i pridruživanjem osjetno većih razreda čvrstoće tvrdim listačama u odnosu na četinjače, unatoč primjeni ekvivalentnih kriterija vizualnog razvrstavanja (tablica 2.) [9, 10]. Upravo zato, unatrag petnaestak godina dolazi do značajnog razvoja LLN-a od navedenih vrsta listača. Tvrde listače sada se primjenjuju za izradu LLN-a djelomično kao zamjena za četinjače, a djelomično u kombinaciji sa četinjačama [11]. Detaljnije o vizualnoj klasifikaciji listača može se pronaći u [12-17].

Bukovina i hrastovina najzastupljenije su vrste listača u Europi. **Bukovina** (lat. *Fagus sylvatica*) je vrlo tvrdo i teško drvo s dobrom obradivošću i visokim vrijednostima čvrstoće (tablica 1.). Sporo se suši zbog sklonosti raspucavanju pri sušenju, ali nakon sušenja dobro reagira na lijepljenje i primjenom odgovarajuće tehnologije lijepljenja postižu se zadovoljavajući rezultati [22]. Ono što bukovinu razlikuje od ostalih vrsta drva je izuzetno visoka vrijednost utezanja i bubrenja (tablica 3.). Već pri niskim promjenama vlažnosti dolazi do pojave značajnijih naprezanja, zbog čega u primjeni za izradu LLN-a dimenzije lamela moraju biti što je moguće tanje. Kod ostalih vrsta drva obično se dopuštaju dimenzije lamela do 40 mm debljine i 240 mm širine, dok se kod bukve trajnost čvrstoće lijepljenog spoja postiže debljinom lamela do 30 mm i širinom do 160 mm [23]. O tome posebno treba voditi računa ako se bukovina kombinira s drugim vrstama drva. Također, u kontaktu s vlagom bukovina ima nisku postojanost. Stoga se bez posebne obrade ne može primjenjivati na nosačima koji su izloženi vanjskom okolišu (tablica 4.). Unatoč tome, zbog dostupnosti, velike čvrstoće [24] i mogućnosti kvalitetnog spajanja ljepilima, bukovina je do sada najviše istraživana listača za proizvodnju LLN-a [25, 26]. S tehničkog stajališta, proizvodnja LLN-a od bukovine pokazuje velike mogućnosti te lako može postići razrede čvrstoće GL40 i GL48. Pojedine tvrtke već posjeduju i cjelokupnu tehnologiju za izradu LLN-a od bukovine [23]. Također, nedavno objavljena studija o vrednovanju listača u građevinarstvu zaključila je da je bukovina zasada najpovoljnije drvo za uporabu [27].

Tablica 3. Koeficijent utezanja različitih vrsta listača i usporedba sa smrekovinom [28, 29]

Vrsta drva	Promjena dimenzija pri jednopostotnoj promjeni udjela vode [%]		
	Radijalno	Tangento	Prosječno
Smreka	0,16	0,32	0,24
Bukva	0,20	0,40	0,30
Hrast	0,16	0,32	0,24
Pitomi kesten	0,16	0,32	0,24
Jasen	0,18	0,32	0,26

Tablica 4. Razredi postojanosti različitih vrsta listača i usporedba sa smrekovinom [30]

Vrsta drva	Gljive truležice	Insekti (točkasti drvotočac)	Termiti	Propusnost srževine*
Smreka	mala otpornost (4)	neotporno drvo (S)	neotporno drvo (S)	teško – ekstremno teško propusno (3-4)
Bukva	neotporno drvo (5)	neotporno drvo (S)	neotporno drvo (S)	lako propusno (1v**)
Hrast	otporno drvo do drvo male otpornosti (2-4)	otporno drvo (D)	srednje otporno drvo (M)	ekstremno teško propusno (4)
Pitomi kesten	otporno drvo (2)	otporno drvo (D)	srednje otporno drvo (M)	ekstremno teško propusno (4)
Jasen	neotporno drvo (5)	neotporno drvo (S)	neotporno drvo (S)	srednje propusno (4)
*lakoća prodiranja tekućine u srževinu u procesu njegove impregnacije; **zabilježena je značajna varijabilnost				

Hrastovina (lat. *Quercus petraea, Quercus robur*) je vrlo tvrdo i teško drvo s dobrom obradivošću i srednjim do visokim vrijednostima čvrstoće (tablica 1.). S obzirom na dostupnost i visoku postojanost (tablica 4.), ubraja se u tradicionalni građevni materijal koji, pravilno obrađen i zaštićen, može trajati i do 500 godina [31]. Sporo se i teško suši s izrazitom sklonosti raspucavanju, osobito u ranim fazama sušenja. U okvirima njezine primjene za izradu LLN-a posebno se mora paziti na lijepljenje, gdje se s većinom ljepila primjenjivanima za četinjače ne postiže zadovoljavajući stupanj cjelovitosti presjeka [32]. Neki od faktora koji pridonose tomu jesu velika gustoća, kiselost površine te znatno veći udio tanina i modul posmika u odnosu na četinjače. Hrastovina u odnosu na smrekovinu ima znatno veće parametre čvrstoće (iako ne onoliko kao bukovina), ali je prati i veća vlastita masa i znatno složenija tehnologija proizvodnje, pa od njezinih glavnih prednosti ostaju izvrsna postojanost i estetika. Zbog visoke postojanosti u kontaktu s vodom, LLN-u od hrastovine daje se prednost pri izradi pješačkih mostova [33, 34].

