

# ODREĐIVANJE NOSIVOSTI SPOJEVA DRVENIH DIJELOVA KONSTRUKCIJA

---

**Kovačec, Stjepan**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac  
University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:534462>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-02**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied  
Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

STROJARSKI ODJEL

Stručni Diplomski studij Strojарstva

Stjepan Kovačec

**Određivanje nosivosti spojeva drvenih  
dijelova konstrukcija**

**Determination of load capability of  
wood structure joints**

Diplomski rad

Karlovac, 2024.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

STROJARSKI ODJEL

Stručni Diplomski studij Strojарstva

Stjepan Kovačec

**Određivanje nosivosti spojeva drvenih  
dijelova konstrukcija**

**Determination of load capability of  
wood structure joints**

Diplomski rad

Mentor: Dr.sc. Hoster Josip

Karlovac, 2024.



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
Karlovac University of Applied Sciences


Klasa:  
602-07/\_\_\_01/\_\_\_

Ur.broj:  
2133-61-04-\_\_\_01

Datum:

## ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA

* Ime i prezime	Stjepan Kovačec	
OIB / JMBG		
Adresa		
Tel. / Mob./e-mail		
Matični broj studenta		
JMBAG		
Studij (staviti znak X ispred odgovarajućeg studija)	<input type="checkbox"/> prijediplomski	<input checked="" type="checkbox"/> specijalistički diplomski
Naziv studija	Specijalistički stručni diplomski studij strojarstva	
Godina upisa	2021.	
Datum podnošenja molbe	16.04.2024.	
Vlastoručni potpis studenta/studentice		

* Naslov teme na hrvatskom: <b>Određivanje nosivosti spojeva drvenih dijelova konstrukcija</b>		
* Naslov teme na engleskom: <b>Determination of of load capability of wood structure joints</b>		
Opis zadatka:  U završnom radu opisati utjecajne faktore građe i vrste drveta na njihovu čvrstoću i mehanička svojstva. Prikazati vrste spojeva drvenih dijelova (greda i daske) te vrste ojačanja s njihovim karakteristikama. Odrediti mjerenjem osnovna mehanička svojstva drveta savijanjem u tri točke i cijepanjem. Za odabrane vrste spojeva i vrste drveta odrediti čvrstoću spojeva bez ojačanja. Odrediti mjerenjem minimalne vrijednosti parametara ojačanja spojeva za koje su spojevi jednake čvrstoće kao i osnovni drveni elementi. Zadatak izraditi i uvezati u skladu s Pravilnikom o završnim radovima Veleučilišta u Karlovcu.		
Mentor: 		Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

## **Izjava**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru, dr.sc. Josipu Hosteru na ukazanom povjerenju i savjetima te pomoći tijekom izrade ovog rada. Zahvaljujem se i ostalim profesorima na prenesenom znanju kroz studij.

Zahvaljujem se roditeljima i djevojci na velikoj podršci.

Karlovac 2024

Stjepan Kovačec

## Sažetak

Ovaj rad istražuje nosivost spojeva drvenih konstrukcija, s posebnim naglaskom na ponašanje drva pod različitim vrstama opterećenja, uključujući vlačna, tlačna i torzijska naprezanja. Ispitivanja su provedena na različitim vrstama drva, kao što su jelovina, bukovina i hrastovina, uz primjenu spojeva poput čavala, vijaka i kombiniranih spojeva s tiplama i ljepilom. Rezultati pokazuju kako metalni elementi poput čavala i vijaka znatno povećavaju nosivost spojeva, dok drveni spojevi pojačani ljepilom pružaju veću otpornost na smična i torzijska naprezanja. Uz dodatak metalnih elemenata, drvene konstrukcije postaju otpornije na klimatske uvjete i seizmičke aktivnosti, čineći ih sigurnijima i dugotrajnijim.

Ključne riječi: nosivost spojeva, vlačno ispitivanje, drvene konstrukcije, torzija

## Summary

This study examines the load-bearing capacity of joints in wooden constructions, with a focus on the behavior of wood under different types of stresses, including tensile, compressive, and torsional forces. Tests were conducted on various types of wood, such as fir, beech, and oak, using joints like nails, screws, and combined joints with dowels and glue. The results show that metal elements like nails and screws significantly increase the load capacity of joints, while wooden joints reinforced with glue offer greater resistance to shear and torsional stresses. With the addition of metal elements, wooden structures become more resistant to environmental conditions and seismic activities, making them safer and more durable.

Key words: Bearing capacity of joints, Tensile testing, wooden structures, Torsion

## Sadržaj

1. Uvod .....	1
1.1 Poboljšanja nosivosti spojeva .....	2
1.2 Vanjski uvjeti.....	2
1.3 Sigurnost i jednostavnost.....	3
1.4 Karakteristike drvenih konstrukcija.....	4
2. Zaštita okoliša i proizvodnja CO <sub>2</sub> .....	6
2.1. Emisije CO <sub>2</sub> u izgradnji u odnosu na druge materijale.....	6
3. Upotreba i vrste spojeva kroz povijest.....	9
3.1. Povijest drvenih spojeva konstrukcija i najčešća upotreba u modernoj izgradnji.....	9
3.2. Srednji vijek.....	9
3.3. Industrijska revolucija .....	10
3.4. Najčešća upotreba drvenih spojeva u modernoj izgradnji.....	11
4. Vrste spojeva drvenih konstrukcija.....	12
4.1. Spoj čep-utor.....	12
4.2. Upotreba lijepila kao pojačivača spoja i vrste .....	13
4.2.1. Izbor ljepila u drvenim konstrukcijama: .....	14
4.2.1.1. Vrste, prednosti i nedostaci lijepila .....	15
4.3. Spojevi s čavlima.....	16
4.3.1. Metode spajanja čavlima .....	17
4.4. Vijci i navojne šipke kao spojni elementi.....	18
5.3. Spojna ploča grede.....	23
5. Proračun raznih vrste drveta u uzorku .....	26
5.1. Jelovina.....	26
5.2. Hrastovina kao materijal u gradnji .....	31
5.3. Proračun vijka, čavala i ostalo .....	34
5.3.1. Izračun produljenja i savijanja vijka .....	34
5.4. Izračun produljenja čavla.....	38
5.5. Smično naprezanje.....	39
6. Vlačno ispitivanje priprema, postupak i rezultati .....	42
6.1. Rezultati.....	45
7. Torzijsko ispitivanje.....	54
8. Zaključak.....	62
Literatura .....	63



## Popis slika

Slika 1. Upotreba čeličnih okvira [3] .....	3
Slika 2. Posljedice potresa 1880. [25] .....	5
Slika 3. Postupak upijanja CO <sub>2</sub> [26].....	6
Slika 4. Primitivni spoj užetom [3] .....	10
Slika 5. Čavao kao element za spajanje poslije industrijske revolucije [13] .....	10
Slika 6. Moderna konstrukcija krova s elementima strojarstva [19].....	11
Slika 7. Spoj čep-utor [4] .....	12
Slika 8. „Leptir“ utor i čep, prikaz raspodjele ljepila kao pojačivača [4] .....	14
Slika 9. Vrlo popularna „epoxy smola“ spoj u kojem je korišteno samo ljepilo [1] .....	16
Slika 10. Vijci DIN 571 [24] .....	19
Slika 11. DIN 7505 [24] .....	20
Slika 12. DIN 7982 [24].....	21
Slika 13. DIN 975 [24].....	21
Slika 14. Nosivost navojne šipke promjera 12mm [11] .....	22
Slika 15. Specijalni Torx vijak za grede [24] .....	23
Slika 16. Hookeov zakon .....	34
Slika 17. Uzorci za vlačno ispitivanje .....	42
Slika 18. Spoj uzorka na ispitni sustav .....	43
Slika 19. Skica vlačnog ispitivanja .....	44
Slika 20. Izdržana sila za čavao 50x2,5mm .....	45
Slika 21. Izdržana sila za čavao 70x3,1mm .....	45
Slika 22. Izdržana sila za čavao 100x4,1mm .....	46
Slika 23. Izdržana sila za vijak 4x50mm.....	47
Slika 24. Izdržana sila za vijak 5x50mm.....	48
Slika 25. Izdržana sila za vijak 6x50mm.....	48
Slika 26. Izdržana sila za vijak 8x50mm.....	49
Slika 27. Izdržana sila za vijak 10x50mm.....	49
Slika 28. Deformacija rupe u drvetu pod djelovanjem sile .....	51
Slika 29. Izdržana sila za drvenu tiplu 8x50mm, bez ljepila.....	51
Slika 30. Izdržana sila za spoj češ-utor i tiplu 8x50mm, bez ljepila .....	52
Slika 31. Izdržana sila za čep-utor i tiplu 8x50mm sa ljepilom .....	52
Slika 32. Skica torzijskog ispitivanja .....	54
Slika 33. Uzorci za torzijsko ispitivanje.....	55
Slika 34. Izdržana sila za čavao 50x2.5mm: Torzijsko ispitivanje.....	56
Slika 35. Izdržana sila za čavao 70x3.1mm: Torzijsko ispitivanje.....	56
Slika 36. Izdržana sila za čavao 100x4.1mm: Torzijsko ispitivanje .....	57
Slika 37. Izdržana sila za vijak 4x50mm: Torzijsko ispitivanje.....	57
Slika 38. Izdržana sila za vijak 6x60mm: Torzijsko ispitivanje.....	58
Slika 39. Izdržana sila za vijak 8x50mm: Torzijsko ispitivanje.....	59
Slika 40. Izdržana sila za vijak 10x 50mm: Torzijsko ispitivanje.....	59
Slika 41. Izdržana sila za T pločicu mm, sa 3 vijaka 5x50mm: Torzijsko ispitivanje. ....	60

## Popis Tablica

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

- I. Radionički nacrt 01/03 (uzorak vlačnog ispitivanja)
- II. Radionički nacrt 02/03 (Spojna ploča)
- III. Radionički nacrt 03/03 (Uzorak torzijskog ispitivanja)

## POPIS OZNAKA

<b>Oznaka</b>	<b>Mjerna jedinica</b>	<b>Opis</b>
$A$	mm	Površina presjeka
$F$	N	Sila
$T$	Nm	Moment torzije
$r$	mm	Polumjer elementa
$J$	mm <sup>4</sup>	Polarni moment inercije
$\sigma$	MPa	Naprezanje
$E$	GPa	Modul elastičnosti
$L_0$	mm	Početna duljina
$\Delta L$	mm	Produljenje
$M$	Nm	Moment savijanja
$\tau$	Nm	Moment torzije
$c$	mm	Udaljenost od neutralne osi
$I$	mm <sup>4</sup>	Moment inercije
$\sigma_t$	MPa	Tlačna čvrstoća
$\sigma_v$	MPa	Vlačna čvrstoća
$F_m$	N	Maksimalna sila
$F_S$	N	Smična sila
$L$	mm	Duljina elementa
$D$	mm	Duljina elementa
$\sigma_l$	MPa	Napon loma
$M_m$	Nm	Maksimalni moment savijanja
$F_l$	N	Maksimalna sila pri lomu

## 1. Uvod

Nosivost spojeva drvenih dijelova konstrukcija predstavlja jedno od ključnih pitanja u području građevinarstva, posebice kod izgradnje drvenih konstrukcija. Drvene konstrukcije se koriste stoljećima zahvaljujući dostupnosti materijala, lakoći obrade i estetskoj privlačnosti. Međutim, kako bi se osigurala dugovječnost i sigurnost takvih konstrukcija, ključno je razumjeti i precizno odrediti nosivost spojeva koji povezuju različite drvene elemente.

Spojevi u drvenim konstrukcijama mogu biti izvedeni na različite načine, uključujući tradicionalne metode poput upotrebe klinova i čavala, te modernije pristupe koji koriste vijčane spojeve, ljepila ili metalne spojne ploče. Svaka od ovih metoda ima svoje specifičnosti, prednosti i ograničenja, a njihova primjena ovisi o mnogim čimbenicima, uključujući vrstu drva, opterećenja koja će konstrukcija trpjeti, klimatske uvjete i estetske zahtjeve.

Određivanje nosivosti spojeva drvenih dijelova je složen proces koji obuhvaća teorijska znanja, laboratorijska ispitivanja i praktična iskustva. U teorijskom smislu, nosivost se često izračunava korištenjem formula koje uzimaju u obzir svojstva drva, geometriju spoja i vrstu opterećenja. Međutim, budući da drvo kao materijal pokazuje znatne varijacije u svojim mehaničkim svojstvima ovisno o vrsti, starosti, vlažnosti i smjeru vlakana, laboratorijska ispitivanja su neophodna kako bi se dobili precizniji podaci.

Laboratorijska ispitivanja obično uključuju testiranje uzoraka spojeva na vlačnu, tlačnu i savojnu čvrstoću. Tijekom ispitivanja, uzorci se podvrgavaju postupnom povećanju opterećenja dok ne dođe do sloma. Maksimalna sila koja uzrokuje slom koristi se za izračunavanje naprezanja i određivanje nosivosti spoja. Vlačna čvrstoća mjeri sposobnost spoja da izdrži rastezajuće sile, tlačna čvrstoća ispituje otpornost na pritisak, dok savojna čvrstoća određuje koliko spoj može podnijeti savijanje.

Osim laboratorijskih ispitivanja, u praksi se često koriste empirijske formule i normativi koji su razvijeni na temelju dugogodišnjeg iskustva u radu s drvenim konstrukcijama. Europski standardi, poput Eurocode 5, daju detaljne smjernice za projektiranje drvenih konstrukcija, uključujući preporuke za dimenzioniranje spojeva. Ovi standardi uzimaju u obzir različite faktore sigurnosti i pružaju okvir za procjenu nosivosti na temelju karakterističnih vrijednosti čvrstoće drva i spojeva. [8]

Primjer razlika u nosivosti spojeva između različitih vrsta drva može se ilustrirati usporedbom borovine i hrastovine. Borovina, koja je mekše i lakše drvo, pokazuje niže vrijednosti tlačne, vlačne i savojne čvrstoće u usporedbi s hrastovinom, koja je tvrđa i gušća. Ove razlike se odražavaju i na spojeve: spojevi u hrastovini će općenito moći podnijeti veća opterećenja nego oni u borovini, čime se potvrđuje važnost odabira odgovarajuće vrste drva za određene konstruktivne zahtjeve.

Osim mehaničkih svojstava, na nosivost spojeva utječe i vrsta i kvaliteta spojnog materijala. Kvaliteta vijaka, čavala, ljepila ili metalnih spojnih ploča može značajno

utjecati na ukupnu nosivost spoja. Na primjer, vijci izrađeni od visokokvalitetnog čelika i pravilno postavljeni mogu značajno povećati nosivost spojeva, dok loša kvaliteta ili nepravilna instalacija mogu dovesti do prerane degradacije i smanjenja nosivosti.

Konačno, uvjeti okoliša igraju ključnu ulogu u dugoročnom ponašanju spojeva drvenih konstrukcija. Vlažnost zraka, temperaturne varijacije i izloženost vodi ili UV zračenju mogu uzrokovati promjene u dimenzijama drva, što može utjecati na naprezanja unutar spojeva i njihovu trajnost. Stoga je pri projektiranju i izvedbi drvenih konstrukcija neophodno uzeti u obzir ove faktore i osigurati odgovarajuću zaštitu i održavanje konstrukcije određivanje nosivosti spojeva drvenih dijelova konstrukcija predstavlja kompleksan zadatak koji zahtijeva integraciju teorijskih znanja, eksperimentalnih podataka i praktičnih iskustava. Različiti faktori, uključujući vrstu drva, kvalitetu spojnih materijala, U današnje vrijeme, s povećanim interesom za održivu gradnju i korištenje prirodnih materijala, razumijevanje nosivosti drvenih spojeva postaje još važnije, osiguravajući da drvene konstrukcije budu ne samo estetski privlačne, već i sigurne i pouzdane.

### 1.1 Poboljšanja nosivosti spojeva

Dodavanje strojarskih elemenata kao što su čavli, vijci, metalni profili i ploče u svrhu ojačanja spojeva drvenih dijelova konstrukcija ima ključnu važnost u građevinarstvu i stolarskim radovima. Prvi i najvažniji razlog je povećanje čvrstoće i stabilnosti. Korištenjem čavala, vijaka i metalnih profila, spojevi drvenih konstrukcija postaju znatno čvršći i stabilniji. To je posebno važno u zgradama i konstrukcijama koje su izložene velikim opterećenjima i dinamičkim silama, gdje je neophodno osigurati dugotrajnu otpornost na različite vrste opterećenja.

Drugi bitan aspekt je distribucija opterećenja. Metalni elementi pomažu u ravnomjernijoj distribuciji opterećenja preko spojeva. Time se smanjuje rizik od lokaliziranih naprezanja koja mogu uzrokovati pucanje ili deformaciju drvenih dijelova. Drvo, kao prirodni materijal, ima svoje granice u pogledu nosivosti, a metalni spojevi omogućuju optimalno iskorištavanje tih svojstava bez ugrožavanja integriteta konstrukcije.

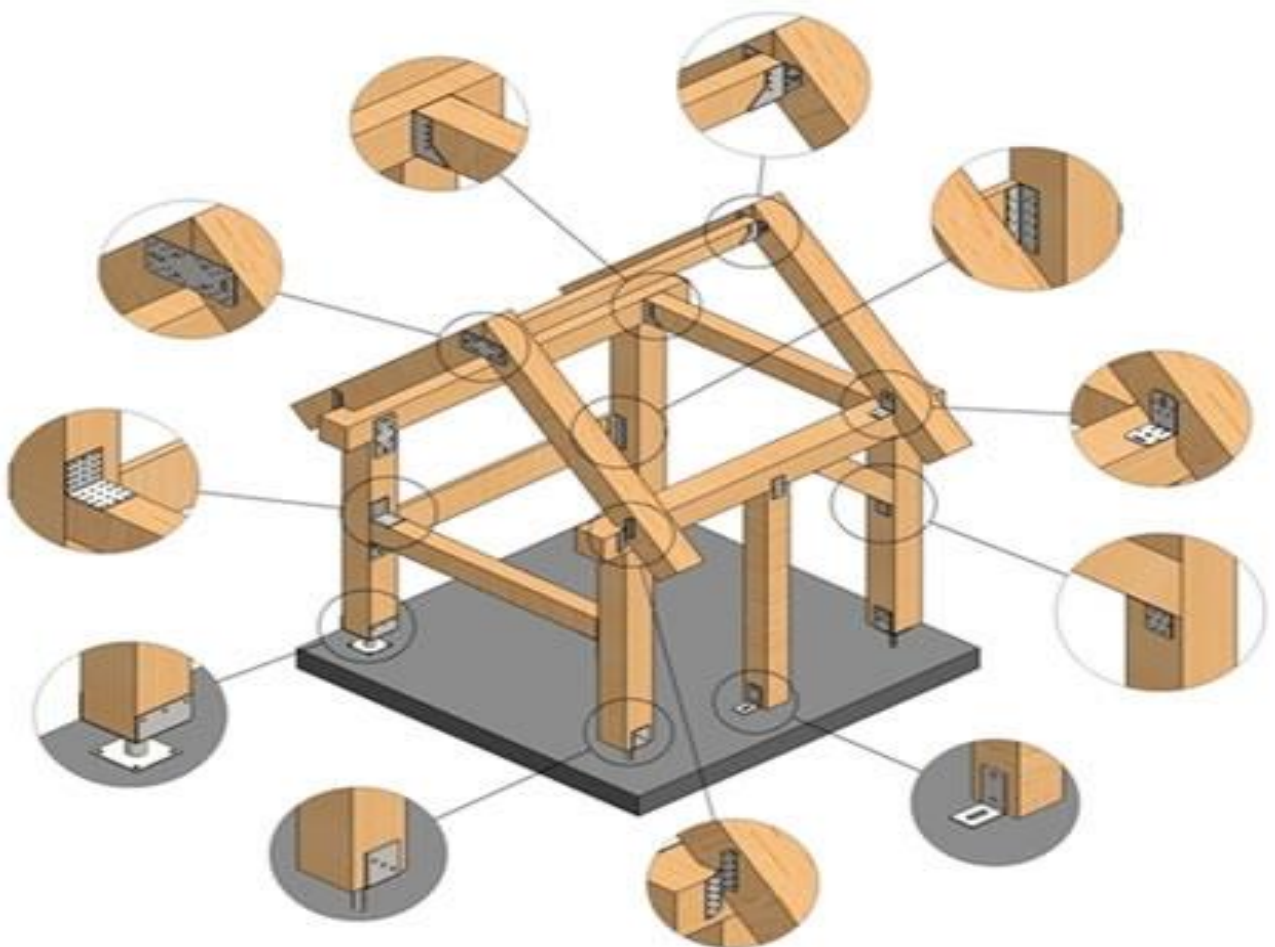
### 1.2 Vanjski uvjeti

Otpornost na klimatske uvjete također je značajan faktor. Dodavanje metalnih elemenata može povećati otpornost drvenih spojeva na promjene u vlažnosti i temperaturi. Drvo se širi i skuplja pod utjecajem vlage, što može dovesti do slabljenja spojeva. Metalni spojevi, s druge strane, su manje podložni ovim promjenama, čime pomažu održati stabilnost i čvrstoću konstrukcije u različitim klimatskim uvjetima. Povećana dugotrajnost drvenih konstrukcija još je jedna prednost. Korištenje metalnih elemenata može produžiti životni vijek konstrukcija, smanjujući rizik od oštećenja zbog habanja, vlage i bioloških čimbenika kao što su insekti i gljivice. Metalni spojevi pružaju dodatnu zaštitu drvenim elementima, osiguravajući da konstrukcija ostane funkcionalna i sigurna tijekom dugog vremenskog razdoblja.

### 1.3 Sigurnost i jednostavnost

Jednostavnost i brzina montaže također su važni aspekti. Strojarski elementi omogućuju bržu i jednostavniju montažu drvenih konstrukcija. Čavli i vijci omogućuju brže spajanje u usporedbi s tradicionalnim metodama kao što su drveni klinovi ili ljepila, što je posebno korisno u situacijama gdje je potrebno brzo izgraditi ili popraviti strukture. Fleksibilnost dizajna koju omogućuju metalni profili i ploče također je značajna. Upotreba ovih elemenata može omogućiti složenije oblike i strukture koje bi bilo teško ili nemoguće ostvariti samo drvetom. Metalni elementi otvaraju nove mogućnosti u arhitektonskom dizajnu, omogućujući stvaranje inovativnih i estetski privlačnih građevina. Kao što su kutni profili kao na slici 1.

Sigurnost je još jedan ključni faktor. Metalni elementi značajno povećavaju sigurnost drvenih konstrukcija, smanjujući rizik od kolapsa ili drugih strukturnih problema. Ovo je posebno važno u zgradama koje moraju zadovoljiti stroge sigurnosne standarde, kao što su javne zgrade, škole i bolnice. Iako dodavanje metalnih elemenata može povećati početne troškove, dugoročno se mogu ostvariti uštede zahvaljujući smanjenju potreba za održavanjem i popravcima. Kvalitetni metalni spojevi osiguravaju dugotrajnu stabilnost i otpornost konstrukcija, što smanjuje ukupne troškove vlasništva i održavanja.



Slika 1. Upotreba čeličnih okvira [3]

## 1.4 Karakteristike drvenih konstrukcija

Drvene konstrukcije imaju niz specifičnih karakteristika koje ih čine prepoznatljivim i široko korištenim u građevinarstvu. Evo nekih ključnih karakteristika drvenih konstrukcija:

1. Lakoća materijala: Drvo je relativno lagano u usporedbi s drugim građevinskim materijalima poput betona i čelika. To čini drvene konstrukcije lakšima za transport i montažu.
2. Visoka nosivost u odnosu na težinu: Drvo ima dobar omjer čvrstoće i težine, što znači da može podnijeti značajna opterećenja u odnosu na svoju težinu. To je posebno korisno u strukturama gdje je važno minimizirati težinu, poput mostova i visokih zgrada.
3. Ekološka održivost: Drvo je obnovljiv materijal, i kada se pravilno upravlja, može se kontinuirano koristiti bez značajnog negativnog utjecaja na okoliš. Također, drvo pohranjuje ugljični dioksid, što pomaže u smanjenju ukupnog ugljičnog otiska građevine.
4. Toplinska izolacija: Drvo ima dobre izolacijske karakteristike, što znači da pomaže u održavanju unutarnje temperature zgrada. To može smanjiti potrebu za dodatnim grijanjem ili hlađenjem, čime se povećava energetska učinkovitost.
5. Estetika: Drvo je vizualno privlačan materijal koji može pružiti topao, prirodan izgled. To ga čini popularnim izborom u stambenim i komercijalnim građevinama gdje je estetski aspekt važan.
6. Jednostavna obrada i prilagodljivost: Drvo se lako obrađuje alatima, što omogućava brzu i jednostavnu gradnju. Također, drvene konstrukcije se mogu lako prilagoditi i proširiti prema potrebama.
7. Osjetljivost na vlagu i štetočine: Iako se drvo može tretirati protiv ovih čimbenika, ono je prirodno podložno truljenju, plijesni, i oštećenjima od insekata kao što su termite. Pravilna zaštita i održavanje su nužni kako bi drvene konstrukcije dugo trajale.
8. Ograničen vijek trajanja: U usporedbi s nekim drugim materijalima, drvo ima ograničen vijek trajanja, posebno ako nije pravilno zaštićeno od vremenskih uvjeta i štetočina.
9. Otpornost na požar: Drvo je zapaljivo, što predstavlja potencijalni rizik u slučaju požara. Međutim, masivno drvo ima sposobnost da formira zaštitni sloj ugljena na površini, koji usporava daljnju degradaciju.



10. Otpornost na seizmička opterećenja: Zbog svoje fleksibilnosti i elastičnosti, drvo se dobro ponaša pod seizmičkim opterećenjima, što ga čini pogodnim za gradnju u područjima sklonim potresima.

Drvene konstrukcije bolje podnose potrese zbog kombinacije fleksibilnosti, niske mase i sposobnosti apsorpiranja i redistribuiranja sila. Drvo, kao prirodno fleksibilan i lagan materijal, može se savijati pod pritiskom bez pucanja, što je ključno kada zgrade trpe snažne horizontalne sile tijekom potresa. Mehanički spojevi u drvenim konstrukcijama omogućuju određeni stupanj gibanja između elemenata, smanjujući koncentraciju stresa na kritičnim točkama i omogućujući strukturi da se prilagodi pokretima tla. Također, drvene konstrukcije imaju visok omjer čvrstoće i težine, što im omogućuje da podnesu sile potresa bez gubitka strukturne integriteta, čime se smanjuje rizik od ozbiljnih oštećenja ili rušenja.

Kada je potres pogodio Zagreb 1880. godine, zgrade izgrađene od drveta pokazale su se otpornijima od onih građenih od opeke ili kamena. Drvene kuće bolje su podnijele potres jer su bile fleksibilnije i lakše, što im je omogućilo da apsorbiraju i raspodjele seizmičke sile bez ozbiljnih oštećenja. Dok su se zgrade od krutih materijala, poput opeke i kamena, lakše rušile pod pritiskom horizontalnih sila potresa, drvene kuće su se zahvaljujući svojoj prirodnoj sposobnosti da se savijaju i prilagođavaju pokretima tla bolje oduprle rušenju. Također, njihova relativno niska masa smanjila je inercijske sile koje djeluju na konstrukciju tijekom potresa, čime su ove kuće pretrpjele manje štete u usporedbi s težim, manje fleksibilnim građevinama. Ova otpornost drvenih kuća bila je jedan od ključnih faktora koji su doprinijeli njihovom opstanku tijekom zagrebačkog potresa 1880. godine. Na slici 2. ispod možemo vidjeti posljedice tog potresa, vidljivo je kako je zid od opeke potpuno stradao, a drvena konstrukcija krova stoji bez potpora. [25]

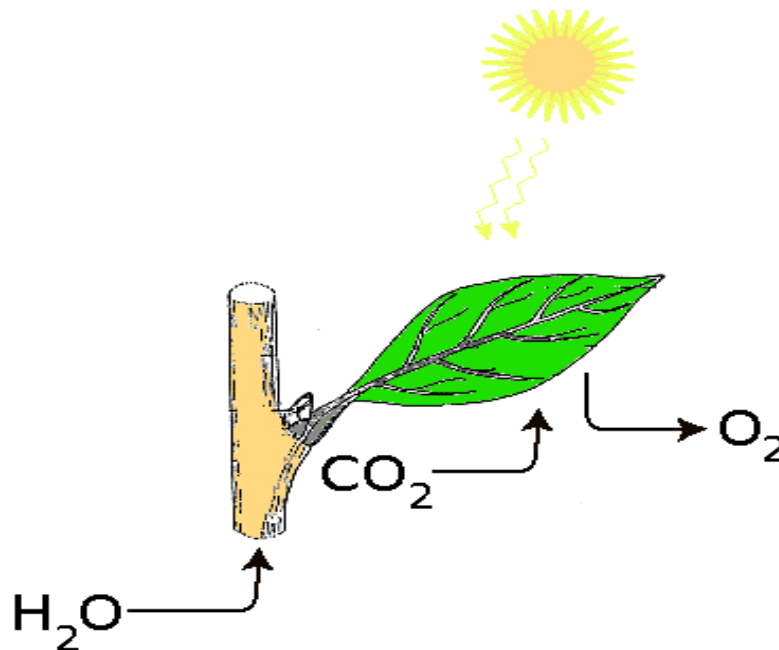


Slika 2. Posljedice potresa 1880. [25]

## 2. Zaštita okoliša i proizvodnja CO<sub>2</sub>

Proizvodnja CO<sub>2</sub> kod proizvodnje drvenog građevinskog materijala znatno je manja u usporedbi s drugim građevinskim materijalima poput betona i čelika. Drvo je prirodni materijal koji tijekom svog rasta apsorbira ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>) iz atmosfere, skladišteći ga u svojoj strukturi. Ovaj proces fotosinteze čini drvo ugljično neutralnim materijalom, jer stablo tijekom svog života apsorbira više CO<sub>2</sub> nego što se oslobađa tijekom njegove prerade u građevinski materijal. Iako se određena količina CO<sub>2</sub> oslobađa tijekom sječe, transporta i obrade drva u gotove proizvode, ta je količina relativno mala u usporedbi s emisijama koje nastaju pri proizvodnji drugih građevinskih materijala. Proizvodnja betona i čelika zahtijeva intenzivne procese koji emitiraju velike količine CO<sub>2</sub>, uključujući visoke temperature i kemijske reakcije, dok obrada drva uglavnom uključuje manje energetske zahtjevne procese poput rezanja, sušenja i obrade.

