

dr. Barbara Fortuna, mag. inž. grad.

barbara.fortuna@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova 2, 1000 Ljubljana



izr. prof. dr. Simon Schnabl, univ. dipl. inž. grad.

simon.schnabl@fkkt.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo,
Večna pot 113, 1000 Ljubljana



prof. dr. Goran Turk, univ. dipl. inž. grad.

goran.turk@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek

UDK 624.011.1:674.031.631.2

NOSILNOST LAMELIRANIH LEPLJENIH NOSILCEV IZ BUKOVEGA LESA

LOAD BEARING CAPACITY OF GLUED LAMINATED BEECH BEAMS

Povzetek

V sklopu raziskave smo z laboratorijskimi testi izmerili mehanske lastnosti lameliranih lepljenih nosilcev iz lesa slovenske bukve. Izdelali smo dve seriji nosilcev, pri katerih so bili sloji dolžinsko spojeni z dvema različnima geometrijama zobatih spojev. V ta namen smo predhodno izvedli tudi analizo vpliva geometrije zobatega spoja in tipa lepila na trdnost zobatih spojev. Z nateznimi laboratorijskimi testi smo izmerili trdnosti treh različnih geometrij zobatih spojev z uporabo treh tipov konstrukcijskih lepil. Rezultati laboratorijskih meritev so potrdili rezultate numerične analize in ugotovili smo, da z daljšimi in ostrejšimi zobatimi spoji pri bukovem lesu dosežemo višje natezne trdnosti. Pri tem tip uporabljenega lepila nima bistvene vloge. Višje natezne trdnosti zobatih spojev neposredno vplivajo tudi na višje upogibne trdnosti nosilcev. Laboratorijski upogibni testi so pokazali, da daljši zobati spoji z višjimi trdnostmi bistveno vplivajo na upogibno trdnost lameliranih lepljenih nosilcev.

Ključne besede: bukov les, zobati spoji, lamelirani lepljeni nosilci, natezni in upogibni testi

Summary

The article presents the results of an experimental investigation of the mechanical properties of glued laminated beech beams. Two groups of beams were made from longitudinally glued beech boards with two different finger joint geometries. Before the production of the two series of glued laminated beams, different finger joint profiles were analysed. Three different types of structural adhesives were used. The results of the experimental testing confirmed the results of the numerical analysis and it was found that longer and sharper finger joints allow higher tensile strengths of finger joints on beech wood. The type of adhesive has no significant influence on the strengths. Higher tensile strengths of finger joints have a direct influence on higher bending strengths of glued laminated beams. The experimental bending tests confirmed that longer finger joints with higher mechanical properties have a significant influence on the bending strength of the glued laminated beams.

Key words: beech wood, finger joints, glued laminated beams, tensile and bending tests

1 UVOD

Lamelirani lepljeni nosilci se v konstrukcijske namene uporabljajo predvsem zaradi izboljšanih trdnostnih in togostnih lastnosti v primerjavi s klasičnim žaganim lesom. Tovrstni konstrukcijski elementi so inženirski izdelki, ki omogočajo tudi izbiro bolj kompleksnih oblik, njihova proizvodnja pa je lahko načrtovana v skladu s predvideno porazdelitvijo napetosti vzdolž dolžine in prečnega prereza elementa. Z lepljenjem lesenih desk pa se poveča tudi dimenzijska stabilnost konstrukcijskega elementa, ko je ta izpostavljen spremembam relativne vlažnosti okolja [Serrano, 2003]. Poleg tega nam lepljenje omogoča uporabo manjših kosov lesa, ki bi sicer predstavljali odpadke, na ta način pa je večja tudi ekonomičnost tovrstnih konstrukcijskih elementov.

Lepljenje je teoretično izvedljivo ne glede na vrsto lesa. V praksi pa se je pokazalo, da je les listavcev zahtevnejši za lepljenje v primerjavi z lesom iglavcev, kar je povezano predvsem s povečanimi stroški zaradi zahtevnejše in časovno zamudnejše obdelave lesa. Zato se v sodobnih, široko uporabljenih lameliranih lepljenih nosilcih uporablja pretežno les iglavcev oziroma les smreke (*Picea abies*) in jelke (*Abies Alba*), uporaba lesa listavcev pa je trenutno še relativno neraziskana in nerazvita. Na nivoju evropske standardizacije se izvajajo aktivnosti, ki so potrebne za pripravo standardov za proizvodnjo lameliranih lepljenih nosilcev iz lesa listavcev, kar je podprto s številnimi raziskavami ([Ehrhart, 2016], [Ehrhart, 2018a], [Ehrhart, 2018b], [Frese, 2007], [Kovryga, 2020], [Sebera, 2021], [Tran, 2015], [Westermayr, 2018]).

V zadnjem desetletju so bili slovenski gozdovi zaradi ekstremnih vremenskih pojavov zelo prizadeti. Žledolom, vetrolom in večkratni snegolomi so močno poškodovali predvsem iglasti gozd. Zaradi sanitarne poseke, ki je bila nujna zaradi povečane namnožitve podlubnikov, pa so posledice za iglasti gozd še toliko bolj izrazite [Repe, 2021]. Zaloga lesa iglavcev se v naših gozdovih vztrajno zmanjšuje, hkrati pa se povečuje zaloga lesa listavcev. V slovenskih gozdovih je bukev najbolj zastopana lesna vrsta listavcev, saj je v letu 2020 predstavljala kar 32,9 % celotne lesne zaloge. Bukov je avtohtona lesna vrsta in zato bolj prilagojena klimatskim razmeram ter tudi manj izpostavljena napadom različnih škodljivcev in med sanitarnim posekom ni bila pretirano prizadeta.

Bukov odlikujejo tudi izredno visoke mehanske lastnosti, saj v povprečju dosega tudi do trikrat višjo natezno trdnost kot smreka, ta v povprečju znaša kar 72 N/mm^2 , posamezni preizkušanci pa lahko dosežejo tudi dvakratnik te vrednosti ([Ehrhart, 2016], [Ehrhart, 2018a], [Fortuna, 2018], [Plos, 2018]).

Zobati spoji se v proizvodnji lameliranih lepljenih nosilcev uporabljajo pri dolžinskem spajanju posameznih desk. Zobati spoji so torej pomemben del lameliranih lepljenih nosilcev. Že pri iglavcih z nižjimi mehanskimi lastnostmi se izkaže, da zobati spoji lahko predstavljajo oslabeitev, tako da je porušitev nosilca običajno posledica ravno porušitve zobatega spoja. Visoke mehanske lastnosti bukovega lesa narekujejo potrebo po prilagojenih zobatih spojih, ki bi zagotavljali zadostno nosilnost in povečali izkoristek trdnosti lesa.

Standard SIST EN 14080 [SIST, 2013] obravnava področje izdelave lepljenih lameliranih nosilcev iz lesa iglavcev in topola.

V skladu s tem standardom je mogoče izdelati lamelirane lepljene nosilce do trdnostnega razreda GL 32, kjer se v laminacijah uporabljajo lamele z deklarirano natezno trdnostjo T26 (26 N/mm^2). Za uporabo bukovega lesa ali lesa listavcev na splošno trenutno ni v veljavi nobenega standarda, ki bi narekoval postopke izdelave tovrstnih konstrukcijskih elementov. To je v veliki meri posledica pomanjkljive baze podatkov o mehanskih lastnostih bukovega lesa in ostalih listavcev (konstrukcijskih dimenzij). Zato so raziskave na tem področju pomembne in potrebne.

V sklopu raziskave smo se odločili za izvedbo laboratorijskih testov tako zobatih spojev kot tudi lameliranih lepljenih nosilcev, izdelanih iz bukovega lesa. Pri tem smo analizirali vpliv geometrije zobatih spojev in tudi različnih lepil na končno natezno trdnost zobatih spojev. Z uporabo dveh različnih geometrij zobatih spojev smo izdelali dve skupini lepljenih lameliranih nosilcev, ki smo jih nato porušili s standardnimi upogibnimi testi.

