

# Utjecaj orijentacije drvnih vlaknaca na abrazijsku otpornost drva

---

Oreški, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:612771>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-26**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Ivan Oreški**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Student:

Ivan Oreški

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se vlastitim znanjem stečenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, uz pomoć navedene literature.

Zahvaljujem se svojoj mentorici Prof. dr. sc. Veri Rede na pomoći, savjetima, utrošenom vremenu i ideji koja je pokrenula rad.

Ivan Oreški



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomatske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

|                                                              |        |
|--------------------------------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum                                                        | Prilog |
| Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1                                 |        |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -                                    |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Oreški**

Mat. br.: 0035213122

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj orijentacije drvnih vlakana na abrazijsku otpornost drva**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of wood fibre orientation on abrasion resistance of wood**

Opis zadatka:

Drvo je visoko vrijedan, obnovljiv i dostupan tehnički materijal. U odnosu na druge tehničke materijale ima niz prednosti, ali i nedostataka. Među osnovne nedostatke mogu se ubrojiti nejednačenost kvalitete, velika rasipanja vrijednosti mehaničkih i ostalih svojstava te usmjerenost svojstava. Zbog razlike u građi između pojedinih vrsta drva, razlikuju se i njihova svojstva, ali velike razlike mogu se pojaviti i unutar iste vrste pa čak i unutar istog debla. Zato se kod ispitivanja bilo kojeg svojstva drva uvijek navodi i orijentacija uzoraka s obzirom na tri karakteristične osi – longitudinalnu, radijalnu i tangencijalnu.

U završnom radu potrebno je istražiti kako usmjerenost drvnih vlakana kod drva hrasta utječe na abrazijsku otpornost. Ispitivanje otpornosti na trošenje provesti standardnom metodom „suhi pjesak – gumeni kotač“ prema normi ASTM G 65. Uzorke za ispitivanje izrezati u longitudinalnom smjeru tako da se na istim uzorcima mogu ispitati radijalni i tangencijalni presjek, u smjeru uz i niz vlakana.

Dobivene rezultate analizirati i na temelju analize donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:

30. studenoga 2020.

Zadatak zadala:

*Rede*

Prof. dr. sc. Vera Rede

Datum predaje rada:

1. rok: 18. veljače 2021.

2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.

3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 22.2. – 26.2.2021.

2. rok (izvanredni): 9.7.2021.

3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:

*Branko Bauer*

Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

|                                                          |     |
|----------------------------------------------------------|-----|
| SADRŽAJ .....                                            | I   |
| POPIS SLIKA .....                                        | II  |
| POPIS TABLICA.....                                       | III |
| POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA .....                    | IV  |
| SAŽETAK.....                                             | V   |
| SUMMARY .....                                            | VI  |
| 1. UVOD.....                                             | 1   |
| 2. STRUKTURA DRVA .....                                  | 2   |
| 2.1. Botanička podjela.....                              | 2   |
| 2.2. Makrostruktura drva.....                            | 3   |
| 2.2.1. Godovi.....                                       | 5   |
| 2.3. Stanična struktura drva.....                        | 7   |
| 2.3.1. Drvna vlakanca .....                              | 10  |
| 2.4. Molekularna struktura drva .....                    | 11  |
| 3. SVOJSTVA DRVA .....                                   | 13  |
| 3.1. Gustoća drva .....                                  | 13  |
| 3.2. Voda u drvu.....                                    | 14  |
| 3.3. Mehanička svojstva.....                             | 15  |
| 3.3.1. Čvrstoća drva .....                               | 16  |
| 3.3.2. Modul elastičnosti .....                          | 18  |
| 3.3.3. Žilavost .....                                    | 20  |
| 3.3.4. Tvrdća .....                                      | 20  |
| 3.3.5. Otpornost na trošenje .....                       | 21  |
| 4. EKSPERIMENTALNI DIO .....                             | 23  |
| 4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja .....            | 23  |
| 4.2. Materijal za ispitivanje .....                      | 23  |
| 4.3. Analiza mikrostrukture .....                        | 28  |
| 4.4. Abrazijsko ispitivanje .....                        | 31  |
| 4.4.1. Rezultati ispitivanja abrazijske otpornosti ..... | 32  |
| 4.5. Određivanje gustoće.....                            | 35  |
| 5. ANALIZA REZULTATA .....                               | 37  |
| 6. ZAKLJUČCI.....                                        | 41  |
| LITERATURA.....                                          | 42  |

**POPIS SLIKA**

|          |                                                                                                                                        |    |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1  | Četinjače i listače, opći oblik stabla četinjače (A) i listače (B), poprečni presjek kroz deblo četinjače (C) i listače (D), [5] ..... | 2  |
| Slika 2  | Karakteristični presjeci drva [7] .....                                                                                                | 3  |
| Slika 3  | Poprečni presjek kroz deblo s makroskopskim elementima građe [7] .....                                                                 | 4  |
| Slika 4  | Stvarna i idealizirana struktura drva [1] .....                                                                                        | 5  |
| Slika 5  | Poprečni presjek četinjače(lijevo: bor) i listače (desno: hrast) [8][9] .....                                                          | 5  |
| Slika 6  | Tri karakteristična tipa godova kod četinjače i listača [2] .....                                                                      | 6  |
| Slika 7  | Poprečni presjek kroz drvo četinjače (A) i listače (B) [5] .....                                                                       | 7  |
| Slika 8  | Građa stanične stijenke [1] .....                                                                                                      | 8  |
| Slika 9  | Drvni traci, A i B tangencijalni presjek, C i D radijalni presjek [5] .....                                                            | 10 |
| Slika 10 | Vrste drvnih stanica kod hrasta .....                                                                                                  | 11 |
| Slika 11 | Utjecaj anizotropnosti drvne građe na utezanje .....                                                                                   | 15 |
| Slika 12 | Tri osnovne osi drva [1] .....                                                                                                         | 16 |
| Slika 13 | Položaj godova u odnosu na smjer savojne sile [1] .....                                                                                | 17 |
| Slika 14 | Shematski prikaz ispitivanja tlačne čvrstoće [1] .....                                                                                 | 17 |
| Slika 15 | Specifična krutost drva i ostalih tehničkih materijala [1] .....                                                                       | 19 |
| Slika 16 | Odnos čvrstoće i žilavosti drva te drugih tehničkih materijala [18] .....                                                              | 20 |
| Slika 17 | Prikaz tvrdoće po presjecima [17] .....                                                                                                | 21 |
| Slika 18 | Taber abrader [22] .....                                                                                                               | 22 |
| Slika 19 | Shematski prikaz uređaja za ispitivanje abrazijske otpornosti metodom „suhi pijesak-gumeni kotač“ [23] .....                           | 22 |
| Slika 20 | List i plod hrasta kitnjaka .....                                                                                                      | 24 |
| Slika 21 | Konstrukcija krova s kojeg je uzeta greda za uzorke .....                                                                              | 24 |
| Slika 22 | Greda iz koje su izrezani uzorci .....                                                                                                 | 25 |
| Slika 23 | Poprečni presjek grede s naznačenim položajem I, II i III niza uzoraka .....                                                           | 26 |
| Slika 24 | Raspored uzoraka po visini .....                                                                                                       | 26 |
| Slika 25 | Uzorci za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje .....                                                                          | 27 |
| Slika 26 | Optički mikroskop AXIO .....                                                                                                           | 28 |
| Slika 27 | Poprečni presjek kroz drvo hrasta .....                                                                                                | 29 |
| Slika 28 | Radijalni presjek kroz drvo hrasta .....                                                                                               | 30 |
| Slika 29 | Tangencijalni presjek kroz drvo hrasta .....                                                                                           | 30 |
| Slika 30 | Uređaj za ispitivanje abrazijskog trošenja metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ .....                                                 | 31 |
| Slika 31 | Položaj uzorka tijekom ispitivanja .....                                                                                               | 32 |
| Slika 32 | Raspored ispitanih ploha na uzorcima .....                                                                                             | 33 |
| Slika 33 | Mjerna vaga „Mettler B5C 1000“ .....                                                                                                   | 35 |
| Slika 34 | Gubitak mase u radijalnom presjeku za sve uzorke .....                                                                                 | 37 |
| Slika 35 | Srednja vrijednost gubitka mase za radijalni presjek .....                                                                             | 37 |
| Slika 36 | Gubitak mase u tangencijalnom presjeku .....                                                                                           | 38 |
| Slika 37 | Srednja vrijednost gubitka mase za tangencijalni presjek .....                                                                         | 38 |
| Slika 38 | Utjecaj orijentacije vlakana na gubitak mase pri abraziji u radijalnom i tangencijalnom presjeku .....                                 | 39 |
| Slika 39 | Prosječni gubitak mase po uzorku u oba smjera i oba presjeka .....                                                                     | 40 |

---

**POPIS TABLICA**

|           |                                                            |    |
|-----------|------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 1 | Vrijednosti modula elastičnosti nekih vrsta drva [17]..... | 19 |
| Tablica 2 | Gubitak mase na uzorcima iz I niza, g .....                | 33 |
| Tablica 3 | Gubitak mase na uzorcima iz II niza, g .....               | 34 |
| Tablica 4 | Gubitak mase na uzorcima iz III niza, g.....               | 34 |
| Tablica 5 | Vrijednosti gustoće i statistički podatci o mjerenju ..... | 36 |



**POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA**

| Oznaka      | Jedinica        | Opis                                    |
|-------------|-----------------|-----------------------------------------|
| $\rho$      | $\text{g/cm}^3$ | gustoća                                 |
| $\rho_0$    | $\text{g/cm}^3$ | gustoća drva pri udjelu vlage od 0 %    |
| $\rho_{12}$ | $\text{g/cm}^3$ | gustoća drva pri udjelu vlage od 12 %   |
| $\rho_w$    | $\text{g/cm}^3$ | gustoća drva pri određenom udjelu vlage |
| $m$         | g               | masa uzorka                             |
| $m_0$       | g               | masa uzorka u apsolutno suhom stanju    |
| $m_w$       | g               | masa uzorka pri određenom udjelu vlage  |
| $V$         | $\text{cm}^3$   | volumen uzorka                          |
| $R_m$       | $\text{N/mm}^2$ | vlačna čvrstoća                         |
| $R_{ms}$    | $\text{N/mm}^2$ | savojna čvrstoća                        |

---

**SAŽETAK**

Osnovni cilj ovog rada bio je istražiti kako usmjerenost vlakanaca utječe na abrazijsku otpornost drva hrasta kitnjaka u smjeru rasta drva i u obrnutom smjeru.

U eksperimentalnom dijelu rada analizirana je mikrostruktura u tri karakteristična presjeka, izmjerena je gustoća i provedeno ispitivanje otpornosti na abrazijsku otpornost standardnom metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“.

Utvrđeno je da orijentacija vlakanaca ima veliki utjecaj na intenzitet abrazijskog trošenja u radijalnom i tangencijalnom presjeku. U oba presjeka trošenje je puno intenzivnije kada je smjer trošenja obrnut od smjera vlakanaca, osobito u radijalnom presjeku. Ukupni gubitak mase pri trošenju u oba smjera zajedno, malo je veći u tangencijalnom nego u radijalnom presjeku. Udaljenost od srčike prema kori debla nema veliki utjecaj na intenzitet trošenja. Povećanjem udaljenosti od podnožja debla gubitak mase pri abraziji pokazuje tendenciju raste.

Srednja vrijednost gustoće uzoraka na kojima je ispitana otpornost na abrazijsko trošenje iznosila je 0,984 g/cm<sup>3</sup>.

**Ključne riječi:** drvo, usmjerenost drvnih vlakanaca, abrazijska otpornost

---

**SUMMARY**

Main goal of this work was to investigate how the orientation of the fibers affects the abrasion resistance of sessile oak wood in direction of wood growth and inversely. In the experimental part of this work, the microstructure in three characteristic cross - sections was analyzed, the density was measured and the abrasion resistance test was performed by the standard method "dry sand - rubber wheel". It was found that the orientation of the fibers has a great influence on the intensity of abrasion wear in radial and tangential cross section. In both sections the wear is much more intense when the direction of wear is reversed from the direction of the fibers, especially in the radial section.

The total weight loss in both directions was slightly higher in tangential than in radial cross section. Distance from the heart to the bark of the trunk doesn't have a great influence on the intensity of wear. As the distance from the base of the trunk increases, the loss of weight during abrasion grows.

Mean density of the samples on which the abrasion resistance was tested was  $0.984 \text{ g/cm}^3$ .