Pitoma kestenovina (lat. *Castanea sativa*) drvo je dobre obradivosti i srednje vrijednosti čvrstoće (tablica 1.). S obzirom na dostupnost i iznimno dobru postojanost (tablica 4.), ubraja se u tradicionalni građevni materijal, ponajviše korišten na području Mediterana. Iako u usporedbi s bukovinom ima podjednako visoku vlačnu čvrstoću, izuzetno niska krutost toga drva prilično smanjuje njegovu savojnu čvrstoću (tablica 1.). Dobro reagira na lijepljenje. Bez obzita na to što postoje komercijalni LLN proizvodi od pitome kestenovine, još uvijek nije obavljeno dovoljno znanstvenih istraživanja s ciljem njegove šire primjene u inženjerskoj praksi [35-39].

Jasenovina (lat. *Fraxinus excelsior*) tvrdo je i teško drvo s dobrom obradivošću i visokim vrijednostima čvrstoće (tablica 1.). Iz tablice 1 može se uočiti da jasenovina svojom čvrstoćom predstavlja glavnu konkurenciju bukovini, a za razliku od bukovine, njezin koeficijent utezanja odgovara onome od smrekovine (tablica 3.). Zo dokazuje da zbog klimatskih promjena jasenovina ima manja naprezanja i lakše se kombinira sa smrekovinom [40, 41]. Unatoč dobrim mehaničkim karakteristikama, najveća prepreka LLN-a od jasenovine je nedostatak pripadajuće tehnologije lijepljenja, koja je kod bukovine već razvijena [7]. Postojeća istraživanja nisu još dovoljna, pa se jasenovina primjenjuje uglavnom u Švicarskoj koja ima liberalnije građevinske propise od primjerice Njemačke. Treba napomenuti i to da zbog širenja fitopatogene gljive *Chalara fraxinea* dolazi do značajnog odumiranja jasena u većini europskih zemalja [42-44], pa je sasvim jasno da će u bliskoj budućnosti na tržište doći velika količina ove sirovine iz sanitarne sječe.

Među ostalim značajnijim botaničkim vrstama listača koje se primjenjuju u izradi LLN-a u Europi navode se breza [45], topola, eucalyptus grandis i bagrem [46]. Unatoč njihovoj zastupljenosti u europskim šumama, još uvijek ne postoje cjelovite studije u kojima je njihova primjena dovoljno istražena. Prema tome, nedvojbeno je kako drvo tvrdih listača posjeduje povoljnije mehaničke karakteristike u usporedbi s drvom četinjača (slika 3.).

Slika 3. LLN od bukovine i smrekovine ekvivalentne savojne krutosti [47]

Nedostatak je listača u tome što im je kompliciranijim a time i skuplji proces sušenja i obradivost te zahtjevnija tehnologija lijepljenja u odnosu na četinjače. Da bi se mehaničke prednosti tvrdih listača uz istovremeno postizanje uštede u izradi LLN-a dobro iskoristile, uobičajeno je kombinirati lamele listača s

lamelama četinjača (slika 4.). Drvo četinjača postavlja se u središnju zonu nosača, koja ima manja naprezanja, a drvo listača postavlja se u vanjsku zonu na visini od jedne šestine visine nosača gdje se odvija prijenos najvećih naprezanja [40, 47]. Treba napomenuti i to da drvo kao prirodni materijal određuju i mehanička svojstva tvori iz područja njihova porijekla. Zbog toga postoje i brojni radovi koji iskazuju bitne razlike u karakteristikama pojedinih vrsta listača u kontekstu geografskog područja [14, 48-50].

Slika 4. Hibridni LLN od bukovine i smrekovine [47]

3. Lijepljenje LLN-a od tvrdih listača

Odavno je poznato da vrste ljepila i tehnologije lijepljenja koje se uspješno primjenjuju kod LLN-a od četinjača ne daju zadovoljavajuće rezultate kod lijepljenja drva listača [51-53]. Listače obično imaju veću gustoću u odnosu na četinjače, pa samim time imaju manju poroznost, zbog čega ljepilo sporije prodire kroz njegovu strukturu i ima slabiji učinak. Osim toga, drvo listača posjeduje i veću sklonost prema apsorpciji vlage, bubrenju i utezanju. Promjenjivi uvjeti koji se javljaju u okolini tako uzrokuju veća naprezanja u slojevima LLN-a u odnosu na četinjače, što može dovesti do pucanja i raslojavanja.