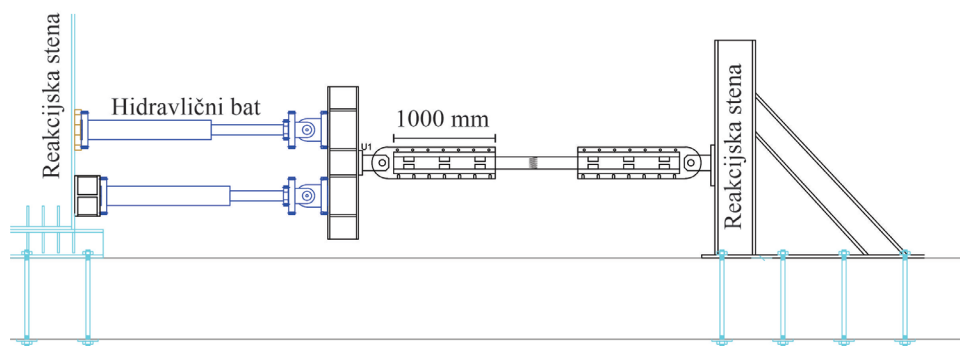
2 LABORATORIJSKI TESTI

2.1 Material

Bukov les, ki smo ga uporabili za izdelavo preizkušancev, je bil pridobljen iz jugovzhodnega dela Slovenije (Gozdno gospodarstvo Novo mesto, d. d.). Deske so bile iz hlodov najprej žagane po debelini, po sušenju v sušilnici pa so bile odrezane na končno širino. S tem postopkom smo se izognili pretiranemu zvijanju desk zaradi sušenja, ki je pri bukovini lahko zelo problematično. Po skobljanju smo dobili deske dimenzij: $120 \times 24 \text{ mm}$, $120 \times 32 \text{ mm}$, $140 \times 20 \text{ mm}$ in $200 \times 16 \text{ mm}$. Pri lepljenju zobatih spojev in lepljenih nosilcev smo uporabili tri različna lepila. Prvi dve sta iz skupine melamin-urea-formaldehidnih lepil: lepilo 1247 z utrjevalcem 2526 (v nadaljevanju MUF) ter lepilo A002 z utrjevalcem H002 (v nadaljevanju GP) proizvajalca CASCO AkzoNobel. Lepilo MUF je lepilo, ki ga v redni proizvodnji uporablja proizvajalec lameliranih lepljenih nosilcev Hoja, d. d., kjer smo izdelali večino preizkušancev. Drugo lepilo, označeno kot GP, pa je bilo izbrano na osnovi priporočila proizvajalca lepila in naj bi bilo, predvsem z vidika trajnosti in odpornosti na delaminacijo, primernejše za lepljenje bukovega lesa. Tretje izbrano lepilo je bilo lepilo fenol-rezorcinol-formaldehid ali PRF. Slednje je ravno tako dvokomponentno (lepilo 1711 in utrjevalec 2520) istega proizvajalca CASCO AkzoNobel.

2.2 Natezni testi zobatih spojev

Natezni testi so bili izvedeni v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Uporabljena je bila postavitve za izvedbo nateznih testov lesenih desk dimenzij, ki se običajno uporabljajo v konstrukcijah (dolžine približno 3,5 m). Testi so bili izvedeni v skladu z navodili standarda SIST EN 408 [SIST, 2012]. Nanos obtežbe je bil kontroliran preko pomikov. V skladu z navodili standarda so bili testi izvedeni tako, da je do porušitve preizkušanca prišlo v času $5 \pm 2 \text{ min}$ od začetka obremenjevanja. Glede na ocenjeno nosilnost posameznih preizkušancev je hitrost obremenjevanja v poprečju znašala $0,3 \text{ mm/min}$. Za nanos obtežbe sta bila uporabljena dva hidravlična bata, kot je prikazano na sliki 1. Za zagotavljanje ustreznega prijemališča desk so bile uporabljene namensko izdelane klešče z narezljano površino, s katerimi je bil omogo-



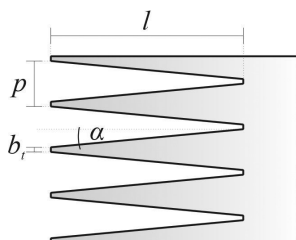
Slika 1. Shema testne konstrukcije za izvedbo nateznih testov na lesenih deskah.

čen oprijem deske do dolžine 1000 mm, ki zadošča nanosu velikih nateznih sil (do 500 kN). Prosta testna dolžina preizkušancev med kleščami je bila med 500 in 1000 mm.

Pri izdelavi preizkušancev zobatih spojev je bila vsaka deska razrezana na eno ali dve krajši deski. Pri tem smo zagotovili, da je bil les čist, brez grč in opaznega naklona vlaken, do najmanj 300 mm od konca deske, kjer je bil predviden zobati spoj. Pari desk pri spajanju so bili pri lepljenju zobatih spojev izbrani naključno.

Geometrija zobatih spojev vpliva na nosilnost zobatih spojev in v splošnem velja, da se nosilnost povečuje z lepljeno površino torej z dolžino zobatih spojev [Aicher, 2003].

Pripravili smo tri serije preizkušancev zobatih spojev, ki se med seboj razlikujejo po dolžini spojev l , naklonu α ter širini konice b_c . Parametri so prikazani na sliki 2. Poleg različnih geometrij smo pri lepljenju uporabili tudi različna lepila. Program testiranja zobatih spojev je predstavljen v preglednici 1, kjer je podano število preizkušancev za posamezno kombinacijo uporabljene geometrije (dolžine) zobatega spoja ter uporabljeno lepilo.



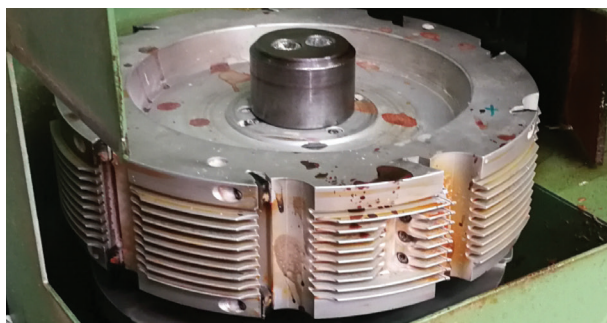
Slika 2. Shema konstrukcijskega zobatega spoja z označenimi geometrijskimi parametri.

Dolžina spojev	Vrsta lepila		
	MUF	PRF	GP
10	28	25	-
18	27 (5 N/mm ²)+26 (10 N/mm ²)	26	-
40	22	-	25

Preglednica 1. Število preizkušancev za posamezno dolžino zobatih spojev in uporabljeno lepilo.

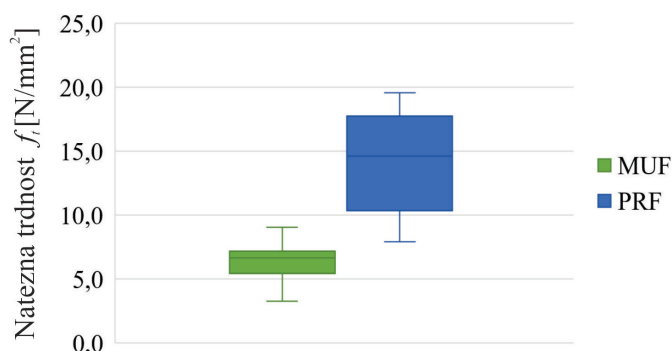
2.2.1 Zobati spoji dolžine 10 mm

Prva serija zobatih spojev je bila izdelana v podjetju MSora, d. d., na deskah s prečnim prerezom 120 x 24 mm. Deske so bile zaradi omejitev strojne opreme naknadno poskobljane na končno širino 70 mm. Dolžina posameznih desk pred lepljenjem je znašala 1,2 m. Povprečna gostota desk, uporabljenih za to serijo, je bila 712 kg/m³. Podjetje zobate spoje uporablja pri spajanju desk za proizvodnjo okenskih in vratnih okvirjev, zato geometrija uporabljenih zobatih spojev ni ustrezala zahtevam standarda SIST EN 14080 [SIST, 2013] za konstrukcijske spoje, kjer je potrebno samozaklinjanje zob in se nosilnost spojev v določeni meri zagotavlja tudi preko trenja. V raziskavi so bili spoji z dolžino spojev $l=10$ mm, širino konice $b_c=2$ mm ter razmikom med zobmi $p=6$ mm uporabljeni predvsem z namenom analize vpliva vrste lepila. Na sliki 3 sta prikazana rezkalni nož (levo) ter izrezan zobati spoj z dolžino 10 mm (desno). Nanos lepila ter stiskanje sta bila izvedena ročno. Preizkušanci so bili nameščeni v stiskalnico, kjer se je lepilo utrjevalo 24 ur. Uporabljeni sta bili lepili MUF in PRF.