**Key words:** wood, orientation of the wood fibers, abrasion resistance

## 1. UVOD

**Drvo** ima izuzetno važnu ulogu u životu ljudi od prvih početaka civilizacije do danas. Ono je uvijek dostupno, raste uz pomoć Sunčeve energije, a koristi se za razne namjene te kao sirovina u proizvodnji brojnih drugih proizvoda. Uz kamen i glinu, drvo je bilo među prvim tehničkim materijalima neophodnim za život ljudi te razvoj industrije, a i danas predstavlja glavni izvor energije većem dijelu svjetske populacije. Kada je riječ o proizvodnji i obradi drva, u usporedbi s ostalim sirovinama, ono zahtijeva minimalan utrošak energije. Drvo posjeduje sposobnost proizvodnje kisika i prirodnog vezivanja štetnog ugljikovog dioksida, stoga predstavlja dobru alternativu ostalim materijalima s obzirom na današnje vrlo visoke ekološke zahtjeve i norme. Drvo kao tehnički materijal ima posebna i jedinstvena fizikalna, kemijska, mehanička i tehnološka svojstva. Ono je u potpunosti reciklabilan, prirodan, obnovljiv i svestran materijal, koji razvojem tehnologije svoju primjenu osim u građevinarstvu i celuloznoj industriji nalazi i šire. Osnovni cilj u modernoj primjeni drva jest naglasiti i iskoristiti njegove prirodne, estetske i tehničke prednosti, uz istodobno eliminiranje njegovih nedostataka. Mnogobrojne su prednosti drva u odnosu na moderne tehničke materijale: laka obradivost, mala osjetljivost na temperaturne promjene, mala težina konstrukcijskih elemenata, velika čvrstoća u smjeru vlakana. Drvo ima i neke nedostatke kao što su: greške u drvu, usmjerenost građe i svojstava, ovisnost mehaničkih i drugih svojstava o udjelu vlage, tendenciju utezanja i bubrenje, zapaljivost te osjetljivost na biotske i abiotske razgrađivače. Različitim postupcima ove prirodne nedostatke drva nastoji se smanjiti na minimum, a istaknuti njegove prednosti. [1], [2], [3], [4]

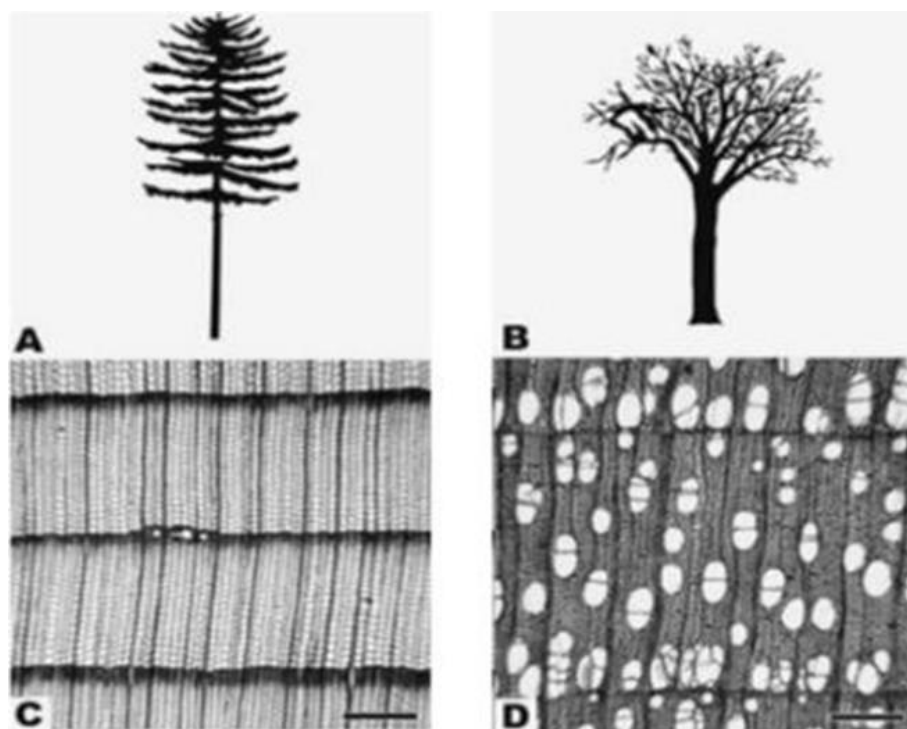
Zbog izrazito anizotropne strukture kod drva je vrlo izražena i anizotropnost većine svojstava. U ovom radu analiziran je utjecaj usmjerenosti drvnih vlakana na abrazijsku otpornost hrasta kitnjaka koji ima široku primjenu. Ispitivanja su provedena na dva karakteristična presjeka - radijalnom i tangencijalnom. Uz ispitivanje otpornosti abrazijskom trošenju određena je i gustoća drva za neki udio vlage, a provedena je i analiza mikrostrukture.

## 2. STRUKTURA DRVA

Drvo je prirodni, heterogeni, anizotropan kompozitni materijal. Dobiva se od drvenastih, vaskularnih, višegodišnjih biljaka s razvijenim trajnim deblom. Struktura drva može se promatrati na više razina. Na razini kemijskih spojeva drvo se sastoji od tri skupine biopolimera tj. od umreženih lanaca celuloze i hemiceluloze, povezanih ligninom. Osnovna strukturna jedinica drvnog tkiva je drvna stanica koja se sastoji od lumena i stanične stijenke. Kada je riječ o makrostrukтури, razlikujemo različite slojeve na karakterističnim presjecima: srčika, bjeljika, srževina, godovi, ...[1]

### 2.1. Botanička podjela

Sve komercijalno zanimljive vrste drva pripadaju skupini cvjetnica ili sjemenjača, a dijele se na listače i četinjače. Na slici 1 prikazan je uobičajeni oblik stabla i mikrostruktura poprečnog presjeka četinjača i listača.



**Slika 1** Četinjače i listače, opći oblik stabla četinjače (A) i listače (B), poprečni presjek kroz deblo četinjače (C) i listače (D), [5]

Četinjače još nazivamo i meko drvo, a spadaju u skupinu golosjemenjača, rastu na sjevernoj hemisferi te su uglavnom zimzelene (zadržavaju lišće u hladnom dijelu godine). Malobrojne su

po porodicama, nema mnogo vrsta, a najpoznatije domaće vrste su bor (*Pinus*), jela (*Abies*) i smreka (*Picea*).

**Listače** spadaju u skupinu kritosjemenjača, a nazivaju se još i tvrdo drvo ili bjelogorica. Za razliku od četinjača, zastupljene su s oko 2000 vrsta, a lišće im u jesen opada. Tipične domaće vrste su bukva (*Fagus*), jasen (*Fraxinus*) i hrast (*Quercus*). [1], [2]

## 2.2. Makrostruktura drva

Svako stablo čine tri glavna dijela: korijen, deblo i krošnja. Svaki od njih ima svoju ulogu. Sustav korijenja podupire i drži deblo te apsorbira vodu i mineralne tvari. Deblo podupire krošnju do koje od korijenja provodi vodu i mineralne tvari, dok u dubljem sloju pohranjuje rezervne tvari i šećere. Krošnju čine grane, izboji i lišće. Listovi apsorbiraju ugljični dioksid iz atmosfere, upijaju energiju iz sunčeve svjetlosti i procesom fotosinteze proizvode ugljikohidrate. [1], [2], [6]

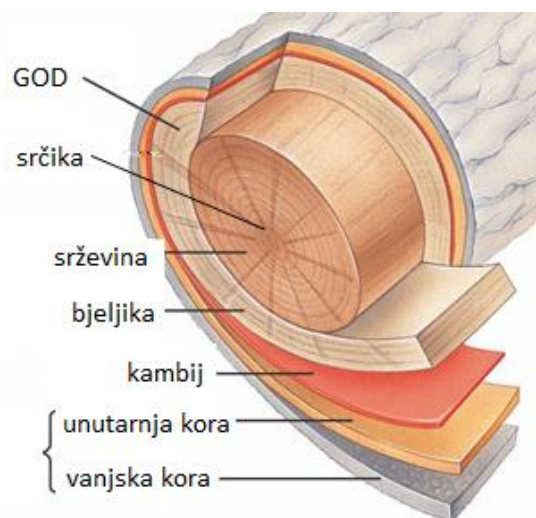
Zbog usmjerenosti građe drva, za dobivanje cjelokupne predodžbe o njegovoj građi, koriste se tri karakteristična presjeka prikazana na slici 2: [7]

- **POPREČNI** - okomit na uzdužnu os debla i na drvena vlakanca
- **RADIJALNI** – u ravnini koju određuju radijus i uzdužna os debla
- **TANGENCIJALNI** – okomit na radijus valjka debla i paralelan s uzdužnom osi debla.



Slika 2 Karakteristični presjeci drva [7]

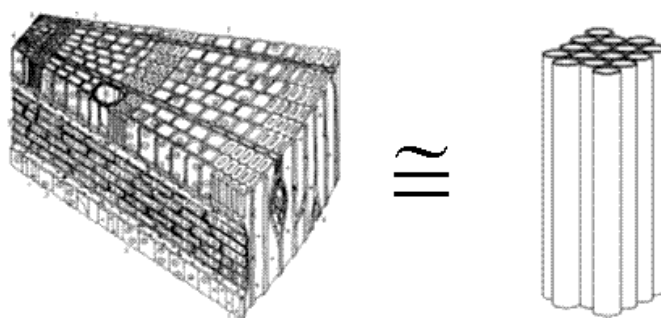
Na poprečnom presjeku debla, na slici 3, prikazan je međusobni položaj makroskopskih elemenata građe.



**Slika 3 Poprečni presjek kroz debllo s makroskopskim elementima građe [7]**

**Vanjska kora** ima mehaničku ulogu zaštite cijelog debla od isušivanja. Kroz **unutarnju koru** provode se organske tvari nastale u procesu fotosinteze od listova prema svim drugim dijelovima biljke. **Kambij** je tanki živi sloj stanica između unutarnje kore i drvnog tkiva. Svakog proljeća u našoj klimatskoj zoni iz kambija kreće rast novog goda prema unutra (sekundarni ksilem) i novi sloj unutarnje kore prema vani (sekundarni floem). Prvi sloj ispod kambija je bjeljika. To je živi, metabolički aktivan sloj drva u kojem se sintetiziraju i pohranjuju škrob i lipidi. Kroz bjeljiku se od korijena prema gore transportiraju voda i mineralne tvari. Ispod bjeljike nalazi se **srževina** koju čine odumrle stanice i nataložene različite biokemijske tvari zbog kojih je ona tamnije obojena. Provođenje vode i mineralnih tvari kroz nju je onemogućeno. O količini i vrsti nataloženih biokemijskih tvari i ekstraktila ovise mehanička svojstva i trajnost drva. U samom središtu drvnog valjka nalazi se srčika koja predstavlja ostatak tkiva iz rane faze prije formiranja samog debla.[1], [6]

Ako se promatra poprečni presjek debla mogu se uočiti cilindrični elementi grupirani u koncentričnim krugovima oko srčike. To su godovi građeni od drvnih stanica koje su osnovni građevni element drva. Sve drvene stanice su izduženog oblika pa se idealizirana struktura drva često prikazuje kao snop cjevčica, kao na slici 4.

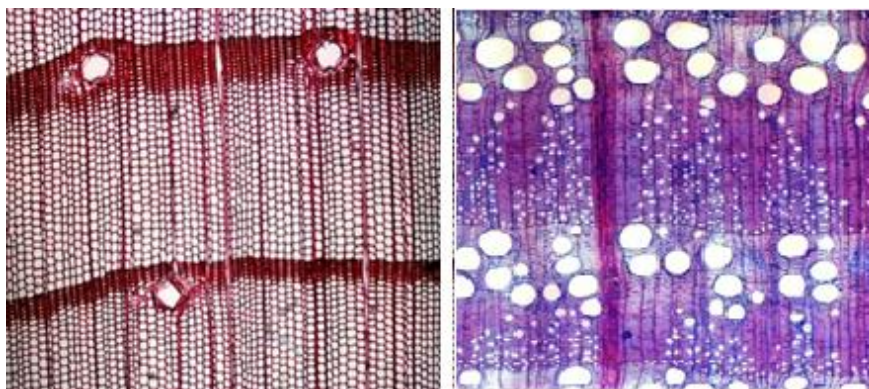


**Slika 4 Stvarna i idealizirana struktura drva [1]**

### 2.2.1. Godovi

Kada se govori o rastu drvenastih biljaka razlikuju se primarni i sekundarni rast. Primarni rast odnosi se na rast vegetacijskog vrha, odnosno na rast u visinu, dok sekundarni rast podrazumijeva rast u debljinu i traje čitavog života biljke. Za sekundarni rast zadužen je kambij, čije djelovanje može biti kontinuirano ili diskontinuirano. Diskontinuirano djelovanje kambija karakteristično je za umjereni zemljopisni pojas s pravilnom izmjenom godišnjih doba, u kojem je djelovanje kambija najintenzivnije u proljeće, a potpuno prestaje krajem ljeta. Prirast sekundarnog trajnog tkiva (ksilema) koji nastaje u tom razdoblju naziva se god. Kontinuirano djelovanje kambija karakteristično je za vrste koje rastu u tropskom pojasu i one nemaju godove. Na početku vegetacijskog razdoblja nastaju drvene stanice koje čine rani dio goda, a poslije nastaju stanice koje čine kasni dio goda. Ove stanice se međusobno dosta razlikuju. Kod nekih vrsta drva ova razlika se može uočiti i bez optičkih pomagala. [1]

Na slici 5 prikazan je poprečni presjek kroz drvo gdje se jasno vidi razlika između ranog i kasnog dijela goda kod četinjača i listača.