Za lijepljenje građevnog drva zasad prevladavaju četiri vrste ljepila: fenol-rezorcin formaldehidno ljepilo (PRF), melamin-utrea formaldehindno ljepilo (MUF), emulzijsko polimerno izocijanatno ljepilo (EPI) i poliuretansko ljepilo (PUR). Karakteristike lijepljenih spojeva tvrdih listača obično se procjenjuju prema otpornosti na raslojavanje (delaminaciju) [54] i prema čvrstoći na smicanje vlakom (uzdužne posmične čvrstoće) [55]. Nezadovoljavajuća otpornost na raslojavanje predstavlja najveću prepreku lijepljenim spojevima kod tvrdih listača. Postupak testiranja delaminacije obuhvaća nekoliko ciklusa impregnacije lameliranih uzoraka vodom u impregnacijskoj komori pod visokim tlakom i vakuumom, nakon čega slijedi njihovo sušenje na povišenoj temperaturi. Temperatura, uvjeti sušenja i broj ponovljenih ciklusa ovisi o klimatskim uvjetima kojima bi spoj trebao biti izložen (tip I i tip II). Na taj se način u ravninu lijepljenog spoja uvode naprezanja koja simuliraju promjenjive uvjete u okolini i proučava se dugotrajna stabilnost spoja. Rezultati se prikazuju u obliku udjela duljine raslojene sljubnice spoja u ukupnoj duljini vidljive sljubnice ljepila na plohi elementa [54]. Razlozi zbog kojih tvrde listače teško zadovoljavaju ovaj test jesu kombinacija slabije penetracije ljepila, veće sklonosti utezanju i bubrenju te većeg modula elastičnosti i čvrstoće u odnosu na četinjače.

Parametri koji mogu utjecati na čvrstoću adhezivnog spoja su brojni i ovise o vrsti drva, pripremi površine, dimenzijama lamela, vrsti ljepila, samom postupku lijepljenja i izloženosti spoja. Tek nedavno su znanstvenici s Tehničkog sveučilišta u Münchenu uspjeli pokazati da pravilnim odabirom navedenih parametara drvo bukve uspješno prolazi test raslojavanja prema [54]. Kao ključni parametar pokazalo se zadano vrijeme čekanja, tj. vrijeme između sklapanja lamela nakon nanošenja ljepila i nanošenja pritiska [22]. Za vrijeme čekanja manje od 45 minuta dolazi do dobre ali plitke penetracije ljepila. Produljenjem vremena čekanja povećava se viskoznost ljepila, što se pokazalo ključnim za njegovu dublju penetraciju. Odabirom MUF ljepila i zadanog vremena čekanja između 45 minuta i 75 minuta, postotak raslojenosti pao je unutar dopuštenih 5 %. Među ostalim parametrima za bukovinu potrebno je spomenuti utjecaj obojene srži na raslojavanje lijepljenog spoja, ali ne i na čvrstoću na smicanje vlakom [56-58]. Kod tvrdih listača nisu testovi čvrstoće na smicanje vlakom pokazali značajniju ovisnost o navedenim parametrima, što potvrđuje teoriju da uzdužna posmična čvrstoća spoja ponajviše ovisi o hidrotermalnim uvjetima [59-61].

U usporedbi s bukovinom, koju prati difuzno porozna struktura, drva hrasta, jasena i pitomog kestena imaju nehomogeniju prstenasto poroznu strukturu. Također, svojstva drva bitna za proces očvršćivanja ljepila poput pH-vrijednosti, apsorpcije vode i količine ekstrakta variraju za pojedine vrste drva [57]. Među studijama u kojima se je ispitivala kvaliteta lijepljenog spoja hrastovog drva zabilježene su značajne razlike čak i unutar iste vrste ljepila [53, 62]. Njemački institut za graditeljstvo izdao je 2012. prvo odobrenje komercijalnom MUF ljepilu za lijepljenje tvrdih drva bukve, hrasta, pitomog kestena i breze [63]. Odobrenjem su naznačeni i ključni parametri poput pripreme površine, postupka nanošenja, zadanog vremena čekanja, vremena pritiska itd. Nakon toga odobreno je još nekoliko komercijalnih ljepila za drva bukve, hrasta i pitomog kestena [46], međutim za jasenovo drvo još uvijek nije pronađena tehnologija koja bi zadovoljila otpornost na raslojavanje. U nedavnim studijama za drvo jasena provedena su ispitivanja s različitim obradama površine, vrstama ljepila, omjerima miješanja i zadanim vremenom čekanja [8, 60, 64, 65].

4. Modeliranje ponašanja LLN-a od tvrdih listača

Nedostatak baze podataka ili tehničkih odrednica za proračun standardiziranih LLN-a od tvrdog drva, kao i proračunskih modela kojima bi se opisale njihove karakteristike, do sada je težište istraživanja bilo usmjereno na izvođenje eksperimenata.

Razvojem proračunskih modela omogućilo bi se poznavanje savojne čvrstoće LLN-a iz unosa mehaničkih karakteristika lamela i zupčastih spojeva. Do sada usvojeni modeli uglavnom su prikladni za opisivanje LLN-a od drva četinjača. Prema [6] karakterističnu savojnu čvrstoću homogenih LLN-a od drva četinjača i drva topole moguće je odrediti iz izraza (1):

$$f_{m,g,k} = -2.2 + 2.5 f_{t,o,l,k}^{0.75} + 1.5\left(f_{m,j,k} / 1.4 - f_{t,o,l,k} + 6\right)^{0.65} \quad (1)$$

gdje je $f_{t,o,l,k}$ karakteristična vlačna čvrstoća lamele, dok je $f_{m,j,k}$ karakteristična savojna čvrstoća zupčastog spoja. Međutim, taj izraz vrijedi samo ako je