Slika 3. Rezkalni nož za 10 mm dolg zobati spoj (levo) in deska z 10 mm dolgim zobatim spojem (desno).

Z nateznimi testi smo izmerili natezno trdnost spojev f_t in po pričakovanjih ugotovili nizke vrednosti. Rezultati so prikazani na sliki 4, kjer je razlika med MUF- in PRF-lepilom očitna. S statističnim testom ANOVA smo potrdili, da je vpliv vrste lepila na natezno trdnost statistično značilen (dejansko tveganje manjše od 0,0004). V povprečju razlika med lepiloma znaša 1:2,3 v prid lepilu PRF. Maksimalna izmerjena natezna trdnost za lepilo MUF je bila 9 N/mm² za PRF pa 19,6 N/mm².



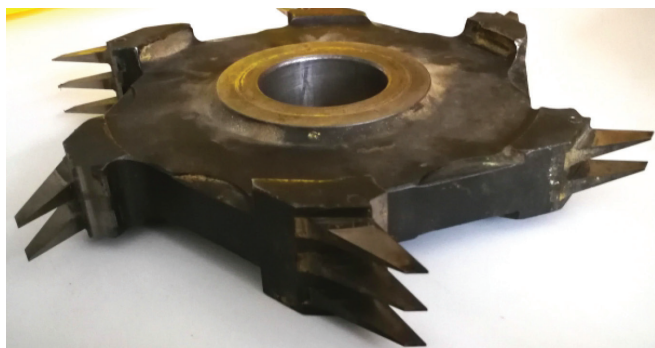
Slika 4. Škatlasti diagram nateznih trdnosti 10 mm dolgih zobatih spojev in različnih vrst lepila.

Večina preizkušancev se je porušila po lepilu, le dva preizkušanca z lepilom PRF sta se porušila po stiku, kar pa je bila posledica slabe kakovosti lesa. Natezne trdnosti so bile zelo nizke in nezadostne glede na trdnosti bukovega lesa, ki v povprečju znašajo 72 N/mm². Geometrija z 10 mm dolgimi zobatimi spoji je torej neustrezna za uporabo pri lepljenju bukovega lesa.

2.2.2 Zobati spoji dolžine 18 mm

Druga geometrija zobatega spoja je enaka tisti, ki se uporablja pri proizvodnji zobatih spojev v podjetju Hoja, d. d., kjer proizvajajo lamelirane lepljene nosilce iz lesa iglavcev. Preizkušanci so bili izdelani na deskah s prečnim prerezo 120 x 24 mm. Povprečna gostota uporabljenih desk je bila 684 kg/m³, vlažnost lesa, izmerjena po metodi sušenja v peči, kot je predpisano v standardu EN 13183-1 [SIST, 2003], pa je bila 9,6 %. Geometrija zobatih spojev je bila $l=18$ mm, $b_t=1$ mm ter enakim razmikom med zobmi, $p=6$ mm, kot v primeru 10 mm dolgih spojev. 18 mm dolgi spoji so v primerjavi z 10 mm dolgimi spoji ostrejši z manjšim naklonom α . Rezanje in stiskanje zobatih spojev je bilo v celoti avtomatizirano. Na sliki 5 sta prikazana rezkalni nož (levo) ter izrezan zobati spoj (desno). Pri 26 preizkušancih smo ročno nanесли lepilo PRF, pri 53 pa je bil nanos lepila MUF avtomatiziran in izveden znotraj neprekinjene proizvodnje linije, saj se to lepilo uporablja v redni proizvodnji nosilcev iz lesa iglavcev v podjetju Hoja, d. d. Da bi lahko ocenili vpliv tlaka na končno trdnost, smo preizkušance z lepilom MUF stiskali pri dveh različnih tlakih, 5 in 10 N/mm².

Z nateznimi testi smo izmerili natezne trdnosti zobatih spojev f_t in statični modul elastičnosti E_t v skladu z navodili standarda SIST EN 408 [SIST, 2012]. Dolžina testiranega območja med kleščami je bila 1200 mm, zobati spoji pa so bili na sredini razpona. Deformacije lepljenega zobatega spoja so zelo majhne in jih je težko izmeriti in izločiti vpliv lesa na vzdolžno deformacijo. Zato smo se odločili, da upoštevamo navodila standarda [SIST 2012] za merjenje modula elastičnosti lesenih desk in sicer z indukcijskimi merilniki pomikov ali LVDT-ji. Merilniki so bili nameščeni tako, da je bil zobati spoj na sredini razpona merilnikov. Treba je poudariti, da je zaradi relativno velikega razpona merjenja pomikov (dolžina LVDT-jev), ki je znašal 600 mm,



Slika 5. Rezkalni nož za 18 mm dolg zobati spoj (levo) in deska z 18 mm dolgim zobatim spojem (desno).



Slika 6. Laboratorijske meritve statičnega modula elastičnosti 18 mm dolgega zobatega spoja z LVDT-merilniki.

izmerjeni modul elastičnosti v večji meri predstavljal modul elastičnosti deske in ne neposredno modula elastičnosti zobatega spoja. Merjenje modula elastičnosti v nategu E_t je prikazano na sliki 6.

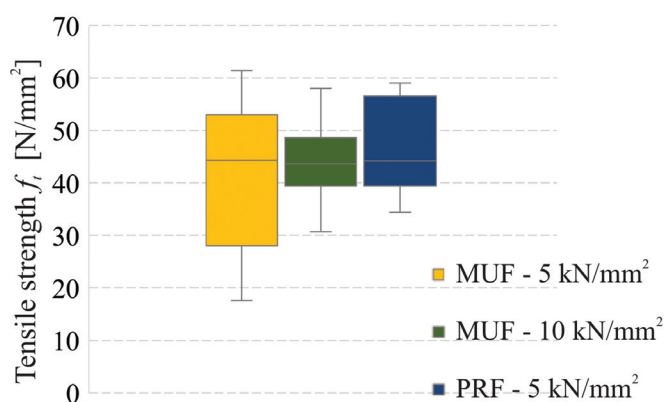
Rezultati nateznih testov so prikazani v preglednici 2 ločeno za preizkušance, ki so se porušili po lesu, in tiste, ki so se porušili po spoju oziroma po lepljenem stiku. Način porušitve je namreč zanesljiv pokazatelj, ali je bila v posameznem preizkušancu dosežena optimalna nosilnost in je prišlo do porušitve lesa in ne spoja. Obenem pa si želimo čim višje vrednosti nosilnosti preizkušancev s porušitvijo v spoju. Srednja vrednost natezne trdnosti vseh preizkušancev je bila 43,4 N/mm². Preizkušanci, ki so se porušili po spoju, imajo višje natezne trdnosti v primerjavi s tistimi, ki so se porušili po lesu.

	Porušitev po lesu			Porušitev po spoju		
	MUF	MUF	PRF	MUF	MUF	PRF
f_t [N/mm ²]	(5 N/mm ²)	(10 N/mm ²)	(10 N/mm ²)	(5 N/mm ²)	(10 N/mm ²)	(10 N/mm ²)
5. centil	23,0	15,3	11,2	23,0	36,7	42,4
Povprečje	42,0	35,5	32,7	47,6	50,5	54,1
St. deviacija	12,3	14,9	16,8	16,5	8,3	10,2
Velikost vzorca	13	9	17	14	17	9
Povprečje E_t [N/mm ²]	17500	16600	16500	17900	18300	17800

Preglednica 2. Statistične vrednosti nateznih trdnosti in nateznega modula elastičnosti, razdeljenih v šest skupin glede na tip lepila, tlak pri stiskanju in način porušitve za 18 mm dolge zobate spoje.