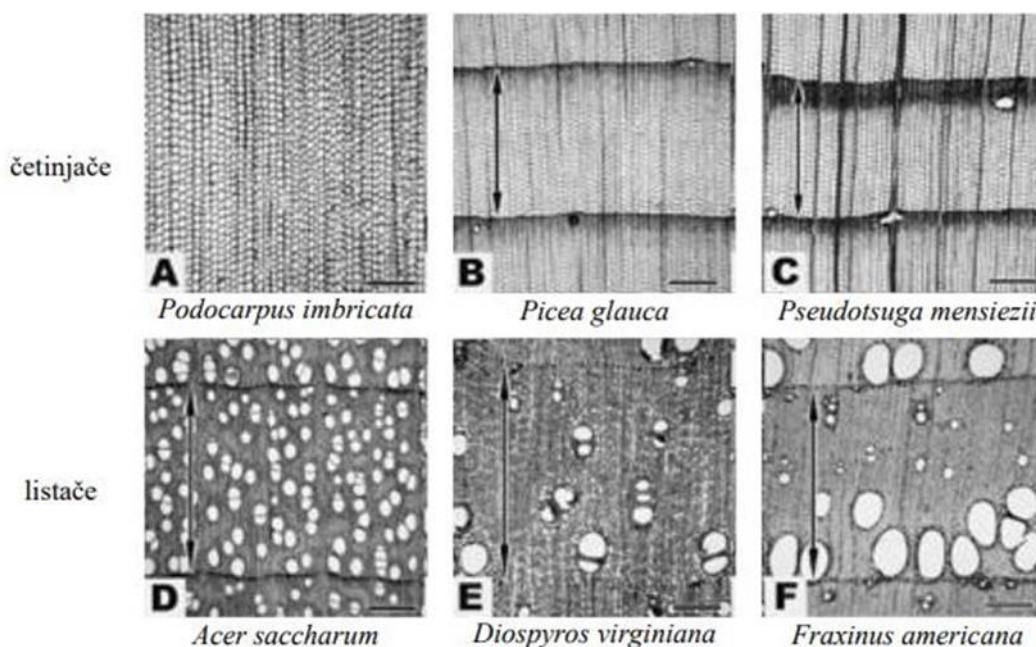
**Slika 5 Poprečni presjek četinjače(lijevo: bor) i listače (desno: hrast) [8][9]**



S obzirom na izgled stanica ranog i kasnog dijela goda, sve vrste drva dijele se u jednu od tri sljedeće skupine: [1]

- vrste kod kojih se unutarnji promjer provodnih elemenata **postepeno smanjuje** od ranog prema kasnom godu
- vrste kod kojih se unutarnji promjer provodnih elemenata **naglo smanjuje** od ranog prema kasnom godu
- vrste **bez razlike** između stanica ranog i kasnog dijela goda.

Na slici 6 prikazane su različite vrste četinjača i listača prema razlici u izgledu stanica ranog i kasnog dijela goda.



**Slika 6 Tri karakteristična tipa godova kod četinjače i listača [2]**

**A** – nema izraženih godova, **B** – postupan prijelaz iz ranog u kasno drvo, **C** - izražen prijelaz iz ranog u kasno drvo, **D** – difuzno porozno drvo (ne vidi se prijelaz iz ranog u kasni dio goda), **E** – semi-difuzno porozno drvo (postupan prijelaz iz ranog u kasni dio goda), **F** – prstenasto porozno drvo (nagli prijelaz iz ranog u kasni dio goda)

Za razliku od četinjača, koje imaju jednostavniju građu, listače posjeduju puno složeniju građu. Osnovnu razliku čine velike provodne stanice koje se zovu traheje, a često ih se naziva porama. Pore mogu biti ravnomjerno razmještene po cijelom godu i takve vrste drva se nazivaju difuzno

porozne. Pore mogu biti grupirane samo u ranom dijelu goda i takve vrste se zovu prstenasto porozne. Semi-difuzno porozne vrste drva predstavljaju prijelazni oblik između difuzno poroznih i prstenasto poroznih vrsta drva. [1]

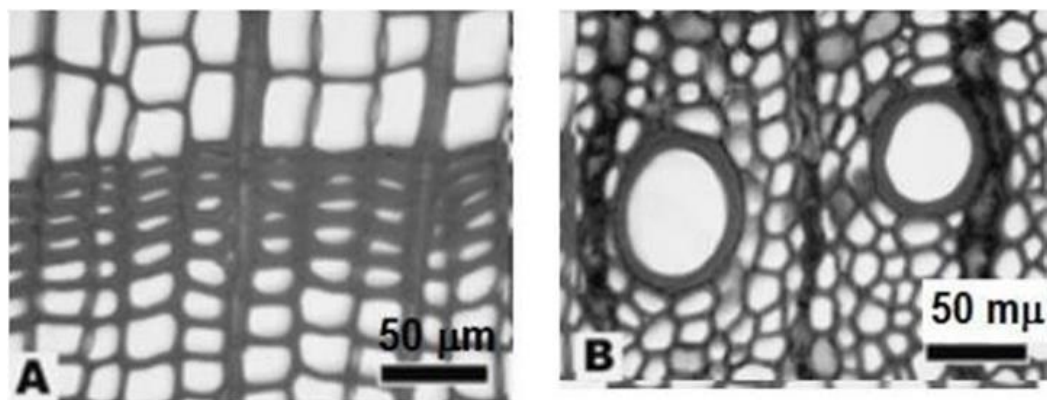
Osim što se mogu razlikovati po načinu rasporeda pora, godovi se mogu međusobno razlikovati i po:

- stupnju markantnosti (izraženosti godova) - markantniji su kod četinjača, nego listača
- boji – mogu biti svjetliji ili tamniji
- širini - fini (do 1/3 cm), polu-fini (1/3-2/3 cm) ili grubi (širi od 2/3 cm)
- tijeku granične linije – paralelni s periferijom poprečnog presjeka debla, valoviti ili uleknuti
- načinu nizanja – uglavnom širi u blizini srčike, nego na periferiji.

### 2.3. Stanična struktura drva

Osnovna organizacijska jedinica bilo koje biljke jest biljna stanica, koja se sastoji od protoplasti (žive tvari okružene staničnom membranom) i stanične stijenke (nežive tvari izgrađene uglavnom od ugljikohidrata). Kada se govori o drvnoj stanici, misli se na mrtvu stanicu bez plazmatskog sadržaja. Prazni prostor omeđen staničnom stijenkom u kojem su se ranije nalazile protoplasti i čija je osnovna funkcija provođenje vode naziva se lumen. Uloga stanične stijenke je mehanička potpora stanice te zaštita od previsokog osmotskog tlaka.

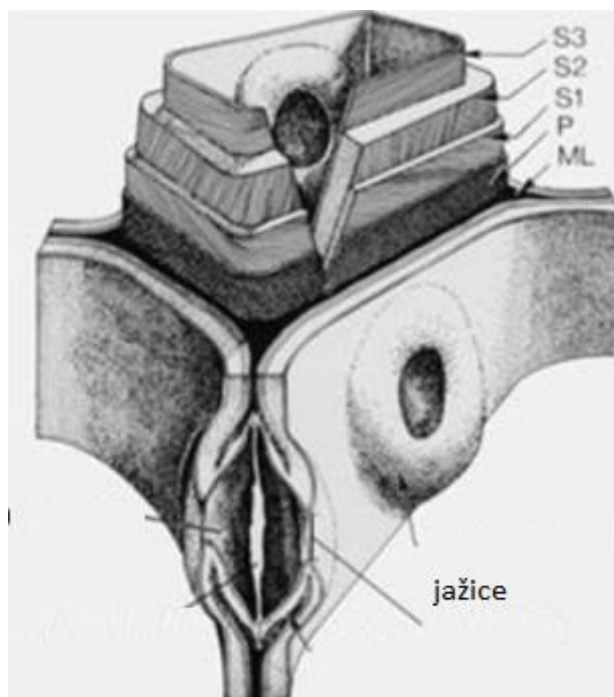
Četinjače i listače međusobno se razlikuju prema obliku stanice, debljini stijenke i veličini lumena, što je prikazano na slici 7.



Slika 7 Poprečni presjek kroz drvo četinjače (A) i listače (B) [5]

Stanice četinjača pravokutnog su oblika, sve su istog tipa i zovu se traheide. Drvne stanice listača su puno raznolikije. Najveće provodne stanice zovu se traheje ili pore. To su široke stanice s debelom staničnom stijenkom i s vrlo velikim lumenom. [1], [2]

Na slici 8 prikazana je struktura stanične stijenke. Staničnu stijenku svake drvene stanice čine tri glavna dijela: središnja lamela (ML) te primarni (P) i sekundarni (S1, S2 i S3) dio stijenke.



**Slika 8 Građa stanične stijenke [1]**

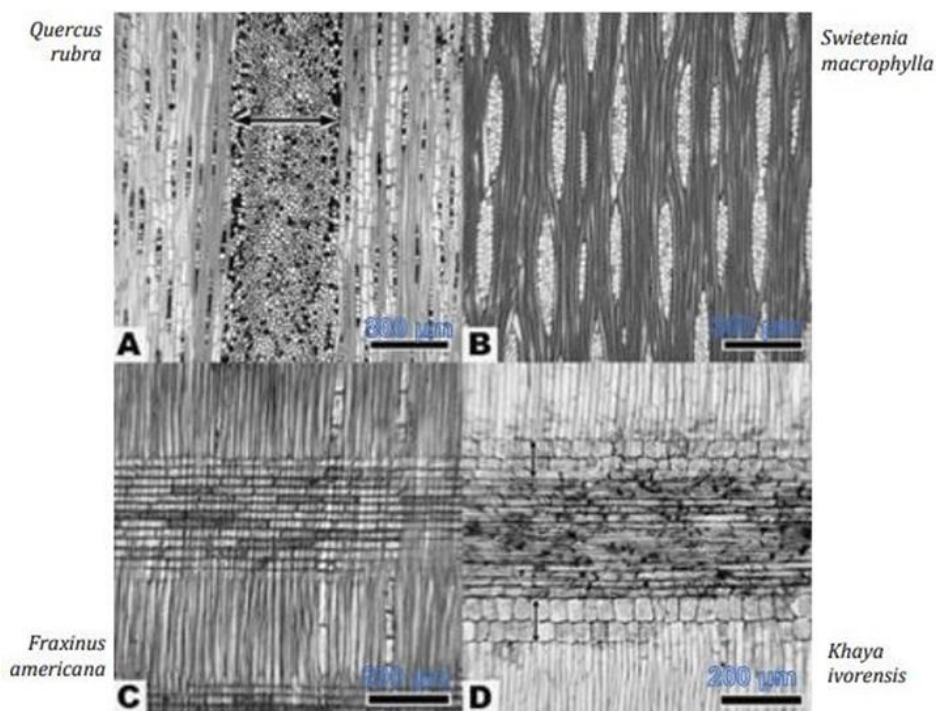
Struktura drvene stijenke je kompozitna, izgrađena je od mikrovlakana celuloze i hemiceluloze okruženih matricom od lignina. Središnjom lamelom stanice su povezane u jedinstvenu cjelinu, čime je omogućena njihova funkcija provođenja vode i biokemijskih tvari. Na središnju lamelu (ML) nastavlja se primarni dio stijenke sačinjen od dugih mikrovlakana celuloze koja stanicu omataju pod kutom od  $0^\circ$  do  $90^\circ$  u odnosu na uzdužnu os. Na primarnu stijenku (P) nastavlja se sekundarna, sastavljena od tri sloja različite debljine. U vanjskom sloju (S1) sekundarne stijenke, koji je relativno tanak, celulozna mikrovlakna položena su pod kutem od  $50^\circ$  do  $90^\circ$  u odnosu na uzdužnu os stanice. U srednjem sloju (S2), ujedno i najdebljem, celulozna mikrovlakna položena su pod kutem od  $5^\circ$  do  $30^\circ$ , a udio lignina manji je nego u središnjoj lameli i primarnoj stijenci. Posljednji, najdublji sloj (S3), sadrži još manje lignina, relativno je tanak, a mikrovlakna su omotana pod kutem većim od  $70^\circ$ . Sadržaj lignina smanjuje se

postupno od središnje lamele prema lumenom da bi se olakšao protok vode u živom drvu s obzirom da je lignin hidrofoban.

Četinjače tvore samo dvije vrste stanica – traheide i parenhimske stanice. Traheide su aksijalno orijentirane stanice čiji volumni udio u drvu četinjača iznosi preko 90 %. Omjer duljine i širine je približno 100:1. Krajevi su zašiljeni, a na njima se nalaze otvori preko kojih su dvije susjedne stanice povezane. Osim aksijalnih traheida postoje i radijalne, koje obavljaju funkciju radijalnog transporta vode. Parenhimske stanice također mogu biti radijalne ili aksijalne, a od traheida se razlikuju po tamnije obojenom lumenom. Aksijalne parenhimske stanice zauzimaju svega 1 % volumena dok se radijalne grupiraju u drvene trake i povezuju centar debla s periferijom. Prizmatičnog su oblika i služe sintezi, skladištenju i lateralnom transportu biokemijskih tvari između ksilema i sekundarnog floema. Neke vrste golosjemenjača posjeduju i strukture koje se nazivaju smolnim kanalima ili smolenicama. To su međustanični prostori omeđeni parenhimskim stanicama koji proizvode smolu. Od naših autohtonih vrsta smolu proizvode bor, smreka i ariš.