Štoviše, kada se drvo koristi u građevini, ono nastavlja skladištiti CO<sub>2</sub>, smanjujući ukupnu količinu ovog stakleničkog plina u atmosferi. Zbog toga se drvo smatra jednim od najodrživijih građevinskih materijala s obzirom na njegov nizak ugljični otisak i pozitivnu ulogu u smanjenju emisija CO<sub>2</sub>. Fotosinteza nam pokazuje proces upijanja CO<sub>2</sub> na slici 3. [22]



Slika 3. Postupak upijanja CO<sub>2</sub> [26]

### 2.1. Emisije CO<sub>2</sub> u izgradnji u odnosu na druge materijale

Za usporedbu emisije CO<sub>2</sub> pri proizvodnji jednog kubičnog metra drvenih jelovih gredica dimenzija 12x14 cm s proizvodnjom jednog kubičnog metra betona i 1 kubičnog

metra opeke možemo koristiti prosječne vrijednosti emisije CO<sub>2</sub> koje su dostupne za te materijale.

Drvene jelove gredice (1 m<sup>3</sup>):

- Prosječna emisija CO<sub>2</sub>: Prilikom proizvodnje jednog kubičnog metra drvenih jelovih gredica, uključujući sječu, transport i obradu, emisija CO<sub>2</sub> iznosi otprilike 30-50 kg CO<sub>2</sub>.
- Skladištenje CO<sub>2</sub>: Međutim, tijekom svog rasta, drvo apsorbira i skladišti ugljični dioksid. Jedan kubični metar drva može pohraniti oko 700-900 kg CO<sub>2</sub>. Dakle, u konačnici, drvo ima pozitivan učinak na okoliš jer skladišti znatno više CO<sub>2</sub> nego što se emitira tijekom njegove proizvodnje.

Beton (1 m<sup>3</sup>):

- Prosječna emisija CO<sub>2</sub>: Proizvodnja jednog kubičnog metra betona (sastavljenog od cementa, agregata i vode) emitira značajno više CO<sub>2</sub>. Ovisno o recepturi i korištenim materijalima, emisija može varirati, ali prosječno se kreće oko 200-300 kg CO<sub>2</sub> po kubičnom metru betona.
- Glavni izvor emisije: Cement, koji je glavni vezivni materijal u betonu, odgovoran je za većinu emisija jer se tijekom proizvodnje cementa oslobađaju velike količine CO<sub>2</sub> uslijed kemijskih reakcija i potrošnje energije.

Opeka (1 m<sup>3</sup>):

- Prosječna emisija CO<sub>2</sub>: Proizvodnja jednog kubičnog metra opeke, koja uključuje ekstrakciju gline, oblikovanje, sušenje i pečenje, generira emisiju CO<sub>2</sub> koja se obično kreće između 150 i 200 kg CO<sub>2</sub> po kubičnom metru. Ove brojke mogu varirati ovisno o tehnologiji peći, vrsti goriva korištenom za pečenje i energetske učinkovitosti procesa.
- Glavni izvor emisije: Većina emisije CO<sub>2</sub> tijekom proizvodnje opeke dolazi iz procesa pečenja, gdje se glina zagrijava na vrlo visoke temperature (oko 900-1000 °C) kako bi se očvrstnula. Taj proces zahtijeva puno energije, a ako se koriste fosilna goriva, to značajno doprinosi emisijama CO<sub>2</sub>.

Usporedba:

- Drvo (1 m<sup>3</sup>): 30-50 kg CO<sub>2</sub> (s tim da drvo skladišti CO<sub>2</sub>),
- Opeka (1 m<sup>3</sup>): 150-200 kg CO<sub>2</sub>,
- Beton (1 m<sup>3</sup>): 200-300 kg CO<sub>2</sub>.

Proizvodnja opeke emitira više CO<sub>2</sub> nego proizvodnja drvenih gredica, ali manje nego proizvodnja betona. Iako opeka ne može skladištiti CO<sub>2</sub> poput drva, njena emisija je niža nego kod betona. Međutim, zbog visokih temperatura potrebnih za pečenje opeke, njen ugljični otisak je i dalje značajan, čime ju svrstava u sredinu između drva i betona u smislu emisije CO<sub>2</sub> po kubičnom metru.

Usporedba emisije CO<sub>2</sub> za izradu kuće od različitih materijala – drveta, armiranog betona i opeke postaje značajno veća kad se radi o konstrukciji kao cjelini.

### 1. Drvena kuća:

-Prosječna emisija CO<sub>2</sub>: Za drvenu kuću, emisija CO<sub>2</sub> je relativno niska. Ovisno o veličini kuće i upotrijebljenim materijalima, ukupna emisija može biti u rasponu od 20 do 50 tona CO<sub>2</sub> za izgradnju standardne kuće. Međutim, važno je napomenuti da drvo tijekom svog rasta pohranjuje značajne količine CO<sub>2</sub>, često više nego što se emitira tijekom cijelog ciklusa izgradnje kuće. To znači da drvene kuće mogu imati čak i negativan ugljični otisak, tj. više CO<sub>2</sub> ostane pohranjeno nego što se emitira.

### 2. Kuća od armiranog betona:

- Prosječna emisija CO<sub>2</sub>: Izgradnja kuće od armiranog betona ima najviši ugljični otisak među ove tri vrste konstrukcije. Proizvodnja cementa, čelika za armiranje i betoniranje zahtijeva puno energije i stvara velike količine CO<sub>2</sub>. Ukupna emisija za tipičnu kuću može biti u rasponu od 80 do 120 tona CO<sub>2</sub>. Ove brojke mogu biti veće ovisno o veličini kuće i količini upotrijebljenog betona.

### 3. Kuća od opeke:

- Prosječna emisija CO<sub>2</sub>: Kuća od opeke emitira više CO<sub>2</sub> nego drvena kuća, ali manje nego kuća od armiranog betona. Proizvodnja opeke zahtijeva visoke temperature, što rezultira značajnim emisijama CO<sub>2</sub>. Ukupna emisija za izgradnju kuće od opeke može biti u rasponu od 50 do 80 tona CO<sub>2</sub>, ovisno o količini korištene opeke i vrsti vezivnog materijala (npr. cementni mort).

Odabir drvene konstrukcije predstavlja najodrživiju opciju u smislu emisije CO<sub>2</sub>, dok armirani beton ima najveći negativni utjecaj na okoliš zbog svoje visoke emisije stakleničkih plinova tijekom proizvodnje. Opeka se nalazi između ove dvije opcije, s ugljičnim otiskom koji je viši od drva, ali niži od betona.

### 3. Upotreba i vrste spojeva kroz povijest

#### 3.1. Povijest drvenih spojeva konstrukcija i najčešća upotreba u modernoj izgradnji

Drveni spojevi imaju dugu i bogatu povijest koja seže tisućama godina unazad, od prapovijesti do današnjih dana. Drvo je kao građevinski materijal uvijek bilo cijenjeno zbog svoje dostupnosti, obradivosti i izvanrednih mehaničkih svojstava. S razvojem civilizacija, razvijale su se i tehnike spajanja drvenih elemenata, omogućujući sve složenije i trajnije konstrukcije. U ovom eseju istražiti ćemo povijest drvenih spojeva i njihovu primjenu u modernoj izgradnji. U antičkim civilizacijama, poput Egipta, Grčke i Rima, drvo je bilo ključan materijal za izgradnju različitih struktura, uključujući hramove, mostove, brodove i kuće. Stari Egipćani koristili su drvo za izradu složenih struktura poput hramova i grobnica, dok su Grci i Rimljani koristili drvo za izgradnju brodova, mostova i zgrada. Spojevi koji su se koristili u to doba bili su jednostavni, poput preklopnih spojeva i čepova i rupa, omogućavajući stabilne i čvrste veze između drvenih elemenata. Ovi spojevi omogućili su izgradnju struktura koje su bile otporne na opterećenja i vremenske uvjete, što je bilo ključno za dugovječnost tih građevina.

#### 3.2. Srednji vijek

Tijekom srednjeg vijeka, upotreba drvenih spojeva doživjela je značajan napredak, posebice u Europi. Razvijene su tehnike gradnje drvenih okvira (timber framing), koje su omogućavale izgradnju velikih i složenih struktura poput katedrala, dvoraca i građevina od javnog značaja. Čepovi i rupe postali su standardni način spajanja drvenih elemenata, a gotovo svaka srednjovjekovna drvena zgrada koristila je ove spojeve. Ovi spojevi omogućavali su izgradnju visokih i stabilnih struktura koje su mogle podnijeti velika opterećenja. Također, u ovom razdoblju počelo se više pažnje posvećivati estetskoj komponenti drvenih spojeva, što je doprinijelo razvoju dekorativnih elemenata u drvenim konstrukcijama.

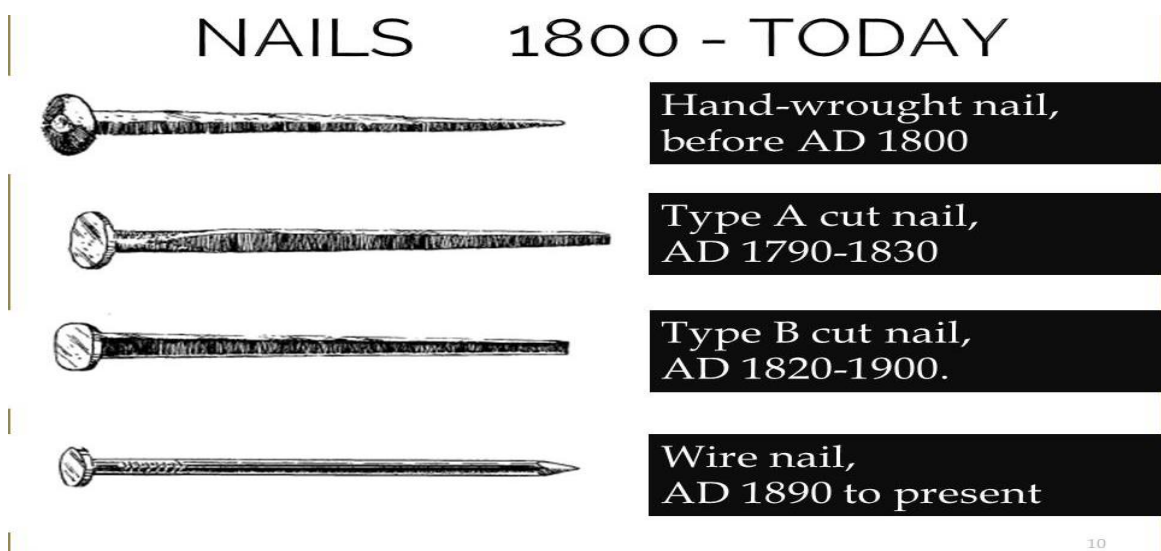
Tijekom renesanse i baroka, drvene konstrukcije postale su još sofisticiranije. Drvodjelci su razvili razne ukrasne tehnike i složene spojeve, što je omogućilo izgradnju estetski privlačnih i funkcionalnih struktura. Drveni mostovi, krovne konstrukcije i brodovi izgrađeni tijekom ovog razdoblja često su sadržavali složene spojeve, uključujući različite vrste čepova i rupa, preklopne spojeve i ponekad metalne spojnice. Ovi spojevi omogućavali su veću fleksibilnost u dizajnu i veću otpornost na opterećenja. Renesansni i barokni majstori drvodjelci usavršili su tehnike koje su omogućile izradu zgrada i namještaja koji su se odlikovali ne samo funkcionalnošću, već i izuzetnom estetikom. Pokazuju veliki napredak od jednostavnih i primitivnih spojeva prikazanih na slici 4..



Slika 4. Primitivni spoj užetom [3]

### 3.3. Industrijska revolucija

Industrijska revolucija donijela je promjene u načinu gradnje drvenih konstrukcija. Pojavom industrijske proizvodnje i novih materijala poput čelika i betona, drvene konstrukcije počele su koristiti kombinaciju tradicionalnih drvenih spojeva i novih metalnih spojnice. Metalni vijci, čavli i spojnice postali su uobičajeni, što je omogućilo bržu i jeftiniju izgradnju. Ovi novi materijali i tehnike omogućili su izgradnju većih i složenijih struktura s poboljšanom čvrstoćom i dugovječnošću. Također, industrijska revolucija je donijela standardizaciju građevinskih elemenata, što je omogućilo veću preciznost i dosljednost u gradnji. Prikaz napretka na slici 5.. [13]



Slika 5. Čavao kao element za spajanje poslije industrijske revolucije [13]

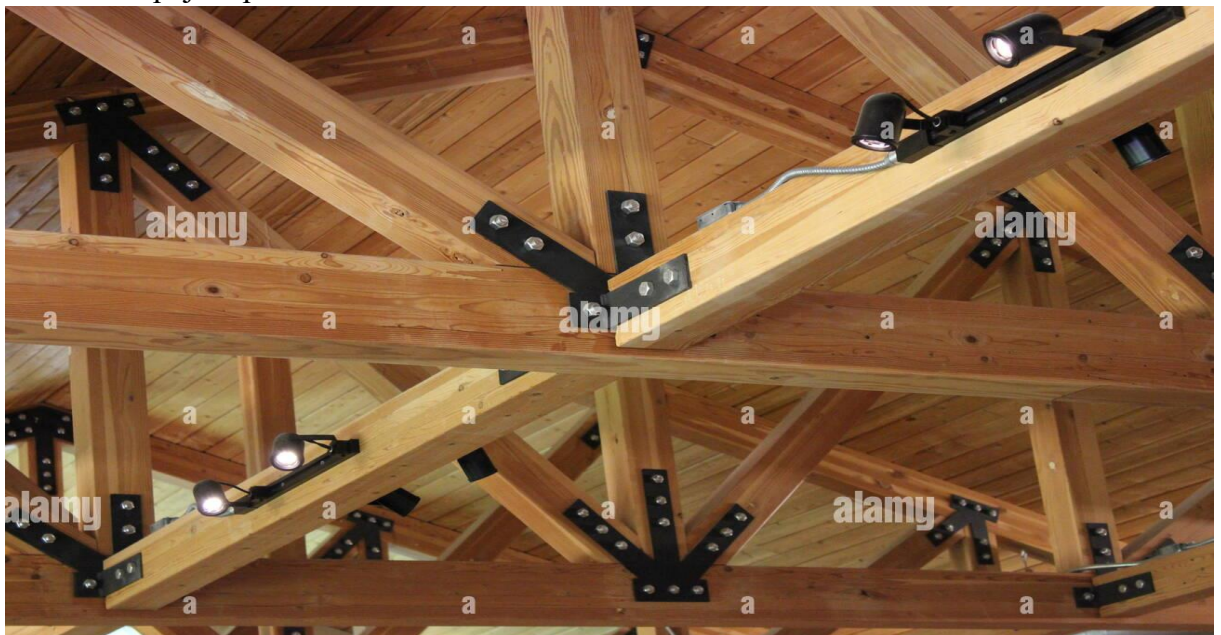


### 3.4. Najčešća upotreba drvenih spojeva u modernoj izgradnji

U modernoj izgradnji, drvo se i dalje koristi zbog svoje ekološke prihvatljivosti, estetske privlačnosti i mehaničkih svojstava. Upotreba drvenih spojeva u modernoj izgradnji kombinira tradicionalne tehnike s novim tehnologijama i materijalima. Drvo se često koristi u izgradnji stambenih zgrada, posebno u okvirima (timber framing). Spojevi poput preklopnih spojeva, čepova i rupa, te spojeva vijcima i čavlima su uobičajeni u ovim konstrukcijama. Osim toga, ljepilo se često koristi za osiguranje dodatne čvrstoće. Drveni spojevi omogućuju izgradnju stabilnih i trajnih stambenih objekata koji su ekološki održivi i estetski privlačni. U stambenoj izgradnji, drveni spojevi omogućuju brzu i ekonomičnu gradnju, te pružaju dobre izolacijske karakteristike.

Drvene kuće i kabine često koriste jednostavne spojeve poput preklopnih spojeva i spojeva ljepilom. Metalne spojnice se također koriste za dodatnu stabilnost, posebno u seizmički aktivnim područjima. Ovi spojevi omogućuju brzu i jednostavnu izgradnju drvenih kuća i kabina koje su funkcionalne i estetski privlačne. Drvene kuće pružaju toplinu i prirodni ugođaj, a spojevi su dizajnirani da osiguraju otpornost na različite vremenske uvjete. Izrada namještaja jedna je od najvažnijih primjena drvenih spojeva. Stolari koriste razne spojeve, uključujući čepove i rupe, preklopne spojeve, vijke i ljepilo, kako bi osigurali čvrstoću i estetsku privlačnost. Drveni namještaj izrađen s pažljivo odabranim spojevima može trajati generacijama i pruža visoku funkcionalnost i ljepotu. Namještaj izrađen tradicionalnim tehnikama često ima visoku estetsku vrijednost i izdržljivost.

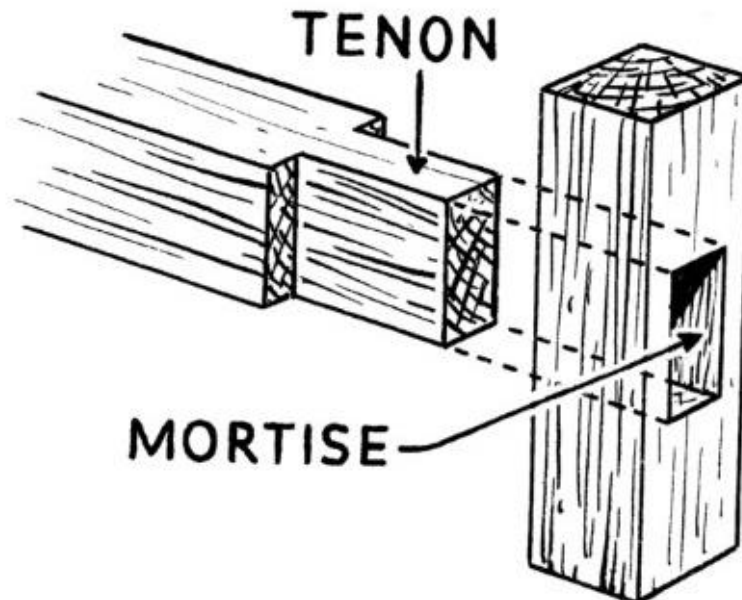
Krovne konstrukcije često koriste kombinaciju drvenih i metalnih spojnica. Tradicionalni čepovi i rupe, zajedno s modernim metalnim spojnica, osiguravaju čvrstoću i otpornost na različite vremenske uvjete. Ovi spojevi omogućuju izgradnju krovnih konstrukcija koje su stabilne i dugovječne, te mogu podnijeti velike opterećenja. Krovne konstrukcije također koriste drvene grede i nosače koji su spojeni na način da osiguravaju maksimalnu stabilnost i otpornost na vjetar i snijeg. Izgled sa dodatkom spojnih ploča na slici 6. .



Slika 6. Moderna konstrukcija krova s elementima strojarstva [19]

## 4. Vrste spojeva drvenih konstrukcija

### 4.1. Spoj čep-utor



Slika 7. Spoj čep-utor [4]

Spoj čep/utor (Slika 7.), jedan je od najstarijih i najizdržljivijih načina spajanja drvenih elemenata, poznat po svojoj dugovječnosti i učinkovitosti. Ovaj spoj se koristi u stolarskim i tesarskim radovima već stoljećima, prvenstveno zbog svoje jednostavnosti i izuzetne čvrstoće. U svojoj osnovi, spoj se sastoji od dva ključna dijela: čepa, koji predstavlja izbočeni dio precizno izrezan na kraju jednog drvenog elementa, i utora, šupljine izrezane unutar drugog drvenog elementa koja je oblikovana tako da savršeno odgovara čepu. Kada se čep umetne u utor, stvara se snažna i stabilna veza između dva komada drva, omogućujući čvrstu povezanost bez potrebe za dodatnim metalnim elementima. [4]

Proces spajanja čepom i utorom izuzetno je učinkovit jer osigurava visoku stabilnost, budući da čep savršeno pristaje unutar utora, čime se minimizira rizik od razdvajanja ili slabljenja spoja tijekom vremena. Ovaj spoj može se dodatno osigurati primjenom ljepila, drvenih zaticima ili klinovima, čime se postiže još veća čvrstoća i izdržljivost. Različite varijacije spoja čep/utor omogućuju dodatnu fleksibilnost u konstrukciji. Na primjer, prolazni čep omogućuje da čep prolazi kroz cijeli element i izlazi na drugu stranu, što je često estetski privlačno, dok zasječeni čep s ramenima pruža dodatnu stabilnost i sprječava uvijanje ili savijanje spoja.

Prednosti spoja čep/utor leže u njegovoj izuzetnoj trajnosti i sposobnosti očuvanja strukturnog integriteta drva kroz dug vremenski period. Budući da ovaj spoj ne zahtijeva metalne elemente, značajno doprinosi estetskoj vrijednosti drvene konstrukcije, zadržavajući pritom prirodni izgled i osjećaj drva. Osim toga, njegova sposobnost dugotrajnog očuvanja čvrstoće i stabilnosti čini ga idealnim za izradu namještaja, drvenih zgrada i drugih konstrukcija koje zahtijevaju



pouzdanе i dugotrajne veze između drvenih elemenata. Ovaj tradicionalni način spajanja, iako jednostavan, i dalje ostaje jedan od najpouzdanijih metoda za stvaranje čvrstih i estetski ugodnih drvenih konstrukcija.

Iako je spoj čep/utor vrlo čvrst i dugotrajan, ima nekoliko nedostataka koji mogu ograničiti njegovu upotrebu u određenim situacijama:

1. Složenost izrade: Izrada spoja čep/utor zahtijeva visoku razinu vještine i preciznosti. Ručno izrezivanje čepa i utora može biti vremenski zahtjevno, a ako nije pravilno izvedeno, spoj može biti labav ili neusklađen, što značajno smanjuje njegovu čvrstoću.
2. Potrebno vrijeme: Izrada ovog spoja može biti dugotrajan proces, osobito kada je riječ o većim projektima ili kada je potrebno izraditi više spojeva. To može povećati troškove rada i produžiti vrijeme potrebno za završetak projekta.
3. Oslablјivanje materijala: Izrezivanje čepa i utora uklanja dio materijala iz drvenih elemenata, što može oslabiti ukupnu strukturalnu čvrstoću tih elemenata, osobito ako se koristi na drvu manjeg presjeka ili u područјima koja nose velika opterećenja.
4. Ograničena primjena u modernim materijalima: Iako je spoj čep/utor izuzetno učinkovit u drvenim konstrukcijama, nije prikladan za uporabu s modernim građevinskim materijalima poput metala ili kompozitnih materijala, gdje su potrebne druge vrste spojeva.
5. Održavanje stabilnosti spoja: U nekim slučajevima, drvo se može vremenom skupljati, širiti ili deformirati zbog promjena u vlažnosti i temperaturi. To može dovesti do labavljenja spoja čep/utor, što zahtijeva redovito održavanje ili popravak kako bi se osigurala dugotrajna stabilnost spoja.
6. Potencijalni trošak: Zbog složenosti izrade i potrebnog vremena, spojevi čep/utor mogu povećati troškove projekta, osobito ako se koriste na velikom broju mjesta u konstrukciji ili namještaju.

Unatoč ovim nedostacima, spoj čep/utor se i dalje koristi zbog svoje snage, estetike i tradicije, posebno u visokokvalitetnim stolarskim radovima i restauracijama, gdje su preciznost i trajnost ključni.

#### **4.2. Upotreba lijepila kao pojačivača spoja i vrste**

Upotreba lijepila u drvenim konstrukcijama:

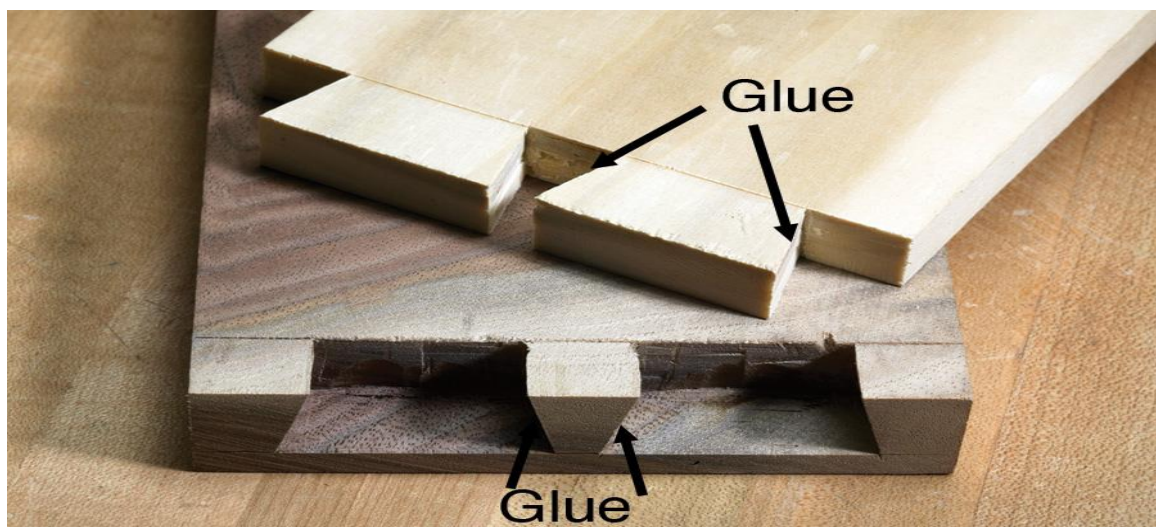
Korištenje lijepila u drvenim konstrukcijama donosi niz prednosti koje značajno doprinose ukupnoj čvrstoći i dugovječnosti spojeva. Kada se lijepilo koristi u kombinaciji s tradicionalnim drvenim spojevima (Slika 8.), kao što su čep/utor, ono ne samo da poboljšava mehaničku stabilnost, već i omogućuje ravnomjerniju distribuciju opterećenja kroz spoj. Na ovaj način, opterećenje koje djeluje na spoj nije koncentrirano na jednom malom područјu, već je raspoređeno po cijeloj površini spoja, što smanjuje rizik od pojave naprezanja i pucanja drva.

Osim toga, ljepila su ključna u modernim drvenim konstrukcijama koje uključuju slojevite elemente poput lameliranih greda ili šperploča. U ovim slučajevima, ljepila pomažu u održavanju integriteta slojevitih struktura, omogućujući im da podnose veća opterećenja bez deformacija ili gubitka čvrstoće.

Ljepila također imaju ulogu u zaštiti spojeva od vanjskih utjecaja. Na primjer, u vanjskim drvenim konstrukcijama, korištenje vodootpornih ljepila može spriječiti prodor vlage u spoj, čime se smanjuje rizik od truljenja drva i degradacije spoja tijekom vremena. U kombinaciji s odgovarajućim tehnikama lijepljenja, ljepila mogu znatno povećati otpornost drvenih konstrukcija na vremenske uvjete, produžujući njihov vijek trajanja i smanjujući potrebu za čestim održavanjem ili popravcima.

#### 4.2.1. Izbor ljepila u drvenim konstrukcijama:

Izbor ljepila ključan je za uspjeh svakog projekta s drvenim konstrukcijama, jer različiti projekti zahtijevaju različite karakteristike ljepila. Na primjer, vrsta drva koja se koristi u konstrukciji igra značajnu ulogu u odabiru odgovarajućeg ljepila. Neka drva, poput hrasta ili tikovine, imaju visok sadržaj prirodnih ulja koja mogu otežati prijanjanje standardnih ljepila, pa je u tim slučajevima potrebno koristiti specijalizirana ljepila koja su formulirana za rad s takvim drvetom. Također, uvjeti primjene – hoće li konstrukcija biti izložena vanjskim utjecajima ili će ostati u zatvorenom prostoru – također diktiraju vrstu ljepila. U vanjskim uvjetima, važno je odabrati ljepilo koje je otporno na vlagu, UV zrake i promjene temperature kako bi se osigurala dugotrajnost spoja. Osim toga, očekivana opterećenja koja će djelovati na spojeve također utječu na izbor ljepila. U slučajevima kada se očekuju velika mehanička opterećenja, kao što su težina krova ili dinamička opterećenja uslijed vjetra, potrebna su ljepila s visokim kapacitetom nosivosti. To osigurava da će spoj zadržati svoju čvrstoću i stabilnost čak i pod najzahtjevnijim uvjetima. Pravilan izbor ljepila i tehnika lijepljenja stoga nije samo pitanje dugovječnosti, već i sigurnosti konstrukcije, jer kvaliteta spojeva izravno utječe na ukupnu stabilnost i pouzdanost drvene građevine.