$$1.4 f_{t,o,l,k} \leq f_{m,j,k} \leq 1.4 f_{t,o,l,k} + 12 \quad (2)$$

što je tipično za drva četinjara. Izraz (2) ograničava da vlačna čvrstoća spoja ne smije biti manja od vlačne čvrstoće lamele. Kod drva tvrdih listača s porastom čvrstoće lamele dolazi do opadanja odnosa čvrstoće zupčastog spoja i čvrstoće lamele, pa uvjet (2) nije uvijek ispunjen. Istraživanje provedeno na LLN-u od hrastovine [66] pokazalo je da potencijal vlačne čvrstoće materijala može biti iskorišten samo do klase T30, a iznad toga omjer vlačne čvrstoće zupčastog spoja i lamele pada znatno ispod jedinice. Kod modeliranja LLN-a s konačnim elementima, mehaničke karakteristike lamela i zupčastih spojeva opisuju se statistički. Modul elastičnosti i čvrstoća razlikuju se lokalno duž svake lamele, a lamele se razlikuju prema globalnim svojstvima. Znanstvenici sa sveučilišta u Stuttgartu nedavno su predstavili stohastički model za predviđanje savojne čvrstoće LLN-a od hrastovine, kalibriran s eksperimentalnim podacima i implementiran u kontekstu proširene metode konačnih elemenata (MKE) [67]. Proširena takva metoda omogućava predviđanje pojave i širenja pukotina, a s različitim energijama loma razdvajaju se pukotine pri lamelama i pri zupčastim spojevima. Među ostale numeričke analize ubrajaju se radovi [68-70], gdje je u okviru studije [68] parametarskom analizom prikazana značajna ovisnost geometrije zupčastog spoja i savojne čvrstoće LLN-a od bukovine. Povoljnim za savojnu čvrstoću LLN-a pokazalo se povećanje duljine zubaca spoja uz smanjenje koraka zupca i uzimanje u obzir debljine vrha zupca. Komercijalni programski paketi koji se uspješno primjenjuju za numeričko modeliranje LLN-a od drva tvrdih listača su

Tablica 5. Svojstva dosad odobrenih LLN-a od tvrdih listača u Njemačkoj i drugim europskim zemljama [47]

Vrsta drva	Bukva	Hrast	Hrast	Pitomi kesten
Odobrenje	Z-9,1-821	Z-9,1-679	ETA-13/0642	ETA-13/0646
Nositelj odobrenja	Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V.	Holz Schiller GmbH	Elaborados y Fabricados Gámiz, S.A.	SIERO LAM S.A.
Porijeklo drva	-	Njemačka, Češka Republika	Francuska	
Vizualna klasifikacija				
DIN 4074-1, DIN 4074-5 [20]	LS 10, LS13	LS 13	LS 10, LS13	LS 13
HRN EN 338 [21]	D 35	D 30	D 30	D 24
Lamele				
Debljina [mm]	≤30/≤42*	19-23	20 ± 2	-
Širina [mm]	≤160	50-70	≤160	-
Duljina [m]	-	≥300	300-1200	-
LLN				
Visina [mm]	≤600/≤900*	76-280	80-400	80-400
Širina [mm]	≤160	50-70	50-160	70-220
Duljina [m]	-	≤12/≤4**	≤12	≤13,5
Čvrstoća [N/mm²]				
Savojna $f_{m,k}$	28,0-48,0	31,5/59,0**	33,0	30,0
Vlačna ∥ $f_{t,0,k}$	21,0	28,5/29,4**	23,0	20,0
Vlačna ⊥ $f_{t,90,k}$	0,5	0,6	0,6	0,7
Tlačna ∥ $f_{c,0,k}$	25,0	48,0	45,0	45,0
Tlačna ⊥ $f_{c,90,k}$	8,4	9,0	8,0	5,5
Posmična $f_{v,k}$	3,4/2,5*	5,5	4,0	4,2
Uporabna klasa	1	1,2	1,2	1,2

*odnosi se na hibridne nosače; **odnosi se na Premium nosače

ABAQUS [71] i ANSYS [72]. Iako su zabilježena prilično dobra poklapanja između eksperimentalnih i numeričkih rezultata, zbog kratkotrajne uporabe, čekaju se dodatne parametarske analize koje bi potpuno odredile prednosti i ograničenja pojedinog modela. Osim toga, treba spomenuti eksperimentalna istraživanja na LLN-ima od hrastovine u radovima [73], bukovine, jasenovine i bagremovine [74] te jasenovine [40] čiji rezultati uvelike pridonose daljnjoj kalibraciji numeričkih modela. Osim ispitivanja nosača u cjelini, potrebno je naglasiti da kvalitetan model LLN-a traži i eksperimentalne rezultate svojstava lamela, zupčastih spojeva te ponašanja drva pri pojavi i širenju pukotine [75].