Traheje kod listača nastavljaju se jedna na drugu, čine provodne sudove koji provode veliku količinu vode od korijena prema gore. Traheje različitih vrsta drva međusobno se razlikuju po veličini i rasporedu unutar goda. Pored traheja, aksijalni sustav listača čine još i drvena vlakanca, traheide i parenhimske stanice. Sve nabrojane stanice svojim oblikom, veličinom i rasporedom utječu na mnoga svojstva drva. Drvena vlakanca su izdužene stanice s debelom staničnom stijenkom i uskim lumenom. Njihova glavna uloga je mehanička potpora. Radijalni sustav listača sačinjen je od parenhimskih stanica koje su uglavnom grupirane u drvnim tracima.

Na slici 9 vide se drveni traci nekoliko različitih vrsta drva u tangencijalnom i radijalnom presjeku. [1], [6], [10]

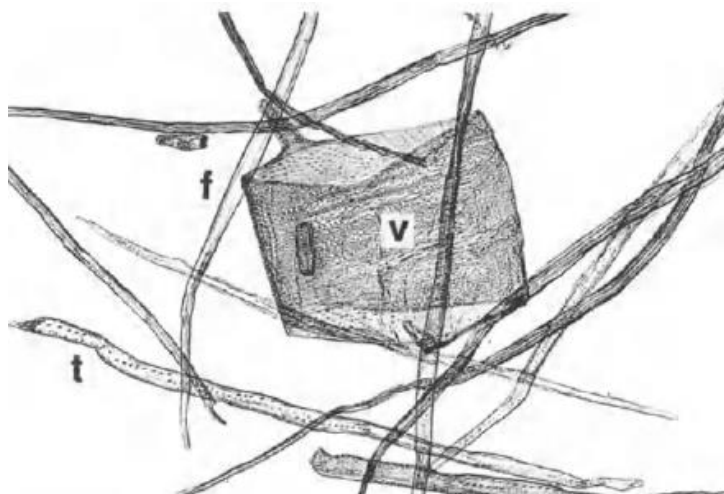


**Slika 9 Drvni traci, A i B tangencijalni presjek, C i D radijalni presjek [5]**

### 2.3.1. Drvna vlakanca

Drvna vlakanca su izdužene stanice s relativno debelom staničnom stijenkom i uskim lumenom. Njihova duljina je manja od duljine traheida kod četinjača, a širina im je upola manja od širine traheida. Dva do deset puta su dulji od traheja kod listača. Prema literaturi [11] duljina drvnih vlakanaca nalazi se u rasponu od 0,3 do 2,7 mm, a promjer u rasponu od 0,01 do 0,046 mm. Duljina drvnih vlakanaca za različite vrste hrasta je između 0,5 i 1,6 mm, a promjer između 0,014 do 0,03 mm. Njihova glavna uloga je mehanička potpora, a o debljini stijenke ovise gustoća i čvrstoća svake pojedine vrste. Vrste čija vlakanca imaju tanku stijenku i veliki lumen imaju nisku gustoću i čvrstoću. Među domaćim vrstama takav tip vlakanaca imaju topola i lipa. Vrste s debelom stijenkom i malim lumenom imaju veću gustoću i višu čvrstoću, a takva vlakanca imaju jasen, bukva i brijest.

Na slici 10 mogu se vidjeti realni odnosi između veličine traheja (v), drvnih vlakanaca (f) i vlaknastih traheida (t) hrasta. [11]



Slika 10 Vrste drvnih stanica kod hrasta

#### 2.4. Molekularna struktura drva

Suha drvena tvar stanične stijenke na elementarnoj razini sastoji se skoro u potpunosti od samo tri kemijska elementa:

- ugljika, s udjelom oko 50 %
- vodika, s udjelom oko 6 %
- kisika, s udjelom oko 44 %.

Osim ugljika, kisika i vodika može biti i vrlo mali udio nekih anorganskih tvari.

Na razini kemijskih spojeva drveno tkivo čine celuloza, hemiceluloza i lignin.

**Celuloza** je bijela vlaknasta tvar bez okusa i mirisa, netopiva je u vodi i organskim otapalima, a sastavljena je od dugih nizova međusobno povezanih molekula glukoze. Najrasprostranjeniji je polisaharid i najrašireniji organski spoj na Zemlji. U drvu se uglavnom nalazi visokokristalinična celuloza čiji stupanj polimerizacije doseže 15-ak tisuća. [2], [12]

**Hemiceluloza** se, za razliku od celuloze, vrlo lako otapa u lužinama. Razgranati je polimer koji sadrži više monomernih šećera. Amorfne je strukture i puno manjeg stupnja polimerizacije, svega 100-200. [13]

**Lignin** je visokokompleksni, amorfni, uglavnom aromatski polimer, sačinjen od fenilpropanskih jedinica. Osnovna uloga lignina je povezivanje lanaca celuloze i hemiceluloze čime se povećava krutost i stabilnost stanične stijenke. [1], [6]

Ostali ugljikohidratni polimeri koji se nalaze u drvnoj tvari listača i četinjača su još pektin, škrob i proteini.

Osim ugljikohidratnih polimera, u drvu se mogu naći ekstrahirane i anorganske tvari. Ekstrahirane tvari su prirodni produkti nastali ekstrakcijom iz biljnih sokova i uglavnom su koncentrirani u srževini. O njihovoj vrsti i količini ovise boja, miris i trajnost drva. [1]

### 3. SVOJSTVA DRVA

#### 3.1. Gustoća drva

Gustoća predstavlja odnos između mase i volumena. Računa se prema izrazu (1.1):

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad \text{g/cm}^3 \quad (1.1)$$

gdje je:

$\rho$  – gustoća, g/cm<sup>3</sup>

$m$  – masa uzorka, g

$V$  – volumen uzorka, cm<sup>3</sup>.

Kako gustoća drva ovisi o udjelu vlage u drvu, uz vrijednosti gustoće uvijek se navode i udjeli vlage pri kojima je mjerena gustoća.

Gustoća drva pri određenom udjelu vlage ( $w$ ) računa se prema izrazu (1.2):

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w}, \quad \text{g/cm}^3 \quad (1.2)$$

dok se gustoća drva u apsolutno suhom stanju računa prema formuli (1.3) :

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0}, \quad \text{g/cm}^3 \quad (1.3)$$

Preračunavanje vrijednosti gustoće drva pri nekom udjelu vlage na vrijednosti pri udjelu vlage od 12 % računa se prema izrazu (1.4.):

$$\rho_{12} = \rho_w \frac{1+0,01(12-w)}{1+0,01(12-w) \times \frac{\rho_w}{\rho_{H_2O}}}, \quad \text{g/cm}^3 \quad (1.4.)$$

Gustoća drva u obrnutom je razmjeru s poroznošću drva – što je veća gustoća, manji je volumen pora i obrnuto. S druge strane, porastom gustoće dolazi i do porasta čvrstoće, tvrdoće te ogrjevne vrijednosti drva.



### 3.2. Voda u drvu

Živo drvo sadrži toliko vode koliko je potrebno za održavanje elastičnosti i izdržavanje vanjskih naprezanja poput udara vjetra i slično. Tehničko drvo je mrtvo i primjenjuje se u prosušenom stanju. Kako je drvo higroskopan materijal, ono upija vlagu iz zraka, a s promjenom količine vlage dolazi i do promjene dimenzija te mehaničkih, toplinskih i ostalih svojstava.

Vlaga u drvu može biti **slobodna** (nalazi se u lumenu) ili **vezana** (nalazi se unutar stanične stijenke). Određena je udjelom vode u ukupnoj masi vlažnog drva te se njen sadržaj u drvu izračunava prema izrazu (1.5):

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} * 100 \quad \text{u \%} \quad (1.5)$$

pri čemu je:

$w$  – sadržaj vode u drvu, %

$m_1$  – masa drva kod nekog sadržaja vlage, g

$m_2$  – masa drva u apsolutno suhom stanju, g.

Sadržaj vlage izražava se u % i zaokružuje na 1 %.

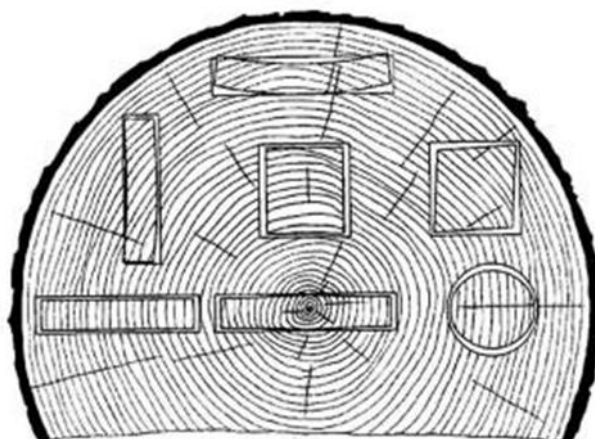
Metode određivanja sadržaja vode u drvu mogu biti direktne, indirektne i higrometrijske.

Sušenjem posječenog drva i smanjenjem udjela vlage njegov volumen ostaje nepromijenjen sve dok se ne dosegne točka zasićenja vlakanaca, koja iznosi između 25 % i 35 % vlage. Točka zasićenja vlakanaca definira se kao sadržaj vlage u staničnoj stijenci pri kojem nema slobodne vode u lumenu, a stanična stijenka je potpuno zasićena vodom.

Ako udio vlage padne ispod točke zasićenja doći će do utezanja drva, odnosno smanjenja njegovog volumena. Ako se poveća udio higroskopske vlage iznad točke zasićenja doći će do bubrenja odnosno porasta volumena.

Utezanje ili bubrenje zbog usmjerenosti strukture drva nije jednako u longitudinalnom, radijalnom i tangencijalnom smjeru. Utezanje ili bubrenje u tangencijalnom smjeru iznosi oko 8 %, u radijalnom smjeru oko 4 %, a u longitudinalnom smjeru samo 0,2 - 0,4 %.

Na slici 11 vidi se utjecaj usmjerenosti drvene građe na utezanje.



**Slika 11 Utjecaj anizotropnosti drvene građe na utezanje**

Bubrenje i utezanje ovise o gustoći drva u suhom stanju i točki zasićenja vlakanaca. Te promjene sadržaja vlage imaju značajan utjecaj na različita svojstva drva. Bubrenje negativno utječe na vibracijska i akustična svojstva koja su u uskoj vezi s modulom elastičnosti i kohezivnom silom između celuloze, hemiceluloze i lignina unutar stanične stjenke. S druge strane, djeluje pozitivno na toplinsku i električnu vodljivost. [1], [14]

### **3.3. Mehanička svojstva**

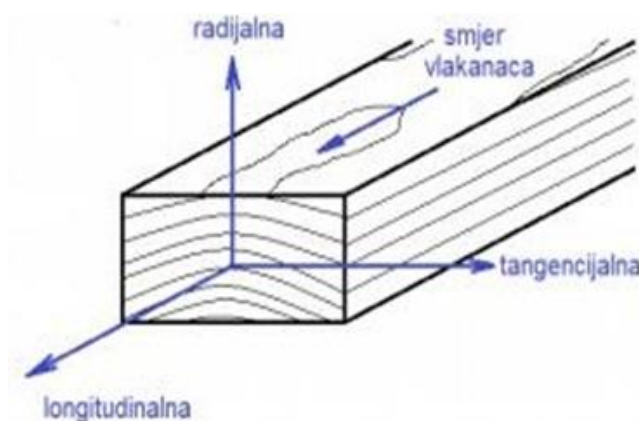
Mehanička svojstva drva su skup obilježja materijala koja dolaze do izražaja u uvjetima mehaničkog opterećenja, prerade i uporabe drva.

Različite vrste drva imaju različita mehanička svojstva koja su posljedica prije svega anatomske građe drva. Do značajnih razlika u svojstvima drva može doći i unutar iste vrste drva, ali i unutar istog debla pa čak i unutar jednog goda. [1], [15]

Općenito mehanička svojstva drva ovise o:

- vrsti i građi drva
- gustoći drva
- smjeru vlakanaca
- sadržaju vode u drvu
- trajanju i intenzitetu opterećenja
- temperaturi i vremenu uporabe.

Drvo kao ortotropan materijal ima jedinstvena svojstva, ovisna o smjeru triju međusobno okomitih osi: longitudinalnoj, radijalnoj i tangencijalnoj. Položaj ovih triju osi u odnosu na smjer vlakanaca i godova, prikazan je na slici 12. Longitudinalna os paralelna je s vlakancima i glavnom osi debla, radijalna je okomita na godove i vlakanca, a tangencijalna je okomita na vlakanca i tangira zakrivljene linije godova.



Slika 12 Tri osnovne osi drva [1]

### 3.3.1. Čvrstoća drva

Čvrstoća drva predstavlja jedno od najvažnijih svojstava koje se bitno u svakoj nosivoj konstrukciji. To je otpor kojim drvo nadvladava silu koja na pokušava razvući, stlačiti, saviti, iskrenuti ili slomiti. Ovisno o načinu opterećenja, razlikujemo **savojnu**, **tlačnu**, **vlačnu** i **smičnu** čvrstoću. Prema čvrstoći drva određuje se vrijednost drva kao konstrukcijskog materijala. Značajne su razlike u čvrstoći u smjeru vlakanaca te one okomito na vlakanca. Znatno višu čvrstoću pokazuje drvo opterećeno u smjeru vlakanaca.