Slika 8. „Leptir“ utor i čep, prikaz raspodjele ljepila kao pojačivača [4]

#### 4.2.1.1. Vrste, prednosti i nedostaci lijepila

##### 1. PVA ljepilo (Polyvinyl Acetate):

- Primjena: Ovo je najčešće korišteno ljepilo za drvo u stolarskim radovima. PVA ljepilo je bijelo ili žuto ljepilo koje se koristi za unutarnje i neke vanjske primjene (ako je vodootporno).

- Sile koje podnosi: PVA ljepila mogu podnijeti sile od približno 2 do 5 MPa (megapaskala) u čvrstoći na smicanje.

- Prednosti: Jednostavno za korištenje, brzo sušenje, netoksično.

- Nedostaci: Nije otporno na vlagu osim ako je posebno formulirano (npr. "Titebond III").

##### 2. Epoksidno ljepilo (Slika 9.):

- Primjena: Epoksidna ljepila su iznimno snažna i koriste se za drvene konstrukcije koje zahtijevaju visoku čvrstoću i otpornost na vlagu. Pogodna su za vanjske primjene i spojeve koji su izloženi velikim opterećenjima.

- Sile koje podnosi: Epoksidna ljepila mogu podnijeti sile od 10 do 20 MPa ili više u čvrstoći na smicanje, ovisno o formulaciji.

- Prednosti: Izuzetno snažno, otporno na vodu, kemikalije i temperaturu.

- Nedostaci: Duže vrijeme stvrdnjavanja, potreban miješanje dviju komponenti, viša cijena.

##### 3. Urea-formaldehidno ljepilo (UF):

- Primjena: Ovo ljepilo se često koristi u proizvodnji šperploče i drugih slojevitih drvenih proizvoda. Također se koristi za lijepljenje u stolarskim radovima gdje je potrebna visoka čvrstoća.

- Sile koje podnosi: Urea-formaldehidna ljepila mogu podnijeti sile od 7 do 15 MPa u čvrstoći na smicanje

- Prednosti: Visoka čvrstoća, otpornost na toplinu.

- Nedostaci: Nije otporno na vlagu, može ispuštati formaldehid.

##### 4. Poliuretansko ljepilo:

- Primjena: Poliuretanska ljepila su poznata po svojoj sposobnosti da vežu različite materijale i po svojoj otpornosti na vlagu, što ih čini pogodnima za vanjske radove i mjesta izložena vlazi.

- Sile koje podnosi: Poliuretanska ljepila mogu podnijeti sile od 6 do 10 MPa u čvrstoći na smicanje.

- Prednosti: Vodootporno, dobro veže različite materijale, fleksibilno.

- Nedostaci: Pjenjenje tijekom sušenja može izazvati probleme ako se koristi previše ljepila.

##### 5. Melaminsko ljepilo:

- Primjena: Ovo ljepilo se koristi u proizvodnji laminata i slojevitih drvenih proizvoda. Pruža visoku čvrstoću i otpornost na vlagu.
- Sile koje podnosi: Melaminska ljepila mogu podnijeti sile od 8 do 15 MPa u čvrstoći na smicanje.
- Prednosti: Dobra otpornost na vlagu i toplinu, koristi se u vanjskoj gradnji.
- Nedostaci: Potrebno je precizno miješanje i kontrolirani uvjeti sušenja. [1]



Slika 9. Vrlo popularna „epoxy smola“ spoj u kojem je korišteno samo ljepilo [1]

### 4.3. Spojevi s čavlima

Spojevi drvenih konstrukcija čavlima predstavljaju jedan od najosnovnijih, ali i najčešće korištenih metoda spajanja drvenih elemenata. Od davnina, čavli su korišteni u različitim vrstama drvenih građevina zbog svoje jednostavnosti primjene, dostupnosti i učinkovitosti. Iako su danas dostupne mnoge sofisticiranije tehnike spajanja, čavli i dalje ostaju nezaobilazan alat u stolariji, građevinarstvu i izradi namještaja. Ovaj seminar istražiti će različite vrste spojeva drvenih konstrukcija pomoću čavala, te će se detaljno razmotriti njihova primjena, prednosti, nedostaci i tehnike postavljanja.

Spojevi drvenih konstrukcija čavlima temelje se na jednostavnom principu: čavao se zabija kroz jedan ili više komada drva, spajajući ih u stabilnu cjelinu. Ključna prednost korištenja čavala leži u brzini i jednostavnosti njihove primjene, što ih čini posebno korisnim za brze popravke i masovne građevinske projekte. Čavli dolaze u različitim veličinama, oblicima i materijalima, omogućujući njihovu upotrebu u širokom spektru drvenih konstrukcija – od laganih okvira do teških nosivih elemenata.

Postoji mnogo vrsta čavala koje se koriste u drvenim konstrukcijama, ali najčešće korišteni su:

- Obični čavli: Najčešća vrsta čavala, idealna za opće radove u stolariji. Obični čavli su duguljasti, s ravnom glavom i oštrim vrhom.

- Pocinčani čavli: Ovi čavli su premazani cinkom kako bi bili otporniji na koroziju, što ih čini pogodnim za vanjske primjene.
- Zakovani čavli: Koriste se u aplikacijama gdje je potrebna dodatna čvrstoća, kao što su konstrukcije koje su izložene vibracijama ili visokim opterećenjima.
- Ukrasni čavli: Čavli s dekorativnim glavama koriste se za namještaj i obloge gdje je estetski izgled važan.

#### 4.3.1. Metode spajanja čavlima

Spajanje drvenih elemenata čavlima može se izvesti na nekoliko načina, ovisno o zahtjevima konstrukcije i vrsti spoja. Neki od najčešćih metoda uključuju:

1. Jednostrani spoj čavlima U ovom spoju, čavao se zabija kroz jedan drveni element, a zatim ulazi u drugi element, pričvršćujući ih zajedno. Ova metoda se često koristi za spajanje okvira, zidnih obloga i podnih ploča.
2. Dvostrani spoj čavlima: U ovoj metodi, čavli se zabijaju s obje strane drvenog elementa, povećavajući stabilnost spoja. Ova tehnika se obično koristi za jače spojeve u nosivim konstrukcijama.
3. Spoj na kutu: Kada se drveni elementi spajaju pod kutom, čavli se postavljaju dijagonalno kako bi se osigurala stabilnost spoja i spriječilo pucanje drva.
4. Prekriženi spoj: Ova metoda koristi čavle postavljene u križnom uzorku, što povećava otpornost na smicanje i sprječava razdvajanje elemenata pod opterećenjem.

##### 4.3.1.1. Prednosti spajanja čavlima

Spojevi čavlima imaju nekoliko ključnih prednosti:

- Jednostavnost i brzina: Spajanje čavlima je brzo i jednostavno, što omogućuje brzu montažu i uštedu vremena u građevinskim projektima.
- Dostupnost i niska cijena: Čavli su široko dostupni i relativno jeftini, što ih čini ekonomičnim izborom za većinu projekata.
- Svestranost: Mogu se koristiti u raznim aplikacijama, od konstrukcije okvira do završnih radova, bez potrebe za specijaliziranim alatima ili opremom.

##### 4.3.1.2. Nedostaci spajanja čavlima

Iako spajanje čavlima ima brojne prednosti, postoje i neki nedostaci koje treba uzeti u obzir:

- Slabija čvrstoća: U usporedbi s drugim metodama spajanja, poput vijaka ili ljepila, čavli pružaju manju čvrstoću spoja. Spojevi čavlima su skloniji razdvajanju pod velikim opterećenjem ili vibracijama.

- Korozija: Čavli, posebno oni izrađeni od običnog čelika, mogu biti podložni koroziji, što smanjuje trajnost spoja, posebno u vanjskim aplikacijama.
- Oštećenje drva: Zabijanje čavala može uzrokovati pucanje ili cijepanje drva, osobito ako se koriste čavli neprikladne veličine ili se zabijaju preblizu ruba drvenog elementa.

Primjena čavala u različitim vrstama drvenih konstrukcija

Čavli se koriste u širokom spektru drvenih konstrukcija, od jednostavnih stolarskih radova do složenih građevinskih projekata. U stolariji, čavli su neizostavni za izradu okvira, ladica, ormara i drugih elemenata namještaja. U građevinarstvu, čavli se koriste za spajanje drvenih greda, rogova, podnih ploča, zidnih obloga i krovnih konstrukcija.

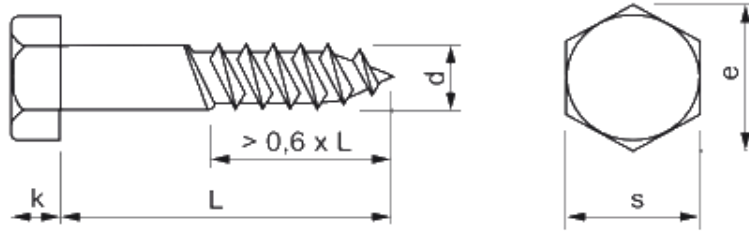
Primjena čavala također se proširila i na modernu drvenu gradnju, gdje se koriste u kombinaciji s drugim spojnim tehnikama, kao što su vijci, spojnice i ljepila, kako bi se postigla maksimalna čvrstoća i stabilnost konstrukcije. U nekim slučajevima, čavli se koriste kao privremeni spojni elementi tijekom gradnje, dok se trajni spojevi ne postave.

#### 4.4. Vijci i navojne šipke kao spojni elementi

Vijci koji se najčešće koriste za spajanje drvenih dijelova u konstrukcijama dolaze u različitim vrstama, svaki sa specifičnim karakteristikama i DIN standardima (Deutsches Institut für Normung) koji osiguravaju uniformnost i kvalitetu. Evo nekoliko najčešće korištenih vijaka i njihovih pripadajućih DIN brojeva:

##### 1. Vijci za drvo (DIN 571), (Slika 10):

- Opis: Drveni vijci, poznati i kao vijci za drvo, najčešće se koriste za direktno spajanje drvenih komada. Imaju grubi navoj koji omogućava čvrsto uvijanje u drvo bez potrebe za prethodnim bušenjem, iako je to često preporučljivo kako bi se spriječilo cijepanje drveta.
- DIN 571: Ovi vijci imaju šesterokutnu glavu i koriste se za spajanje drvenih elemenata s drugim materijalima poput metala ili plastike. Njihova upotreba je široka u konstrukcijama gdje je potrebno osigurati snažno spajanje. [24]



Materijal:  
**Čelik**  
**Inox A2**  
**Inox A4**

dimenzije u mm		Dužina: 16 - 400 mm					
<b>d</b>	max.	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>16</b>
	min.	4,52	5,52	7,42	9,42	11,3	15,3
<b>k</b>	srednja	3,5	4	5,5	7	8	10
	max.	3,88	4,38	5,88	7,45	8,45	10,45
	min.	3,13	3,63	5,13	6,55	7,55	9,55
<b>s</b>	srednja	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>13</b>	<b>17</b>	<b>19</b>	<b>24</b>
	max.	8	10	13	17	19	24
	min.	7,64	9,64	12,57	16,57	18,48	23,16
<b>e</b>	min.	8,63	10,89	14,2	18,72	20,88	26,17

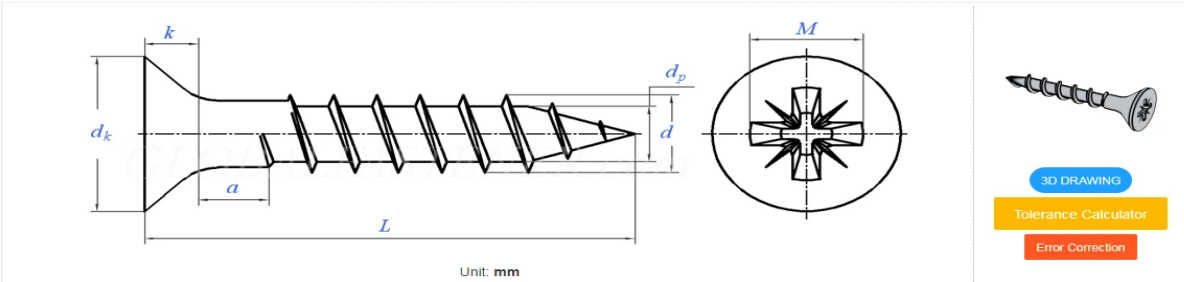
Površina: Cink (BELI, CRNI) / Inox

**Slika 10. Vijci DIN 571 [24]**

## 2. Univerzalni vijci (DIN 7505),(Slika 11.):

- Opis: Univerzalni vijci za drvo su često korišteni vijci sa zvjezdastom ili križnom glavom. Namijenjeni su za opću upotrebu u drvenim konstrukcijama. Pogodni su za upotrebu s različitim vrstama drva i kompozitnih materijala. [5]

**DIN 7505 (A) - 1986 Particle Board Screws With Cross Recess Type Z, countersunk Head - Form A**



Screw Thread <b>d</b>	2.5	3	3.5	4	4.5	5	6
<b>d</b>							
max	2.5	3	3.5	4	4.5	5	6
min	2.25	2.75	3.2	3.7	4.2	4.7	5.7
<b>P</b>							
Pitch(±10%)	1.1	1.35	1.6	1.8	2	2.2	2.6
<b>a</b>							
max	2.1	2.35	2.6	2.8	3	3.2	3.6
<b>dk</b>							
max=nominal size	5	6	7	8	9	10	12
min	4.7	5.7	6.64	7.64	8.64	9.64	11.57
<b>k</b>							
	1.4	1.8	2	2.35	2.55	2.85	3.35
<b>dp</b>							
max=nominal size	1.5	1.9	2.15	2.5	2.7	3	3.7
min	1.1	1.5	1.67	2.02	2.22	2.52	3.22
<b>Socket No.</b>	1	1	2	2	2	2	3
<b>M</b>	2.51	3	4	4.4	4.8	5.3	6.6

Unit: mm

Slika 11. DIN 7505 [24]

- DIN 7505: Ovi vijci su dostupni s različitim vrstama glava (plosnate, polukružne) i koriste se u situacijama gdje je potrebno univerzalno rješenje za spajanje drvenih elemenata.

### 3. Vijci za ivericu (DIN 7981 i DIN 7982), (Slika 12.) :

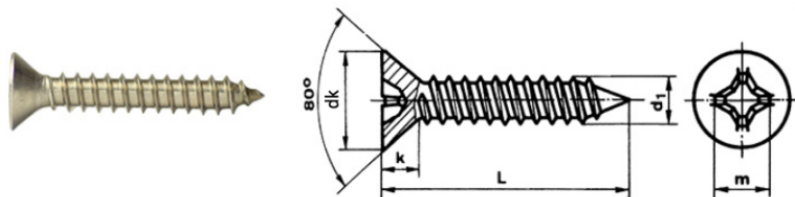
- Opis: Vijci za ivericu su specijalizirani vijci sa sitnim navojem dizajnirani za spajanje u ivericu, šperploču i druge materijale koji su skloniji cijepanju. Imaju šiljati kraj koji olakšava ulazak u materijal.

- DIN 7981: Ovi vijci imaju zaobljenu glavu i koriste se gdje je potreban estetski ugodan završni sloj.

- DIN 7982: Ovi vijci imaju plosnatu glavu koja omogućava da vijak bude u ravnini s površinom materijala, što je korisno u situacijama gdje je potreban glatki završetak. [24]



## DIN 7982 Form C Philips Flat Tapping Screw A2 304 Stainless Steel



DIN 7982 Form C

d1	ST 2,2	ST 2,9	ST 3,5	ST 3,9	ST 4,2	ST 4,8	ST 5,5	ST 6,3	
Pitch	0,8	1,1	1,3	1,3	1,4	1,6	1,8	1,8	
dk max	4,2	5,6	6,9	7,8	8,2	9,5	10,8	12,5	
dk min	3,9	5,3	6,54	7,14	7,84	9,14	10,37	12,07	
k max	1,8	2,2	2,6	2,8	3,05	3,55	3,95	4,55	
k min	1,55	1,95	2,35	2,55	2,75	3,25	3,65	4,25	
Drive	1	1	2	2	2	2	3	3	
m	2,6	3,0	4,2	4,4	4,6	5,0	6,5	7,1	
Penetratio n Depth	max	1,32	1,80	2,03	2,26	2,46	2,87	3,15	3,66
	min	0,86	1,32	1,40	1,63	1,80	2,26	2,49	3,00

Slika 12. DIN 7982 [24]

#### 4. Navojne šipke (DIN 975), (Slika 13.):

- Opis: Navojne šipke koriste se u kombinaciji s maticama za spajanje debelih drvenih elemenata. Ove šipke dolaze u raznim dužinama i omogućavaju snažno spajanje koje se može podešavati zatezanjem matica s obje strane.

-DIN 975: Standard koji opisuje navojne šipke koje se koriste u građevinskim konstrukcijama. Ove šipke su u potpunosti navojne i mogu se koristiti u različitim aplikacijama, uključujući i drvene konstrukcije. [24]



### NAVOJNA ŠIPKA DIN 975

DOSTUPNI MATERIJALI:  
ČELIK | INOX

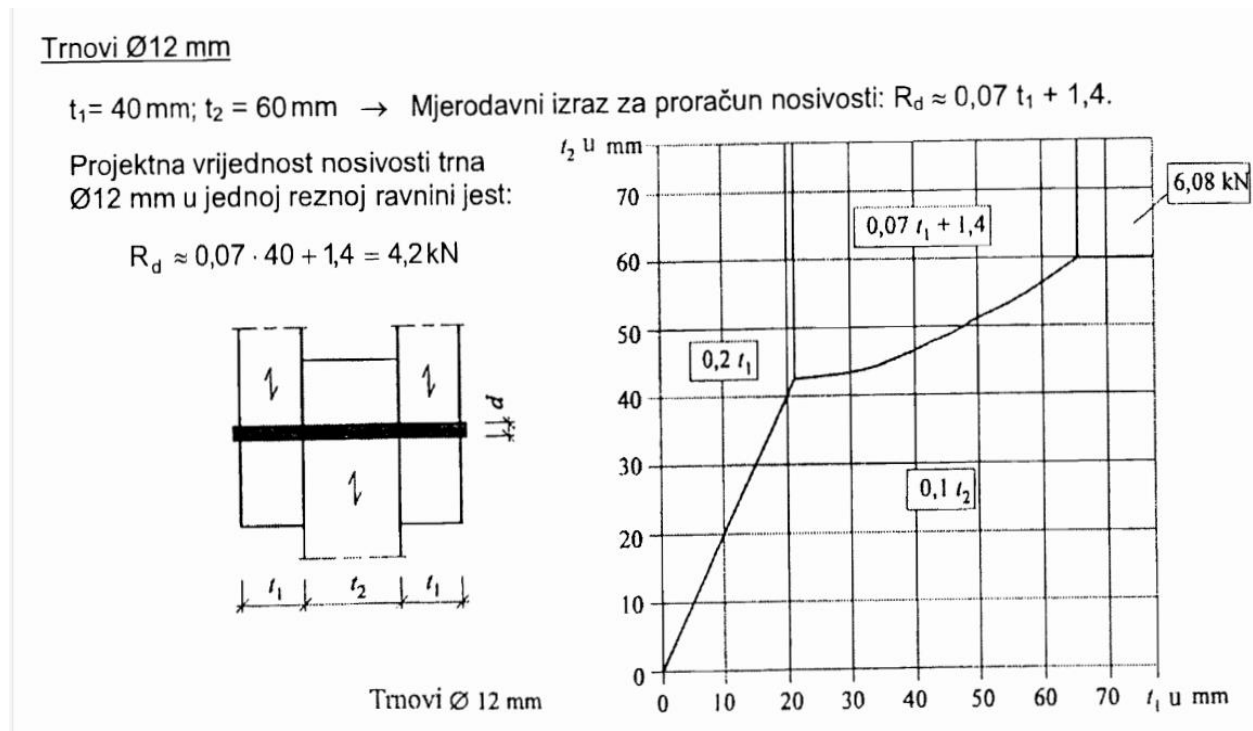
KVALITETA  
ČELIK 4,8 | 8,8 | 10,9  
INOX A2 | A4

ZAŠTITA  
CINČANO



Diameter	s	h	t
M3	5,5	6	3,80
M4	7,0	8	5,74
M5	8,0	10	7,79
M6	10,0	12	8,29
M8	13,0	15	11,35
M10	17,0	18	13,35
M12	19,0	22	16,35
M14	22,0	25	18,35
M16	24,0	28	21,42
M18			
M20	30,0	34	26,42

Slika 13. DIN 975 [24]



**Slika 14. Nosivost navojne šipke promjera 12mm [11]**

Slika 14. nam prikazuje grafikon koji prikazuje nosivost trna promjera 12 mm u jednoj reznjnoj ravlini kao funkciju debljine elementa  $t_1$ . Kako se debljina elementa  $t_1$  povećava, nosivost trna raste, a formula za proračun nosivosti je dana kao  $R_d = 0.07 t_1 + 1.4$ . Na temelju te formule, nosivost se postepeno povećava do vrijednosti od 6,08 kN, što je maksimalna nosivost trna prema prikazanim podacima. Ova formula je specifična za trn promjera 12 mm u jednoj reznjnoj ravlini. Vrijednost  $R_d$  (nosivost trna) ovisi o debljini elementa  $t_1$ , koja je navedena u milimetrima (mm). Kada debljina  $t_1$  raste, nosivost  $R_d$  se također povećava.

#### 5. Vijci za montažu (DIN 7991)

- Opis: Ovi vijci imaju uvučenu glavu koja omogućava da vijak bude u ravlini s ili ispod površine materijala. Koriste se tamo gdje je potrebno osigurati ravnu površinu bez izbočenih dijelova vijka.

- DIN 7991: Vijci sa šesterokutnom glavom i uvučenom glavom za upotrebu u drvenim konstrukcijama i drugim materijalima gdje je potrebna glatka površina. [5]

Odabir odgovarajućih vijaka i navojnih šipki za spajanje drvenih dijelova u konstrukcijama zavisi o specifičnim zahtjevima projekta, uključujući vrstu drva, veličinu i prirodu konstrukcije, te očekivana opterećenja. U ispitivanjima će biti korišteni vijci DIN 571, DIN 7505, DIN 7982. Najveći promjer šipke će biti promjera 12mm .

#### 5. Specijalni vijci (Slika 15.):

PZ prihvat olakšava uvrtnje vijka, a rebra na glavi olakšavaju da se vijak upusti u drvo. Cijeli navoj pruža maksimalnu efikasnost prilikom spajanja tankih elemenata. Žuto-cinčani.

Ovi vijci su specijalizirani za teže aplikacije i obično su pocinčani kako bi bili otporni na koroziju. Iako se točan DIN standard ne može precizno odrediti samo na temelju slike, vijci slični ovima često odgovaraju standardima poput DIN 571 za vijke za drvo, ali s dodatnim karakteristikama koje im daju veću nosivost i stabilnost, poput široke podloške i Torx glave.

Ako tražite specifične informacije o ovom tipu vijka, najbolje bi bilo provjeriti kod dobavljača ili proizvođača tehničke specifikacije kako biste bili sigurni da odgovaraju vašim potrebama za rad na gredama ili drugim drvenim konstrukcijama.



Slika 15. Specijalni Torx vijak za grede [24]

### 5.3. Spojna ploča grede

čelici koje se koriste za proizvodnju ploča:

#### 1. Čelik S235

- Ovo je najčešće korištena vrsta konstrukcijskog čelika u Europi. S235 je čelik s niskim udjelom ugljika, što ga čini lakim za strojnu obradu i relativno jeftinim, dok pruža dovoljnu čvrstoću za standardne konstrukcijske primjene.

#### 2. Čelik S355

- S355 je čelik visoke čvrstoće, često se koristi za zahtjevnije konstrukcije koje zahtijevaju veću nosivost. Ovaj čelik pruža bolju otpornost na napetost i pritisak, što ga čini pogodnim za veće konstrukcije ili elemente koji nose značajna opterećenja.

#### 3. Pocinčani čelik

- Pocinčani čelik je čelik presvučen slojem cinka za zaštitu od korozije. Ovaj materijal se koristi za panele koji će biti izloženi vanjskim utjecajima, kao što su vlaga i atmosferski utjecaji, što omogućuje dulji vijek trajanja bez potrebe za čestim održavanjem.

#### 4. Nehrđajući čelik (inox)

- Nehrđajući čelik se koristi u slučajevima kada je potrebna visoka otpornost na koroziju bez dodatnog zaštitnog tretmana. Iako je skuplji, koristi se za specifične primjene gdje su potrebni dugovječnost i minimalno održavanje, kao što su objekti u obalnim područjima.

#### 1. Kutnici (Metalni kutni spojevi)

- Opis: Kutnici su metalni spojevi u obliku slova "L" koji se koriste za spajanje drvenih greda pod pravim kutom. Oni omogućuju stabilno i čvrsto povezivanje dva elementa, najčešće na mjestima gdje je potrebna dodatna nosivost ili otpornost na izvijanje.

- DIN 1053-1: Ovaj standard se prvenstveno odnosi na zidane konstrukcije, ali se često koristi i u drvenim konstrukcijama za definiranje zahtjeva vezanih uz nosivost i stabilnost kutnih spojeva.

#### 2. Pločasti spojni elementi (Montažne ploče)

- Opis: Pločasti spojni elementi, ili montažne ploče, ravni su metalni komadi s otvorima za vijke ili čavle. Koriste se za spajanje drvenih greda na ravnoj površini, omogućujući ravnomjerno raspodjelu opterećenja između spojenih elemenata.

- DIN 1052: Ovaj standard definira tehničke zahtjeve za drvene konstrukcije, uključujući spojne elemente poput montažnih ploča. Propisuje dimenzije, nosivost i metode ispitivanja kako bi se osigurala trajnost i sigurnost konstrukcije.

#### 3. Vučne ploče

- Opis: Vučne ploče su specifične metalne ploče koje se koriste za prenošenje vučnih sila između dvije grede. Ove ploče imaju posebne rupe ili proreze za vijke ili šarafe, što omogućava čvrsto povezivanje elemenata koji su pod stalnim vučnim opterećenjem.

- DIN 1476: Ovaj standard postavlja kriterije za vučne ploče koje se koriste u drvenim konstrukcijama. Standard definira dimenzije, materijale i otpornost na vučne sile, osiguravajući da ploče mogu izdržati očekivane opterećenja.

#### 4. Nazubljene ploče (Ploče sa zupcima)

- Opis: Nazubljene ploče su metalni spojni elementi s nizom zubaca koji se utiskuju u drvo. Ove ploče pružaju visok stupanj čvrstoće spoja i koriste se tamo gdje je potrebno osigurati da spoj ne popusti pod velikim opterećenjima ili vibracijama.

- DIN 68150: Ovaj standard specificira zahtjeve za nazubljene metalne ploče koje se koriste u spajanju drvenih elemenata. Uključuje tehničke specifikacije za materijale, dimenzije zubaca i metode testiranja otpornosti na izvlačenje.

### 5. Spojne ploče s urezima (Cink ploče)

- Opis: Spojne ploče s urezima, poznate i kao cink ploče, koriste se za spajanje drvenih elemenata pod kutom ili na ravnoj površini. Ove ploče imaju urezane dijelove koji pomažu pri lakšoj montaži i osiguravaju čvrsto spajanje elemenata.

- DIN 1479: Ovaj standard odnosi se na spojne elemente poput cink ploča i propisuje tehničke zahtjeve za njihovu primjenu u drvenim konstrukcijama. Standard definira dimenzije, vrstu materijala i metode ispitivanja kako bi se osigurala pravilna funkcionalnost i trajnost spojeva.

### 6. Ploče sa vijcima (Zavrtne ploče)

- Opis: Ploče sa vijcima ili zavrtne ploče su metalni spojni elementi koji imaju rupe za vijke ili šarafe. Ove ploče omogućuju čvrsto spajanje drvenih elemenata, s mogućnošću dodatnog učvršćivanja pomoću vijaka. Koriste se u situacijama gdje je potrebna visoka čvrstoća spoja.

- DIN 7990: Ovaj standard postavlja tehničke specifikacije za metalne vijke i ploče koji se koriste u drvenim konstrukcijama. Standard propisuje dimenzije, materijale i metode ispitivanja kako bi se osigurala odgovarajuća nosivost i otpornost na opterećenja. [24]

## 5. Proračun raznih vrste drveta u uzorku

### 5.1. Jelovina

Distribucija i osnovna svojstva jelovine

Jela pripada porodici Pinaceae i ima preko 100 različitih varijanti, od kojih se većina može naći sjeverno od ekvatora. Ovisno o lokaciji, stabla jela mogu narasti do maksimalne visine od 40 m, a različite varijante mogu razviti različita svojstva. Na primjer, boja drva ljetnog rasta je tamno crvenkasta, dok je ona proljetnog rasta svijetla.

Kao meko drvo, jelovina nije jako tvrda i ima srednju težinu. Međutim, drvo ima dobru čvrstoću, trajnost i elastičnost. Ljetni rast jelovine je relativno tvrdi i teži u usporedbi s drugim varijantama. Drvo jelovine može ponekad biti podložno gljivičnim infekcijama koje mogu dovesti do plave mrlje zbog prirodne vlage jelovine.

Boja i izgled: Što se tiče boje, jezgra i bjelika jelovine prilično su različite jedna od druge. Dok je jezgra crvenkasto-žuta i potamni s vremenom, bjelika je žućkasta ili crvenkasto-bijela.

Tekstura: Jelovina može imati prugast ili valovit uzorak, ovisno o tome kako je drvo rezano. Ima srednje finu teksturu i zatvoreno zrno, što je čini lakšom za obradu u usporedbi s većinom tvrdih drva.

Otpornost: Kao meko drvo, jelovina nije jako otporna, nema prirodnu otpornost na truljenje i raspadanje, ali je često podvrgnuta tlačnom tretmanu kako bi se povećala njezina trajnost, posebno otpornost na truljenje i insekte za vanjske projekte.