Z analizo variance (ANOVA-test) smo preverili rezultate glede na uporabljeno lepilo in tlak ob stiskanju zobatih spojev. Izkazalo se je, da vrsta lepila nima statistično značilnega vpliva na dosežene trdnosti za stopnjo značilnosti 5 %. Podobno velja tudi za tlak stiskanja spojev. Rezultati so prikazani grafično na sliki 7, kjer je podobnost srednjih vrednosti podvzorcev očitna.

Izmerjene vrednosti statičnega modula elastičnosti zobatih spojev v nategu so bile nekoliko višje od modula elastičnosti bukovih desk. Povprečna vrednost vseh preizkušancev, ne glede na tip porušitve, lepila ali tlaka, je bila 17.600 N/mm², medtem ko je bila povprečna vrednost modula elastičnosti bukovih desk 16.300 N/mm² ([Plos, 2018], [Plos, 2022]). Očitnega razloga za te razlike ni. Ocenjujemo, da bi lahko do določene mere lepilo ojačalo les v območju zobatega spoja vendar tega vpliva nismo mogli ovrednotiti. Zavedati pa se je treba, da 79 preizkušancev v kontekstu merjenja mehanskih lastnosti lesa ne predstavlja velikega vzorca in obstaja možnost, da so višje izmerjene vrednosti modula elastičnosti slučajne oziroma uporabljen les ni bil povsem reprezentativen.



Slika 7. Škatlasti diagram nateznih trdnosti preizkušancev, ki so se porušili v stiku za tri skupine zobatih spojev lepljenih z lepiloma PRF in MUF z dvema tlakoma ob stiskanju.

Kljub relativno visokemu deležu porušitev po lepljenem stiku smo izmerili nekoliko nižje trdnosti kot v podobni raziskavi [Aicher, 2001], kjer je bila povprečna natezna trdnost zobatih spojev 62 N/mm². Iz preglednice 2 opazimo, da je povprečna vrednost nateznih trdnosti preizkušancev, ki so se porušili po

lesu, enaka 36,5 N/mm², kar je bistveno manjša vrednost od poročane za populacijo slovenske buke [Plos, 2022], kar nakazuje na les slabše kvalitete. Poleg tega smo pri izvedbi nateznih testov upoštevali navodila standarda, ki zahteva testni razpon pri nateznih testih 9h, kjer h predstavlja širino deske. Velik razpon pa poveča verjetnost prisotnosti oslabiljenega lesa znotraj testnega območja.

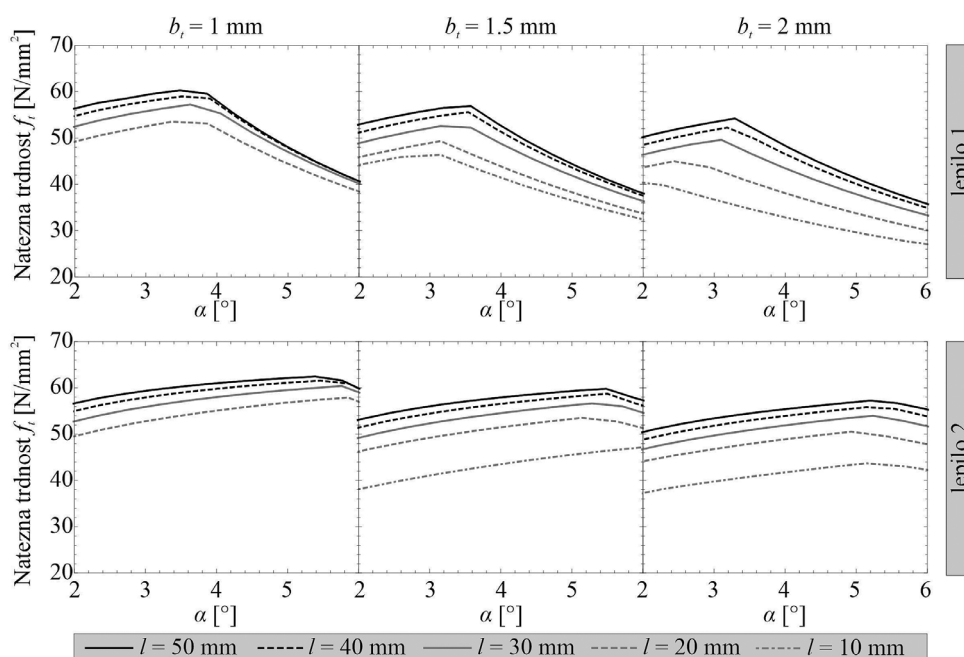
2.2.3 Zobati spoji dolžine 40 mm

Kot je bilo omenjeno v uvodu, je za dolžinsko spajanje lesa z višjimi mehanskimi lastnostmi, predvsem z višjimi nateznimi trdnostmi, potrebna optimizacija geometrije zobatih spojev. Na osnovi numeričnega modela, ki smo ga pripravili v sodelovanju s partnerji projekta TIGR4smart, smo pripravili parametrično študijo vpliva geometrijskih parametrov zobatega spoja in materialnih parametrov dveh različnih lepil na natezno trdnost zobatih spojev. Numerična analiza je podrobneje predstavljena v literaturi [Fortuna, 2020], na tem mestu pa prikazujemo samo rezultate parametrične študije, s katero smo lahko določili optimalnejši profil zobatih spojev glede na pričakovano natezno trdnost. Na osnovi rezultatov parametrične študije, ki so prikazani na sliki 8, smo lahko ocenili optimalne vrednosti glavnih parametrov, ki definirajo geometrijo zobatega spoja. Iz diagramov je lepo razvidna tudi maksimalna natezna trdnost, iz katerih lahko odčitamo vrednosti parametrov za dva tipa lepila z izbranimi mehanskimi lastnostmi. Pri Lepilu 1 smo upoštevali nižje vrednosti (trdnost v smeri normale na stik $\sigma_u=1,6$ N/mm² in strižna trdnost $\tau_1=9,6$ N/mm²) kot pri Lepilu 2 ($\sigma_u=3,0$ N/mm² in $\tau_1=15$ N/mm²), zato so tudi natezne vrednosti spoja nekoliko višje. V splošnem pa velja, da se z dolžino zobatega spoja l natezna trdnost povečuje. Ravno tako se natezna trdnost povečuje z manjšanjem širine konice b_t in tudi naklona zoba α , vendar samo do določene vrednosti. S spreminjanjem geometrije se namreč spremeni tudi način porušitve. V začetnem delu diagrama, levo od maksimalnih nateznih trdnosti, je porušitev spoja pogojena s porušitvijo lesa. V desnem delu pa pride do porušitve v lepljenem stiku. Na osnovi teh rezultatov smo določili nekaj optimalnih vrednosti geometrijskih parametrov: $l=30-50$ mm, $p=5,8-8,4$ mm in $b_t=1-2$ mm, kar ustreza naklonu $\alpha \approx 3,8^\circ$.

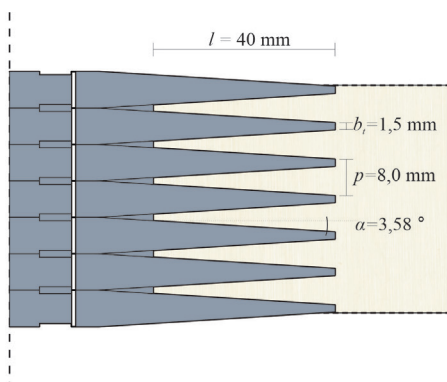
Pri izdelavi rezkalnih nožev za novo geometrijo zobatih spojev smo bili nekoliko omejeni zaradi tehnologije izdelave rezkalnih nožev in tudi zaradi dejstva, da je bukev relativno krhek les,

zato pri vitkih zobeh obstaja nevarnost krušenja. Posledično smo se odločili za geometrijo, ki je definirana z naslednjimi vrednostmi: $l=40$ mm, $p=8,0$ mm in $b_f=1,5$ mm, kar ustreza naklonu $\alpha \approx 3,58^\circ$. Geometrija je prikazana na sliki 9. Glede na rezultate numerične analize zobatih spojev (slika 9) smo ocenili, da lahko s takšno geometrijo pričakujemo natezne trdnosti zobatih spojev med 55 in 60 N/mm².