5. Sadašnji europski propisi za LLN od tvrdih listača

U okvirima postojećih europskih normi nema naznačenih zahtjeva za LLN od drva tvrdih listača. Svojstva LLN-a od četinjača mogu biti određena na osnovi standardiziranih lamela, karakteristika poprečnog presjeka ili ispitivanjem nosača u prirodnoj veličini [6]. Kako bi iskoristile prednosti tvrdih listača i povećale resurse drvene građe, pojedine su zemlje izdale tehnička odobrenja za LLN-e od tvrdih listača. Njemački institut za graditeljstvo (DIBt) tako je izdao odobrenja za LLN od tamnocrvene merantijevine, bukovine i hrastovine. Tamnocrvena merantijevina je tropsko drvo i njezino je odobrenje na snazi od 2004., a obuhvaća LLN-e širine između 55 mm i 145 mm, visine do 320 mm i duljine do 6 m [76]. Kod tvrdih listača zastupljenih u Europi, Njemačka se pokazala pionirom u njihovu testiranju i odobrenju. Tako odobrenje za LLN od bukovine, koje DIBt ima na snazi od 2009., obuhvaća homogene i hibridne nosače u kombinaciji sa smrekovinom, jelovinom ili borovinom [77], a odobrenje za LLN od hrastovine na snazi je od 2013., [78]. Iako LLN-i od tvrdih listača nisu regulirani na europskoj razini, Europska je organizacija za tehničko ocjenjivanje (EOTA) preko Europske tehničke ocjene (ETA) izdala odobrenje za LLN od hrastovine [79] i pitome kestenovine [80]. Glavne karakteristike LLN-a od tvrdih listača koji imaju dopuštenje od DIBt i ETA prikazane su u tablici 5. Treba napomenuti da proizvođač, kad građevni proizvod dobije ETA, tek tada može izraditi izjavu o svojstvima i na proizvodu prikazati CE oznaku, koja mu omogućuje njegovu primjenu i prodaju u Europskom gospodarskom prostoru.
Detaljniji pregled svih tehničkih odobrenja za LLN od tvrdih listača dan je u [47, 81, 82]. Ta odobrenja, izdana u kontekstu specifičnog proizvoda, dodatno upućuju na potrebu izrade jedinstvene i cjelovite europske norme za LLN-e od tvrdih listača.

6. Zaključak

Sadašnji okolišni čimbenici pogoduju dugoročnom razvoju listača, koje kontinuirano povećavaju svoj udio u europskim šumama u odnosu na četinjače. Kad je riječ o drvnoj građi to znači da se težište s uobičajene primjene četinjača preusmjerava na intenzivna istraživanja koja ispunjavaju tehnološke praznine u primjeni listača za izradu LLN-a. Iako je u protekla dva desetljeća napravljen velik napredak, projektante i proizvođače još uvijek brinu brojne nepoznanice. Budući da ne postoje standardizirani nosači i ni proračunski modeli, proizvođači su primorani eksperimentirati kako bi utvrdili karakteristike proizvoda, to jest sami moraju ispitati svaki proizvod u naravnoj veličini i u proizvodnom stanju te za njega ishoditi tehničko dopuštenje.
Do sada provedena ispitivanja pokazuju da LLN-i od tvrdih listača imaju znatno veću mehaničku otpornost u usporedbi s LLN-ima od četinjača. Unatoč tome, nedostatak zakonskih okvira, veća cijena u proizvodnji i nedostatno razrađena tehnologija proizvodnje razlog su zašto projektanti i proizvođači daju prednost LLN-ima od četinjača. Međutim, nedavno plasiranje na tržište komercijalnih ljepila za tvrde listače znatno je ubrzalo razvoj i proizvodnju LLN-a od tvrdih listača. Tu se ponajprije misli na drvo bukve, za koju pojedine tvrtke već imaju razrađenu tehnologiju proizvodnje. Osim bukovine, komercijalna ljepila razrađena su za drvo hrasta, pitomog kestena i breze. Drvo jasena, međutim, iako pokazuje obećavajuće rezultate vezano za primjenu u LLN, do sada nije zadovoljilo u otpornosti na raslojavanje, pa ostaje kao tema aktualnih istraživanja. Odabirom drva tvrdih listača, LLN ima veće područje primjene i nudi estetski primjereniju konstrukciju, ali u usporedbi s LLN-om od četinjača, još uvijek je potrebno poboljšavati njegovu profitabilnost i proizvodni proces. Samo na taj način drvo listača ima priliku dobiti što veći tržišni udio u proizvodnji LLN-a. Kao jedna od mogućnosti uštede nameće se kombinirana uporaba drva listača i četinjača u obliku hibridnih nosača.
Strateški gledano, nužno je ulagati u daljnja istraživanja tvrdih listača kako bi se postigla optimalna uporaba i dugoročno upravljanje resursom. Autori se nadaju da će proizvođači LLN-a, potaknuti ovim radom, iskoristiti mogućnosti listača koje su dostupne u šumama. Standardizirani testovi koji vode do LLN-a s CE oznakom sigurno će pomoći u stvaranju europske norme. Tada će inženjerima biti omogućeno u cijelosti koristiti prednosti drva listača, a istovremeno će se osigurati i kvalitetan građevni proizvod.

LITERATURA

[1] European Environment Agency: Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016, An indicator-based report, 2017.

[2] Bolte, A., Hilbrig, L., Grundmann, B., Kampf, F., Brunet, J., Roloff, A.: Climate change impacts on stand structure and competitive interactions in a southern Swedish spruce-beech forest, European Journal of Forest Research, 129 (2010) 3, pp. 261–276, https://doi.org/10.1007/s10342-009-0323-1

[3] Lindner, M., Fitzgerald, J.B., Zimmermann, N.E., Reyer, C., Delzon, S., van der Maaten, E., Schelhaas, M.-J., Lasch, P., Eggers, J., van der Maaten-Theunissen, M., Suckow, F., Psomas, A., Poulter, B., Hanewinkel, M.: Climate change and European forests: What do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management?, Journal of Environmental Management, 146 (2014), pp. 69–83, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.030

[4] Wehrmann, W., Torno, S.: Laubholz für tragende Konstruktionen, Cluster-Initiative Forst und Holz in Bayern gGmbH, 2015.