Ostala fizička i mehanička svojstva jelovine:

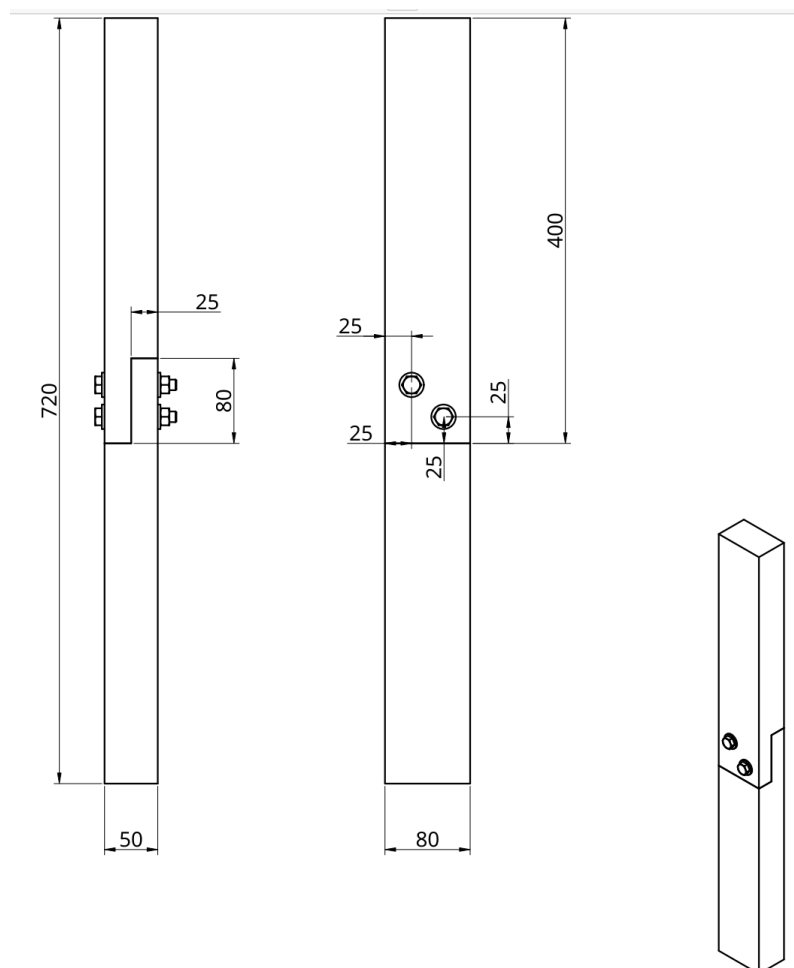
- Visina stabla jela: 20 – 40 m,
- Prosječna starost stabla: 300 – 500 godina,
- Tekstura: Monotona,
- Prosječna vlažnost: 11% (bjelika) i 33% (jezgra),
- Skupljanje: 6,7% (pri standardnoj vlažnosti od 12%),
- Prosječna gustoća: 505 kg/m<sup>3</sup>.
- Vlačna čvrstoća:
  - U statičkom savijanju: 70 – 92 MPa,
  - U tlačenju paralelno s vlaknima: 40 – 49 MPa,
  - U rastezanju duž vlakana: 100 – 116 MPa - Pri smicanju duž tangencijalne ravnine: 6,6 – 8,1 MPa,

- Modul elastičnosti u statičkom savijanju: 8,0 – 13,1 GPa,
- Udarno naprezanje: 28 – 51 kJ/m<sup>2</sup>.
- Tvrdća:
  - Početak: 28 – 33 N/mm<sup>2</sup>,
  - Radijalna: 21 – 25 N/mm<sup>2</sup>,
  - Kraj: 16 – 23 N/mm<sup>2</sup>.

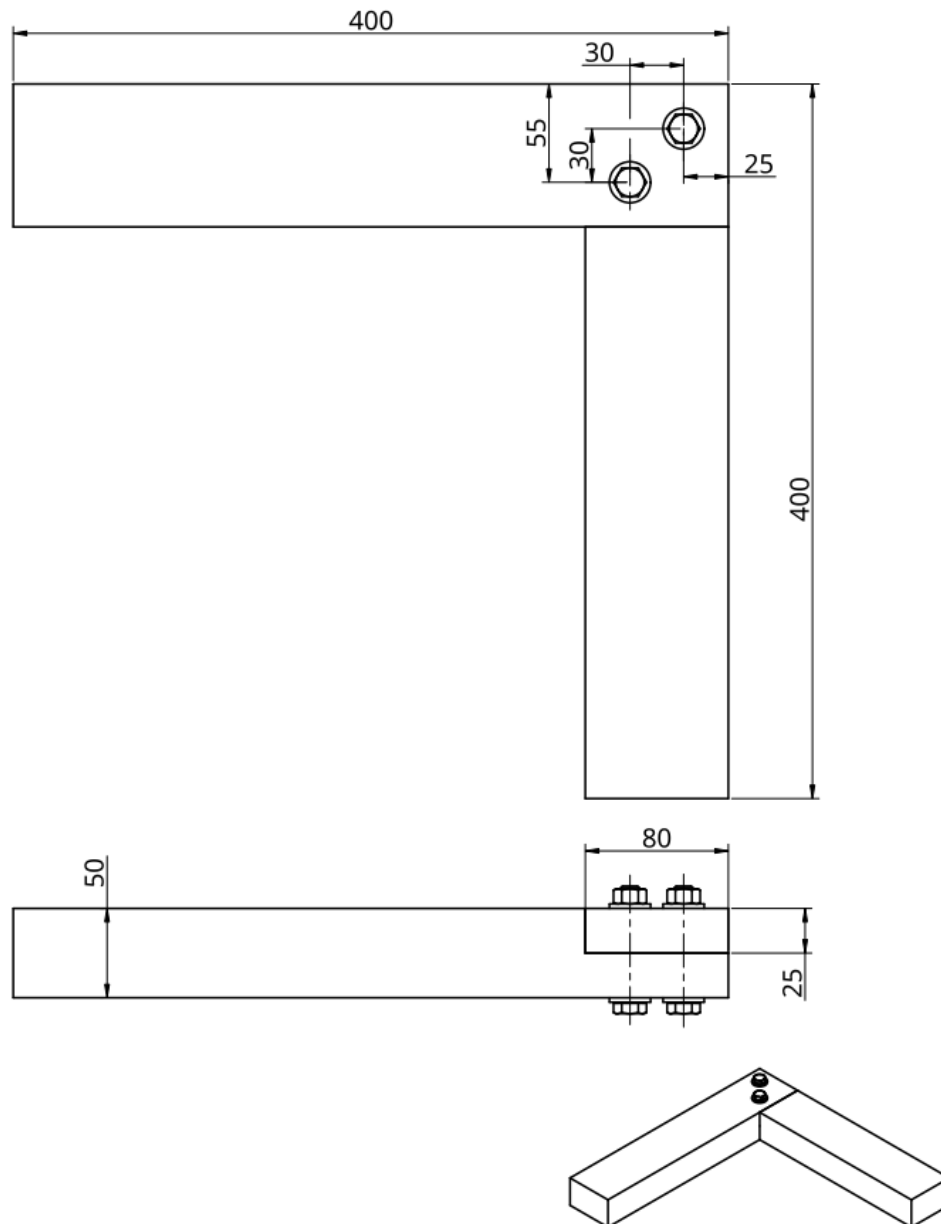
Dostupnost i cijena jelovine-Iako je jelovina lako dostupno meko drvo koje košta manje u usporedbi s mnogim visokokvalitetnim vrstama drva, cijena i potražnja za jelovinom značajno su porasle posljednjih nekoliko godina.

Podaci o uzorku:

- Debljina: 50 mm
- Širina: 80 mm
- Duljina: 400 mm
- Materijal: Jelovina.



Slika 16. Dimenzije uzorka za proračun tlaka i vlaka



**Slika 17. Dimenzije uzorka za torzijsko ispitivanje**

Mehaničke osobine jelovine (odabrano za izračun):

- Vlačna čvrstoća: 40 MPa,
- Tlačna čvrstoća: 30 MPa,
- Savojna čvrstoća: 70 MPa,
- Modul elastičnosti: 8 – 13.1 GPa (prosječno 10 GPa). [10]

Za ovaj proračun, analizirat ćemo sile i moment savijanja koje uzorak od jelovine može podnijeti, a ujedno ćemo razmotriti i ponašanje materijala pri različitim vrstama opterećenja.

1. Vlačna sila - detaljni izračun:



Kada uzorak vuče sila  $F$ , vlačna sila djeluje na poprečni presjek uzorka, a naprezanje se raspodjeljuje preko površine. Koristimo osnovnu formulu za naprezanje (1):

$$\sigma_v = \frac{F_v}{A} \quad (1)$$

Gdje je:

- $\sigma_v$  vlačno naprezanje,
- $F_v$  vlačna sila,
- $A$  poprečni presjek uzorka ( $80 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} = 4000 \text{ mm}^2$ ).

Maksimalna vlačna sila koju uzorak može podnijeti izračunava se na sljedeći način:

$$F_v = \sigma_v \times A = 40 \text{ MPa} \times 4000 \text{ mm}^2 = 160,000 \text{ N} = 160 \text{ kN}$$

Uzorak može podnijeti maksimalnu vlačnu silu od 160 kN prije nego što dođe do puknuća. Pri tome, najveća naprezanja će se početi javljati na točkama gdje vlakna drva nisu homogena, odnosno na slabijim točkama. Vlačna sila djeluje na način da vuče drvo, uzrokujući razdvajanje vlakana drveta.

## 2. Tlačna sila - detaljni izračun:

Tlačna sila djeluje na uzorak tako da ga pritišće, a to izaziva deformaciju. Koristimo sličnu formulu kao za vlačnu silu (2):

$$F_t = \sigma t \times A \quad (2)$$

Gdje je:

- $\sigma t$  tlačna čvrstoća (30 MPa za jelovinu),
- $A$  poprečni presjek ( $80 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} = 4000 \text{ mm}^2$ ).

Maksimalna tlačna sila izračunava se:

$$F_t = 30 \text{ MPa} \times 4000 \text{ mm}^2 = 120,000 \text{ N} = 120 \text{ kN} \quad (2)$$

Tlačna sila izaziva sabijanje vlakana drveta, pri čemu materijal postaje sve kompaktniji, ako prođe 120 kN, vlakna drveta će početi pucati.

## 3. Moment savijanja - detaljni izračun:

Moment savijanja izaziva zakretanje uzorka, a naprezanja se javljaju u točkama gdje je materijal podložen deformaciji. Izračun se temelji na formuli (3):

$$\sigma_s = \frac{M \times c}{I} \quad (3)$$

Gdje je:

- $M$  moment savijanja,
- $c$  udaljenost od neutralne osi (pola debljine uzorka = 25 mm),
- $I$  moment inercije.

Moment inercije izračunava se za pravokutni presjek (4):

$$I = \frac{b \times h^3}{12} \quad (4)$$

$$I = \frac{(80 \text{ mm} \times (50 \text{ mm})^3)}{12} = 83333.33 \text{ mm}^4$$

Udaljenost od neutralne osi  $c$  iznosi pola debljine (5):

$$c = \frac{50}{2} = 25 \text{ mm} \quad (5)$$

Maksimalni moment savijanja koji uzorak može podnijeti (6):

$$M = \frac{\sigma_s \times I}{c} = \frac{70 \times 83333.3}{25} = 2333.33 \text{ Nm} \quad (6)$$

### Ponašanje uzorka pod opterećenjem:

1. Vlačno opterećenje: Kada se uzorak vuče silom  $F$ , naprezanje se ravnomjerno raspoređuje duž presjeka. Pri vlačnoj sili većoj od 160 kN, uzorak će početi pucati, a pukotine će se širiti duž vlakana drveta.
2. Tlačno opterećenje: Kada se uzorak pritišće, vlakna drveta će se sabijati. Pri sili većoj od 120 kN, uzorak će početi pucati na mjestima najvećih naprezanja, posebno na točkama učvršćenja.
3. Moment savijanja: Ako na uzorak primijenimo moment, dolazi do savijanja. Zatezna naprezanja na donjoj strani uzorka uzrokuju pucanje kada moment premaši 2333 Nm.

Važno je napomenuti da drvo, kao prirodni materijal, ima varijabilne mehaničke osobine koje ovise o vlazi, starosti materijala, te vrsti i kvaliteti same jelovine. Stoga, iako smo koristili prosječne vrijednosti vlačne, tlačne i savojne čvrstoće, u stvarnim uvjetima ove vrijednosti mogu varirati. Pored toga, uvjeti okoliša (vlažnost zraka, temperatura) mogu utjecati na otpornost drveta.

Ovaj proračun pruža osnovni uvid u sposobnost uzorka da podnese različite vrste opterećenja. Inženjerska praksa često uzima u obzir sigurnosne faktore kako bi se osiguralo da materijal neće popustiti prije predviđenih naprezanja. Za primjene u stvarnom svijetu, uvijek je važno testirati materijal u uvjetima koji će simulirati stvarne uvjete korištenja.

## 5.2. Hrastovina kao materijal u gradnji

Hrastovina je jedno od najkorištenijih i najcjenjenijih vrsta drveta u građevini, poznata po svojoj čvrstoći, izdržljivosti i otpornosti na habanje. Hrast je tvrdolisno drvo iz porodice \*Fagaceae\* i obuhvaća mnoge vrste, pri čemu su europski hrast (*Quercus robur*) i bijeli hrast (*Quercus alba*) najzastupljeniji u građevini.

### Tehnički podaci

Hrastovina je iznimno gusta, što je čini teškom i vrlo izdržljivom. Gustoća hrastovine varira ovisno o vrsti, ali obično iznosi između 600 i 900 kg/m<sup>3</sup>. Zbog svoje visoke gustoće, hrastovina je vrlo otporna na vlagu, što je čini idealnim materijalom za izradu vanjske stolarije, brodova, podova, vrata i prozora.

### Mehanička svojstva

Hrastovina ima izuzetnu čvrstoću i izdržljivost. Vlačna čvrstoća hrastovine iznosi oko 90 MPa, dok je tlačna čvrstoća u smjeru vlakana oko 50 MPa. Osim toga, hrastovina ima odlična svojstva savijanja, s modulom elastičnosti u rasponu od 10 do 12 GPa. Ova svojstva omogućuju hrastovini da izdrži velika opterećenja i dugotrajnu izloženost raznim uvjetima bez značajnih oštećenja. Hrastovina se također odlikuje visokom otpornošću na habanje i truljenje, osobito bijeli hrast, koji sadrži visoki udio tanina, prirodnog spoja koji pomaže u borbi protiv gljivica i insekata. To čini hrastovinu prikladnom za korištenje u zahtjevnim uvjetima, poput konstrukcija mostova, pilota ili drvenih bačava.

### Kemijska svojstva

Hrastovina je bogata taninima, prirodnim spojevima koji služe kao prirodna zaštita od truljenja i insekata. Tanini također daju hrastovini karakterističnu tamnu boju, koja može dodatno potamnjeti kroz proces oksidacije kada drvo stari. Zbog svog kemijskog sastava, hrastovina je manje podložna biološkoj razgradnji od ostalih vrsta drva, što doprinosi njezinoj dugotrajnosti u građevinskim projektima.

### Ostale karakteristike

Hrastovina ima prepoznatljivu teksturu, s izraženim godovima i porama, što joj daje karakterističan i plemenit izgled. Osim toga, lako se obrađuje i ima dobru sposobnost držanja čavala, vijaka i ljepila, što je čini omiljenom za različite stolarske i građevinske radove.

U građevini, hrastovina se koristi za izradu masivnih konstrukcija, kao što su krovne grede, podovi, stepenice i namještaj. Njena trajnost i estetska privlačnost osigurali su joj dugogodišnju popularnost u arhitekturi i dizajnu interijera.

Proračun vlačne, tlačne sile i momenta savijanja uzorka od hrastovine

Podaci o uzorku:

- Debljina: 50 mm,
- Širina: 80 mm,
- Duljina: 400 mm,
- Materijal: Hrastovina.

Mehaničke osobine hrastovine (odabrano za izračun):

- Vlačna čvrstoća: 90 MPa,
- Tlačna čvrstoća: 50 MPa,
- Modul elastičnosti (savijanje): 10.5 GPa.

U ovom dokumentu izračunat ćemo maksimalnu vlačnu, tlačnu silu i moment savijanja koje uzorak od hrastovine može podnijeti.

1. Vlačno opterećenje djeluje na poprečni presjek uzorka. Formula za izračunavanje vlačne sile je (7):

$$\sigma = \frac{F_v}{A} \quad (7)$$

Gdje je:

- $\sigma$  vlačno naprezanje,
- $F_v$  vlačna sila,
- $A$  poprečni presjek uzorka ( $80 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} = 4000 \text{ mm}^2$ ).

Maksimalna vlačna sila iznosi:

$$F_v = 90 \text{ MPa} \times 4000 \text{ mm}^2 = 360,000 \text{ N} = 360 \text{ kN}$$

Dakle, uzorak može podnijeti maksimalnu vlačnu silu od 360 kN. Pukotine će se pojaviti ako ova sila bude premašena, najprije na slabijim točkama u vlaknima drveta. Pukotine će se širiti paralelno s vlaknima, a najranjivija područja bit će čvorovi ili nepravilnosti u drvetu.

2. Tlačna sila:

Tlačna sila sabija drvo, uzrokujući deformacije vlakana drveta. Formula za izračunavanje tlačne sile je (8):

$$F_t = \sigma_t \times A \quad (8)$$

Gdje je:

- $\sigma_t$  tlačna čvrstoća (50 MPa),
- $A$  poprečni presjek ( $80 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} = 4000 \text{ mm}^2$ ).

Maksimalna tlačna sila je:

$$F_t = 50 \text{ MPa} \times 4000 \text{ mm}^2 = 200,000 \text{ N} = 200 \text{ kN}$$

Uzorak može podnijeti maksimalnu tlačnu silu od 200 kN. Pri toj sili vlakna drveta će se sabiti, a ako se sila poveća, uzorak će puknuti. Sabijanje vlakana izaziva koncentraciju naprezanja u točkama gdje je drvo pričvršćeno, a eventualna oštećenja će se pojaviti na tim mjestima.

2. Moment savijanja uzorka izaziva zakretanje uzorka, uzrokujući naprezanja na različitim dijelovima drva. Formula za moment savijanja je:

$$\sigma_s = \frac{M \times c}{I} \quad (3)$$

Gdje je:

- $M$  moment savijanja,
- $c$  udaljenost od neutralne osi (pola debljine = 25 mm),
- $I$  moment inercije (za pravokutni presjek iznosi  $83333.33 \text{ mm}^4$ ).

Izračunavanje maksimalnog momenta savijanja:

$$M = (10.5 \text{ GPa} \times 83333.33 \text{ mm}^4) / 25 \text{ mm} = 35,000 \text{ Nm}$$

Uzorak može podnijeti maksimalni moment savijanja od 35,000 Nm prije nego što se slomi. Savijanje uzrokuje različite napetosti na gornjoj i donjoj strani uzorka, pri čemu će donja strana, koja je pod zateznim naprezanjima, prva popustiti.

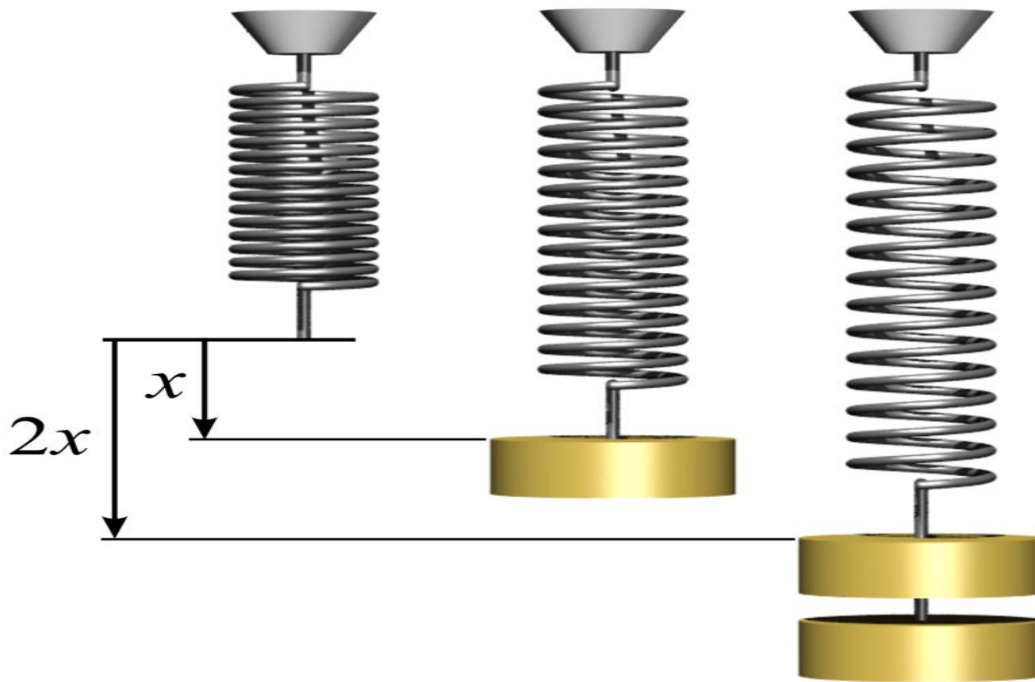
- Maksimalna tlačna sila: 200 kN
- Maksimalni moment savijanja: 35,000 Nm

Uzorak može podnijeti navedena opterećenja, ali ako se ta opterećenja premaše, uzorak će početi pucati. Vlačna sila uzrokuje razdvajanje vlakana, dok tlačna sila sabija vlakna drveta, a moment savijanja izaziva zakretanje i naprezanja koja uzrokuju lom u području zatezanja. Ovi proračuni oslanjaju se na prosječne vrijednosti otpornosti materijala, te u stvarnim uvjetima mogu varirati ovisno o kvaliteti hrastovine, uvjetima okoliša i eventualnim nepravilnostima u strukturi drva.

### 5.3. Proračun vijka, čavala i ostalo

#### 5.3.1. Izračun produljenja i savijanja vijka

Kako bismo izračunali koliko produljenje vijak može podnijeti prije nego pukne pri istežanju po dužini, moramo koristiti formulu za produljenje pri istežanju, koja se temelji na Hookeovom zakonu:



Slika 16. Hookeov zakon

$$\Delta L = \frac{(F \times L_0)}{(A \times E)} \quad (11)$$

-Vijak 6x60mm

Gdje su:

- $\Delta L$  – produljenje vijka,
- $F$  – sila primijenjena na vijak,
- $L_0$  – početna duljina vijka (60 mm),
- $A$  – površina presjeka vijka,
- $E$  – modul elastičnosti (Youngov modul) materijala vijka, koji za čelik kvalitete 8.8 obično iznosi oko 210 GPa (giga-paskala).

Površina presjeka vijka ( $A$ ):

Pretpostavljam da je 6 mm promjer jezgre vijka. Površina presjeka vijka je (9):

$$A = \frac{(\pi \times d^2)}{4} \quad (9)$$

Za promjer  $d = 6$  mm:

$$A = \frac{(\pi \times (6^2))}{4} = 28.27 \text{ mm}^2$$

Maksimalna sila prije loma:

Za čelik kvalitete 8.8, napon loma iznosi približno 640 MPa (640 N/mm<sup>2</sup>). Sada možemo izračunati maksimalnu silu koju vijak može podnijeti prije nego pukne (10):

$$F_m = \sigma_l \times A = 640 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \times 28.27 \text{ mm}^2 = 18,093 \text{ N} \quad (10)$$

Sada možemo izračunati produljenje (11):

$$\Delta L = \frac{(18,093 \text{ N} \times 60 \text{ mm})}{\left(28.27 \text{ mm}^2 \times 210,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right)} \approx 0.018 \text{ mm} \quad (11)$$

Dakle, vijak se može produljiti za oko 0.018 mm prije nego što pukne pri rastezanju.

-Vijak 8x60 mm

Dimenzije vijka: 8x60 mm

Kvaliteta vijka: 8.8 (čelik)

Modul elastičnosti za čelik:  $E = 210$  GPa (210,000 MPa)

Napon loma za čelik kvalitete 8.8,  $\sigma_l = 640$  MPa.

1. Površina presjeka vijka (A):

Za vijak promjera 8 mm, površina presjeka se računa pomoću formule za površinu kruga:

$$A = \frac{(\pi \times d^2)}{4} \quad (9)$$

Za promjer  $d = 8$  mm:

$$A = \frac{(\pi \times (8^2))}{4} = 50.27 \text{ mm}^2 \quad (9)$$

2. Maksimalna sila prije loma ( $F_{\max}$ ):

Maksimalna sila koju vijak može podnijeti prije nego pukne:

$$F_m = \sigma_l \times A = 640 \text{ MPa} \times 50.27 \text{ mm}^2 = 32,173 \text{ N} \quad (10)$$

3. Produljenje vijka ( $\Delta L$ ):

Produljenje se može izračunati pomoću Hookeovog zakona:

$$\Delta L = \frac{(F \times L_0)}{(A \times E)} \quad (11)$$

Gdje su:

- $F$  – sila na vijku (maksimalna sila prije loma),
- $L_0$  – početna duljina vijka (60 mm),
- $A$  – površina presjeka (50.27 mm<sup>2</sup>),
- $E$  – modul elastičnosti (210,000 MPa).

$$\Delta L = \frac{(32,173 \text{ N} \times 60 \text{ mm})}{(50.27 \text{ mm}^2 \times 210,000 \text{ MPa})} \approx 0.0183 \text{ mm} \quad (11)$$

Vijak promjera 8 mm i duljine 60 mm može se produljiti za oko 0.0183 mm prije nego što pukne pri maksimalnom opterećenju od 32,173 N.

-Vijak 10x60

Podaci:

- Promjer: 10 mm
- Duljina: 60 mm
- Vlačna čvrstoća: 800 N/mm<sup>2</sup>
- Materijal: čelik kvalitete 8.8 ( $E = 210 \text{ GPa}$ )
- Vijak zavijen u drvo: 30 mm.

## 1. Izračun produljenja vijka prije nego pukne pri rastezanju

Gdje su:

- $F$  – sila koja uzrokuje maksimalno naprezanje (dobivena iz vlačne čvrstoće i površine presjeka),
- $L_0$  – početna duljina vijka ( $L = 60 \text{ mm}$ ),
- $A$  – površina presjeka vijka (računa se na osnovi promjera),
- $E$  – modul elastičnosti čelika (210,000 MPa).

Površina presjeka vijka:

Za promjer  $D = 10 \text{ mm}$ , površina presjeka je:

$$A = \frac{(\pi \times (10)^2)}{4} = 78.54 \text{ mm}^2 \quad (9)$$

Maksimalna sila prije loma:

Maksimalna sila prije nego što vijak pukne računa se na temelju vlačne čvrstoće materijala:



$$F_m = \sigma_v \times A = 800 \frac{N}{mm^2} \times 78.54 \text{ mm}^2 = 62,832 \text{ N} \quad (10)$$

Produljenje  $\Delta L$ :

Produljenje prije loma računa se pomoću formule:

$$\Delta L = \frac{(F_m \times L)}{(A \times E)} = \frac{(62,832 \text{ N} \times 60 \text{ mm})}{(78.54 \text{ mm}^2 \times 210,000 \text{ MPa})} \quad (11)$$

$$\Delta L \approx 0.0229 \text{ mm}$$

Vijak promjera 10 mm i duljine 60 mm može se produljiti za oko 0.0229 mm prije nego što pukne pri m

-Izračun produljenja navojne šipke DIN 976 4.6 M12x60 mm

Podaci za šipku:

- Standard: DIN 976
- Kvaliteta: 4.6 (čvrstoća na istezanje: 400 MPa, granica tečenja: 240 MPa)
- Promjer: M12 (12 mm)
- Duljina: 60 mm
- Modul elastičnosti za čelik:  $E = 210 \text{ GPa}$  (210,000 MPa).

Površina presjeka:

Površina presjeka navoja šipke računa se kao površina kruga:

Za promjer  $D = 12 \text{ mm}$ :

$$A = \frac{(\pi \times (12)^2)}{4} = 113.1 \text{ mm}^2 \quad (9)$$

Maksimalna sila prije loma:

Maksimalna sila koju šipka može podnijeti prije nego pukne:

$$F_m = \sigma_v \times A = 400 \text{ MPa} \times 113.1 \text{ mm}^2 = 45,240 \text{ N} \quad (10)$$

Produljenje šipke  $\Delta L$ :

Koristimo Hookeov zakon za izračun produljenja:

$$\Delta L = \frac{(F_m \times L_0)}{(A \times E)} \quad (11)$$

Gdje su:

- $F_m$  – maksimalna sila (45,240 N),
- $L_0$  – početna duljina šipke (60 mm),

- $A$  – površina presjeka ( $113.1 \text{ mm}^2$ ),
- $E$  – modul elastičnosti ( $210,000 \text{ MPa}$ ).

Izračun:

$$\Delta L = \frac{(45,240 \text{ N} * 60 \text{ mm})}{(113.1 \text{ mm}^2 * 210,000 \text{ MPa})} \approx 0.0114 \text{ mm} \quad (11)$$

Navojna šipka M12x60 mm, kvalitete 4.6, može se produljiti za oko 0.0114 mm prije nego što pukne pod maksimalnom silom od 45,240 N.

#### 5.4. Izračun produljenja čavla

Podaci:

- Modul elastičnosti čelika:  $E = 210 \text{ GPa}$  ( $210,000 \text{ MPa}$ )
- Vlačna čvrstoća čelika:  $\sigma_v = 400 \text{ MPa}$ .