Štebe, d. o. o. Tudi nanos lepila je bil izveden ročno. Za obe vrsti lepila je bil postopek lepljenja opravljen v skladu z navodili proizvajalca lepil, torej 5 N/mm² za lepilo MUF ter 1,4 N/mm² za lepilo GP. Pritisk je bil nanesen ročno, s stiskalnico, pripravljeno ravno za ta namen (slika 10, levo). Na stiskalnico je bil nameščen silomer za kontrolo nanosa tlaka (slika 10, desno).



Slika 8. Vpliv geometrijskih parametrov konstrukcijskega zobatega spoja in dveh tipov lepil na natezno trdnost zobatega spoja – rezultati parametrične študije z numeričnim modelom [Fortuna, 2020].



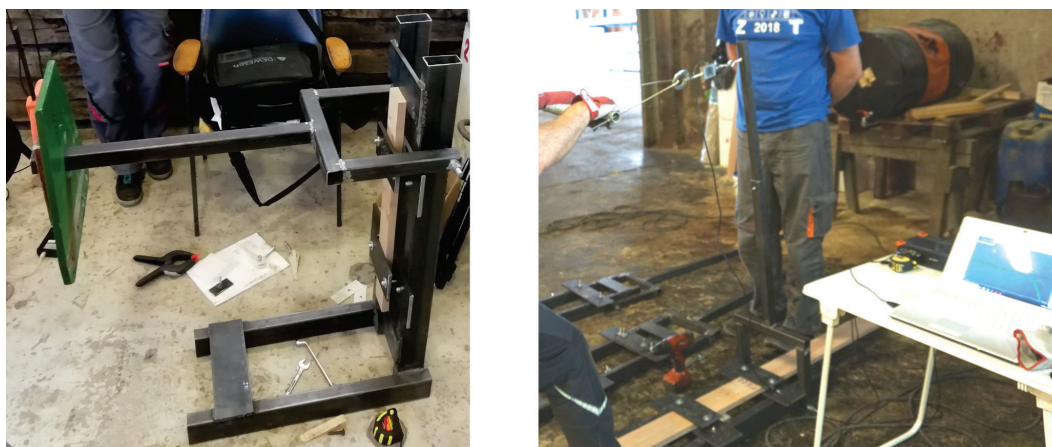
Slika 9. Geometrija zobatega spoja, prilagojena za doseganje višjih nateznih trdnosti, ki so pričakovane pri bukovem lesu.

Zobati spoji z dolžino 40 mm so bili izdelani na deskah s prečnim prerezo 100 x 18 mm. Srednja vrednost gostote desk je bila 692 kg/m³. Povprečna vlažnost lesa je bila 11,2 %. Zaradi nestandardnega profila avtomatizirana izdelava preizkušancev ni bila mogoča, zato je ta potekala ročno. Zobati spoji so bili izrezani z rezkalnim nožem, nameščenim na strojno napravo CNC v podjetju Tesarstvo in krovstvo

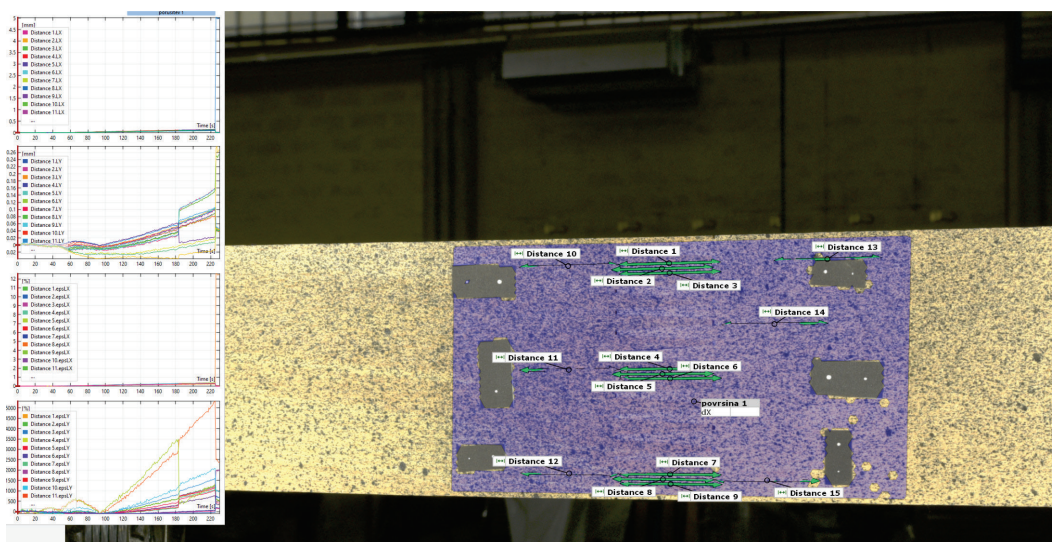
Glede na ugotovitve nateznih testov prvih dveh serij zobatih spojev smo testno postavitev pri 40 mm dolgih zobatih spojih nekoliko prilagodili, in sicer tako, da smo skrajšali testni razpon med kleščami. Na ta način smo natezno obtežbo omejili na manjše območje okrog zobatega spoja. Testni razpon je znašal 500 mm.

Tudi deformacije so bile merjene na manjšem območju, tj. na dolžini zobatega spoja. Moduli elastičnosti, izmerjeni na ta način, so bolj merodajen podatek o togosti zobatega spoja, saj je vpliv togosti lesa bistveno manjši kot v primeru meritev na preizkušancih z 18 mm dolgimi zobatimi spoji. Za merjenje pomikov smo uporabili sistem za optično merjenje pomikov GOM. Fotografije smo zajemali z dvema fotoaparatom Nikon D850 (format slike DX). Fotoaparata sta bila od preizkušancev oddaljena 600 mm. Statični modul elastičnosti 40 mm dolgih zobatih spojev v nategu je bil izmerjen na osnovi relativne deformacije razdalje med izbranimi točkama, ki sta označevali začetek in konec zobatega spoja (slika 11).

Rezultati nateznih testov 40 mm dolgih zobatih spojev so prikazani v preglednici 3, ločeno po skupinah glede na uporabljen tip lepila ter način porušitve, na sliki 12 pa so rezultati prikazani grafično ne glede na tip porušitve. Povprečna natezna trdnost vseh 47 preizkušancev je bila 55,8 N/mm², kar je v skladu z rezultati numeričnega modela zobatega spoja. V



Slika 10. Naprava za izdelavo zobatih spojev (levo) in izdelava preizkušancev – stiskanje pod kontroliranim nanosom tlaka (desno).



Slika 11. Primer vzorca v programu GOM 2018 Professional z označenimi razdaljami za določitev statičnega modula elastičnosti 40 mm dolgih zobatih spojev v nategu.

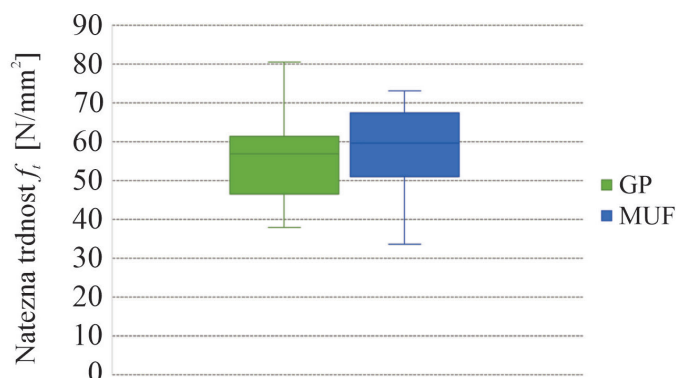
primerjavi z 18 mm dolgimi zobatimi spoji smo dosegli skoraj 50 % višje natezne trdnosti, kar predstavlja znatno izboljšanje. Iz preglednice 3 lahko ugotovimo, da je bil delež porušitve po lesu bistveno višji, hkrati pa so ti preizkušanci dosegali višje natezne trdnosti kot v primeru krajših zobatih spojev. Ocenjujemo, da je spremenjena testna postavitev bistveno pripomogla k izboljšanju nateznih trdnosti preizkušancev, ki so se porušili po lesu.