[5] neue Holzbau AG, https://neueholzbau.ch, 18.06.2019.

[6] HRN EN 14080: Drvene konstrukcije -- Lijepljeno lamelirano drvo i lijepljeno cjelovito drvo -- Zahtjevi, 2013.

[7] HRN EN 14081-1: Drvene konstrukcije -- Konstrukcijsko drvo pravokutnoga poprečnog presjeka razvrstano prema čvrstoći – 1.dio: Opći zahtjevi, 2016.

[8] Knorz, M.: Verklebung von Buche und Esche für tragende Holzbauteile, 18 Internationales Holzbau-Forum, Garmisch-Partenkirchen, 2012.

[9] EN 1912: Structural Timber - Strength classes - Assignment of visual grades and species, 2012.

[10] HRN EN 1912:2012: Drvene konstrukcije – Razredi čvrstoća – Pridruživanje razreda vizualnim razvrstavanjem i prema vrsti, 2012.

[11] Strahm, T.: Laubholz im Ingenieurholzbau, 9 Europäischer Kongress EBH, Köln, 2016.

[12] Frühwald, K., Schickhofer, G.: Strength grading of hardwoods, Proceedings of the 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, pp. 198–210, 2005.

[13] Frese, M., Blaß, H.J.: Beech glulam strength classes, International council for research and innovation in building and construction, Working commission W18 – timber structures, Meeting thirty-eight, Universität Karlsruhe, 2005.

[14] Ehrhart, T., Fink, G., Steiger, R., Frangi, A.: Strength grading of European beech lamellas for the production of GLT & CLT, International Network on Timber Engineering Research Proceedings, Meeting 49, Graz, pp. 29-42, 2016.

[15] Ehrhart, T., Fink, G., Steiger, R., Frangi, A.: Experimental Investigation of Tensile Strength and Stiffness Indicators Regarding European Beech Timber, World Conference on Timber Engineering, Vienna, 2016.

[16] Cibecchini, D., Cavalli, A., Goli, G., Togni, M.: Beech sawn timber for structural use: A case study for mechanical characterization and optimization of the Italian visual strength grading rule, Journal of Forest Science, 62 (2016) 11, pp. 521–528, https://doi.org/10.17221/93/2016-JFS

[17] French Timber & Association for the Promotion of French Oak: Grading of Oak Sawn Timber, Paris, 2012.

[18] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft: Beiträge zur Edelkastanie, Freising, 2018.

[19] DIN 4074-1:2012-06: Strength grading of wood - Part 1: Coniferous sawn timber.

[20] DIN 4074-5:2008-12 Strength grading of wood - Part 5: Sawn hard wood.

[21] HRN EN 338: Konstrukcijsko drvo -- Razredi čvrstoće, 2016.

[22] Schmidt, M., Glos, P., Wegener, G.: Verklebung von Buchenholz für tragende Holzbauteile. European Journal of Wood and Wood Products, 68 (2010) 1, pp. 43–57, doi 10.1007/s00107-009-0382-5

[23] Strahm, T.: Esche und Buche im Ingenieurholzbau, 2 Forum Holzbau, Beaune, 2012.

[24] Niemz, P., Ożyhar, T., Hering, S., Sonderegger, W.: Moisture dependent physical-mechanical properties from beech wood in the main directions, Pro ligno, 11 (2015) 4, pp. 37–42.

[25] Blass, H.J., Denzler, J., Frese, M., Glos, P., Linsenmann, P.: Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche, Universitatsverlag Karlsruhe, 2005.

[26] Frese, M.: Die Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche, Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Laminierungseffekt, Universitatsverlag Karlsruhe, 2006.

[27] Šuhajdová, E., Novotný, M., Pěnčík, J., Šuhajda, K., Schmid, P., Straka, B.: Evaluation of suitability of selected hardwood in civil engineering, Građevni materijali i konstrukcije, 61 (2018) 2, pp. 73–82, https://doi.org/10.5937/GRMK1802073S

[28] Informationsdienst Holz: Holz als konstruktiver Baustoff, Holzabsatzfonds, 2008.

[29] Sell, J.: Eigenschaften und Kenngrössen von Holzarten, Lignum, 1968.

[30] HRN EN 350: Trajnost drva i proizvoda na osnovi drva -- Ispitivanje i razredba otpornosti drva i materijala na osnovi drva na biološke štetnike, 2016.

[31] Ojurović, R., Grbac, I.: Drvo u suvremenim trendovima stanovanja. Drvna Industrija, 60 (2009) 1, pp. 61–63.

[32] Aicher, S., Ruckteschell, N.: Brettschichtholz aus Eiche, 2 Stuttgarter Hozbau-Symposium, Stuttgart, pp. 145-154, 2012.

[33] Sarum Hardwood Structures Limited, https://www.sarumhardwood.co.uk., 18.06.2019.