1. Čavao 50x2.5 mm

Površina presjeka:

$$A = \frac{(\pi * 2.5^2)}{4} = 4.91 \text{ mm}^2 \quad (9)$$

Maksimalna sila prije loma:  $F_{max} = 400 \text{ MPa} * 4.91 \text{ mm}^2 = 1,964 \text{ N}$

Produljenje:

$$\Delta L = \frac{(F_m * L_0)}{(A * E)} = 0.0094 \quad (11)$$

2. Čavao 70x3.1 mm

Površina presjeka:

$$A = \frac{(\pi * 3.1^2)}{4} = 7.55 \text{ mm}^2 \quad (9)$$

Maksimalna sila prije loma:  $F_{max} = 400 \text{ MPa} * 7.55 \text{ mm}^2 = 3,020 \text{ N}$

Produljenje

$$\Delta L = \frac{(F_m * L_0)}{(A * E)} = 0.0132 \quad (11)$$

3. Čavao 100x4.2 mm

Površina presjeka:

$$A = \frac{(\pi \times 4.2^2)}{4} = 13.85 \text{ mm}^2 \quad (9)$$

Maksimalna sila prije loma:  $F_m = 400 \text{ MPa} \times 13.85 \text{ mm}^2 = 5,540 \text{ N}$

Produljenje:

$$\Delta L = \frac{(F_m \times L_0)}{(A \times E)} = 0.0192 \quad (11)$$

1. Čavao 50x2.5 mm: Produljenje  $\approx 0.0094 \text{ mm}$ .
2. Čavao 70x3.1 mm: Produljenje  $\approx 0.0132 \text{ mm}$ .
3. Čavao 100x4.2 mm: Produljenje  $\approx 0.0192 \text{ mm}$ .

### -Izračun produljenja tiple

Podaci:

- Promjer tiple: 8 mm,
- Duljina tiple: 50 mm,
- Materijal: jelovina,
- Vlačna čvrstoća jelovine: 40 MPa,
- Smična čvrstoća jelovine: 6 MPa,
- Modul elastičnosti jelovine: 10 GPa (10,000 MPa).

. Produljenje tiple prije pucanja

Maksimalna sila prije pucanja:  $F_m = \sigma_v \times A = 40 \text{ MPa} \times 50.27 \text{ mm}^2 = 2,010.8 \text{ N}$

Produljenje:

$$\Delta L = \frac{(F_m \times L_0)}{(A \times E)} \quad (11)$$

$\approx 0.02 \text{ mm}$

Produljenje tiple prije pucanja je oko 0.02 mm.

## 5.5. Smično naprezanje

1. Vijak 6 x 60 mm (kvaliteta 8.8)

Koristimo Hookeov zakon za izračun produljenja pri rastezanju.

Površina presjeka:

$$A = \frac{(\pi * D^2)}{4} = \frac{(\pi \times (6)^2)}{4} = 28.27 \text{ mm}^2 \quad (9)$$

Maksimalna sila:

$$F_m = \sigma_v \times A = 640 \text{ MPa} * 28.27 \text{ mm}^2 = 18,093 \text{ N} \quad (10)$$

Produljenje prije pucanja:

$$\Delta L = \frac{(F_m \times L_0)}{(A \times E)} \approx 0.0183 \text{ mm} \quad (11)$$

Smična sila (12):

$$F_s = \tau_s \times A = 384 \text{ MPa} \times 28.27 \text{ mm}^2 \approx 10,857 \text{ N} \quad (12)$$

2. Vijak 8 x 60 mm (kvaliteta 8.8)

Koristimo Hookeov zakon za izračun produljenja pri rastezanju.

Površina presjeka:  $A = 50.27 \text{ mm}^2$ ,

Maksimalna sila:  $F_m = 640 \text{ MPa} \times 50.27 \text{ mm}^2 = 32,173 \text{ N}$ ,

Produljenje prije pucanja:  $\Delta L \approx 0.0229 \text{ mm}$ ,

Smična sila:  $F_s = 384 \text{ MPa} \times 50.27 \text{ mm}^2 \approx 19,704 \text{ N}$ .

3. Vijak M10 x 140 mm (kvaliteta 8.8)

Koristimo Hookeov zakon za izračun produljenja pri rastezanju.

Površina presjeka:  $A = 78.54 \text{ mm}^2$ ,

Maksimalna sila:  $F_m = 640 \text{ MPa} \times 78.54 \text{ mm}^2 = 50,266 \text{ N}$ ,

Produljenje prije pucanja:  $\Delta L \approx 0.0229 \text{ mm}$ ,

Smična sila:  $F_s = 384 \text{ MPa} \times 78.54 \text{ mm}^2 \approx 30,153 \text{ N}$ .

4. Navojna šipka DIN 976 4.6 M12 x 60 mm,

Koristimo Hookeov zakon za izračun produljenja pri rastezanju.

Površina presjeka:  $A = 113.1 \text{ mm}^2$ ,

Maksimalna sila:  $F_m = 400 \text{ MPa} \times 113.1 \text{ mm}^2 = 45,240 \text{ N}$ ,

Produljenje prije pucanja:  $\Delta L \approx 0.0114 \text{ mm}$ ,

Smična sila:  $F_s \approx 27,144 \text{ N}$ .

5. Čavao 50 x 2.5 mm

Koristimo Hookeov zakon za izračun produljenja pri rastezanju.

Površina presjeka:  $A = 4.91 \text{ mm}^2$ ,

Maksimalna sila:  $F_m = 40 \text{ MPa} \times 4.91 \text{ mm}^2 = 1,964 \text{ N}$ ,

Produljenje prije pucanja:  $\Delta L \approx 0.0094 \text{ mm}$ .

Sila savijanja (sila potrebna da se vijak savine ako je do pola fiksno pričvršćen (13):

$$sila_{savijanja} = \frac{\sigma_v \times D}{2} = \frac{40 \text{ Mpa} \times 2.5}{2} = 50 \text{ N} \quad (13)$$

#### 6. Čavao 70 x 3.1 mm

Koristimo Hookeov zakon za izračun produljenja pri rastezanju.

Površina presjeka:  $A = 7.55 \text{ mm}^2$ ,

Maksimalna sila:  $F_m = 40 \text{ MPa} \times 7.55 \text{ mm}^2 = 3,020 \text{ N}$ ,

Produljenje prije pucanja:  $\Delta L \approx 0.0132 \text{ mm}$ ,

Sila savijanja  $\approx 62 \text{ N}$ .

#### 7. Čavao 100 x 4.2 mm

Koristimo Hookeov zakon za izračun produljenja pri rastezanju.

Površina presjeka:  $A = 13.85 \text{ mm}^2$ ,

Maksimalna sila:  $F_m = 40 \text{ MPa} \times 13.85 \text{ mm}^2 = 5,540 \text{ N}$ ,

Produljenje prije pucanja:  $\Delta L \approx 0.0192 \text{ mm}$ ,

Sila savijanja  $\approx 84 \text{ N}$ .

#### 8. Drvena tipla (jelovina) promjera 8 mm i duljine 50 mm.

Koristimo Hookeov zakon za izračun produljenja pri rastezanju,

Površina presjeka:  $A = 50.27 \text{ mm}^2$ ,

Maksimalna sila:  $F_{\max} = 40 \text{ MPa} \times 50.27 \text{ mm}^2 = 2,010 \text{ N}$ ,

Produljenje prije pucanja:  $\Delta L \approx 0.02 \text{ mm}$ ,

Smična sila:  $F_s \approx 301.62 \text{ N}$ .

## 6. Vlačno ispitivanje priprema, postupak i rezultati

Vlačno ispitivanje je jedna od ključnih metoda ispitivanja mehaničkih svojstava materijala, posebno u kontekstu drvenih konstrukcija. U ovom konkretnom slučaju, provodi se ispitivanje spojeva različitih vrsta drveta i spojnih elemenata, s ciljem procjene njihovih kapaciteta pod vlačnim opterećenjem. Uzorak korišten u ispitivanju ima dimenzije 800 x 50 x 80 mm, te se ispituje sve do trenutka kada dođe do popuštanja spoja ili pucanja materijala, što omogućuje ocjenu nosivosti i kvalitete spoja. Dimenzije spoja i uzorka moguće je vidjeti na nacrtu 01/03, nalazi se u tehničkoj dokumentaciji. Izgled uzoraka možemo vidjeti na Slici 17..

Ispitivanje obuhvaća nekoliko tipova spojeva i spojnih elemenata, uključujući čavle različitih duljina i dimenzija, vijke različitih promjera te kombinirane spojeve poput čep-utora, tiple, i tiple u kombinaciji s ljepilom. Spojni elementi koji su korišteni uključuju čavle duljine 50x2.5, 70x3.1 i 100x4.1 mm te vijke duljine 50 mm s promjerima od 4, 5, 6, 8 i 10 mm (po tri komada u svakom ispitivanju). Uz to, testirani su i složeniji spojevi, kao što su čep-utor i tipla, čep-utor, te kombinacija tiple i ljepila. Materijali korišteni u ispitivanju uključuju tri vrste drveta: jelovinu, bukovinu i hrastovinu. Svaki od ovih materijala ima različita mehanička svojstva, kao što su gustoća, tvrdoća i čvrstoća na savijanje, što omogućuje ispitivanje kako različiti materijali utječu na performanse spojeva pod opterećenjem. Jelovina, kao meko drvo, ima nižu gustoću i nižu čvrstoću u usporedbi s bukovinom i hrastovinom, koji su tvrda drva s većom gustoćom i većom otpornošću na savijanje i lom.



Slika 17. Uzorci za vlačno ispitivanje

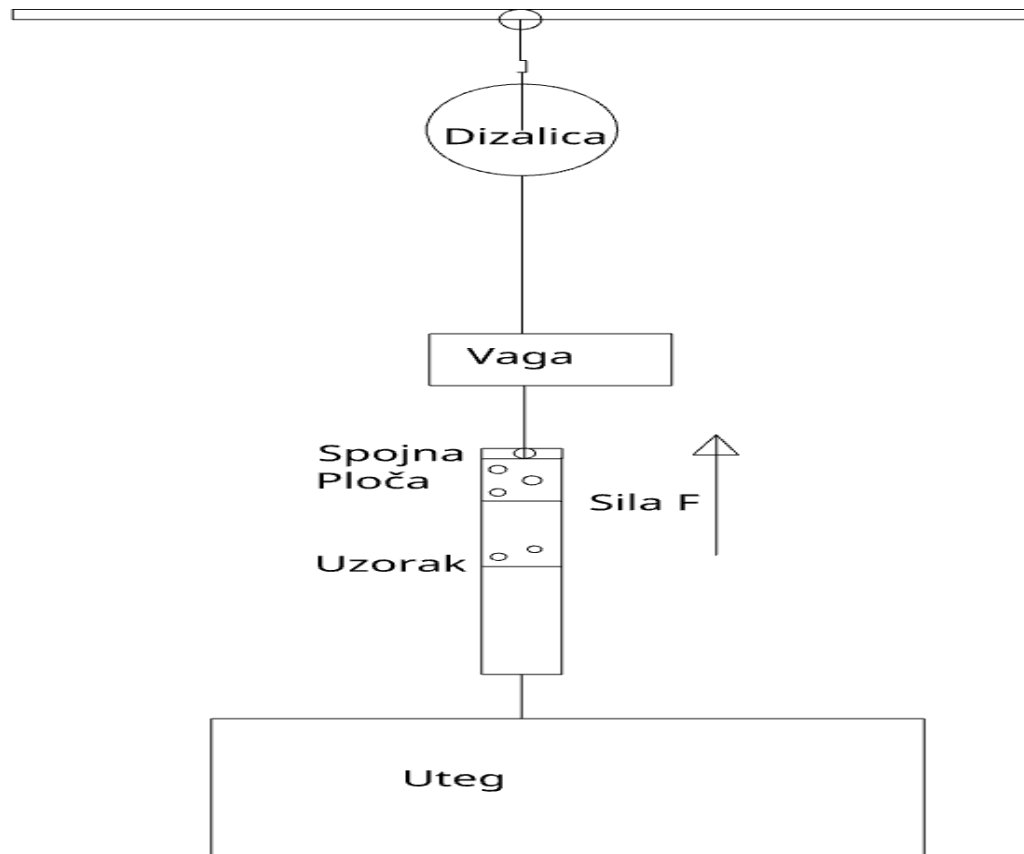
Za svaku kombinaciju materijala i spojnog elementa, ispitivanje je provedeno tri puta kako bi se dobili reprezentativni rezultati. Ova replikacija omogućuje smanjenje utjecaja nasumičnih varijacija u materijalima i postupcima te osigurava točnije i pouzdanije rezultate. Svaki test je dizajniran da ispita nosivost spoja u uvjetima vlačnog opterećenja, pri čemu se mjeri sila koja

je potrebna da bi došlo do popuštanja ili pucanja spoja. Pomoću dizalice (prikazane u skici) primjenjuje se kontrolirana sila (sila  $F$ ), a vaga mjeri silu koja djeluje na uzorak. Dizalica je baždarena na maksimalnu podiznu masu od dvije tone (2T), podizanje se vrši pomoću lanca koji prenosi silu na zupčanik sa velikim brojem zuba što nam dopušta da dodavanje sile bude preciznije i u manjim intervalima. Tako da silu možemo očitavati što točnije. Vaga je baždarena do maksimalne mase vaganja jedne tone (1T), to nam je ujedno i definiralo dimenzije uzorka jer masivniji uzorci bi zahtijevali mnogo veću silu tada mjerenje ne bi bilo uspješno. Dodatno je izrađena spojna ploča koja je omogućavala spajanje uzorka sa ispitnim sustavom (test rigg). Ploča je izrađena od pločevine debljine 3,5mm, izrađena su 2 komada koji su dolazili svaki na svoju stranu uzorka. Metalni klin promjera 20mm sa dva sigurnosna elementa je dolazio na gornji di pločevine. Sa dva ili tri vijka M12 (ovisi jeli bilo potrebno) sa dodatkom 4 podloške i dvije matice M12 kroz provrt na spojnoj ploči i uzorku je stegnut spoj. Vidljive dimenzija su na nacrtu 02/03.



**Slika 18. Spoj uzorka na ispitni sustav**

Na slici 18. brojevima označeno je : 1.dizalica, 2. Vaga, 3. Metalni klin, 4. Spojna ploča, 5. Uzorak, 6. Vijci M12 (kao spojni elementi).



**Slika 19. Skica vlačnog ispitivanja**

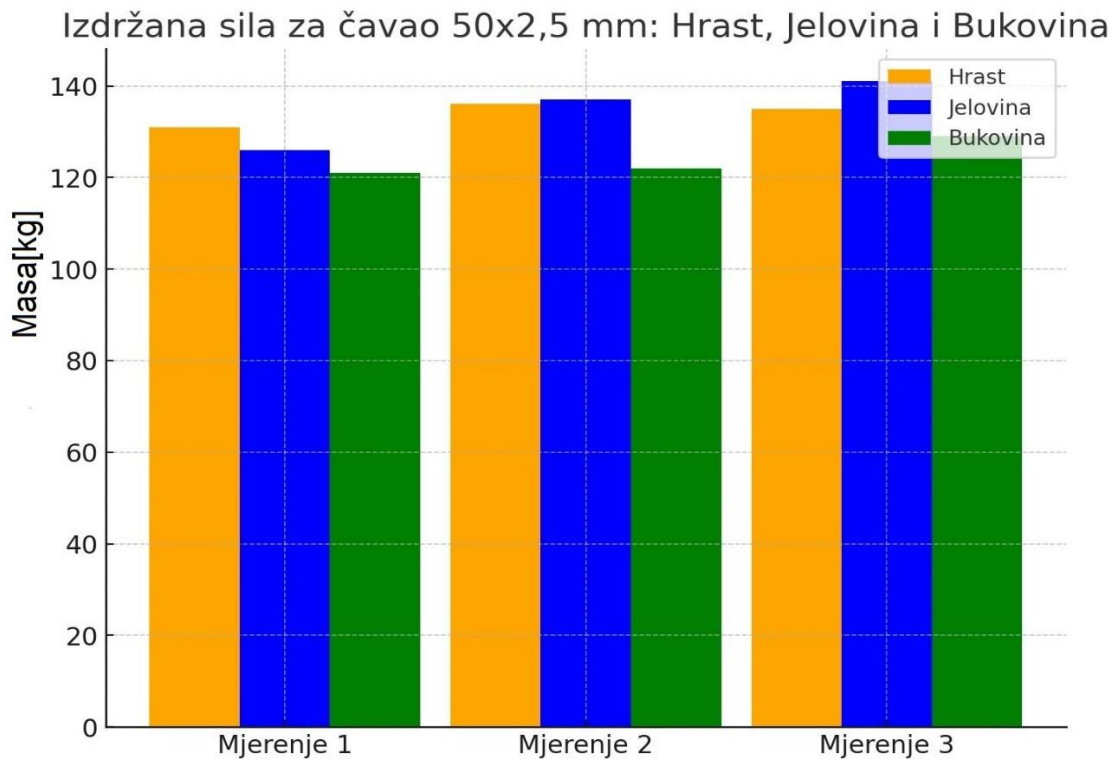
Ukupni broj uzoraka je bio 99. Čavli su bili zabijeni bez mjerenja sile, a vijci uvijeni pod maksimalnom silom od 150 Nm. Na slici 19. je prikazan koncept prema kojem se ispitivalo. Različiti spojevi daju različite mehaničke karakteristike i imaju specifične primjene u građevinarstvu i drvenim konstrukcijama. Spojevi s čavlima i vijcima često se koriste u konstrukcijama gdje je potrebna jednostavna montaža, dok su čep-utori i tiple složeniji spojevi, namijenjeni situacijama gdje su potrebne veće nosivosti i otpornosti na pomake. Očekuje se da će vijci većih promjera i dulji čavli pružiti veću otpornost na vlačna opterećenja zbog veće površine kontakta s drvetom, dok će kombinacije tiple i ljepila pružiti dodatnu čvrstoću zbog prijenosa opterećenja kroz ljepilo. Cilj ispitivanja je utvrditi koja kombinacija materijala i spojnih elemenata nudi najbolju otpornost na vlačna opterećenja. Poseban fokus je na ispitivanju da li složeniji spojevi (kao što su čep-utor i tipla s ljepilom) nude značajne prednosti u odnosu na jednostavne spojeve s čavlima i vijcima. Rezultati ovog ispitivanja mogu se koristiti za optimizaciju dizajna drvenih konstrukcija, gdje je važno osigurati visoku nosivost i dugotrajnost spojeva, posebno u konstrukcijama izloženim značajnim opterećenjima. Pokazat će se dodatno kako strojarski elementi poboljšavaju druge grane industrije.

Ovo vlačno ispitivanje pružit će ključne podatke o mehaničkim svojstvima različitih tipova spojeva u drvenim konstrukcijama. Analiza rezultata omogućit će inženjerima da odaberu optimalne materijale i spojne elemente ovisno o specifičnim zahtjevima konstrukcije, čime će se osigurati sigurnost, trajnost i ekonomičnost konstrukcije. Ovakva ispitivanja su ključna za razumijevanje ponašanja drvenih materijala pod opterećenjem i osiguranje kvalitete u građevinskim projektima.

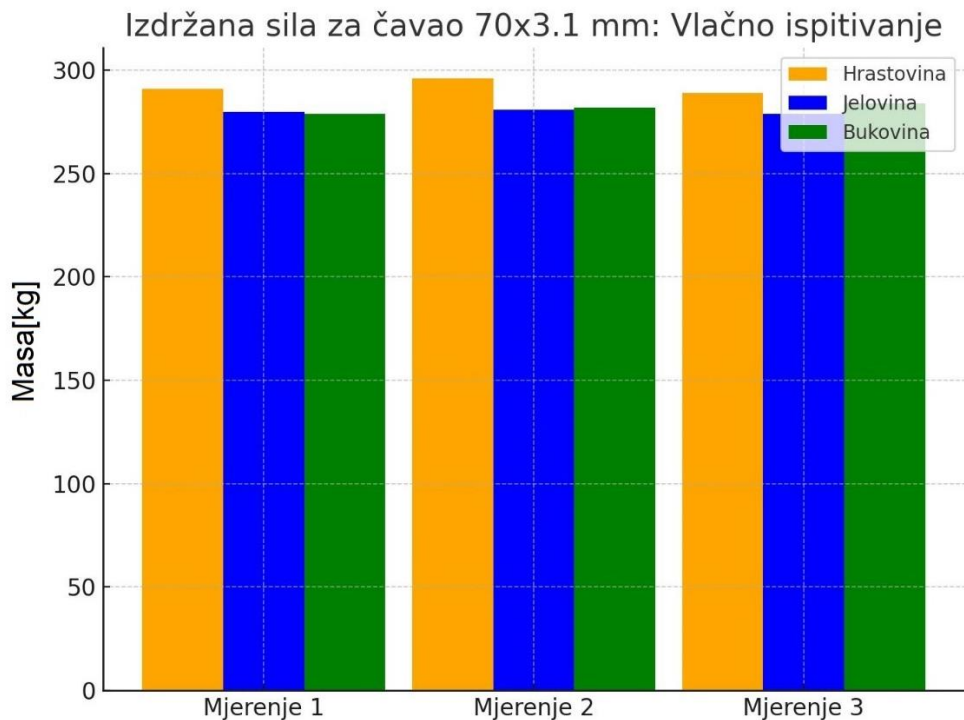


## 6.1. Rezultati

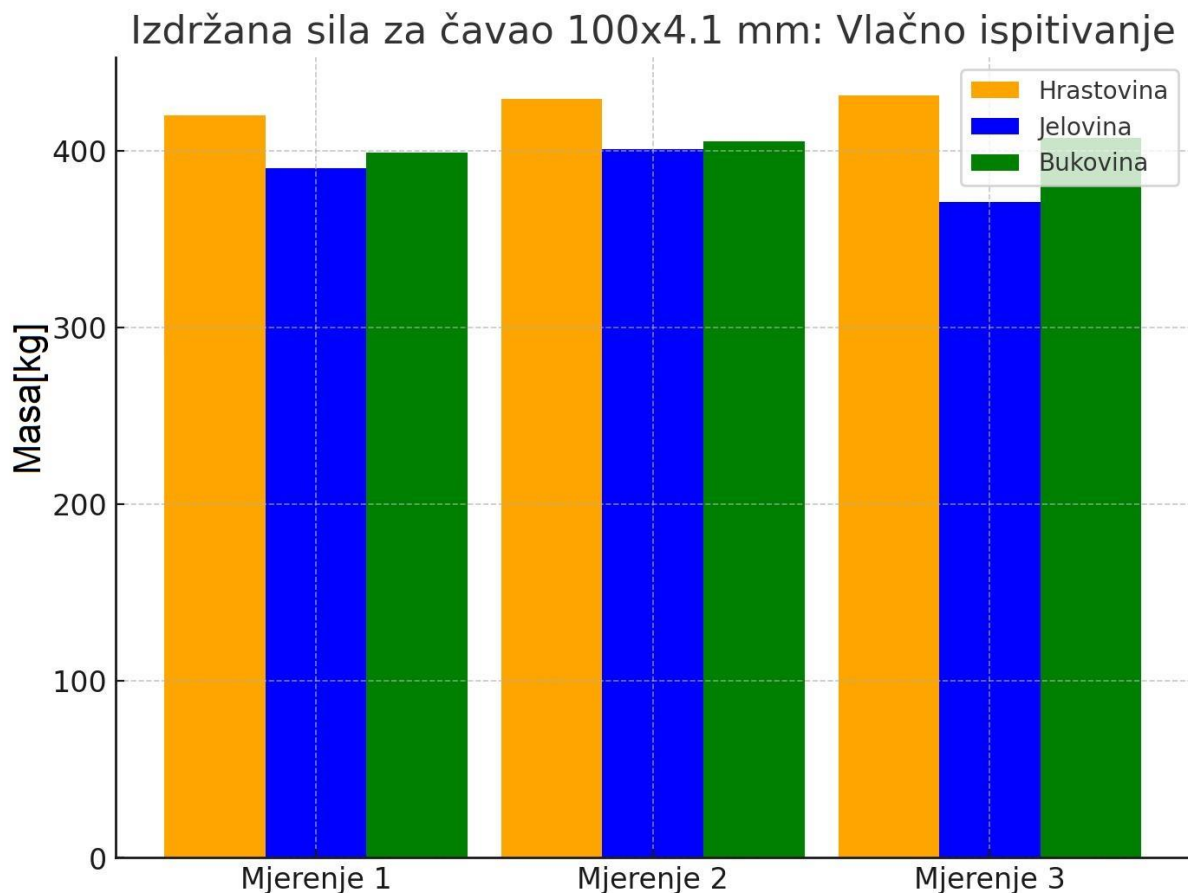
Rezultati će biti prikazani u obliku tablica (grafa) pa naknadno objašnjeni.



Slika 20. Izdržana sila za čavao 50x2,5mm



Slika 21. Izdržana sila za čavao 70x3,1mm



Slika 22. Izdržana sila za čavao 100x4,1mm

Na temelju prikazanih rezultata s grafova, proveden je niz ispitivanja vezanih za izdržljivost spojeva s čavlima različitih duljina i promjera u tri vrste drveta: hrastovini, jelovini i bukovini. Ispitivanje je bilo usmjereno na analizu vlačne sile (uzdužne sile) koja djeluje na čavle, pri čemu je zabilježeno savijanje čavala, ali nije došlo do pucanja spojnih elemenata. Ispitne snage, prikazane na grafovima, predstavljaju maksimalne sile pri kojima su spojevi počeli popuštati ili došlo do ozbiljnijih oštećenja. Čavli su se samo svijali i osmaknuli, zapažena je pojava smične sile zbog svojstava materijala od kojeg se izrađuju čavli.

Slika 20. -Čavao 50 mm x 2.5 mm:

Prikazani rezultati za čavao duljine 50 mm i promjera 2.5 mm pokazuju da je spoj najizdržljiviji bio kod bukovine (zeleni stupac), dok su hrastovina (narančasti stupac) i jelovina (plavi stupac) pokazale nešto niže otpore. Sva tri ispitivanja (Mjerenje 1, 2 i 3) bila su konzistentna. Maksimalne sile izdržane kod jelovine bile su nešto niže, što može ukazivati na nižu gustoću i čvrstoću ovog drveta. Drvo se u ovom slučaju napelo, ali bez većih oštećenja, osim laganog smicanja spoja.