Podobno kot pri 18 mm dolgih zobatih spojih vrsta lepila tudi pri daljših zobatih spojih ni imela statistično značilnega vpliva na njihove natezne trdnosti (slika 12), kar smo preverili s testom ANOVA z dejanskim tveganjem 0,45. Povprečna vrednost trdnosti za preizkušance z lepilom MUF je bila 56,8 N/mm² za preizkušance z lepilom GP pa 55,0 N/mm², medtem ko so posamezni preizkušanci z lepilom GP dosegli višje trdnosti. Iz primerjave rezultatov nateznih trdnosti 18 mm dolgih zobatih spojev iz preglednice 2 ter 40 mm dolgih zobatih spojev iz preglednice 3 lahko opazimo, da smo

	Porušitev po lesu		Porušitev po spoju	
f_t [N/mm ²]	GP	MUF	GP	MUF
5. centil	38,1	31,0	59,6	52,3
Povprečje	52,9	53,3	64,1	63,0
St. deviacija	13,0	14,6	7,0	7,9
Velikost vzorca	22	14	2	8
Povprečje E_t [N/mm²]	12400	11500	12900	12300

Preglednica 3. Statistične vrednosti nateznih trdnosti in nateznega modula elastičnosti zobatih spojev, razdeljenih v štiri skupine glede na tip lepila in način porušitve za 40 mm dolge zobate spoje.

z daljšimi zobatimi spoji dosegli višje natezne trdnosti. Direktno primerjavo lahko naredimo za lepilo MUF. Pri krajših zobatih spojih je bila karakteristična natezna trdnost zobatih spojev, ki so se porušili po spoju $36,7 \text{ N/mm}^2$, pri daljših pa $52,3 \text{ N/mm}^2$. Tudi povprečna vrednost nateznih trdnosti zobatih spojev se je povečala za več kot 24 %. Sklepamo lahko, da se s povečevanjem dolžine in manjšanjem naklona spojev vpliv lepila zmanjšuje, kar je bilo nakazano tudi z rezultati numeričnega modela.



Slika 12. Škatlasti diagram nateznih trdnosti 40 mm dolgih zobatih spojev, lepljenih z dvema različnima lepiloma, GP in MUF.

2.3 Upogibni testi lameliranih lepljenih nosilcev

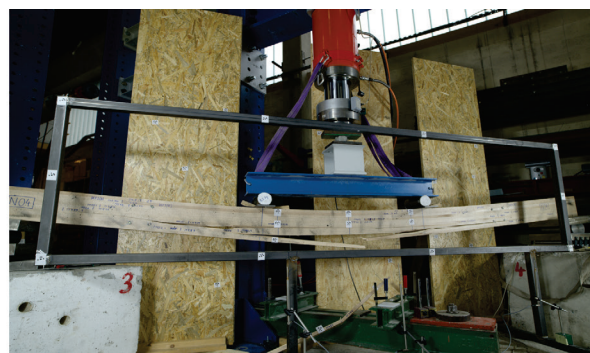
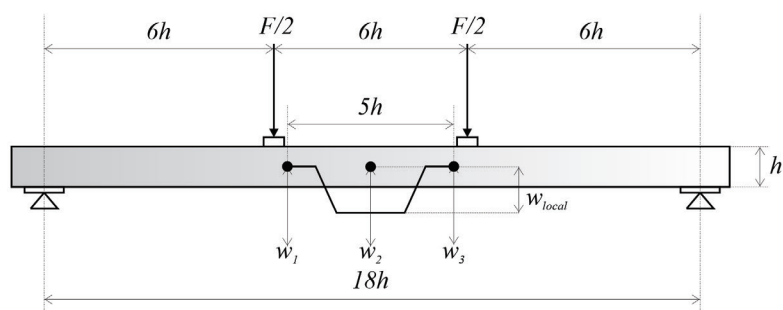
Lamelirane lepljene nosilce smo testirali s štiritočkovnim upogibnim testom v skladu z navodili standarda SIST EN 408 [SIST, 2012] (slika 13, levo) za določanje osnovnih mehanskih lastnosti konstrukcijskega lesa in lameliranih lepljenih elementov. Upogibni testi so bili izvedeni na dveh skupinah lepljenih nosilcev, ki so se med seboj razlikovali v dolžini zobatih spojev, uporabljenih pri izdelavi lamel za nosilce. V podjetju Hoja, d. d., smo izdelali 10 nosilcev z zobatimi spoji dolžine 18 mm ter 4 nosilce z zobatimi spoji dolžine 40 mm. Lamelle za slednjo skupino nosilcev smo dolžinsko spojili v

podjetju Krovstvo in tesarstvo Štebe, d. o. o. Lamelle so bile nato skobljane na končno debelino in zlepljene v podjetju Hoja, d. d. Vsi nosilci so bili sestavljeni iz 10 lamel debeline 18 mm. Prečni prerez testiranih nosilcev je bil $180 \times 100 \text{ mm}$, dolžina nosilcev pa 3,6 m. Pri vseh nosilcih je bilo uporabljeno lepilo MUF.

2.3.1 Lamelirani lepljeni nosilci z 18 mm dolgimi zobatimi spoji

V skupini lepljenih nosilcev s standardno geometrijo zobatih spojev so bili le ti razporejeni naključno. Rezultati upogibnih testov so prikazani v preglednici 4. Prikazane so statistične vrednosti za izmerjeno upogibno trdnost ter korigirano upogibno trdnost, kjer je upoštevan tudi faktor k_h zaradi višine nosilca, ki je različna od 600 mm. To je postopek, ki ga zahteva standard EN 14080 [SIST, 2013] za določitev nosilnosti lameliranih lepljenih nosilcev. Ta je potreben, če želimo objektivno ovrednotiti trdnost nosilcev in jih razvrstiti v trdnostne razrede. Tako je možna primerjava s trdnostmi certificiranih konstrukcijskih elementov, ki se uporabljajo v grajenem okolju. Karakteristična vrednost (5. centil) je eden izmed ključnih podatkov pri razvrščanju v trdnostne razrede. Ker gre za relativno majhen vzorec, smo jo določili ob predpostavki, da je trdnost porazdeljena po logaritemsko normalni porazdelitvi. Upogibni modul elastičnosti nosilcev smo merili z LVDT-merilniki (slika 13, desno). Povprečna vrednosti lokalnega modula elastičnosti 10 nosilcev je bila 13.200 N/mm^2 , globalnega pa 14.900 N/mm^2 .

Visoke izmerjene mehanske lastnosti lameliranih lepljenih nosilcev dokazujejo dober potencial bukovega lesa v nosilnih konstrukcijah že brez posebnih modifikacij proizvodnje ali spremembe geometrije zobatih spojev. Karakteristična vrednost izmerjenih upogibnih trdnosti nosilcev je bila $37,5 \text{ N/mm}^2$, na osnovi česar bi nosilce lahko razvrstili v trdnostni razred GL35. Poudariti je treba, da to ni končna razvrstitev v trdnostne razrede, ki bi v celoti izpolnjevala kriterije standardov na tem področju, saj bi bilo treba upoštevati še modul elastičnosti ter gostoto nosilcev, poleg tega gre za relativno majhen vzorec preizkušancev.



Slika 13. Testna postavitev za določitev lokalnega in globalnega modula elastičnosti ter upogibne trdnosti lameliranih lepljenih nosilcev. Levo: Shema upogibnih testov (povzeto po EN 408). Desno: Izvedba upogibnih testov v laboratoriju.

	f_b [N/mm ²]	$f_b \cdot k_h$ [N/mm ²]
Min	43,3	39,0
Max	84,2	75,8
Povprečna vrednost	62,1	55,9
5. centil (Lognormalna porazdelitev)	37,4	35,7
St. deviacija	12,8	11,5
Velikost vzorca	10	

Preglednica 4. Statistične vrednosti eksperimentalno izmerjenih upogibnih trdnosti ter trdnosti z upoštevanjem k_h faktorja [SIST, 2013] lameliranih lepljenih nosilcev s zobatih spojev z dolžino 18 mm (standardno geometrija).