[34] Manbeck, H.B., Blankenhorn, P.R., Janowiak, J.J., Witmer Jr, R.W., Labosky, P., Powers, P.S., Schram P.D.: Northern Red Oak Glued-Laminated Timber Bridge, Journal of Bridge Engineering, 4 (1999) 4, pp. 268–278, https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(1999)4:4(269)

[35] Vega, A., Guaita, M., Dieste, A., Majada, J., Fernández, I., Baño, V.: Evaluation of the influence of visual parameters on wave transmission velocity in sawn chestnut timber, 17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, Sopron, pp. 311-317, 2011.

[36] Nocetti, M., Bacher, M., Brunetti, M., Crivellaro, A., van de Kuilen, J.W.G.: Machine Grading of Italian Structural Timber, Preliminary Results on Different Wood Species, Proceeding of the World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, Trento, 2010.

[37] van de Kuilen, J.W.G., Ravenshorst, G.J.P., Brunetti, M., Crivellaro, A.: Species independent strength grading of hardwoods, International Scientific Conference on Hardwood Processing, Quebec City, pp. 165-170, 2007.

[38] Vega, A., Dieste, A., Guaita, M., Majada, J., Baño, V.: Modelling of the mechanical properties of Castanea sativa Mill. structural timber by a combination of non-destructive variables and visual grading parameters, European Journal of Wood and Wood Products, 70 (2012) 6, pp. 839–844, https://doi.org/10.1007/s00107-012-0626-7

[39] Romagnoli, M., Cavalli, D., Spina, S.: Wood Quality of Chestnut: Relationship between Ring Width, Specific Gravity, and Physical and Mechanical Properties, BioResources, 9 (2014) 1, pp.1132–1147.

[40] van de Kuilen, J.W., Torno, S.: Materialkennwerte von Eschenholz für den Einsatz in Brettschichtholz, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Schlussbericht zum Vorhaben, TU Munchen, 2014.

[41] Niemz, P., Clauss, S., Michel, F., Hänsch, D., Hänsel, A.: Physical and Mechanical Properties of Common Ash (Fraxinus Excelsior L.), Wood Research, 59 (2014) 4, pp. 671–682.

[42] Vasaitis, R., Rasmus, E.: Dieback of European ash (Fraxinus spp.) - Consequences and Guidelines for Sustainable Management, Swedish University of Agricultural Sciences, 2017.

[43] Enderle, R., Stenlid, J., Vasaitis, R.: An overview of ash (Fraxinus spp.) and the ash dieback disease in Europe, CAB Reviews, 14 (2019) 025, pp. 1-12, https://doi.org/10.1079/PAVSNNR201914025

[44] Barić, L., Županić, M., Pernek, M., Diminić, D.: Prvi nalazi patogene gljive Chalara fraxinea u Hrvatskoj – novog uzročnika odumiranja jasena (Fraxinus spp.), Šumarski List, 9-10 (2012) 001, pp. 461–469.

[45] Jeitler, G., Augustin, M.: Ist Birke die bessere Buche ? Mechanische Eigenschaften und Referenzprojekte aus BIRKE | BSH & BSP, 22 Internationales Holzbau-Forum, Garmisch-Partenkirchen, 2016.

[46] Linsenmann, P.: European Hardwoods for the Building Sector, Reality of today - possibilities for tomorrow, Holzforschung Austria, Garmisch-Partenkirchen, 2016.

[47] Informationsdienst Holz: Spezial - Konstruktive Bauprodukte aus europäischen Laubhölzern, Informationsverein Holz e. V., 2017

[48] Skarvelis, M., Mantanis, G.I.: Physical and mechanical properties of beech wood harvested in the Greek public forests, Wood Research, 58 (2013) 1, pp. 123-130.

[49] Govorčin, S., Sinković, T., Trajković, J.: Some physical and mechanical properties of beech wood grown in Croatia, Wood Research, 48 (2003) 3, pp. 39–52.

[50] Rajčić, V., Bjelanović, A.: Razredba drvne građe. Građevinar, 57 (2005) 10, pp. 779-784

[51] Bernasconi, A.: Verleimung von Laubholz für den tragenden Einsatz, Schweizerische Zeitschrift fur Forstwesen, 155 (2014) 12, pp. 533–539.

[52] van de Kuilen, J.-W., Schaffrath, J.: Möglichkeiten der Verklebung verschiedener Holzarten und Untersuchungen zur Verwendbarkeit als Brettschichtholz, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Munchen, 2014.

[53] Pitzner, B., Bernasconi, A., Frühwald, A.: Verklebung einheimischer dauerhafter Holzarten zur Sicherung von Marktbereichen im Außenbau, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg, 2001.

[54] HRN EN 302-2: Adhezivi za nosive drvene konstrukcije -- Metode ispitivanja -- 2. dio: Određivanje otpornosti na raslojavanje, 2017.

[55] HRN EN 302-1: Adhezivi za nosive drvene konstrukcije -- Metode ispitivanja -- 1. dio: Određivanje uzdužne posmične čvrstoće, 2013.

[56] Aicher, S., Reinhardt, H.W.: Delaminierungseigenschaften und Scherfestigkeiten von Verklebten Rotkernigen Buchenholzlamellen, Holz als Roh- und Werkstoff, 65 (2007) 2, pp. 125–136, https://doi.org/10.1007/s00107-006-0135-7

[57] Schmidt, M., Thönnißen, A., Knorz, M., Windeisen, E., Wegener, G.: Relevant wood characteristics for gluing beech and ash with regard to discoloration, European Journal of Wood and Wood Products, 70 (2012) 1–3, pp. 319–325, https://doi.org/10.1007/s00107-011-0555-x

[58] Schmidt, M.K.: Die Verklebung von Buchenholz für tragende Holzbauteile unter besonderer Berücksichtigung der Farbverkernung, PhD thesis, TU München, 2014.