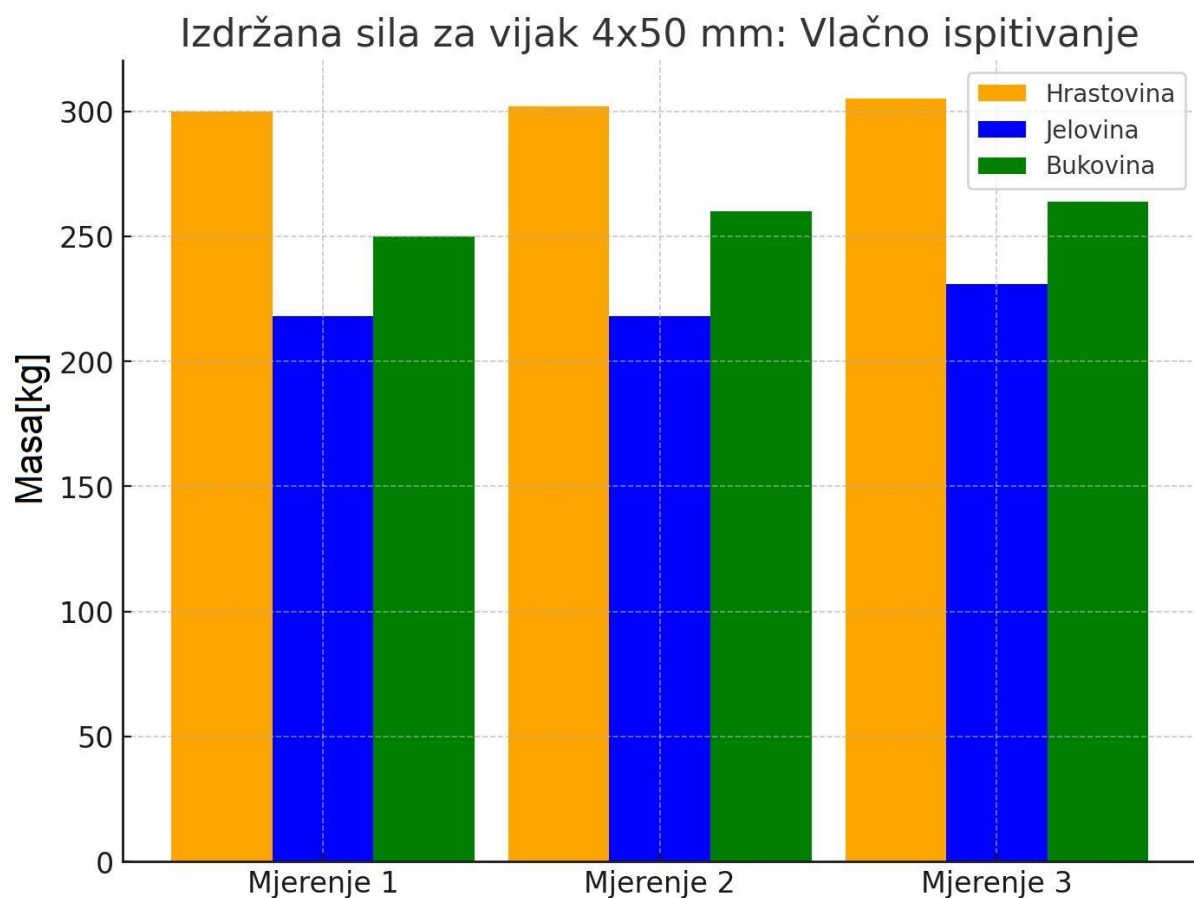
Slika 21. Čavao 70 mm x 3.1 mm:

Kod čavala duljine 70 mm i promjera 3.1 mm, rezultati pokazuju slične trendove, s bukvinom koja je izdržala najveće sile, dok su hrastovina i jelovina pokazale niže vrijednosti. Primijećeno

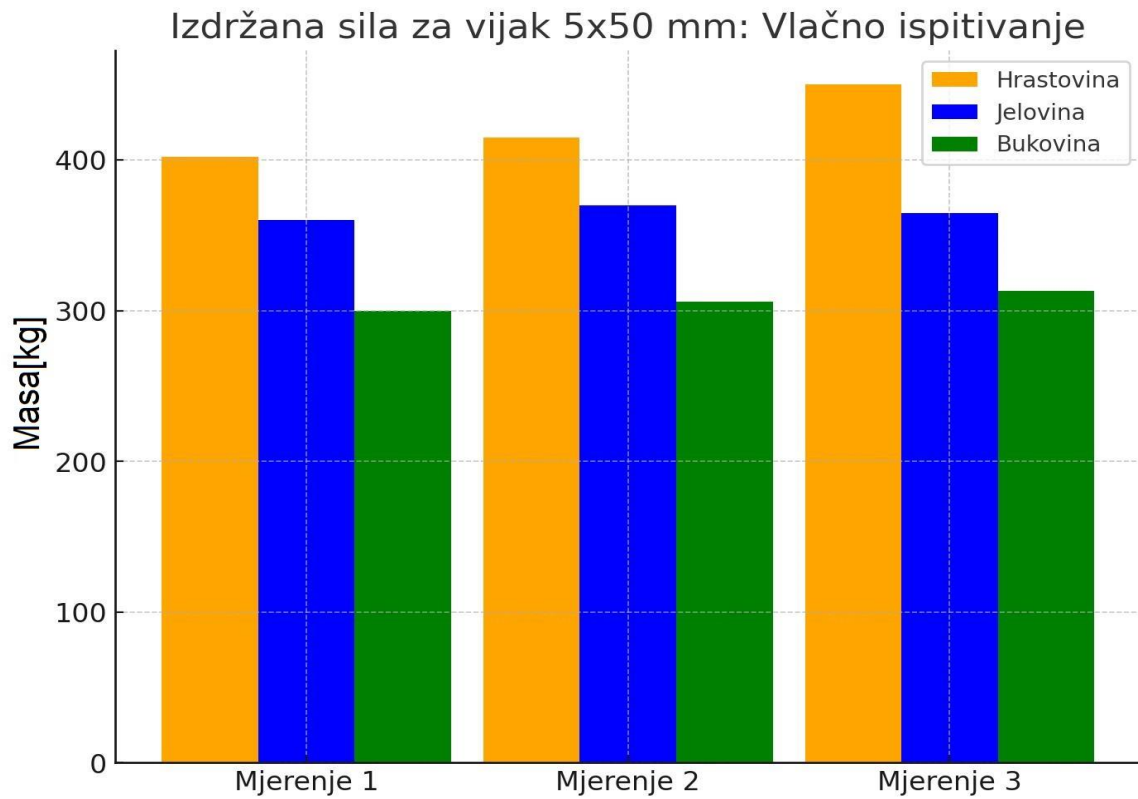
je da su svi spojevi s ovim čavlima zadržali stabilnost do visokih sila, a čavli su se značajno izvili pod opterećenjem. Jelovina je, međutim, pokazala nešto manju otpornost, što je rezultiralo vidljivijim oštećenjima prilikom sva tri ispitivanja.

Rezultati za čavao duljine 100 mm i promjera 4.1 mm pokazuju najviše izdržane sile među svim testiranim spojevima. Ovdje je došlo do većih oštećenja drva, posebno kod jelovine, gdje su oštećenja bila prisutna u sva tri ispitivanja (plavi stupci). Hrastovina i bukovina su pokazale bolju otpornost, iako su čavli kod svih tipova drveta pokazali izvijanje, bez pucanja samih čavala. Zabilježene su najveće sile, a oštećenja drva bila su vidljiva zbog naprezanja, posebno kod jelovine, što ukazuje na slabost ovog materijala u odnosu na hrastovinu i bukovinu.

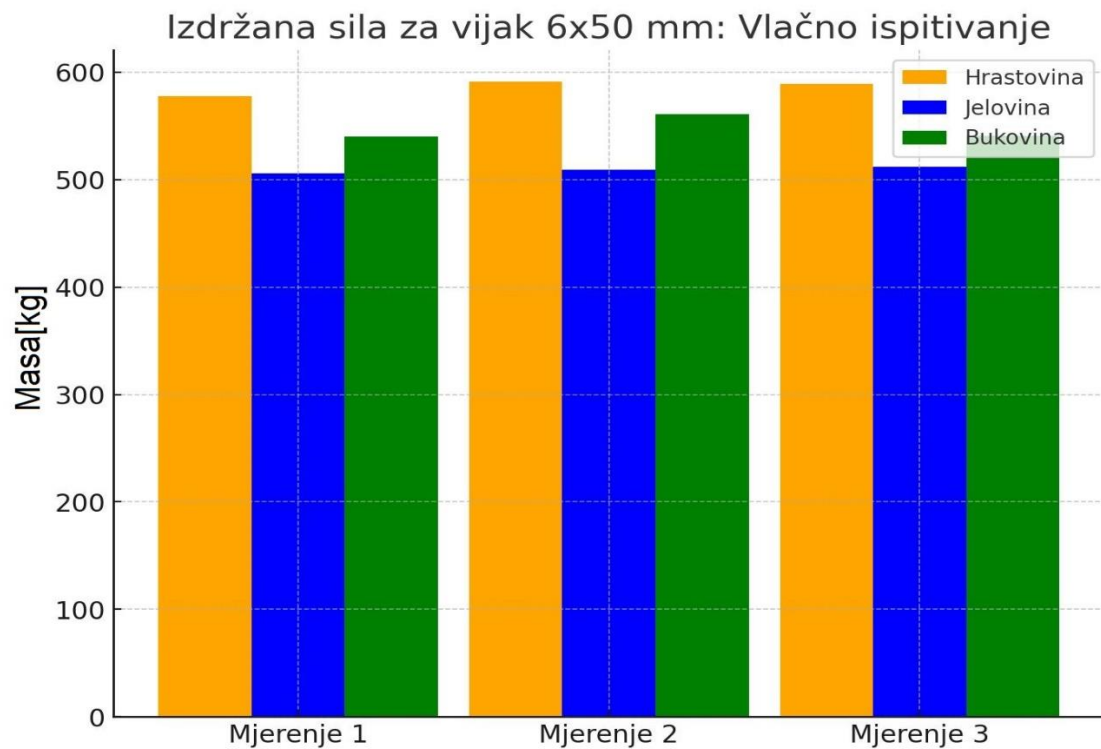
Ispitivanje je pokazalo da su čavli, iako su se izvijali pod smičnim silama, zadržali integritet bez pucanja. Najveća oštećenja primijećena su kod jelovine, koja je imala manju otpornost na smična opterećenja u usporedbi s bukovinom i hrastovinom. Kod čavala duljine 100 mm, oštećenja su postala očitija, osobito kod jelovine, dok su hrastovina i bukovina pokazale bolju izdržljivost. Ako spajamo konstrukciju čavlima bilo bi dobro dodati barem 4 umjesto dva (u svrhu ispitivanja uzeta su dva zbog ograničenja ispitnog mjerenja). Čavao bi bio bolji izbor ako se radi o trusnom području je dopušta drvetu da „diše“ i uvija se tijekom potresa, a vijci često pucaju pod djelovanjem smične (odrezne) sile.



Slika 23. Izdržana sila za vijak 4x50mm

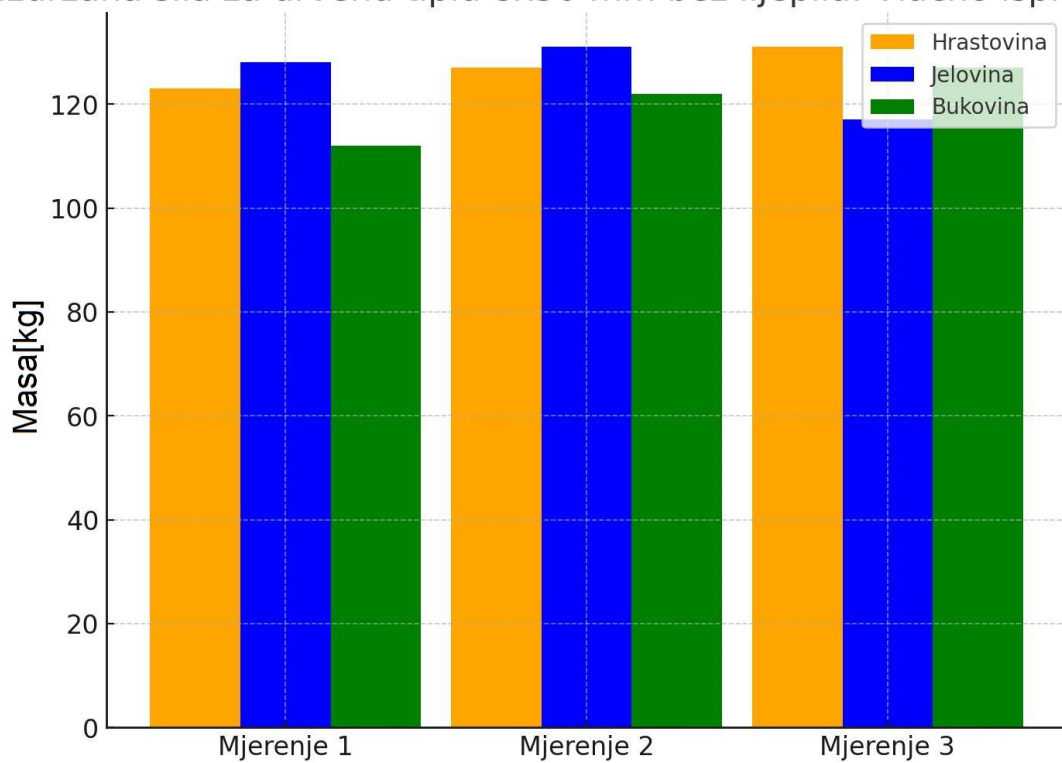


Slika 24. Izdržana sila za vijak 5x50mm



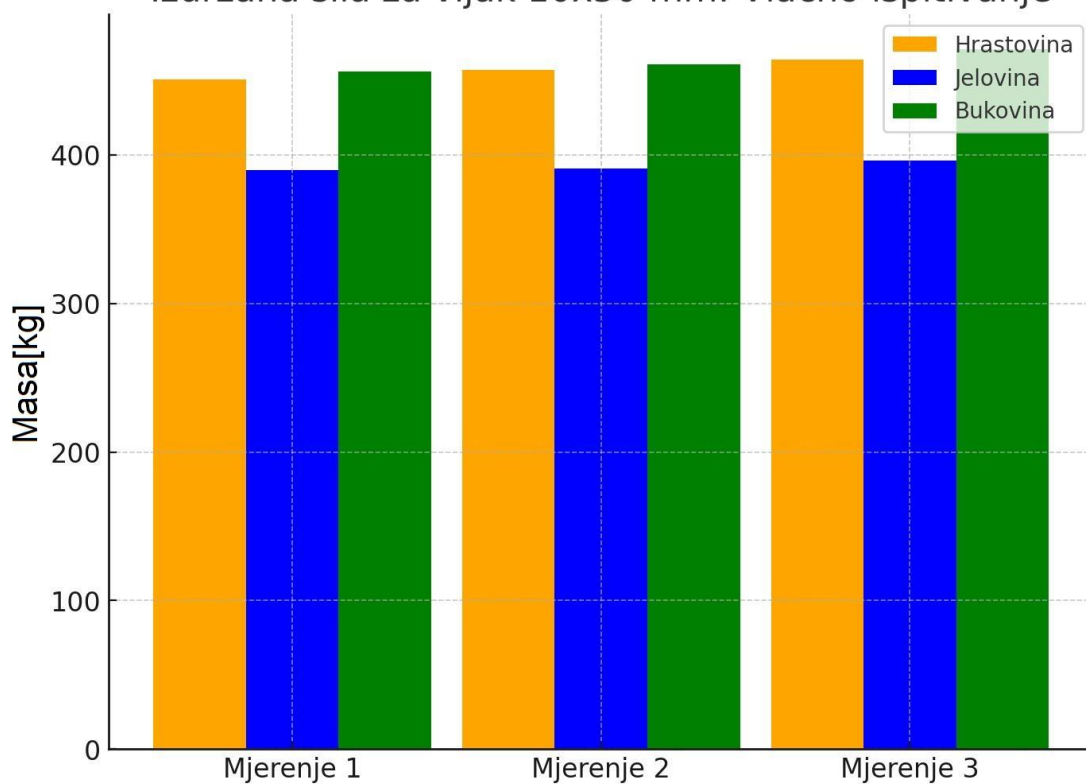
Slika 25. Izdržana sila za vijak 6x50mm

## Izdržana sila za drvenu tiplu 8x50 mm bez lijepila: Vlačno ispitivanje



Slika 26. Izdržana sila za vijak 8x50mm

## Izdržana sila za vijak 10x50 mm: Vlačno ispitivanje



Slika 27. Izdržana sila za vijak 10x50mm

U ovom ispitivanju analizirali smo izdržljivost vijaka različitih promjera pod vlačnim opterećenjem od najmanjeg (4 mm) do najvećeg (10 mm), utječu na ukupnu izdržljivost spoja, s posebnim naglaskom na točku pucanja i ponašanje vijaka pri vlačnim silama.

Koristili smo vijke promjera 4 mm, 5 mm, 6 mm, 8 mm i 10 mm, svi duljine 50 mm. Spojevi su ispitivani tri puta na svakoj vrsti drveta kako bi se dobili reprezentativni podaci. Prikazane vrijednosti na grafovima predstavljaju maksimalne sile (u kilogramima) pri kojima su spojevi popustili, odnosno kada je došlo do pucanja vijka ili drva, te savijanja vijaka. Očekivani rezultati su iznad 500 kg inače ne zadovoljavaju ,jer kod grede 100x160 zahtijevana nosivost je barem jedna tona po spoju po eurocodu 5 za manje konstrukcije.

Vijak promjera 4 mm (Slika 23.) pokazao je najniže izdržane sile i ispao je nepogodan za ovakva ispitivanja jer je puknuo kod relativno niskih sila u svim ispitivanim materijalima. Zbog premale otpornosti na vlačno opterećenje, nije mogao podnijeti dovoljnu silu kako bi se koristio u zahtjevnijim aplikacijama. Došlo je do smicanja prije nego kod čavla od 4.1 mm u hrastovini je pokazao malo veću izdržljivost zbog tvrdoće drveta ,ali zanemarivo. Na temelju toga, vijak promjera 4 mm nije zadovoljavao potrebe ispitivanja.

Vijci promjera 5 mm (Slika 24.) pokazali su nešto veće izdržane sile, ali su također u konačnici pukli pod opterećenjem u svim vrstama drveta. Najbolju izdržljivost pokazali su u bukovini, dok je jelovina pokazala najslabije rezultate. Iako su postigli bolje rezultate od vijaka od 4 mm, još uvijek su bili ispod potrebnog praga za trajnu upotrebu u težim uvjetima.

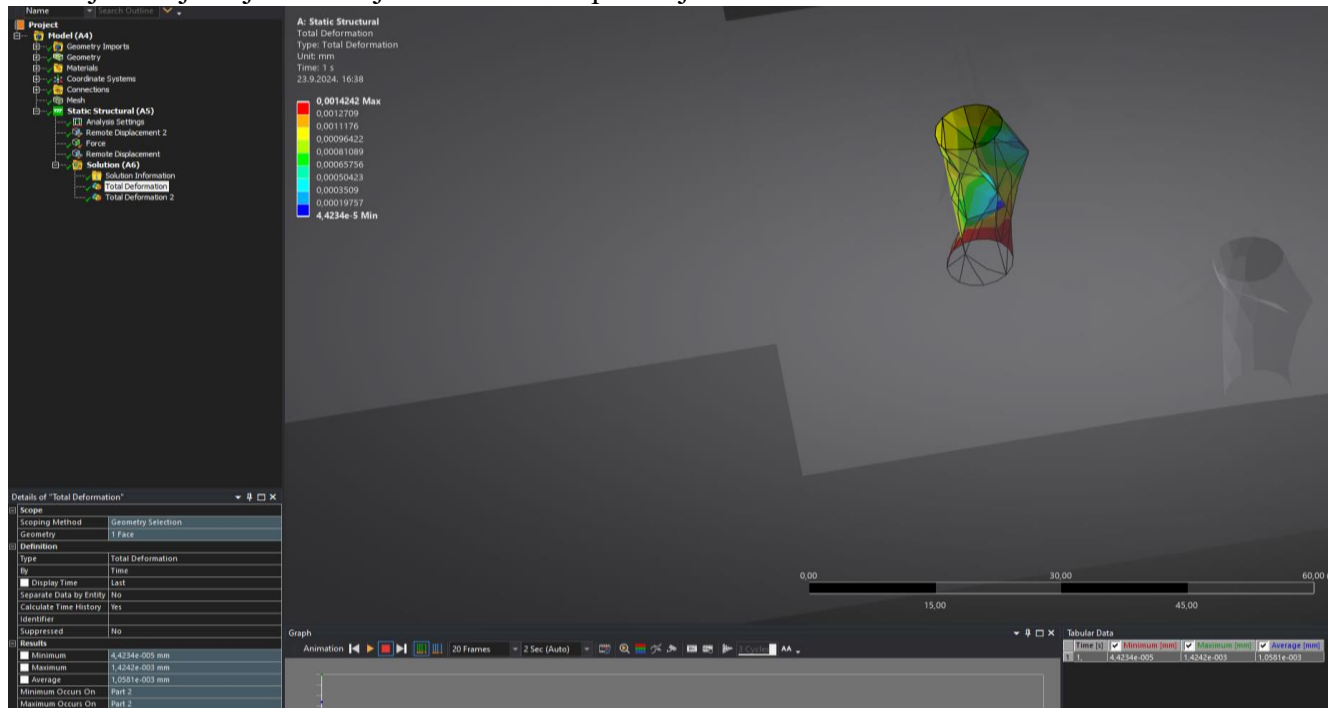
Vijak promjera 6 mm (Slika 25.) pokazao je značajno veću otpornost. Iako nije pukao, došlo je do savijanja vijka, što sugerira da je bio podvrgnut plastičnoj deformaciji prije nego što je došlo do pucanja spoja. Hrastovina je, kao materijal, pokazala najveće otpore, dok su u jelovini rezultati bili nešto slabiji. Vijak je savijen, ali nije pukao, što je pozitivan ishod u kontekstu njegove otpornosti na vlačne sile.

Vijci promjera 8 mm (Slika 26.) pokazali su najbolju otpornost na vlačno opterećenje u svim vrstama drveta. U bukovini i jelovini vijci su ostali netaknuti, dok se u hrastovini vijak promjera 8 mm savinuo, ali nije došlo do pucanja. Ova kombinacija pružila je najveću izdržanost pri vlačnim silama, što se vidi i u tablicama s grafovima gdje je postignuto maksimalno opterećenje od oko 700 kg. Vijak promjera 8 mm se pokazao kao optimalan za ove dimenzije uzorka.

Vijak promjera 10 mm (Slika 27.) očekivalo se da će pokazati najveću izdržljivost, zapravo je imao pad u otpornosti. Razlog je što je promjer provrta dosegao 12 mm, što je više od 1/5 ukupne širine uzorka (80x50 mm), čime je dodatno oslabljen uzorak, umjesto da se ojača spoj. Dok je vijak promjera 10 mm ostao netaknut u jelovini i bukovini, u hrastovini su svi osim jednog savinuli, što je pokazalo da preveliki provrti mogu oslabiti spoj umjesto da ga učine jačim.

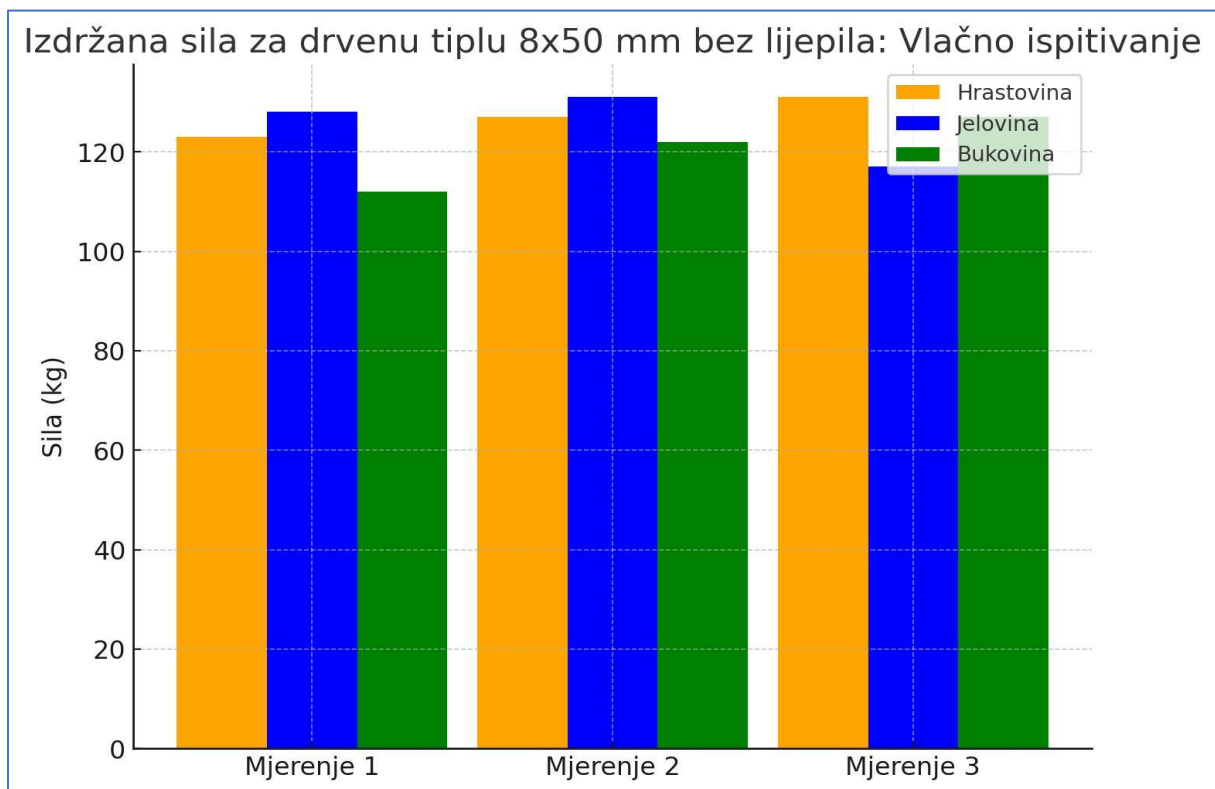
Ovo ispitivanje pokazalo je da se otpornost na vlačna opterećenja poboljšava s povećanjem promjera vijka, ali samo do određene granice. Najbolje rezultate postigli su vijci promjera 8 mm, dok je vijak promjera 10 mm, unatoč većoj debljini, pokazao pad u otpornosti zbog prevelikog promjera provrta, koji je oslabio drveni uzorak. Vijci manjih promjera (4 mm i 5 mm) pukli su pri nižim silama, dok su se vijci promjera 6 mm i 8 mm savili, ali nisu pukli.

Hrastovina je pokazala najbolje rezultate u smislu otpornosti na pucanje, dok je jelovina bila materijal s najmanjom izdržljivošću u svim ispitivanjima.



Slika 28. Deformacija rupe u drvetu pod djelovanjem sile

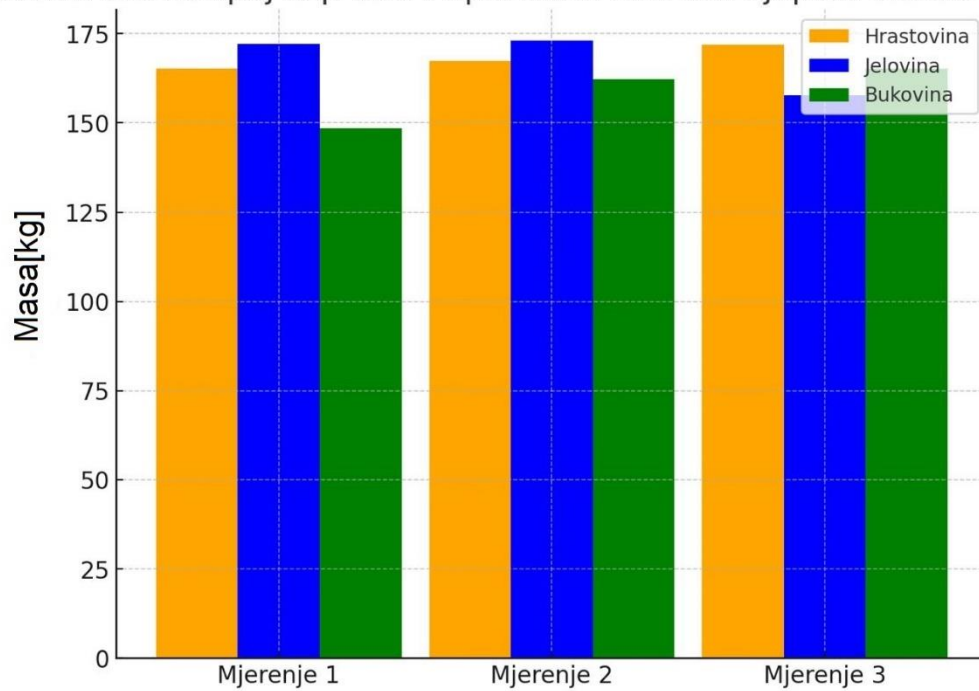
Izgled početne deformacije rupe u drvetu pod djelovanje vlačne sile, simulirano u programu ansys kod djelovanja debljeg vijka koji ne puca i ne savija se.



Slika 29. Izdržana sila za drvenu tiplu 8x50mm, bez ljepila

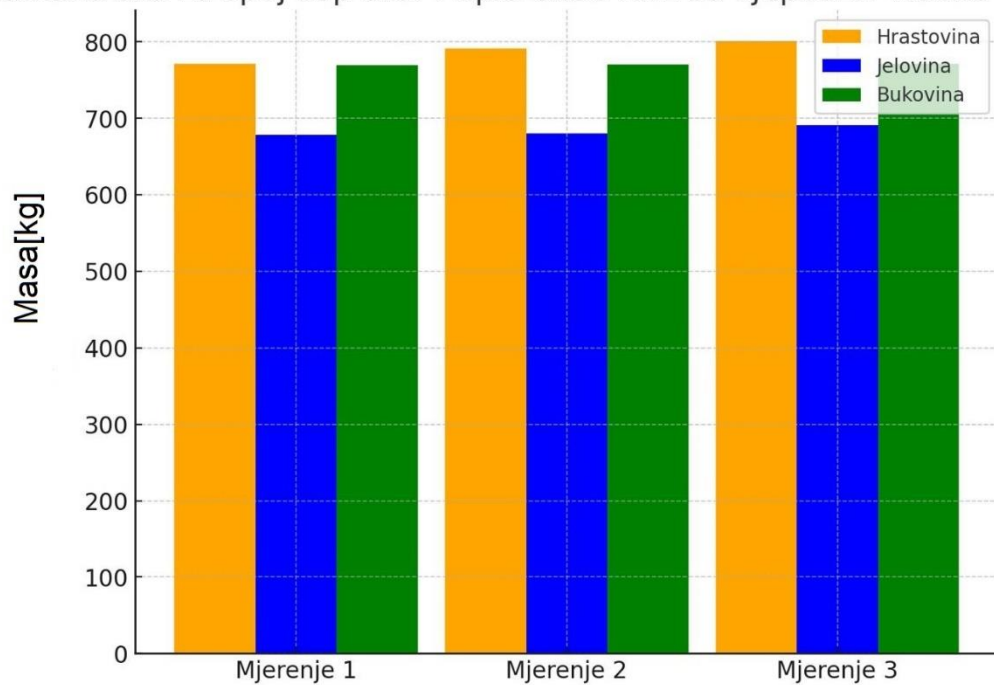


Izdržana sila za spoj čep utor i tiplu 8x50 mm bez lijepila: Vlačno ispitivanje



Slika 30. Izdržana sila za spoj čep-utor i tiplu 8x50mm, bez lijepila

Izdržana sila za spoj čep utor i tiplu 8x50 mm sa lijepilom: Vlačno ispitivanje



Slika 31. Izdržana sila za čep-utor i tiplu 8x50mm sa ljepilom



Na temelju grafova koji prikazuju rezultate ispitivanja spojeva bez metalnih dijelova, uočene su različite izdržljivosti ovisno o tipu spoja i primjeni sintetičkog ljepila. Ispitivani su spojevi s drvenim tiplama i kombiniranim spojevima tipla i čep-utor, te su analizirani utjecaji ljepila na njihovu otpornost.

Drvena tipla 8x50 mm bez ljepila (Slika 28.):

Rezultati iz prvog grafa pokazuju da drvene tiple bez ljepila imaju relativno nisku otpornost na vlačne sile. Sile su bile gotovo jednake u svim vrstama drveta, a najveće izdržane sile bile su oko 130 kg za bukovinu. Razlog niske otpornosti leži u činjenici da su tiple tipske i izrađene od presane bukovine, što znači da materijal ima uniformnu strukturu i relativno nisku otpornost na smicanje. Ovdje nije bilo dodatnih poboljšanja mehaničkih svojstava jer tipla nije imala vanjska pojačanja ni ljepilo.