2.3.2 Lamelirani lepljeni nosilci s 40 mm dolgimi zobatimi spoji

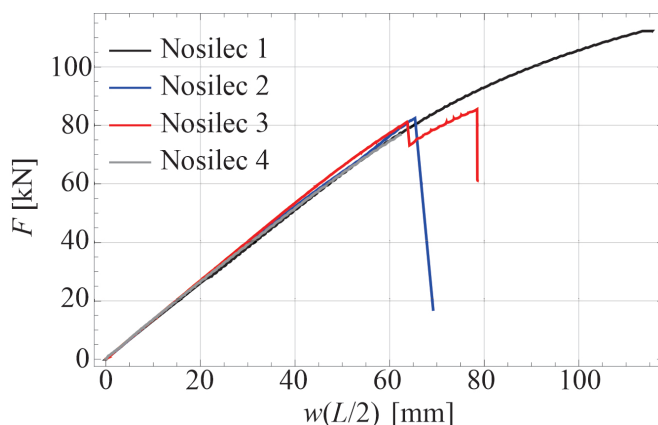
V drugi seriji smo izdelali 4 lamelirane lepljene nosilce. Posamezne lamele smo zlepili ročno s pomočjo pripravljene stiskalnice, kot je bila prikazana na sliki 10. Posamezne lamele so nato zlepili v nosilce v podjetju Hoja, d. d. V seriji nosilcev s 40 mm dolgimi zobatimi spoji njihov položaj v spodnji lameli ni bil naključen. Pri treh nosilcih so bili zobati spoji načrtovani v območju največjih momentov, torej v srednji tretjini nosilca. Pri enem izmed nosilcev pa spoja v spodnji lameli ni bilo oziroma je bil v bližini podpore, kjer so upogibni momenti majhni, torej zobati spoj nima pomembnega vpliva na obnašanje nosilca. Pomiki so bili merjeni z optičnim sistemom GOM.

Kljub dejstvu, da so bile lamele izdelane ročno, smo z upogibnimi testi nosilcev dokazali visoke upogibne trdnosti. Najnižja izmerjena upogibna trdnost nosilcev je bila 77,5 N/mm², najvišja pa kar 112,5 N/mm². Povprečje je znašalo 89,6 N/mm² z relativno majhno standardno deviacijo. Ker gre za majhno število preizkušancev, so v preglednici 5 po-

	f_b [N/mm ²]	$f_b \cdot k_h$ [N/mm ²]
Nosilec 1	112,5	101,3
Nosilec 2	82,9	74,6
Nosilec 3	81,2	77,0
Nosilec 4	77,5	69,7
Povprečna vrednost	89,6	79,7
5. centil (Lognormalna porazdelitev)	57,1	51,4
St. deviacija	16,2	14,5

Preglednica 5. Statistične vrednosti o eksperimentalno izmerjenih upogibnih trdnostih lameliranih lepljenih nosilcev z optimizirano geometrijo zobatih spojev z dolžino 40 mm ter upogibnih trdnostih nosilcev z upoštevanjem k_h faktorja [SIST, 2013].

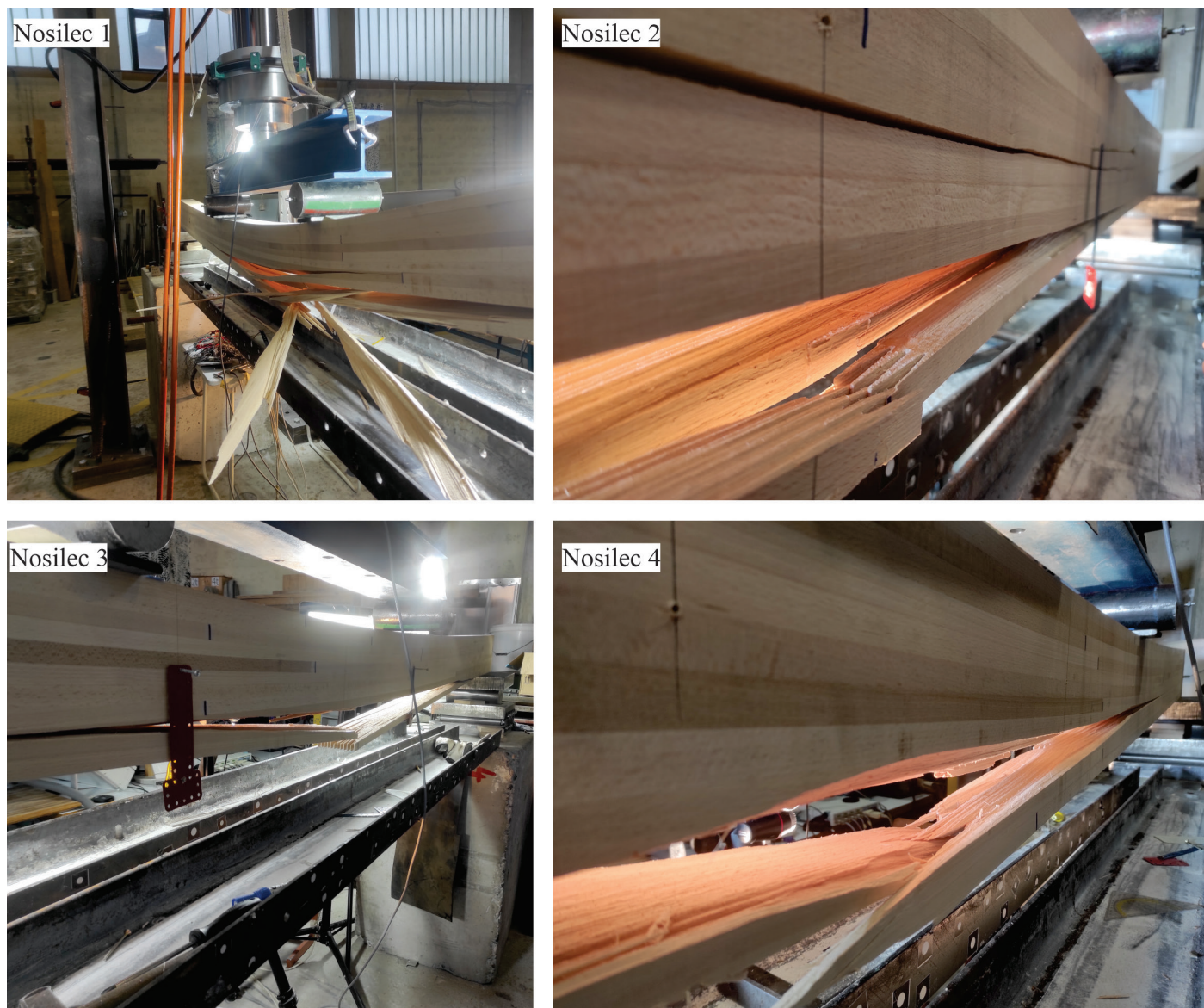
dane posamezne izmerjene vrednosti. Vidimo lahko, da je odstopal en preizkušanelec, in sicer tisti, ki ni imel zobatega spoja v spodnji lameli. S slike 14 pa je viden podoben odziv vseh nosilcev, saj je togost vseh štirih zelo podobna. Najmanjši izmerjeni modul elastičnosti je bil 22.500 N/mm², največji pa 23.500 N/mm², s povprečjem 23.000 N/mm². Podoben odziv je ena izmed prednosti lepljenih nosilcev, saj se z lepljenjem zmanjša vpliv posameznih lokalnih nepravilnosti (grče, povečan odklon vlaken ipd.), ki lahko bistveno vplivajo na mehanski odziv. To se kaže preko manjšega raztrosa mehanskih lastnosti.



Slika 14. Izmerjene krivulje obtežba/navpični pomik na sredini razpona upogibno obremenjenih nosilcev.