**Savojna čvrstoća** određuje se najčešće standardnom metodom savijanja u tri točke. Savojna sila djeluje na sredini između oslonaca, pri čemu je gornja polovica uzorka opterećena tlačno, donja vlačno, a sredina ostaje neutralna. Normom je propisan prirast sile u jedinici vremena, a ispitivanje se provodi dok ne dođe do loma uzorka.

Vrijednost savojne čvrstoće ovisi o usmjerenosti strukture, a najviša je u longitudinalnom smjeru, a računa se prema izrazu:

$$R_{ms} = \frac{3F_{max}}{2b} * \frac{L}{h^2} \quad \text{N/mm}^2 \quad (1.6)$$

gdje je:

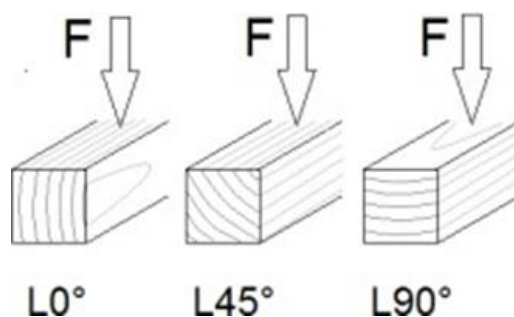
$L$  – razmak između oslonaca, mm

$h$  – visina uzorka, mm

$b$  – širina uzorka, mm

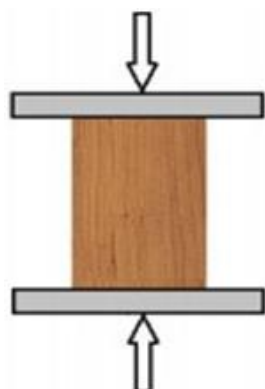
$F_{max}$  – maksimalna sila, N

Kod nekih vrsta drva savojna čvrstoća drva u longitudinalnom smjeru ovisi i o kutu između savojne sile i linije goda, slika 13. Kod nekih vrsta maksimalne vrijednosti postižu se pri kutu od  $0^\circ$ , a kod drugih pri kutu od  $45^\circ$  ili  $90^\circ$ . Čvrstoća nekih vrsta drva je potpuno neovisna o promjeni kuta.



**Slika 13 Položaj godova u odnosu na smjer savojne sile [1]**

**Tlačna čvrstoća** predstavlja najveće naprezanje koje se javlja na uzorku smještenom na horizontalnoj podlozi kad na njega djeluje sila okomita na podlogu i nastoji ga stlačiti, slika 14.



**Slika 14 Shematski prikaz ispitivanja tlačne čvrstoće [1]**

Tlačna čvrstoća u smjeru vlakanaca također se razlikuje od tlačne čvrstoće okomito na smjer vlakanaca – 3 do 10 puta je veća ona u smjeru vlakanaca. Tlačna čvrstoća dosiže samo 50 % vlačne čvrstoće u smjeru vlakanaca.

**Vlačna čvrstoća** se definira kao omjer maksimalne postignute sile pri vlačnom opterećenju i početnog presjeka ispitnog uzorka te se računa prema izrazu (1.7):

$$R_m = \frac{F_{max}}{A}, \quad \text{N/mm}^2 \quad (1.7)$$

gdje su:

$F_{max}$  – maksimalna sila

$A$  - površina početnog presjeka ispitnog uzorka

Vlačna čvrstoća, slično kao i tlačna, znatno je veća u smjeru vlakanaca od čvrstoće okomito na vlakanca.

**Smično naprezanje** javlja se kao rezultat paralelnog djelovanja dviju suprotnih (vlačnih ili tlačnih) sila koje određuju ravninu smicanja. Razlikuju se uzdužna (radijalna ili tangencijalna), poprečna i dijagonalna površina smicanja. Kod uzdužnih površina smjer djelovanja posmičnih sila može biti u smjeru vlakanaca ili okomito na njih, a kod poprečne površine sile su ili paralelne s godovima ili okomite na godove. Smična čvrstoća u smjeru vlakanaca u tangencijalnoj ravnini veća je za 15 % do 35 %, nego u radijalnoj, dok je u frontalnoj ravnini čvrstoća okomito na vlakanca znatno veća od one u smjeru vlakanaca. [1], [14]

### 3.3.2. Modul elastičnosti

Modul elastičnosti predstavlja otpor nekog materijala prema elastičnoj deformaciji. To je jedno od najčešće određivanih svojstava čije se vrijednosti za različite vrste drva dosta razlikuju pa čak i unutar iste vrste. [1]

Modul elastičnosti ovisi o:

- jakosti veza između atoma
- vanjskim uvjetima – temperaturi, udjelu vlage, načinu opterećenja i kemijskom tretmanu
- usmjerenosti mikrostrukture

Prosječna vrijednost modula elastičnosti iznosi od 3 do 25 GPa. Modul elastičnosti u longitudinalnom smjeru može biti 10 do 20 puta viši od modula elastičnosti u radijalnom i tangencijalnom smjeru.

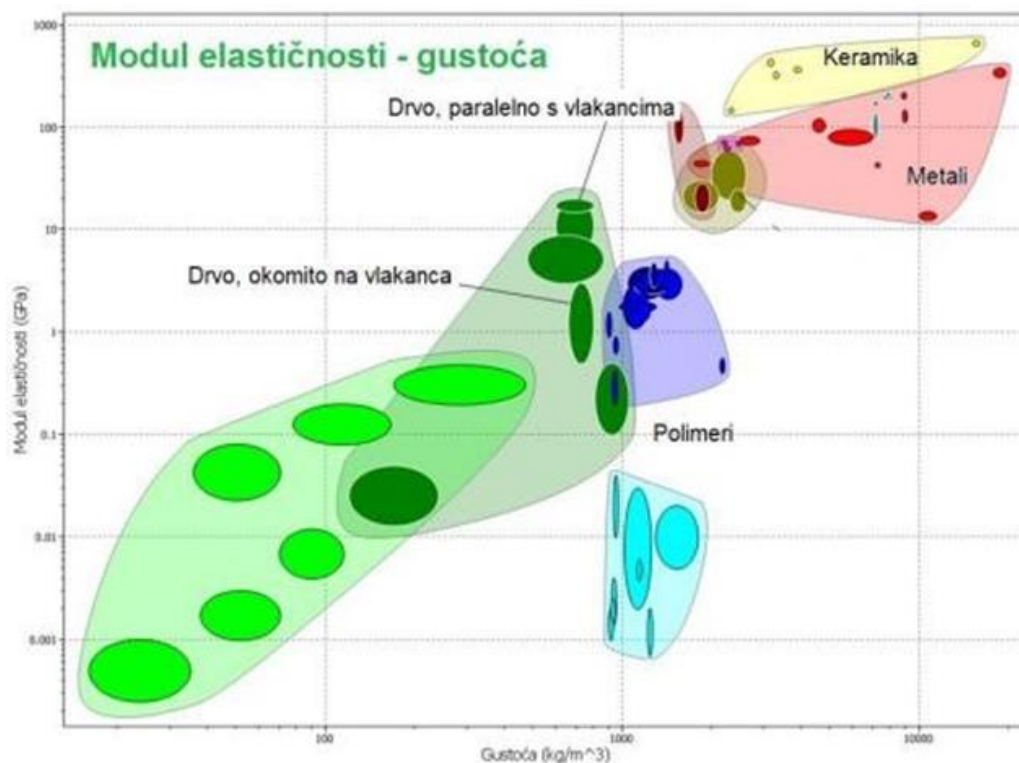
U tablici 1 prikazani su raspon i vrijednosti modula elastičnosti nekih skupina drva.

Vrijednost drva u odnosu na druge konstrukcijske materijale često se prikazuje preko omjera modula elastičnosti i gustoće, tj. preko specifične krutosti.

Na slici 15 prikazana je specifična krutost drva u odnosu na druge materijale.

**Tablica 1 Vrijednosti modula elastičnosti nekih vrsta drva [17]**

| <i>Modul elastičnosti u GPa (<math>w=15\%</math>, <math>\vartheta=1</math> do <math>20\text{ }^{\circ}\text{C}</math>)</i> |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Europske četinjače                                                                                                         | 8 ... 16   |
| Američke četinjače                                                                                                         | 6 ... 17   |
| Listače srednje gustoće                                                                                                    | 3 ... 16,5 |
| Listače velike gustoće                                                                                                     | 10 ... 19  |
| Listače vrlo velike gustoće                                                                                                | 11 ... 25  |



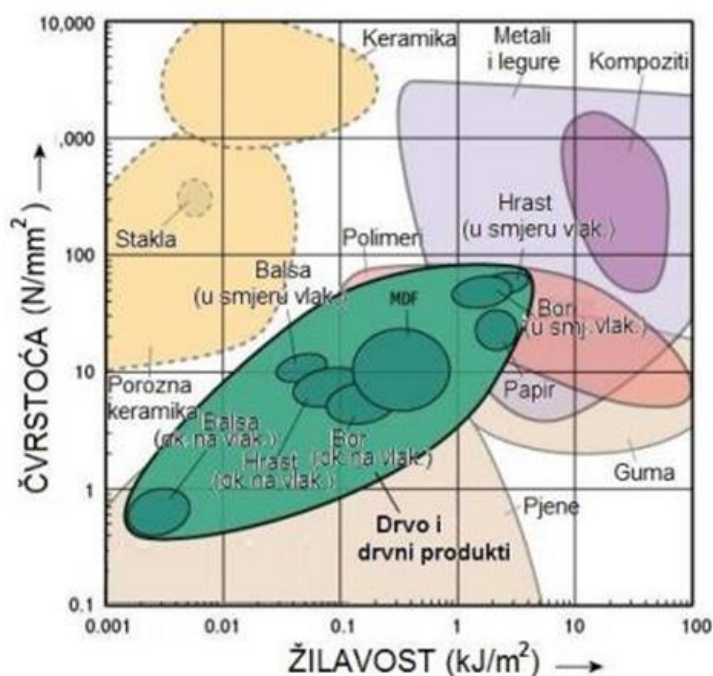
**Slika 15 Specifična krutost drva i ostalih tehničkih materijala [1]**

### 3.3.3. Žilavost

Ponašanje bilo kojeg materijala pri udarnom opterećenju određuje žilavost tog materijala. Ispitivanje žilavosti provodi se na Charpyjevu batu.

Kao i dosad navedena svojstva drva, žilavost također ovisi o usmjerenosti strukture. Najnižu žilavost drvo ima pri udarcu tangencijalno na godove, a najviše kad pada u radijalnom smjeru. Degradacijom mikrostrukture zbog biotskih ili abiotskih čimbenika žilavost značajno pada. Propadanjem mikrostrukture smanjuju se i druga svojstva (čvrstoća i gustoća), ali ne tako intenzivno kao žilavost.

Na slici 16 prikazan je odnos čvrstoće i žilavosti nekih vrsta drva te drugih tehničkih materijala.



Slika 16 Odnos čvrstoće i žilavosti drva te drugih tehničkih materijala [18]

### 3.3.4. Tvrdća

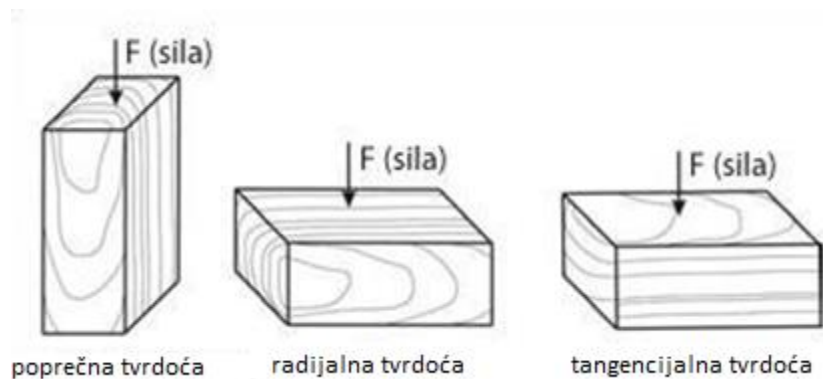
Tvrdća se može definirati kao otpor kojim se materijal suprotstavlja prodiranju nekog drugog, tvrdjeg tijela u vlastitu površinu.

Tvrdća drva ovisna je o sljedećim faktorima:

- vrsti drva
- gustoći drva
- udjelu vlage

- omjeru ranog i kasnog drva u svakom godu
- mjestu uzimanja uzorka
- anatomske građi

Nužno je razlikovati tvrdoću u poprečnom, tangencijalnom i radijalnom presjeku. [17] Pravac djelovanja sile pri mjerenju poprečne, tangencijalne i radijalne tvrdoće prikazan je na slici 17.