Spoj čep-utor i tipla 8x50 mm bez ljepila (Slika 29):

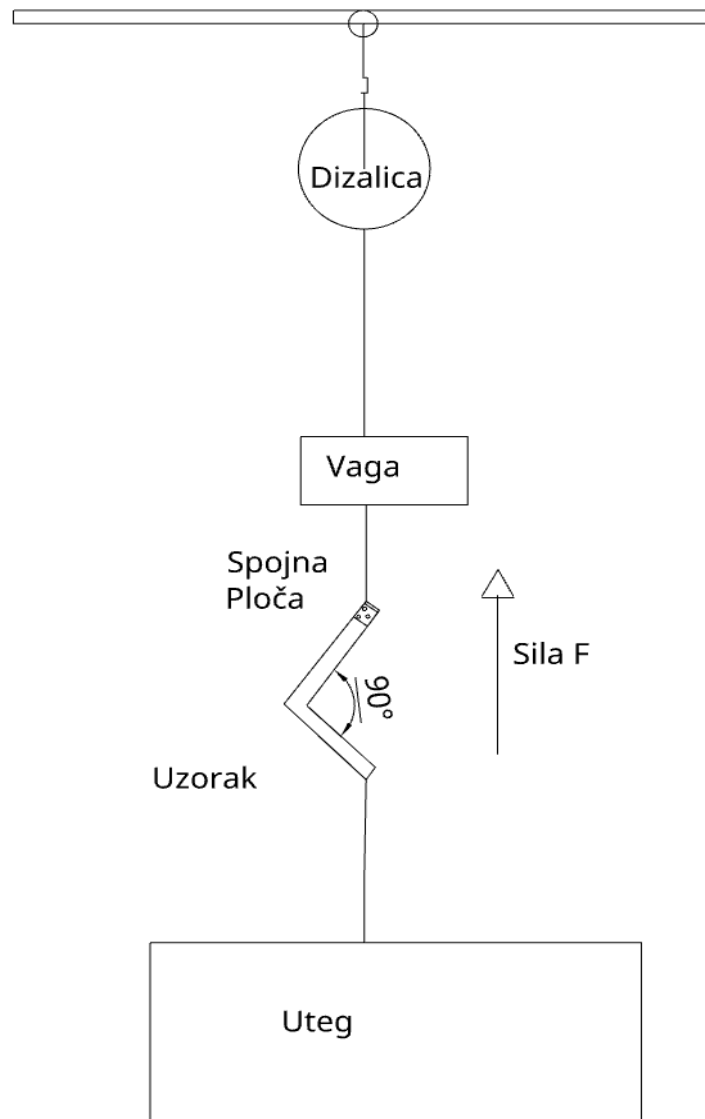
Drugi graf prikazuje rezultate za spojeve čep-utora i tiple bez primjene ljepila. Ovi spojevi su značajno slabiji u odnosu na druge kombinacije, s maksimalnim opterećenjem od približno 150 kg. Razlog slabije otpornosti leži u činjenici da čep-utor i tipla bez ikakvog dodatnog pojačanja nisu u stanju podnijeti velika opterećenja, jer drvo prenosi opterećenje samo kroz mehanički kontakt. Smicanje u ovom slučaju lako nadvlada spoj, posebno kod materijala poput jelovine, koja je mekša i manje otporna na smična opterećenja. Ovdje se jasno vidi kako nedostatak sintetičkih dodataka i pojačanja smanjuje ukupnu otpornost spoja.

Spoj čep-utor i tipla 8x50 mm s ljepilom (Slika 30.):

Treći graf prikazuje značajno bolje rezultate kada je u spoj čep-utora i tiple dodano sintetičko ljepilo. Ovdje je otpornost spojeva dramatično povećana, s maksimalnim izdržanim opterećenju blizu 750 kg, posebno kod bukovine. Ljepilo je ovdje ključni element jer omogućuje veliku površinu dodira između komada drveta i uspješno prenosi sile na veći dio strukture. Sintetičko ljepilo poboljšava otpornost na smične sile jer vezuje površine na mikroskopskoj razini, sprječavajući njihovo klizanje i odvajanje. Hrastovina i bukovina pokazale su najvišu otpornost, dok je jelovina nešto slabija, ali i dalje znatno izdržljivija u usporedbi sa spojevima bez ljepila.

Rezultati ovih ispitivanja jasno pokazuju važnost pravilnog izbora spojnih elemenata i upotrebe dodatnih materijala, poput sintetičkog ljepila, za poboljšanje mehaničkih svojstava spojeva. Dok su drvene tiple bez ljepila pokazale nisku izdržljivost, primjena čep-utora s ljepilom značajno je povećala otpornost na smične sile, što potvrđuje koliko strojarske tehnike mogu poboljšati kvalitetu drvenih spojeva u građevinskim i industrijskim primjenama.

## 7. Torzijsko ispitivanje



**Slika 32. Skica torzijskog ispitivanja**

Torzijsko ispitivanje je ključno za razumijevanje otpornosti materijala ili spojeva na torzijska (uvrtna) opterećenja. Ovo ispitivanje simulira stvarne uvjete u kojima se spojevi mogu nalaziti kada su podloženi uvijanju ili rotacijskim silama, što je često u mnogim konstrukcijskim i inženjerskim aplikacijama. Torzijska sila se primjenjuje oko osi elemenata, što dovodi do naprezanja koje može uzrokovati deformaciju ili pucanje spoja. Koncept ispitivanja je kao na slici 21.

Mnogi spojni elementi, poput čavala i vijaka, izloženi su torzijskim silama u različitim uvjetima upotrebe. Važno je razumjeti koliko dobro ti elementi mogu podnijeti uvijanje prije nego što dođe do deformacije ili otpuštanja spoja. U suprotnom, spojevi mogu otkazati pod nepredviđenim opterećenjima. U konstrukcijama poput drvenih okvira, mostova, zgrada ili strojeva, spojevi moraju biti dovoljno čvrsti da podnose ne samo vlačne i tlačne sile, već i

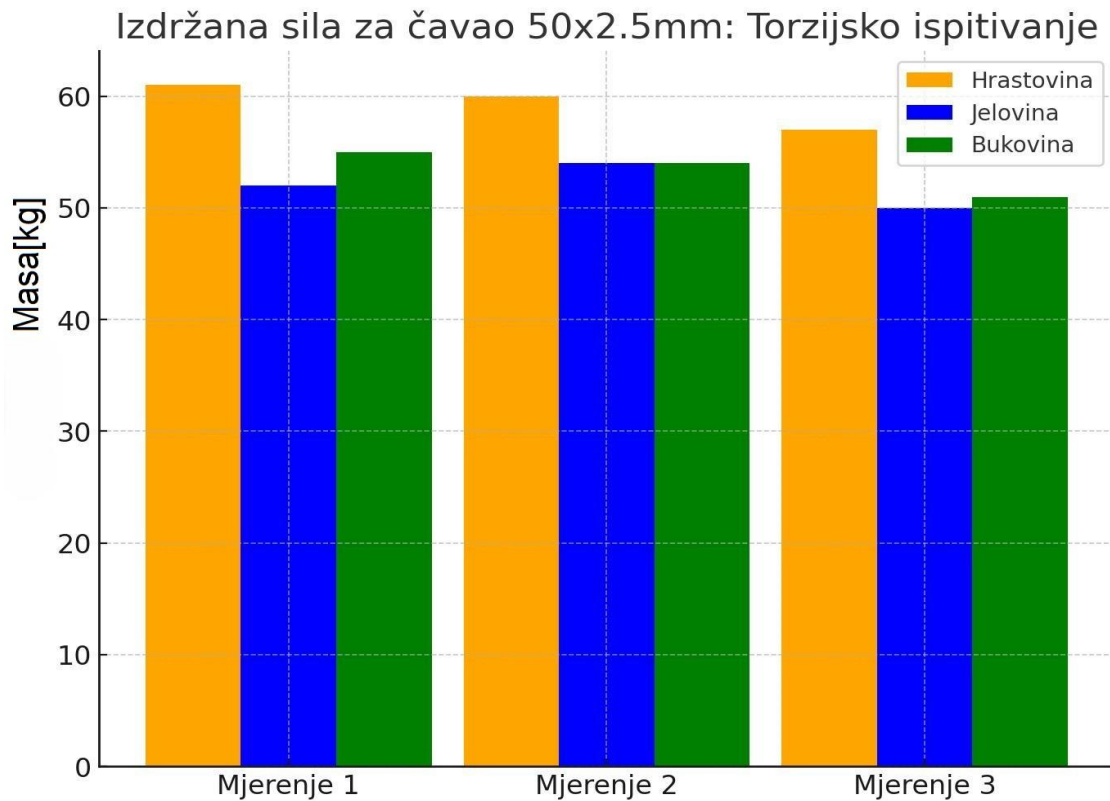
torzijske. Ako spojevi nisu otporni na torzijska opterećenja, može doći do otpuštanja elemenata, što ugrožava stabilnost i sigurnost konstrukcije. Torzijsko ispitivanje omogućuje ocjenu kvalitete spojeva u stvarnim uvjetima. Spojevi s glatkim čavlima, kao što se vidi iz grafova, otpustili su brže nego vijci, što znači da glatki čavli nisu pogodni za aplikacije gdje su spojevi izloženi torzijskim opterećenjima. S druge strane, vijci, zbog navoja, pružaju veću otpornost i stabilnost.

Kako torzijske sile djeluju na spojeve tijekom potresa:

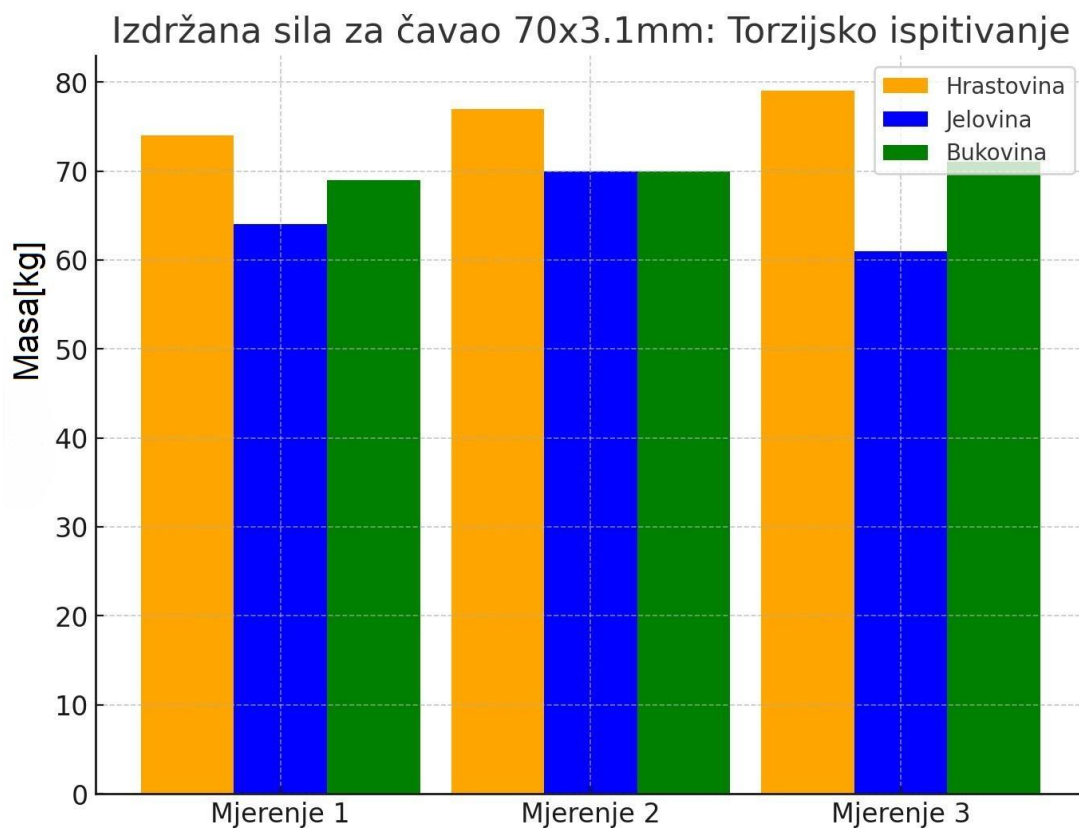
tijekom potresa igraju ključnu ulogu u otpornosti drvenih konstrukcija jer uzrokuju uvijanje oko vertikalne osi uslijed neravnomjernih horizontalnih opterećenja. Ove sile mogu nastati zbog asimetrično raspoređene mase u zgradi ili neravnomjernog djelovanja potresnih sila na različite dijelove konstrukcije. Kada se to dogodi, spojevi unutar drvene konstrukcije, poput čavala i vijaka, postaju podložni velikim naprežanjima, što može dovesti do otpuštanja ili deformacije. Glatki čavli brže popuštaju pod torzijskim opterećenjem zbog manjka trenja, dok su vijci, zahvaljujući navojima, otporniji. Ako spojevi nisu dovoljno čvrsti, cijela konstrukcija može izgubiti lateralnu i vertikalnu stabilnost, što povećava rizik od ozbiljnijih oštećenja tijekom potresa. Osim toga, uvijanje konstrukcije može dovesti do napuklina ili loma materijala, posebno na kritičnim mjestima poput spojeva. Da bi se smanjio utjecaj torzijskih sila, važno je koristiti otpornije spojeve, simetričan dizajn i dodatna pojačanja, poput dijagonalnih ukrućenja, koja mogu osigurati bolju otpornost na uvijanje i smanjenje rizika od oštećenja.



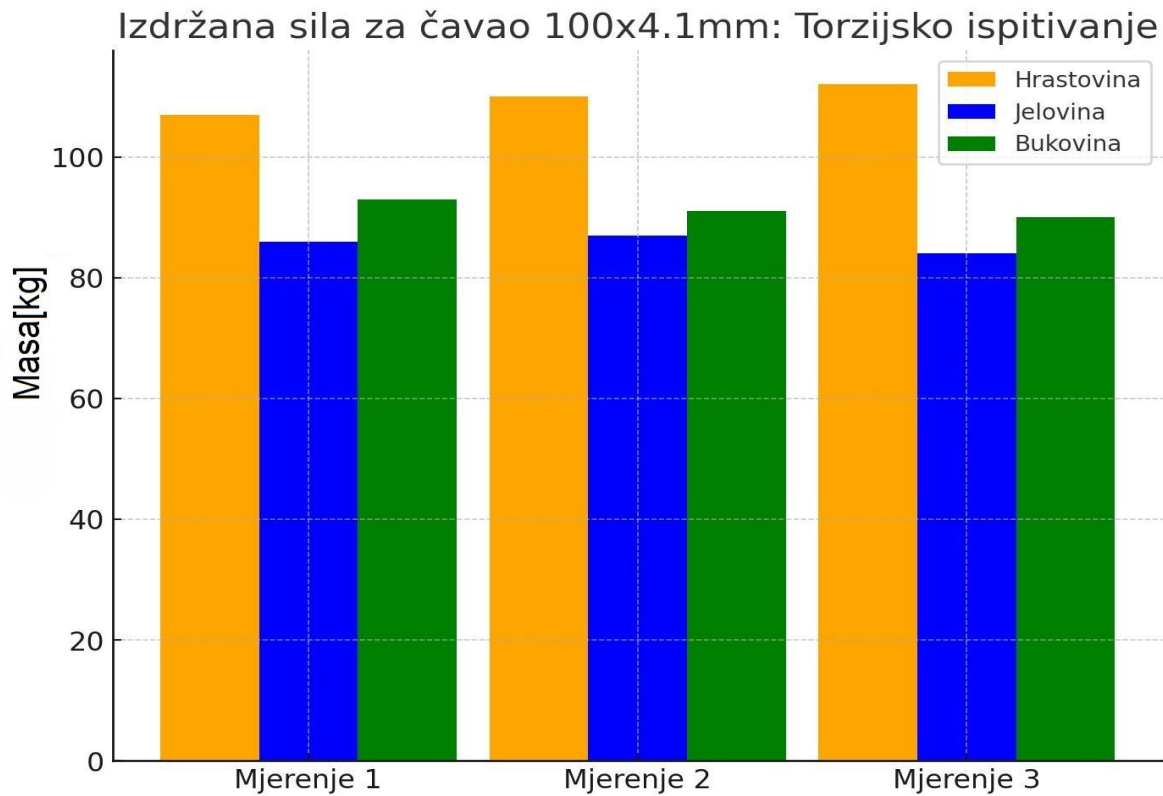
**Slika 33. Uzorci za torzijsko ispitivanje**



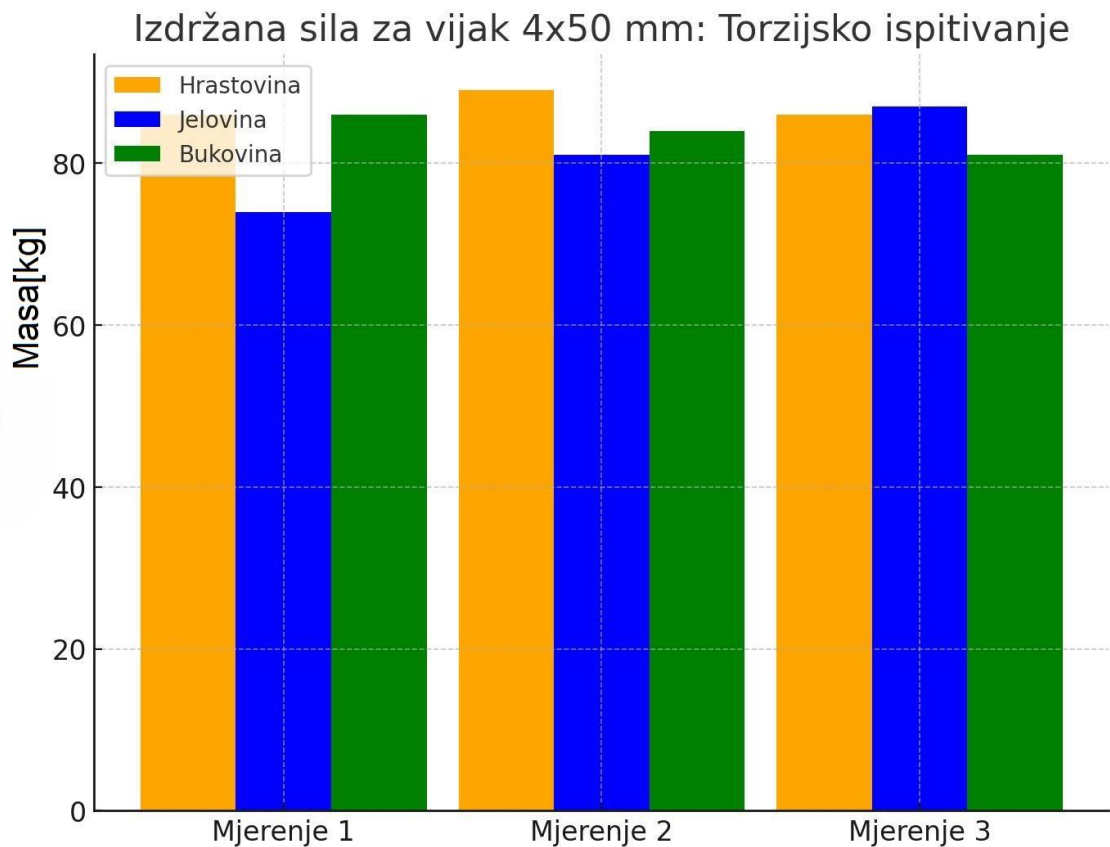
Slika 34. Izdržana sila za čavao 50x2.5mm: Torzijsko ispitivanje



Slika 35. Izdržana sila za čavao 70x3.1mm: Torzijsko ispitivanje



Slika 36. Izdržana sila za čavao 100x4.1mm: Torzijsko ispitivanje



Slika 37. Izdržana sila za vijak 4x50mm: Torzijsko ispitivanje

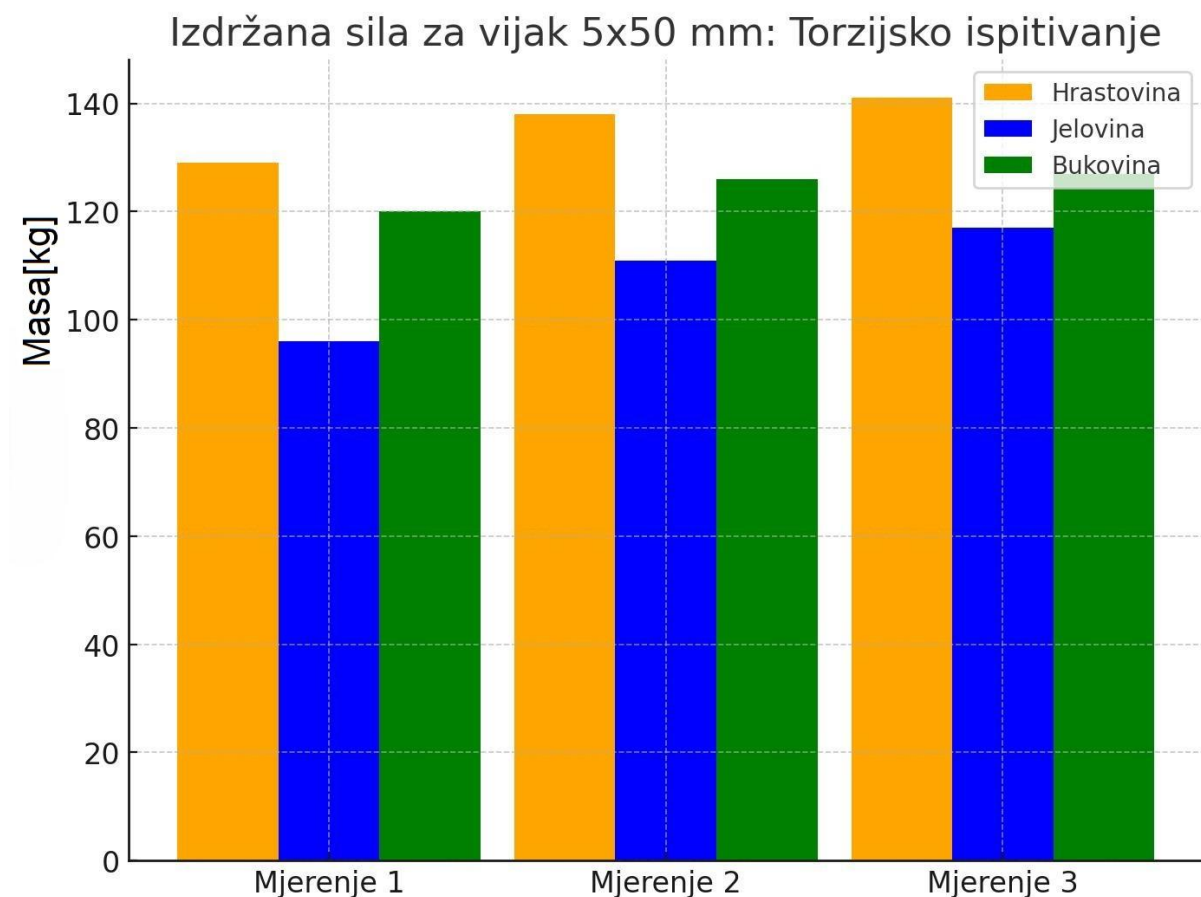
Glatki čavli, zbog nedostatka trenja, brže popuštaju pod torzijskim opterećenjem u odnosu na vijke. Vijci, zbog svoje strukture s navojima, pokazuju veću otpornost na torzijske sile, što ih čini boljim izborom u situacijama gdje je potrebno izdržati veća opterećenja.

Slika 34: Graf prikazuje izdržanu silu za čavao dimenzije 50x2.5 mm, pri čemu se vidi da je bukovina (narančasta boja) pokazala najveću otpornost u sva tri mjerenja, dok su hrastovina (zeleno) i jelovina (plavo) imale nešto niže vrijednosti.

Slika 35: Graf prikazuje izdržanu silu za čavao dimenzije 70x3.1 mm, gdje bukovina i dalje pokazuje najveću otpornost u svim mjerenjima, a jelovina i hrastovina se međusobno razlikuju u pojedinim mjerenjima.

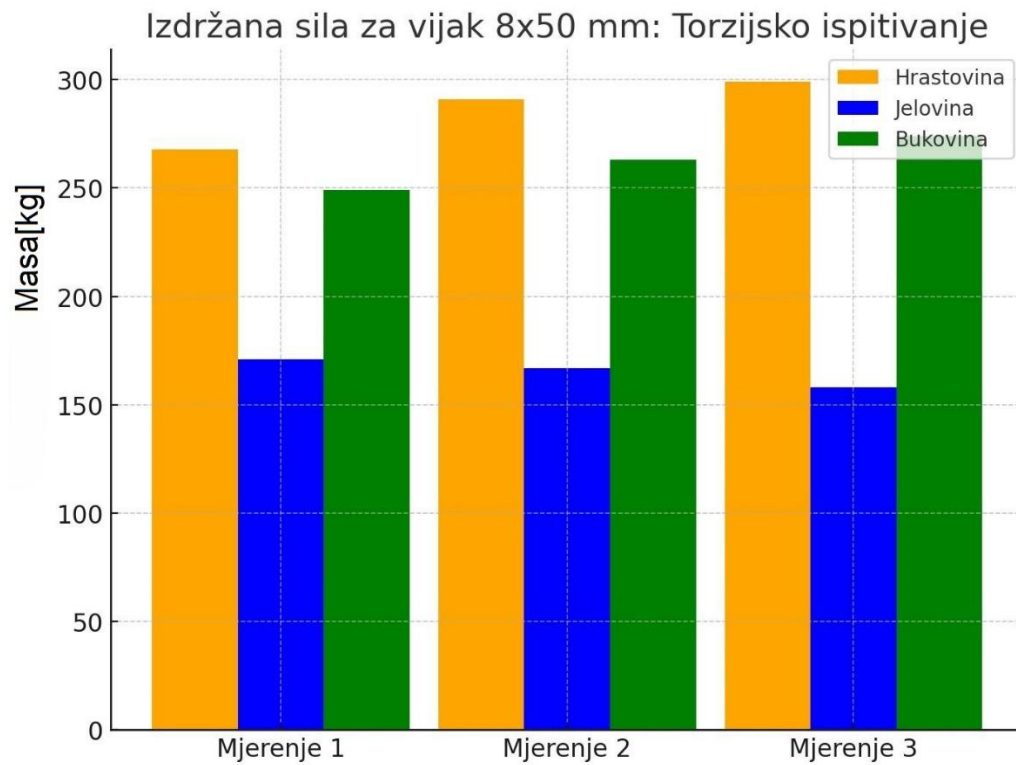
Slika 36: Ovaj graf prikazuje izdržanu silu za čavao dimenzije 100x4.1 mm, gdje su hrastovina i bukovina imale slične rezultate, dok je jelovina imala nešto manju otpornost u svim mjerenjima.

Slika 37: Graf prikazuje izdržanu silu za vijak dimenzije 4x50 mm, pri čemu se može primijetiti da su hrastovina, bukovina i jelovina pokazale slične otpornosti, s time da je bukovina imala nešto veću otpornost u pojedinim mjerenjima.