Iz oblike krivulje obtežba/pomik je opazen izrazito nelinearen odziv nosilca 1, ki ni imel zobatih spojev v spodnji lameli. Ker smo vertikalne pomike med obremenjevanjem merili na srednji in zadnji strani nosilcev smo lahko opazili, da izmerjena pomika nista bila enaka, saj je prišlo do izbočenja nosilca. Drugi razlog, ki bi lahko vplival na nelinearen potek krivulje pa je možen začetek plastifikacije zgornjega sloja nosilca v tlaku, vendar tega z meritvami nismo zaznali. Porušitve posameznih nosilcev so prikazane na sliki 15.

Če predpostavimo, da je upogibna trdnost porazdeljena po logaritemsko normalni porazdelitvi, določimo 5. centil kot karakteristično upogibno trdnosti, s katero bi lahko nosilce uvrstili v trdnostni razred GL 55. S tem smo dosegli skoraj 40-% izboljšanje upogibnih trdnosti samo s prilagoditvijo geometrije zobatih spojev.



Slika 15. Porušitve vseh štirih nosilcev s 40 mm dolgimi zobatimi spoji. Pri vseh nosilcih je prišlo do začetka porušitve v zobatem spoju, razen pri nosilcu 1.

3 SKLEP

V sklopu raziskave, kjer smo opravili laboratorijske teste različnih geometrij zobatih spojev, ki se uporabljalo pri spajanju desk za izdelavo lameliranih lepljenih nosilcev, smo dokazali, da je uporaba v konstrukcijske namene mogoča in smiselna predvsem, ko potrebujemo visoke nosilnosti pri relativno majhnih prečnih prerezi. V primerjavi z obstoječim stanjem, kjer je mogoča izdelava lepljenih elementov iz lesa iglavcev in topola do trdnostnega razreda GL 32, je z uporabo slovenskega bukovega lesa možno doseči tudi do 70 % višje trdnosti lameliranih lepljenih nosilcev, kar pomeni bistveno izboljšavo. Za doseg višjih trdnosti nosilcev je treba uporabiti prilagojeno geometrijo zobatih spojev, katerih natezna trdnost običajno neposredno omejuje upogibno trdnost lameliranih lepljenih

nosilcev. Pokazali smo, da so lepila, ki se trenutno uporabljajo pri proizvodnji lepljenih konstrukcijskih elementov iz lesa, predvsem iglavcev, ustrezna in nimajo bistvenega vpliva na končne trdnosti tovrstnih elementov.

Bukov les pa vseeno predstavlja izziv za tehnologijo proizvodnje, saj njegova trdota povzroča hitro obrabo strojne opreme (rezkalnih nožev). Množična proizvodnja zato v tej fazi še ni smiselna in glede na manjkajočo evropsko standardizacijo na področju lepljenja konstrukcijskih elementov iz lesa listavcev sploh še ni možna. Tovrstne raziskave pa pripomorejo ravno k povečanju baze podatkov, ki je nujno potrebna pri pripravi standardov in nakazujejo, da je uporaba bukovega lesa smiselna za izdelavo visoko nosilnih konstrukcijskih elementov. Na ta način bukov les, ki je v slovenskih gozdovih zelo dobro zastopan, pridobiva dodano vrednost.

4 DODATEK – RAZLAGA KRATIC

V prispevku so uporabljene naslednje kratice:

- ANOVA – analiza variance,
- MUF – melamin-urea-formaldehid,
- PRF – fenol-resorcinol-formaldehid,
- GP – Grip Pro (lepilo tipa melamin formaldehid).

5 ZAHVALA

Zahvaljujemo se Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije za zagotovitev finančne podpore v sklopu programa P2-0260 in programu Mladi raziskovalci. Zahvala tudi Ministrstvu za izobraževanje, znanost in šport za financiranje projekta TIGR4smart. Posebna zahvala tudi vsem sodelavcem v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani ter Mitji Plosu, Tamari Šuligoj, Žigi Kroflu in Borisu Azinoviču iz Zavoda za gradbeništvo Slovenije.

6 LITERATURA

Aicher, S., Höfflin, L., Behrens, W., A study on tension strength of finger joints in beech wood laminations, *Otto-Graf-Journal*, 12, 169-186, <https://www.researchgate.net/publication/237529522>, 2001.

Aicher, S., Structural Adhesive Joints Including Glued-in Bolts, In S. Thelandersson & H. J. Larsen (Eds.), *Timber Engineering* (pp. 333-363). Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003.

Ehrhart, T., Fink, G., Steiger, R., Frangi, A., Strength grading of European beech lamellas for the production of GLT & CLT, In *International net-work on timber engineering research INTER - Meeting 49*, 29-42, Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/311457058>, 2016.

Ehrhart, T., Steiger, R., Palma, P., Frangi, A., Estimation of the tensile strength of European beech timber boards based on density, dynamic modulus of elasticity and local fibre orientation, *Proceedings of the 2018 World Conference on Timber Engineering*, <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000286967>, 2018a.

Ehrhart, T., Steiger, R., Palma, P., Frangi, A., Mechanical properties of European beech glued laminated timber. Paper 51-12-4., In *International net-work on timber engineering research INTER—meeting 51*, 2018b.

Fortuna, B., Plos, M., Šuligoj, T., Turk, G., Mechanical Properties of Slovenian Structural Beech timber, In *Proceedings of the 2018 World Conference on Timber Engineering*. Seoul, South Korea: World Conference on Timber Engineering, 2018.

Fortuna, B., Azinović, B., Plos, M., Šuligoj, T., Turk, G., Tension strength capacity of finger joined beech lamellas, *European Journal of Wood and Wood Products*, 78(5), 985-994, <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01588-9>, 2020.

Frese, M., Blaß, H. J., Characteristic bending strength of beech glulam, *Materials and Structures*, 40(1), 3-13, <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9117-9>, 2007.

Kovryga, A., Stapel, P., van de Kuilen, J. W. G., Mechanical properties and their interrelationships for medium-density European hardwoods, focusing on ash and beech, *Wood Material Science & Engineering*, 15(5), 289-302, <https://doi.org/10.1080/17480272.2019.1596158>, 2020.

Plos, M., Fortuna, B., Šuligoj, T., Turk, G., Beech as construction wood, In *Common Foundations 2018 - uniSTem: 6th Congress of Young Researchers in the Field of Civil Engineering and Related Sciences*. Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split, <https://doi.org/10.31534/CO/ZT.2018.25>, 2018.

Plos, M., Fortuna, B., Šuligoj, T., Turk, G., From Visual Grading and Dynamic Modulus of European Beech (*Fagus sylvatica*) Logs to Tensile Strength of Boards, *Forests*, 13(1), 77, <https://doi.org/10.3390/f13010077>, 2022.

Repe, A. N., Poljanec, A., Poročilo Zavoda za gozdove Slovenije o gozdovih za leto 2020, Ljubljana, 2021.

Sebera, V., Pečnik, J. G., Azinović, B., Milch, J., Huč, S., Wood-adhesive bond loaded in mode II: Experimental and numerical analysis using elasto-plastic and fracture mechanics models, *Holzforschung*, 75(7), 655-667, <https://doi.org/10.1515/hf-2020-0141>, 2021.

Serrano, E., Mechanical Performance and modelling of Glulam, In S. Thelandersson & H. J. Larsen (Eds.), *Timber Engineering*, 67-79, Chichester: John Wiley & Sons, 2003.

SIST, SIST EN 13183-1:2003 Moisture content of a piece of sawn timber-Part 1: Determination by oven dry method. Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2003.

SIST, SIST EN 408:2010+A1:2012 Lesene konstrukcije - Konstrukcijski les in lepljeni lamelirani les - Ugotavljanje nekaterih fizikalnih in mehanskih lastnosti. Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2012.

SIST, SIST EN 14080:2013 - Lesene konstrukcije - Lepljeni lamelirani les in lepljeni masivni les, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2013.

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, 206-217, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.08.013>, 2015.

Westermayr, M., Stapel, P., van de Kuilen, J.-W., Tensile and Compression Strength of Small Cross Section Beech (*Fagus s.*) Glulam Members. Paper 51-12-4, *International Net-Work on Timber Engineering Research INTER - Meeting 51*, 307-322, 2018.