**Slika 17 Prikaz tvrdoće po presjecima [17]**

### 3.3.5. Otpornost na trošenje

Otpornost na trošenje je svojstvo drva da se opire postepenom narušavanju svoje površine uslijed djelovanja vanjskih mehaničkih sila. Od četiri osnovna mehanizma trošenja, za drvo je najznačajniji i najučestaliji abrazijski mehanizam trošenja. Za abraziju je karakteristično istiskivanje materijala zbog prodiranja tvrdih čestica ili tvrdih izbočina pri relativnom gibanju dvaju tijela. [22]

Otpornost na trošenje ovisi o:

- vrsti drva
- građi drva
- gustoći drva
- sadržaju vode
- stanju površine drva
- tvrdoći drva
- orijentaciji mikrostrukture.

Najveću otpornost na abraziju drvo ima u poprečnom presjeku, a najmanju u tangencijalnom.

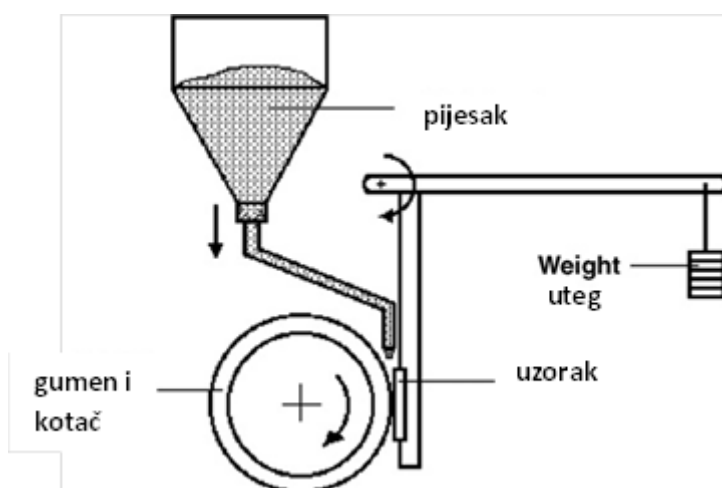


Postoji nekoliko standardnih uređaja za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje, od kojih su dva najznačajnija:

- Taber abrader, prikazan na slici 18
- standardni uređaj za ispitivanje trošenja metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“, shematski prikazan na slici 19.



Slika 18 Taber abrader [22]



Slika 19 Shematski prikaz uređaja za ispitivanje abrazijske otpornosti metodom „suhi pijesak-gumeni kotač“ [23]

## **4. EKSPERIMENTALNI DIO**

### **4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja**

U završnom radu istraženo je kako usmjerenost drvnih vlakanaca hrasta kitnjaka utječe na abrazijsku otpornost. Ispitano je abrazijsko trošenje paralelno s vlakancima u radijalnom i tangencijalnom presjeku, u smjeru rasta drva i u smjeru suprotnom od smjera rasta drva.

U okviru planiranog istraživanja, provedena su sljedeća ispitivanja:

- analiza mikrostrukture
- mjerenje gustoće
- otpornost na abrazijsko trošenje

Nakon provedbe ispitivanja, napravljena je analiza dobivenih rezultata, na temelju čega su doneseni odgovarajući zaključci.

### **4.2. Materijal za ispitivanje**

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provedeno je na autohtonoj vrsti hrasta koja se zbog dobrih mehaničkih svojstava, prije svega visoke čvrstoće i tvrdoće, ubraja među kvalitetnije vrste drva, osobito za primjenu u građevinarstvu, za parkete i sl.

Uzorci za ispitivanje izrezani su iz srževine debla koje je, u grubo tesanom obliku, služilo kao nosač u krovnoj konstrukciji nastambe za držanje stoke na području grada Gospića (Lika, HR).

Starost drva se može procijeniti prema starosti nastambe na sedamdesetak godina, a starost samog debla u trenutku sječe procjenjuje se prema broju vidljivih godina na preko 50 godina.

S obzirom da u navedenom zemljopisnom području prevladava hrast kitnjak, pretpostavlja se da analizirano drvo pripada toj vrsti za koju su određene karakteristične morfološke značajke (oblik i raspored plodova, oblik listova i sl.).

Na slici 20 prikazani su list i plod hrasta kitnjaka, a na slici 21 konstrukcija krova s kojeg je uzeta greda iz koje su izrezani uzorci za ovo istraživanje.



**Slika 20** List i plod hrasta kitnjaka



**Slika 21** Konstrukcija krova s kojeg je uzeta greda za uzorke

Zbog primijenjene mehaničke obrade jasno je bilo vidljivo koji dio debla je bio pri tlu dok je stablo još bilo živo, što je bilo nužno za ovo istraživanje.

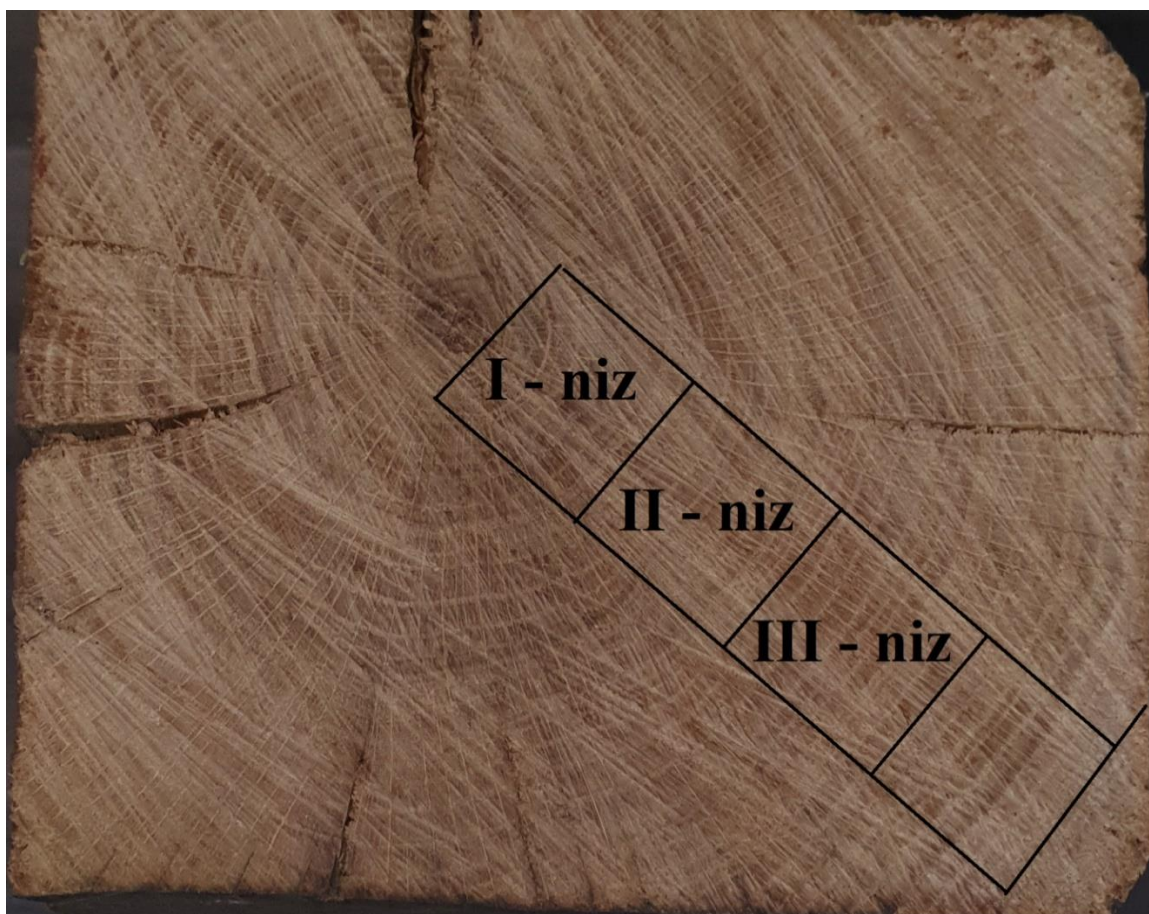
Na slici 22 vidi se izrezani dio grede s naznačenim smjerom rasta u visinu. Iz grede je izrezana daska širine 25 mm postavljena radijalno, a onda je u tri paralelna niza ( I, II i III) iz nje izrezano sedam uzoraka po visini.



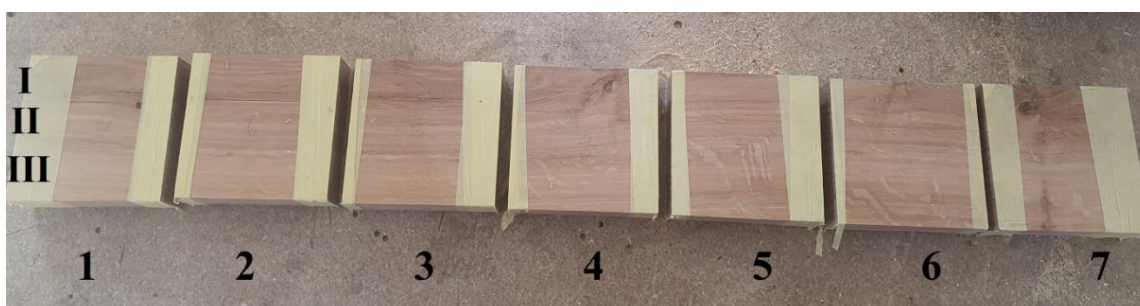
**Slika 22    Greda iz koje su izrezani uzorci**

Na slici 23 naznačen je položaj nizova uzoraka na poprečnom presjeku grede, a na slici 24 prikazana je skica s rasporedom uzoraka u pojedinom nizu.





**Slika 23** Poprečni presjek grede s naznačenim položajem I, II i III niza uzoraka



**Slika 24** Raspored uzoraka po visini

Ukupno je za istraživanje pripremljen 21 uzorak prikazan na slici 25. Konačni uzorci imali su oblik pravilne četverostrane prizme dimenzija  $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 76\text{ mm}$ . Dio grede iz kojeg su izrezani uzorci biran je s velikom pozornošću. Bilo je vrlo važno da se bočne plohe uzoraka poklapaju s radijalnim odnosno tangencijalnim presjekom, tj. da budu paralelne s vlakancima kako ne bi došlo do presijecanja drvnih vlakanaca. To se ipak nije moglo u potpunosti izbjeći zbog nesavršenosti drvene građe. Otpornost na abraziju ispitana je na četiri vertikalne plohe

dimenzija 25 mm × 76 mm kod svakog uzorka. Dvije plohe bile su paralelne s tangencijalnim, a dvije s radijalnim presjekom.



**Slika 25** Uzorci za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

### 4.3. Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture provedena je na Botaničkom zavodu Biološkog odsjeka Prirodoslovno matematičkog fakulteta u Zagrebu. Analizirana je mikrostruktura hrasta u tri karakteristična presjeka – poprečnom, radijalnom i tangencijalnom. Uzorci su propisno pripremljeni i analizirani na optičkom mikroskopu AXIO s kamerom TOUPCAM prikazanom na slici 26.

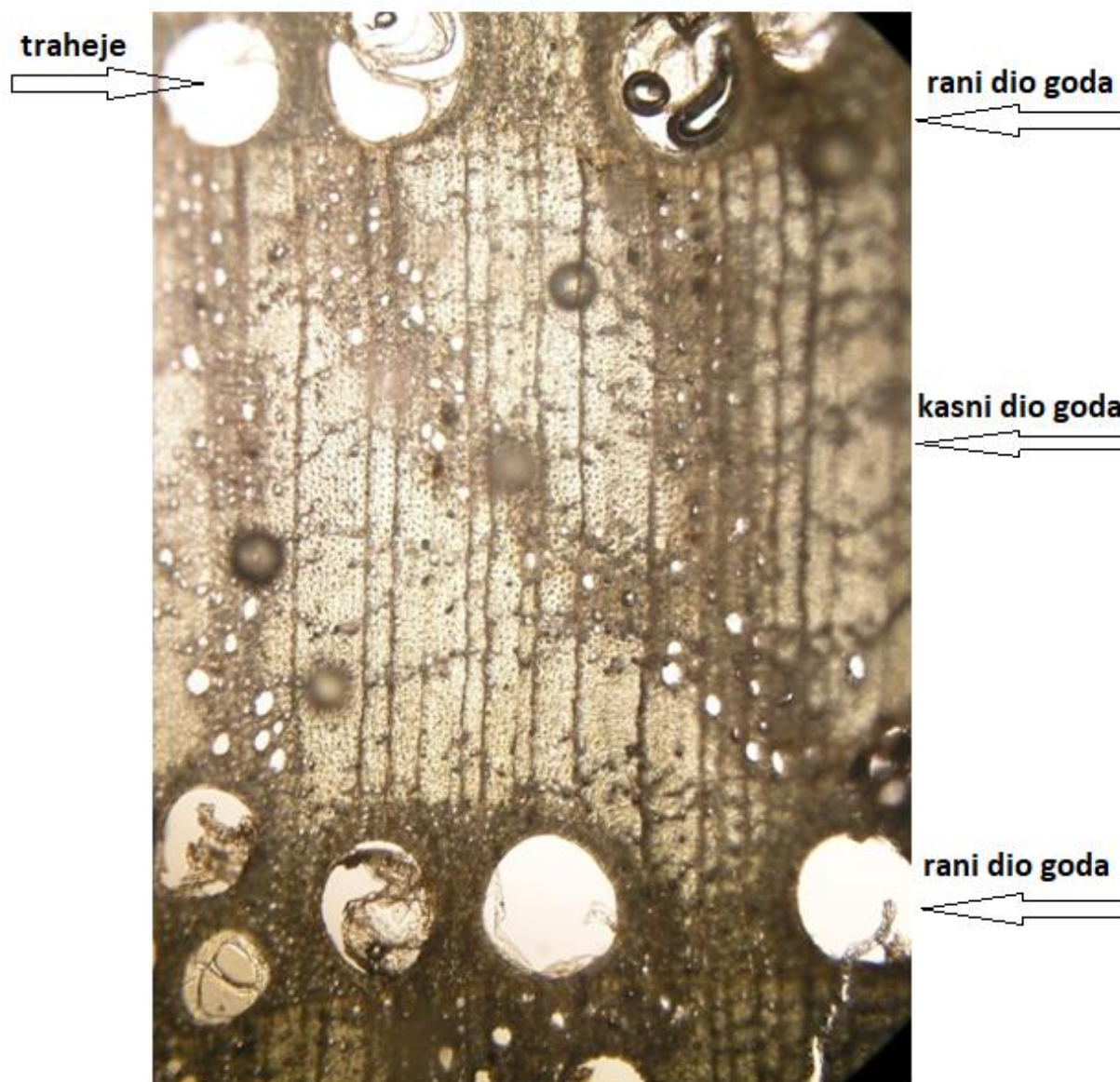


**Slika 26 Optički mikroskop AXIO**

Na slici 27 prikazana je mikrostruktura hrasta u poprečnom presjeku. Jasno se vide rani i kasni dijelovi goda. U ranom dijelu goda vide se prstenasto raspoređene traheje, stanice s velikim lumenom koje se formiraju u proljeće i kroz koje može proći velika količina vode s otopljenim mineralnim tvarima, od korijena prema krošnji.