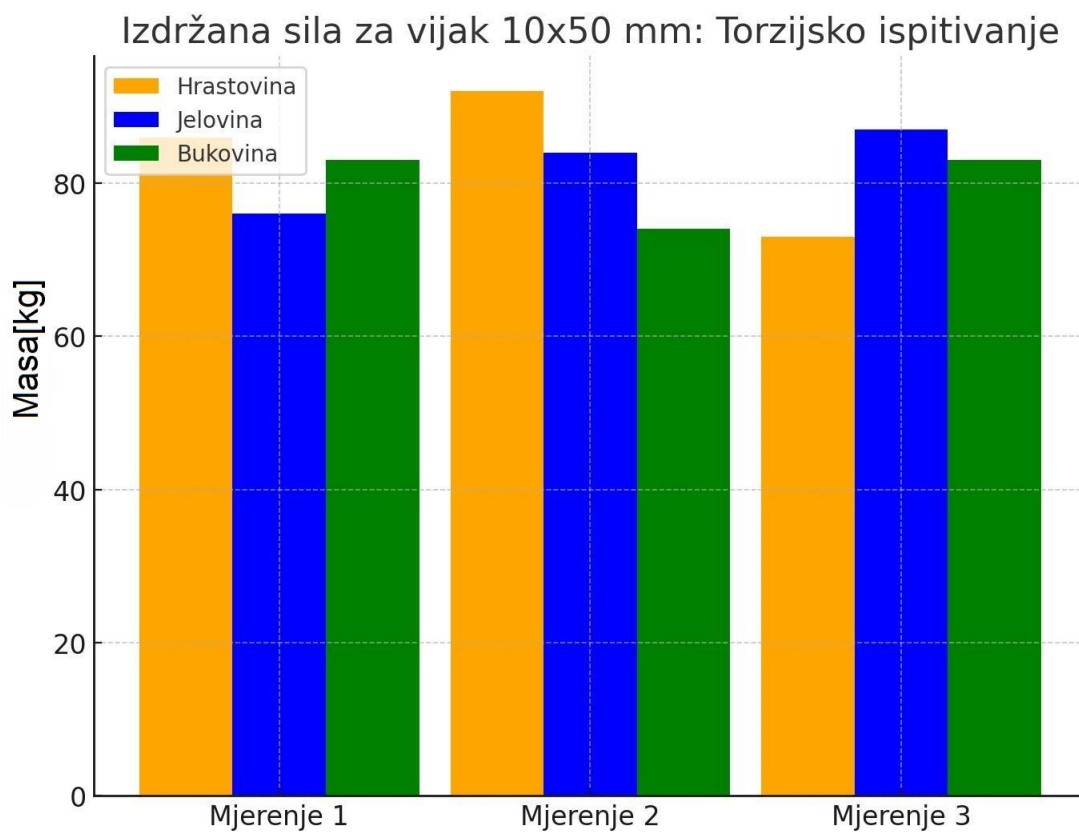


Slika 38. Izdržana sila za vijak 6x60mm: Torzijsko ispitivanje



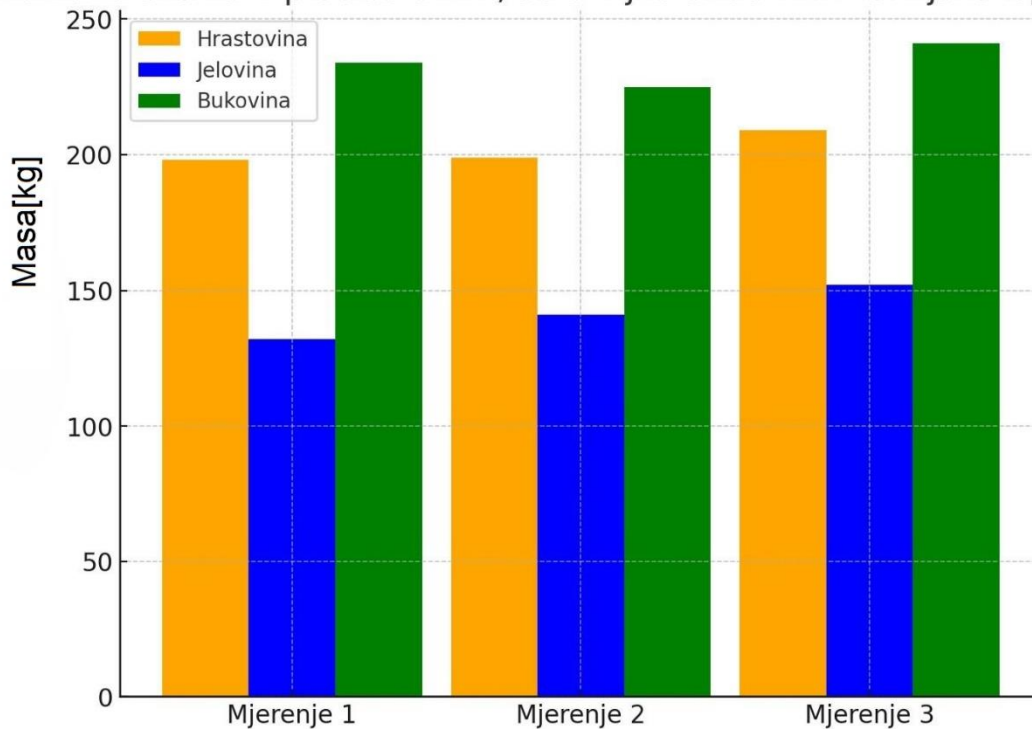


Slika 39. Izdržana sila za vijak 8x50mm: Torzijsko ispitivanje



Slika 40. Izdržana sila za vijak 10x 50mm: Torzijsko ispitivanje

## Izdržana sila za T-pločicu 3mm, sa 3 vijka 5x50mm: Torzijsko ispitivanje



**Slika 41. Izdržana sila za T pločicu mm, sa 3 vijka 5x50mm: Torzijsko ispitivanje.**

Slika 38: Graf prikazuje izdržanu silu za vijak dimenzije 6x60 mm, pri čemu bukovina (narančasta) pokazuje najveću otpornost u sva tri mjerenja, dok hrastovina (zelena) i jelovina (plava) imaju manje vrijednosti u svim mjerenjima.

Slika 39: Ovaj graf prikazuje izdržanu silu za vijak dimenzije 8x50 mm, gdje bukovina opet ima najveću otpornost u svim mjerenjima, dok jelovina pokazuje najslabije rezultate u sva tri mjerenja.

Slika 40: Graf prikazuje izdržanu silu za vijak dimenzije 10x50 mm, pri čemu su hrastovina i jelovina imale slične otpornosti, dok je bukovina pokazala nešto niže vrijednosti u drugom i trećem mjerenju.

Slika 41: Graf prikazuje izdržanu silu za T-pločicu debljine 3 mm, pričvršćenu s tri vijka dimenzije 5x50 mm. Bukovina (zelena boja) pokazuje najveću otpornost u sva tri mjerenja, dok hrastovina (narančasta) ima nešto manju otpornost, a jelovina (plava) ima najslabije rezultate.

Rezultati torzijskog ispitivanja ukazuju na značajnu razliku u otpornosti spojeva kada su izloženi torzijskim silama u usporedbi s tlačnim opterećenjima. Primijećeno je da su vrijednosti izdržljivosti kod torzijskih ispitivanja približno upola manje u odnosu na tlačna ispitivanja. Ova činjenica proizlazi iz prirode torzijskog opterećenja, koje uzrokuje uvijanje elemenata, stvarajući ne samo naprezanja u smicanju, već i složena naprezanja duž poprečnih presjeka spojeva, što značajno smanjuje njihovu nosivost. U tlačnim ispitivanjima, opterećenje djeluje uzdužno kroz os elementa, što stvara dominantno aksijalno naprezanje, dok kod torzijskih ispitivanja dolazi do kombinacije smičnih i tangencijalnih naprezanja.



Matematički, torzijsko naprezanje  $\tau$  u cilindričnom elementu, poput vijka, može se definirati prema jednadžbi (14):

$$\tau = \frac{T \times r}{J} \quad (14)$$

gdje je (T) moment torzije, (r) polumjer elementa, a (J) polarni moment inercije poprečnog presjeka. Iz ove formule je jasno da veći promjeri vijaka, koji povećavaju polarni moment inercije (J), mogu podnijeti veće torzijske momente, što je vidljivo iz rezultata za vijke promjera 8 mm i 10 mm, koji su izdržali veća torzijska opterećenja u usporedbi s vijcima manjih promjera. Vijci s većim promjerom stvaraju veći polarni moment inercije, što im omogućava bolju otpornost na torzijsko naprezanje.

Nadalje, prisutnost navoja kod vijaka omogućava bolju distribuciju opterećenja duž duljine vijka, čime se povećava trenje i otpornost na uvijanje. Zbog toga su vijci pokazali bolje rezultate u torzijskim ispitivanjima u odnosu na glatke čavle. Međutim, iako vijci promjera 8 mm i 10 mm pokazuju veću otpornost, kod većih promjera dolazi do efekta smanjenja otpornosti konstrukcije zbog prevelikih provrta u materijalu, što može dovesti do oslabljenja ukupne strukture.

Iz ovih ispitivanja potvrđuju već poznate činjenice koje su opisane u relevantnoj literaturi o mehaničkim svojstvima materijala i konstrukcijskih spojeva. Primjerice, u klasičnim priručnicima za strojarstvo, poput "Strojarskog priručnika" autora Stojanaović, jasno je navedeno da torzijske sile uzrokuju složenija naprezanja u odnosu na čista tlačna ili vlačna opterećenja, što rezultira manjom nosivošću elemenata podvrgnutih uvijanju. U priručniku se također navodi važnost polarnog momenta inercije (J), što se može naći u svakom udžbeniku o \*Mehanici materijala\* (npr. Hibbeler, "Mechanics of Materials"), gdje je objašnjeno kako geometrijske karakteristike presjeka imaju značajan utjecaj na otpornost elementa na torzijske momente.

Torzijska ispitivanja i njihove metode obrađene su i u \*Priručniku za konstrukcijske materijale", gdje se naglašava kako navoji na vijcima povećavaju otpornost na torzijska naprezanja u odnosu na glatke čavle, zahvaljujući poboljšanoj distribuciji naprezanja kroz navojni profil. Također, u literaturi o građevinskim konstrukcijama od drva\* (Tlustý, "Wooden Structures"), razmatraju se specifičnosti ponašanja drvenih elemenata pod različitim vrstama opterećenja, uključujući torzijska, te se naglašava važnost izbora spojnih elemenata koji mogu podnijeti takve sile.

Ove reference pružaju čvrstu podlogu za razumijevanje torzijskih ispitivanja i naglašavaju važnost pravilnog dizajna spojeva kako bi se osigurala dovoljna otpornost konstrukcija, posebice u uvjetima dinamičkih opterećenja, poput potresa ili vibracija.

## 8. Zaključak

Drvene konstrukcije su zbog svojih specifičnih svojstava dugotrajno prepoznate kao efikasne i sigurne, posebno u područjima izloženima potresima. Njihova fleksibilnost, niska masa i sposobnost apsorpcije i redistribucije sila čine ih otpornijima na seizmička opterećenja u odnosu na zidane konstrukcije. Dok zidane zgrade, koje su čvrste i krute, lako pucaju pod horizontalnim silama potresa, drvene konstrukcije, zbog prirodne elastičnosti drveta, bolje podnose deformacije. Primjer potresa u Zagrebu 1880. godine jasno ilustrira ovu razliku – zgrade izgrađene od drva preživjele su potres s minimalnim oštećenjima, dok su zidane građevine pretrpjele teže štete. Drvo ima sposobnost savijanja bez pucanja, čime se zadržava integritet konstrukcije i smanjuje rizik od rušenja.

Osim prirodnih karakteristika drveta, dodavanje strojarskih elemenata kao što su čavli, vijci, metalni profili i spojne ploče značajno poboljšava nosivost i stabilnost drvenih konstrukcija. Ovi elementi ubrzavaju montažu konstrukcija, omogućuju bržu izgradnju te povećavaju njihovu otpornost na različite vrste opterećenja, uključujući seizmička. Čavli i vijci, zahvaljujući svojoj jednostavnosti upotrebe i prilagodljivosti, omogućuju bržu gradnju u odnosu na tradicionalne metode, poput klinova ili ljepila. Uz to, metalni profili ravnomjerno raspoređuju opterećenja unutar konstrukcije, čime se smanjuje rizik od lokaliziranih naprezanja i deformacija.

Korištenjem visokokvalitetnih strojarskih elemenata, povećava se sigurnost drvenih konstrukcija jer se smanjuje rizik od kolapsa, a istovremeno se produljuje vijek trajanja građevine. Brza montaža i jednostavnost zamjene oštećenih dijelova dodatne su prednosti koje ubrzavaju industriju izgradnje. Drvene konstrukcije, pojačane modernim strojarskim tehnikama, nude pouzdano i ekonomski isplativo rješenje koje zadovoljava zahtjeve suvremene gradnje, s posebnim naglaskom na održivost i otpornost na prirodne katastrofe poput potresa.

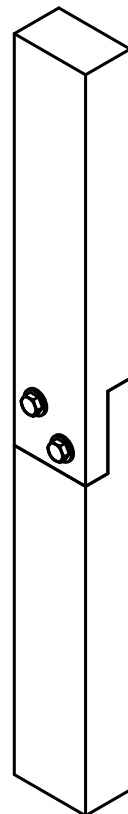
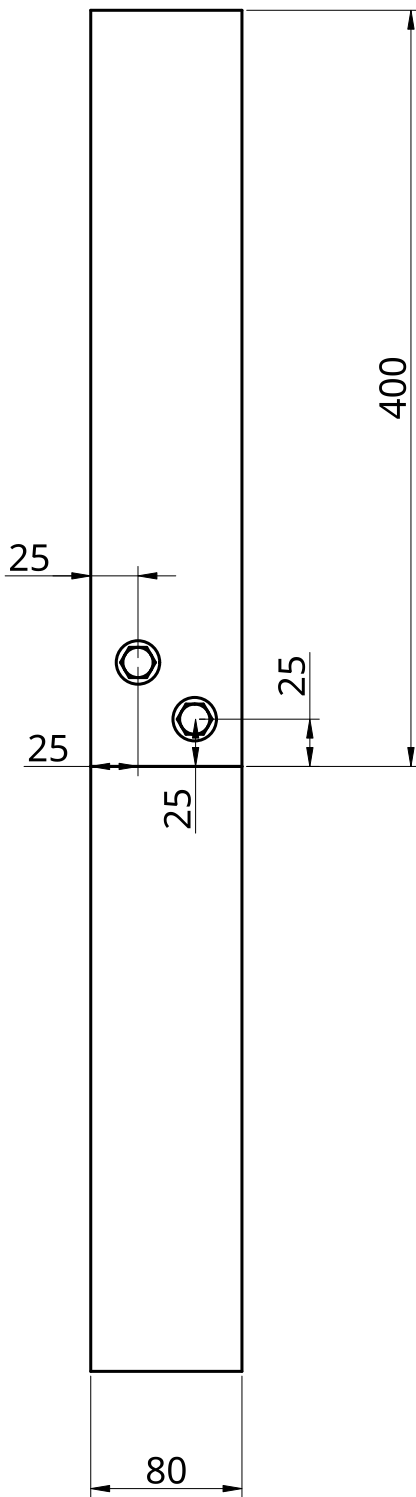
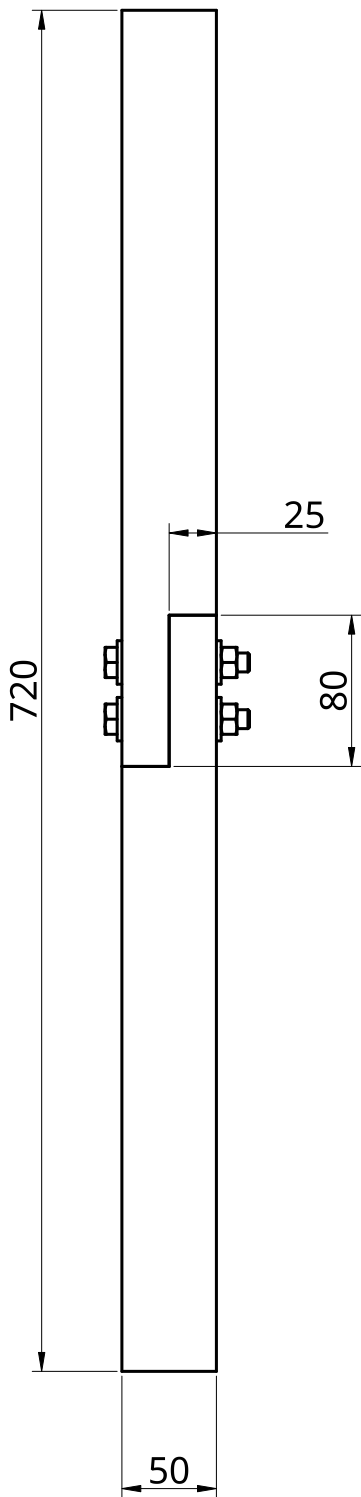
## Literatura



- [1] APA - The Engineered Wood Association (2016). Timber Connections in Structural Design. APA.
- [2] Blaß, H.J., & Uibel, T. (2007). Load Carrying Capacity of Timber Joints with Dowel Type Fasteners. Karlsruhe Institute of Technology.
- [3] Blass, H.J., et al. (1995). Timber Engineering Step 1 (Vol. 1). Timber Engineering. Blackwell Science Ltd. Pristupljeno 12. Rujna 2024.
- [4] Booth, G. S. (2015). Wood Science and Technology. Cambridge University Press.
- [5] DIN 1052. (2004). Design of Timber Structures. Deutsches Institut für Normung e.V.
- [6] Dujmović, D., Žagar, Z., & Baričević, A. (2014). Drvene konstrukcije. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet.
- [7] Đorđević, B., & Sedlar, A. (2019). Ispitivanje nosivosti spojeva drvenih konstrukcija s različitim.
- [8] Eurocode 5. (2008). Design of Timber Structures (EN 1995-1-1). European Committee for Standardization (CEN). Pristupljeno 2. Rujna 2024.
- [9] Florijančić, Z., & Gašparić, D. (2016). Utjecaj jačine izvora vlage na povećanje vlage drvenih konstrukcija. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- [10] Forest Products Laboratory (2010). Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. U.S. Department of Agriculture, Forest Service.
- [11] Foschi, R.O., et al. (2002). Wood Frame Construction Manual for One- and Two-Family Dwellings. American Forest & Paper Association.
- [12] Gustafsson, P.J., & Serrano, E. (2001). Glulam and Timber Joints with Internal Steel Plates – Strength and Design Models. Structural Engineering International.
- [13] Johansen, K. W. (1949). Theory of Timber Connections. International Association for Bridge and Structural Engineering.
- [14] Kessel, M. H., et al. (2017). Experimental and Numerical Analysis of Timber Joint Connections Reinforced with FRP (Fibre Reinforced Polymer). Journal of Structural Engineering.
- [15] Krajina, Z. (1992). Drvene konstrukcije: priručnik za projektiranje drvenih građevinskih konstrukcija prema standardima JUS i DIN. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- [16] Madsen, B. (1992). Structural Behaviour of Timber. Timber Engineering Ltd.
- [17] Radmanović, M. (2011). Proračun drvenih konstrukcija prema europskim normama. Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu. Pristupljeno 2. Rujna 2024.
- [18] Rodd, P.D. (1991). Timber Engineering Connections. Structural Engineer Journal.

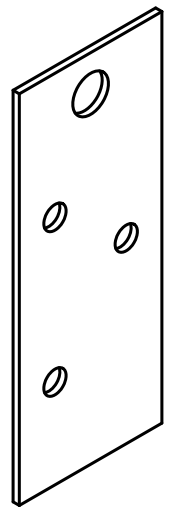
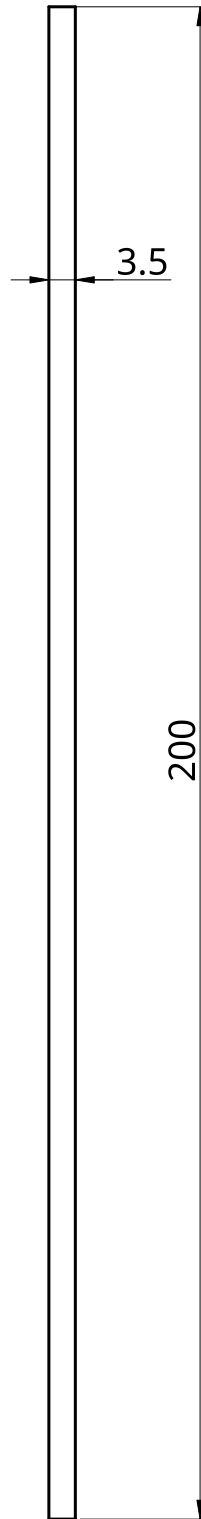
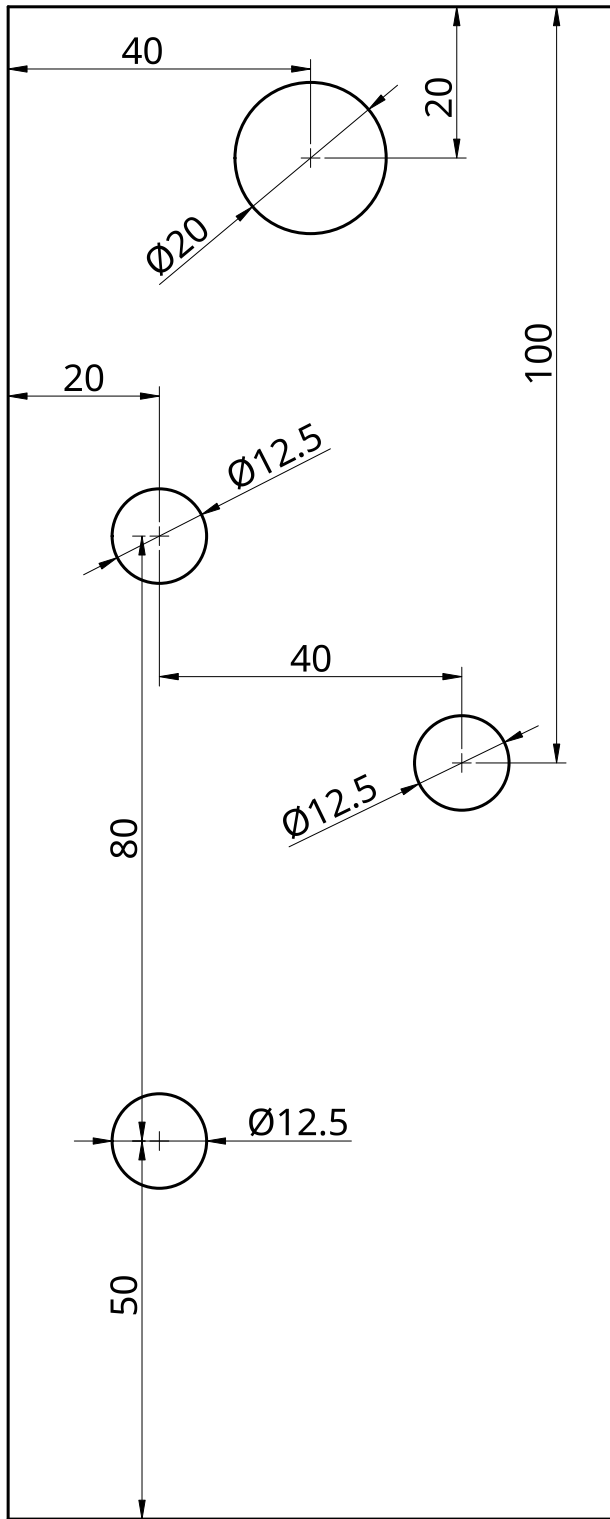
- [19] Sandhaas, C., et al. (2008). Load-carrying Capacity of Timber Joints with Inclined Screws. *Structural Engineering International*.
- [20] Šušnjić, M. (2009). Proračun spojeva u drvenim konstrukcijama primjenom europskih normi. Arhitektonski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- [21] Thelandersson, S., & Larsen, H. J. (2003). *Timber Engineering*. Wiley.
- [22] Zhang, H., & Hossain, M. A. (2019). *Sustainable Timber Structures: Analysis and Design*. Springer.
- [23] Žigulić, R. (2005). *Drvene konstrukcije – primjena i izazovi*. Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- [24] Zadani DIN standardi. Pristupljeno 4. Rujna 2024.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_DIN\\_standards](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_DIN_standards)
- [25] „Zelinska Kuća“ Potres u Zelini. Pristupljeno 2. Rujna 2024.  
<https://www.muzej-zelina.hr/hr/virtualna-izlozba/tresla-se-zelina-1880-godine/>
- [26] „Fotosinteza“ Pristupljeno 16. Kolovoza 2024.  
<https://bs.wikipedia.org/wiki/Fotosinteza#/media/Datoteka:Fotosynteza2.png>


## **Prilozi**

- I. CD
- II. Tehnička dokumentacija

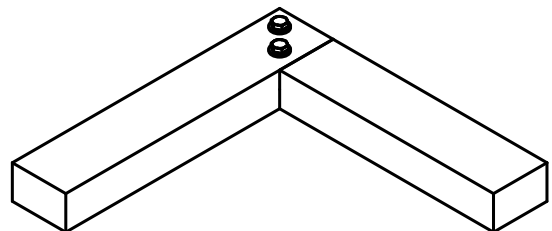
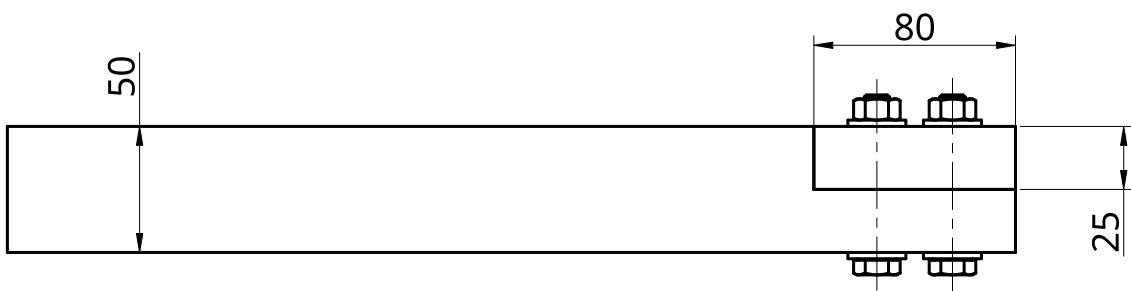
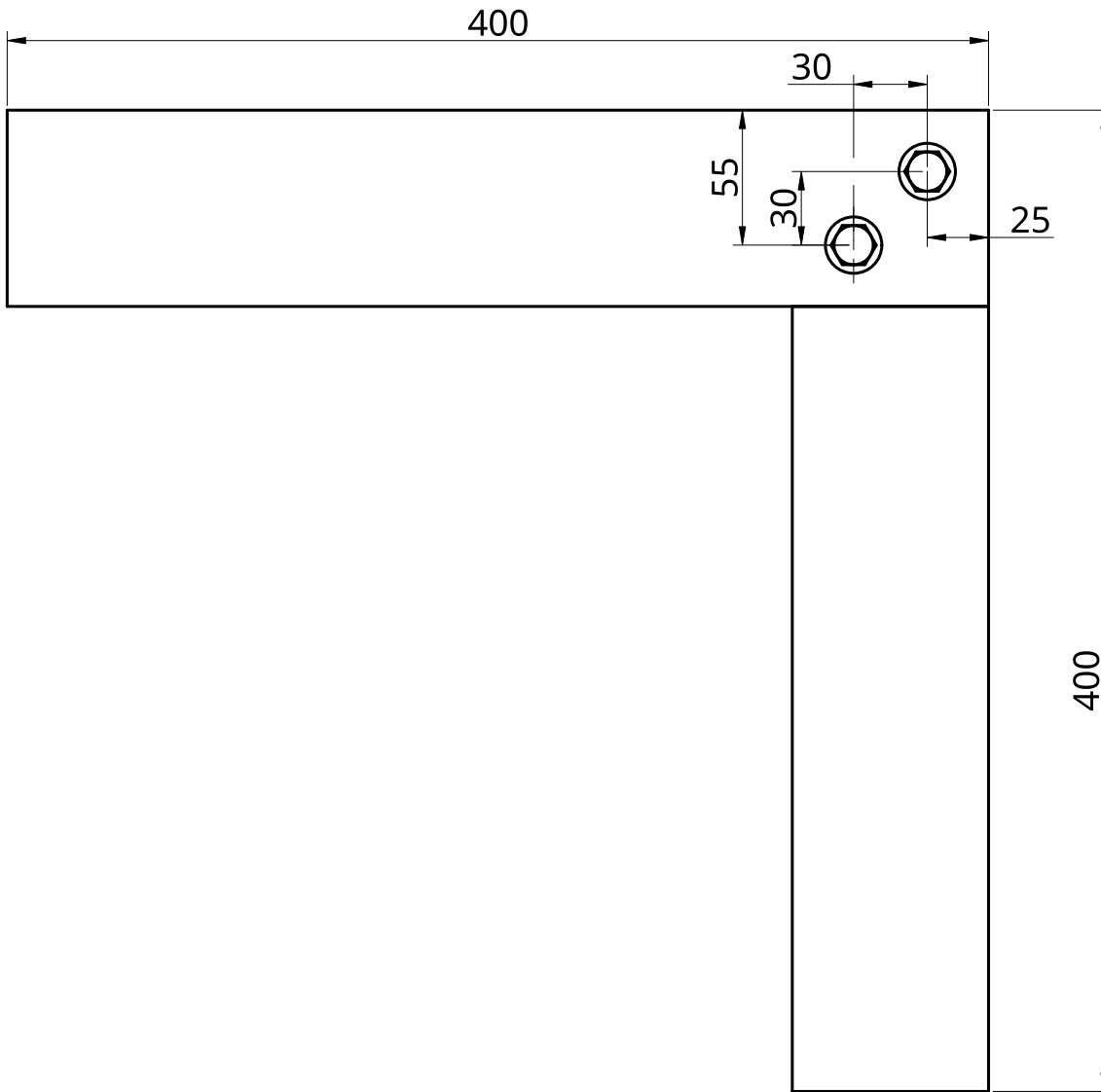



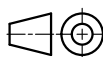
ISO - tolerancije		IME I PREZIME	POTPIS	DATUM	NAZIV:	
		PROJEKTIRAO	STJEPAN KOVAČEC	2024-09-23	Uzorak vlačnog ispitivanja	
		RAZRADIO			 <b>VELEUČILIŠTE U KARLOVCU</b>	
		CRTAO				
		PREGLEDAO				
		MATERIJAL:				
				FORMAT:	CRTEŽ BROJ:	REV.
				A4	01/03	
				MJERILO:	MASA:	LIST
				1:3		1 od 1



ISO - tolerancije		IME I PREZIME	POTPIS	DATUM	NAZIV:
	PROJEKTIRAO	STJEPAN KOVAČEĆ		2024-09-23	Spojna pločica  VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
	RAZRADIO				
	CRTAO				
	PREGLEDAO				
	MATERIJAL:				
					
					FORMAT: <b>A4</b> CRTEŽ BROJ: <b>02/03</b> REV.:
					MJERILO: <b>1:1</b> MASA:    LIST <b>1 od 1</b>





ISO - tolerancije		IME I PREZIME	POTPIS	DATUM	NAZIV:
		PROJEKTIRAO	STJEPAN KOVAČEC	2024-09-25	Uzorak torzijskog ispitivanja
		RAZRADIO			 VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
		CRTAO			
		PREGLEDAO			
		MATERIJAL:			
					FORMAT: <b>A4</b> CRTEŽ BROJ: <b>03/03</b> REV:
				MJERILO: <b>1:3</b> MASA:	LIST <b>1 od 1</b>