[59] Král, P., Klímek, P., Děcký, D.: Comparison of the bond strength of oak (Quercus L.) and beech (Fagus sylvatica L.) wood glued with different adhesives considering various hydrothermal exposures, Journal of Forest Science, 61 (2015) 5, pp. 189–192, https://doi.org/10.17221/95/2014-JFS

[60] 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, European Journal of Wood and Wood Products, 72 (2014) 3, pp. 297–309, https://doi.org/10.1007/s00107-014-0778-8

[61] Aicher, S., Ohnesorge, D.: Shear strength of glued laminated timber made from European beech timber, European Journal of Wood and Wood Products, 69 (2011) 1, pp. 143–154, https://doi.org/10.1007/s00107-009-0399-9

[62] Aicher, S., Stapf, G.: Verklebte Vollholzprodukte aus Eiche im Außenbereich, Schlussbericht zum Holzabsatzfonds-Forschungsvorhaben, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, 2007.

[63] Z-9.1-807, Melamin- Harnstoffharz-Klebstoff GripProTM Design für die Verklebung tragender Holzbauteile aus Nadelholz sowie aus den Laubhölzern Eiche, Buche, Birke und Kastanie, Deutsches Institut fur Bautechnik, 2017.

[64] Ammann, S., Schlegel, S., Beyer, M., Aehlig, K., Lehmann, M., Jung, H., Niemz, P.: Quality assessment of glued ash wood for construction engineering, European Journal of Wood and Wood Products, 74 (2016) 1, pp. 67–74, https://doi.org/10.1007/s00107-015-0981-2

[65] Knorz, M., Neuhaeuser, E., Torno, S., van de Kuilen, J.-W.: Influence of surface preparation methods on moisture-related performance of structural hardwood-adhesive bonds, International Journal of Adhesion and Adhesives, 57 (2015), pp. 40–48, https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.10.003

[66] Aicher, S., Stapf, G.: Glulam from European White Oak: Finger Joint Influence on Bending Size Effect, Materials and Joints in Timber Structures, RILEM Bookseries, 9 (2014), pp. 641–656, https://doi.org/10.1007/978-94-007-7811-5_58

[67] Camú, C.T., Aicher, S.: A Stochastic Finite Element Model for Glulam Beams of Hardwoods, World Conference on Timber Engineering, Seul, 2018.

[68] Tran, V.-D., Oudjene, M., Méausoone, P.-J.: Experimental and numerical analyses of the structural response of adhesively reconstituted beech timber beams, Composite Structures, 119 (2015), pp. 206–217, https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.08.013

[69] Tran, V.-D., Oudjene, M., Méausoone, P.-J.: FE analysis and geometrical optimization of timber beech finger-joint under bending test, International Journal of Adhesion and Adhesives, 52 (2014), pp. 40–47, https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.03.007

[70] Lovrić Vranković, J., Boko, I., Divić, V., Torić, N., Goreta, M.: Experimental and numerical analysis of glued laminated timber beams, 9th International Congress of Croatian Society of Mechanics, Split, 2018.

[71] Dassault Systèmes, ABAQUS, Finite element analysis software, v2017.

[72] ANSYS, Inc., ANSYS, Finite element analysis software, Release 16.2.

[73] Tran, V.-D., Oudjene, M., Méausoone, P.-J.: Experimental investigation on full-scale glued oak solid timber beams for structural bearing capacity, Construction and Building Materials, 123 (2016), pp. 365–371, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.002

[74] Hübner, U.: Mechanische Kenngrößen von Buchen- , Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile, Monographic Series, TU Graz, 2014.

[75] Stanzl-Tschegg, S.E., Navi, P.: Fracture behaviour of wood and its composites. A review. COST Action E35 2004–2008: Wood machining – micromechanics and fracture, Holzforschung, 63 (2009) 2, pp. 139–149, https://doi.org/10.1515/HF.2009.012

[76] Z-9.1-577, Brettschichtholz aus Dark Red Meranti, Deutsches Institut fur Bautechnik, 2016.

[77] Z-9.1-679, BS-Holz aus Buche und BS-Holz Buche-Hybridträger, Deutsches Institut fur Bautechnik, 2014.

[78] Z-9.1-821, Holz Schiller Eiche-Pfosten-Riegel-Brettschichtholz, Deutsches Institut fur Bautechnik, 2018.

[79] ETA-13/0642, VIGAM ¬ Glued laminated timber of oak, European Organisation for Technical Assessment, 2018.

[80] ETA 13/0646, SIEROLAM ¬ Glued laminated timber of chestnut, European Organisation for Technical Assessment, 2018.

[81] Aicher, S., Christian, Z., Dill-Langer, G.: Hardwood Glulams – Emerging Timber Products of Superior Mechanical Properties, World Conference on Timber Engineering, Quebec, 2014.

[82] Aicher, S.: Laubholzprodukte und -anwendungen im Bauwesen – Aktueller Stand in Europa, 20. Internationales Holzbau-Forum, Garmisch-Partenkirchen, 2014.