Vlakanca se nalaze u kasnom dijelu goda. Imaju puno manji poprečni presjek od traheja, vrlo uski lumen i razmjerno debelu staničnu stijenku. Na fotografiji se mogu uočiti i drvni traci koji se radijalno šire od srčike prema periferiji. Ovdje se vide kao paralelne crte usmjerene od dolje prema gore.



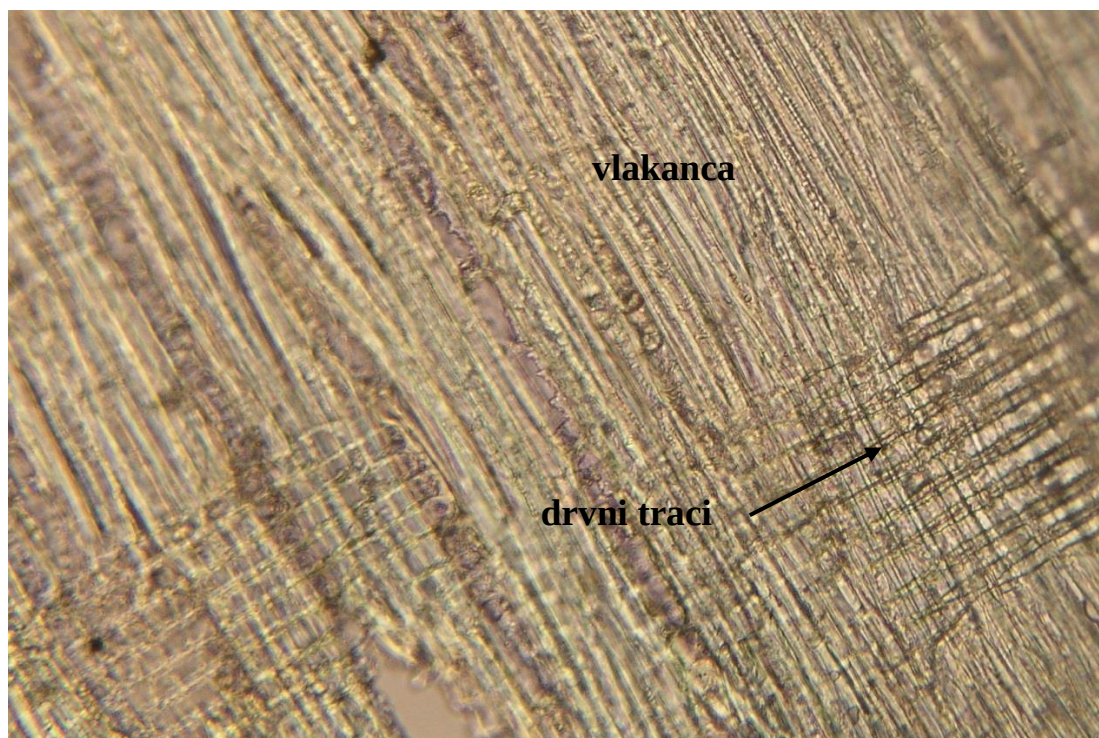


**Slika 27      Poprečni presjek kroz drvo hrasta**

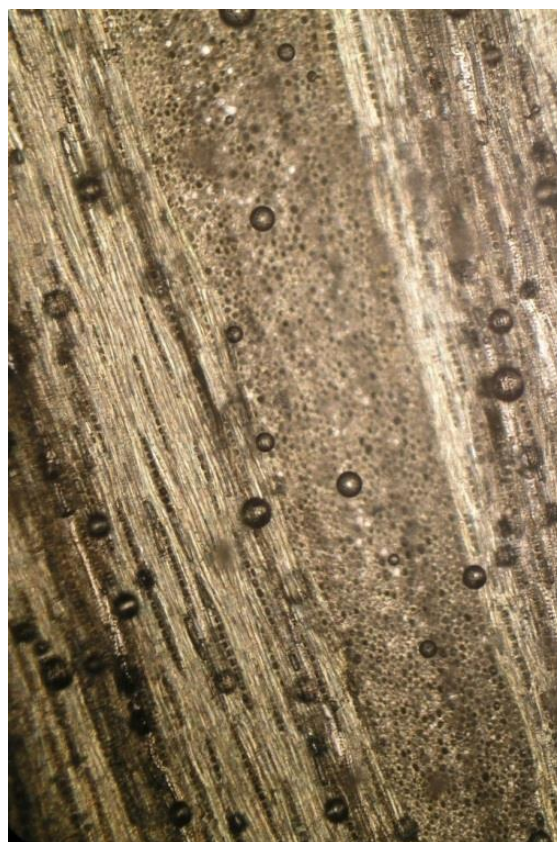
Na slici 28 prikazana je mikrostruktura u radijalnom presjeku. Ovdje se vide drvni traci, uzdužno presječeni. Okomito na drvene trake usmjerena su vlakanca koja su također presječena uzdužno.

Mikrostruktura u tangencijalnom presjeku prikazana je na slici 29. Vide se uzdužno presječena vlakanca i poprečno presječeni drvni traci.





**Slika 28 Radijalni presjek kroz drvo hrasta**



**Slika 29 Tangencijalni presjek kroz drvo hrasta**

#### 4.4. Abrazijsko ispitivanje

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provedeno je u Laboratoriju za tribologiju na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, na uređaju prikazanom na slici 30. Na prikazanom uređaju ispitivanje abrazijske otpornosti provodi se metodom „suhi pijesak-gumeni kotač“. Metoda je normirana američkim standardom ASTM G 65. Standard nudi četiri različite procedure koje su prilagođene materijalima s različitim stupnjevima otpornosti i namijenjen je prvenstveno ispitivanju metalnih materijala. Oblik i dimenzije ispitnih uzoraka također su propisani navedenim standardom.

Sila kojom se ispitni uzorak pritišće uz gumeni kotač iznosila je 45 N, a broj okretaja kotača za svaki ciklus ispitivanja iznosio je 200 okretaja. Uzorcima je prije i nakon svakog ciklusa izmjerena masa na vagi prikazanoj na slici 33.

Ispitni uzorak postavlja se i učvršćuje u čeljusti naprave, a pomoću poluge pritisne se odgovarajućom silom o gumeni kotač koji rotira brzinom od 200 okretaja u minuti. Pijesak, koji čine čestice silicijevog oksida, slobodno pada iz komore kroz sapnicu na dodirnu površinu između uzorka i rotirajućeg gumenog kotača te uzrokuje abrazijsko trošenje površine uzorka.



**Slika 30** Uređaj za ispitivanje abrazijskog trošenja metodom „suhi pijesak – gumeni kotač

Na slici 31 prikazan je uzorak postavljen u čeljusti naprave i prislonjen o gumeni kotač tijekom ispitivanja. Na slici se vidi i mlaz pijeska koji izlazi iz sapnice, a naznačen je i smjer trošenja.



**Slika 31 Položaj uzorka tijekom ispitivanja**

#### **4.4.1. Rezultati ispitivanja abrazijske otpornosti**

Na temelju izmjerenih masa uzoraka prije i nakon ispitivanja izračunat je gubitak mase za pojedinačne plohe svih ispitnih uzoraka. Ukupno je provedeno 84 ispitivanja. Dobiveni rezultati prikazani su u tablicama. Svaka tablica prikazuje vrijednosti vezane uz jedan niz uzoraka.

U prvom stupcu svake tablice navedene su vrijednosti gubitka mase u gramima za tangencijalni presjek u smjeru obrnutom od rasta drva u visinu -  $\Delta m_1(T\downarrow)$ .

U drugom stupcu je gubitak mase za radijalni presjek u istom smjeru kao u prvom -  $\Delta m_2(R\downarrow)$ .

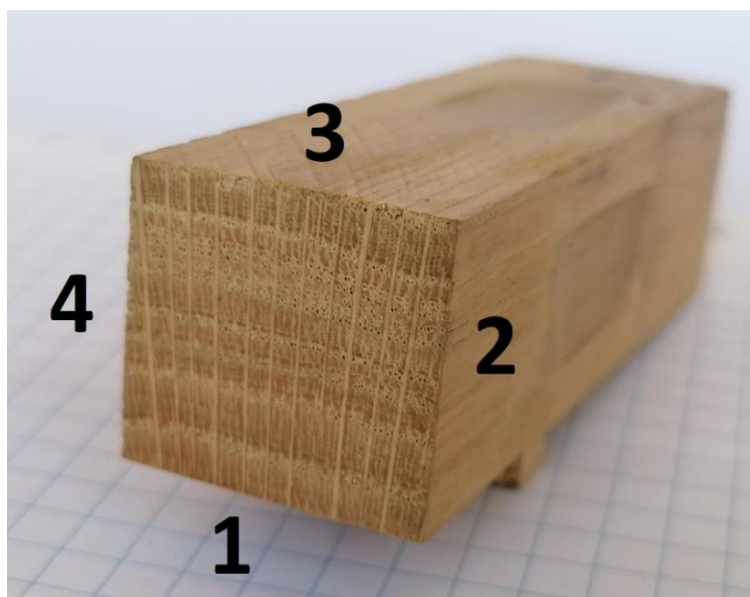
U trećem stupcu navedene su vrijednosti gubitka mase pri trošenju za tangencijalni presjek i smjer trošenja koji se poklapa sa smjerom rasta drva u visinu -  $\Delta m_3(T\uparrow)$ .

U četvrtom stupcu su vrijednosti gubitka mase za radijalni presjek i isti smjer trošenja kao u trećem stupcu -  $\Delta m_4(R\uparrow)$ .

Ispitivanje abrazijskog trošenja ukupno je provedeno na 84 plohe.

Na slici 32 shematski je prikazan raspored bočnih ploha na kojima je provedeno ispitivanje abrazijskog trošenja, u odnosu na srčiku i nizanje godova u poprečnom presjeku.





Slika 32 Raspored ispitanih ploha na uzorcima

Tablica 2 Gubitak mase na uzorcima iz I niza, g

| uzorak             | I - niz                  |                          |                        |                        |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
|                    | $\Delta m1(T\downarrow)$ | $\Delta m2(R\downarrow)$ | $\Delta m3(T\uparrow)$ | $\Delta m4(R\uparrow)$ |
| 1                  | 0,1981                   | 0,2397                   | 0,1285                 | 0,1571                 |
| 2                  | 0,2095                   | 0,2561                   | 0,1275                 | 0,1494                 |
| 3                  | 0,2075                   | 0,2460                   | 0,1260                 | 0,1488                 |
| 4                  | 0,1935                   | 0,2550                   | 0,1881                 | 0,1384                 |
| 5                  | 0,2380                   | 0,2758                   | 0,2238                 | 0,1514                 |
| 6                  | 0,2573                   | 0,2848                   | 0,2068                 | 0,1382                 |
| 7                  | 0,2690                   | 0,2900                   | 0,2061                 | 0,1529                 |
| srednja vrijednost | 0,2247                   | 0,2639                   | 0,1724                 | 0,1480                 |

Tablica 3 Gubitak mase na uzorcima iz II niza, g

| uzorak             | II - niz                  |                           |                         |                         |
|--------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                    | $\Delta m_1(T\downarrow)$ | $\Delta m_2(R\downarrow)$ | $\Delta m_3(T\uparrow)$ | $\Delta m_4(R\uparrow)$ |
| 1                  | 0,2057                    | 0,2531                    | 0,132                   | 0,1491                  |
| 2                  | 0,2215                    | 0,2638                    | 0,1391                  | 0,1664                  |
| 3                  | 0,2128                    | 0,2551                    | 0,1342                  | 0,1569                  |
| 4                  | 0,2109                    | 0,2641                    | 0,1993                  | 0,1459                  |
| 5                  | 0,2268                    | 0,2767                    | 0,2303                  | 0,1421                  |
| 6                  | 0,2499                    | 0,2786                    | 0,1837                  | 0,1569                  |
| 7                  | 0,2575                    | 0,3108                    | 0,214                   | 0,1507                  |
| srednja vrijednost | <b>0,2264</b>             | <b>0,2717</b>             | <b>0,1761</b>           | <b>0,1526</b>           |

Tablica 4 Gubitak mase na uzorcima iz III niza, g

| uzorak             | III - niz                 |                           |                         |                         |
|--------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                    | $\Delta m_1(T\downarrow)$ | $\Delta m_2(R\downarrow)$ | $\Delta m_3(T\uparrow)$ | $\Delta m_4(R\uparrow)$ |
| 1                  | 0,1428                    | 0,1740                    | 0,1316                  | 0,1579                  |
| 2                  | 0,2191                    | 0,2640                    | 0,1373                  | 0,1623                  |
| 3                  | 0,2083                    | 0,2670                    | 0,1350                  | 0,1532                  |
| 4                  | 0,2038                    | 0,2594                    | 0,2090                  | 0,1523                  |
| 5                  | 0,2375                    | 0,2667                    | 0,2299                  | 0,1296                  |
| 6                  | 0,2446                    | 0,2560                    | 0,1973                  | 0,1490                  |
| 7                  | 0,2653                    | 0,2919                    | 0,2159                  | 0,1484                  |
| srednja vrijednost | <b>0,2173</b>             | <b>0,2541</b>             | <b>0,1794</b>           | <b>0,1504</b>           |

#### 4.5. Određivanje gustoće

Mjerenje gustoće provedeno je zbog potrebe da se otpornost na abrazijsko trošenje izrazi preko gubitka volumena. Kako je za drvo karakteristično veliko rasipanje rezultata, određena je gustoća pojedinačno za sve uzorke.

Gustoća svih uzoraka određena je prema normi ISO–13061–2. Najprije je određen volumen uzoraka mjerenjem širine, duljine i visine. Mjerenje je provedeno pomičnim mjerilom s preciznošću od 0,01 mm. Mjerenje mase uzoraka provedeno je u Laboratoriju za tribologiju na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Na slici 33 prikazana je vaga „Mettler“ na kojoj je izmjerena masa uzoraka. Na temelju dobivenih vrijednosti za masu i volumen izračunata je gustoća uzoraka prema izrazu (1.2).

U tablici 5 prikazane su dobivene vrijednosti gustoće za sve uzorke pojedinačno i srednje vrijednosti gustoće za svaki niz.



Slika 33 Mjerna vaga „Mettler B5C 1000“

**Tablica 5 Vrijednosti gustoće i statistički podatci o mjerenju**

| uzorci                            | Gustoća, g/cm <sup>3</sup> |              |              |
|-----------------------------------|----------------------------|--------------|--------------|
|                                   | niz-I                      | niz II       | niz-III      |
| <b>1</b>                          | 1,004                      | 1,008        | 1,001        |
| <b>2</b>                          | 0,983                      | 0,957        | 0,976        |
| <b>3</b>                          | 0,952                      | 0,956        | 0,963        |
| <b>4</b>                          | 0,980                      | 0,959        | 0,982        |
| <b>5</b>                          | 0,997                      | 1,012        | 0,983        |
| <b>6</b>                          | 0,979                      | 1,021        | 1,003        |
| <b>7</b>                          | 0,986                      | 0,985        | 0,974        |
| <b>srednja vrijednost</b>         | <b>0,983</b>               | <b>0,985</b> | <b>0,983</b> |
| <b>aritmetiča sredina</b>         | <b>0,984</b>               |              |              |
| <b>standardna devijacija</b>      | <b>0,020</b>               |              |              |
| <b>st.dev.aritmetičke sredine</b> | <b>0,004</b>               |              |              |
| <b>koeficijent varijacije</b>     | <b>2,004</b>               |              |              |
| <b>indeks preciznosti testa</b>   | <b>0,875 %</b>             |              |              |

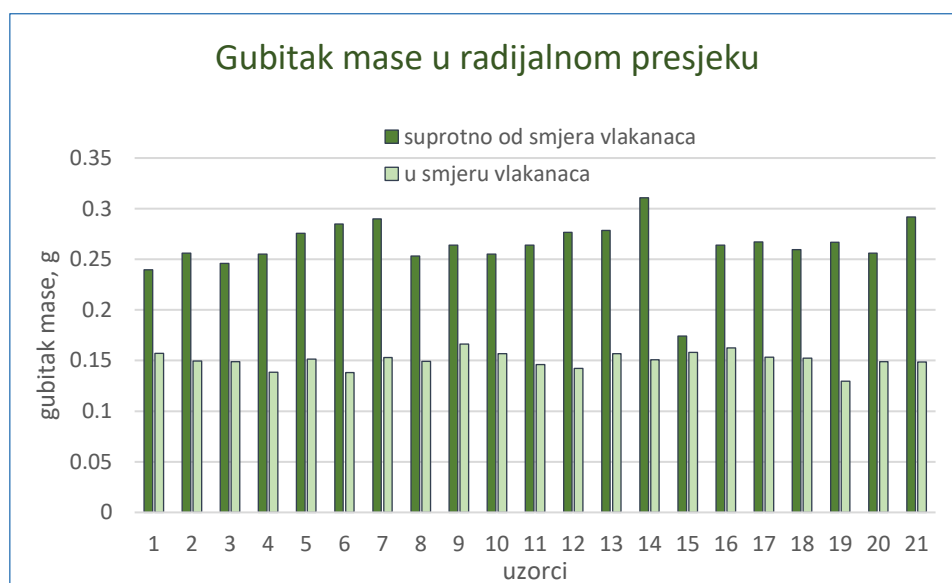
Prema podacima u tablici može se vidjeti da rasipanja rezultata nisu velika. Standardna devijacija iznosi 0,02, a standardna devijacija aritmetičke sredine 0,004. Koeficijent varijacije iznosi 2,004, a indeks preciznosti testa 0,875%. Prema standardu ISO–13061 koeficijent varijacije za mjerenje gustoće ne bi trebao biti veći od 10, isto kao i prema literaturnom izvoru [25]. To znači da se rasipanja rezultata dobivenih pri mjerenju gustoće nalaze u dopuštenim granicama.

S obzirom na vrlo male razlike u gustoći pojedinih uzoraka, u analizi rezultata promatrat će se gubitak mase pri abrazijskom trošenju, a neće se preračunavati u gubitak volumena.

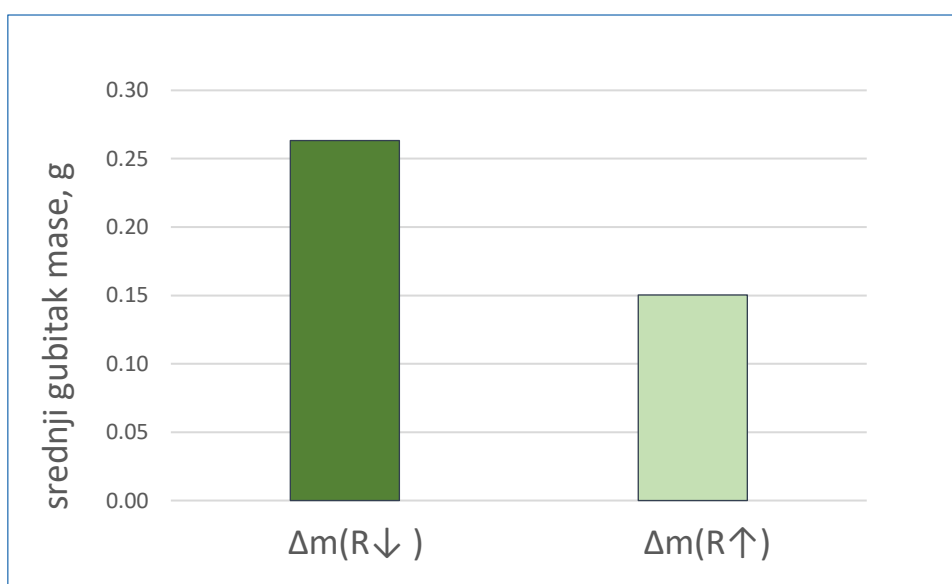


## 5. ANALIZA REZULTATA

U dijagramu na slici 34 prikazan je gubitak mase pri ispitivanju abrazijskog trošenja u radijalnom presjeku u smjeru rasta vlakanaca i u suprotnom smjeru, a na slici 35 prikazana je srednja vrijednost gubitka mase za isti presjek u oba smjera. Uzorci od 1 do 7 pripadaju prvom nizu, od 8 do 14 drugom nizu, a uzorci od 15 do 21 trećem nizu uzoraka.



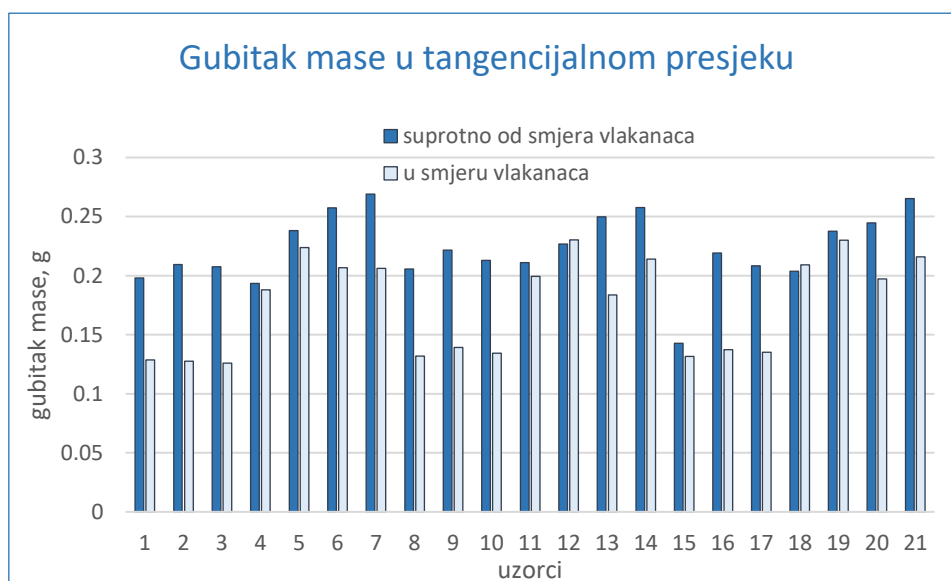
Slika 34 Gubitak mase u radijalnom presjeku za sve uzorke



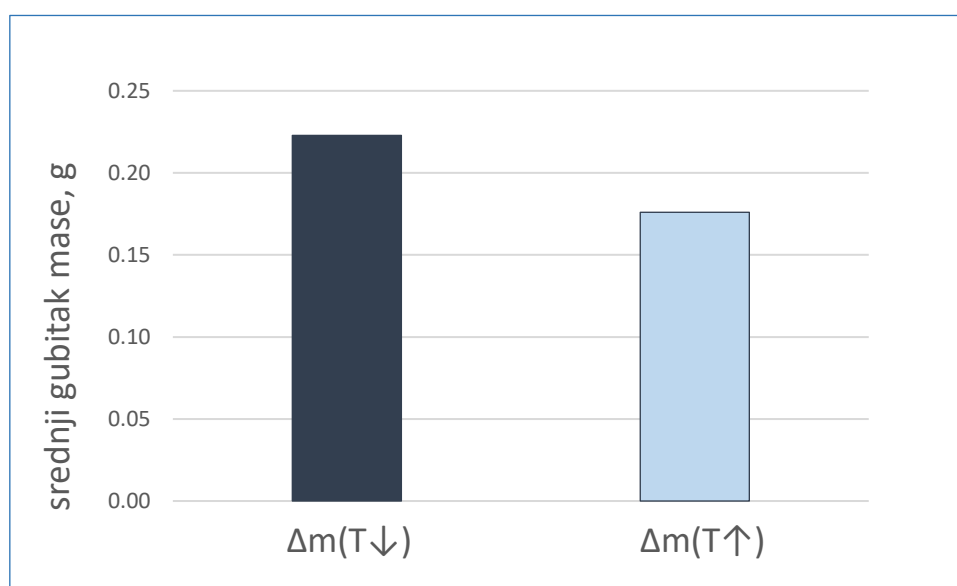
Slika 35 Srednja vrijednost gubitka mase za radijalni presjek

Na slici 36 prikazan je dijagram u kojem se vidi gubitak mase pri ispitivanju abrazijskog trošenja u tangencijalnom presjeku u smjeru rasta vlakanaca i u suprotnom smjeru za sve uzorke.

Na slici 37 prikazana je srednja vrijednost gubitka mase za oba smjera u tangencijalnom presjeku.



**Slika 36 Gubitak mase u tangencijalnom presjeku**



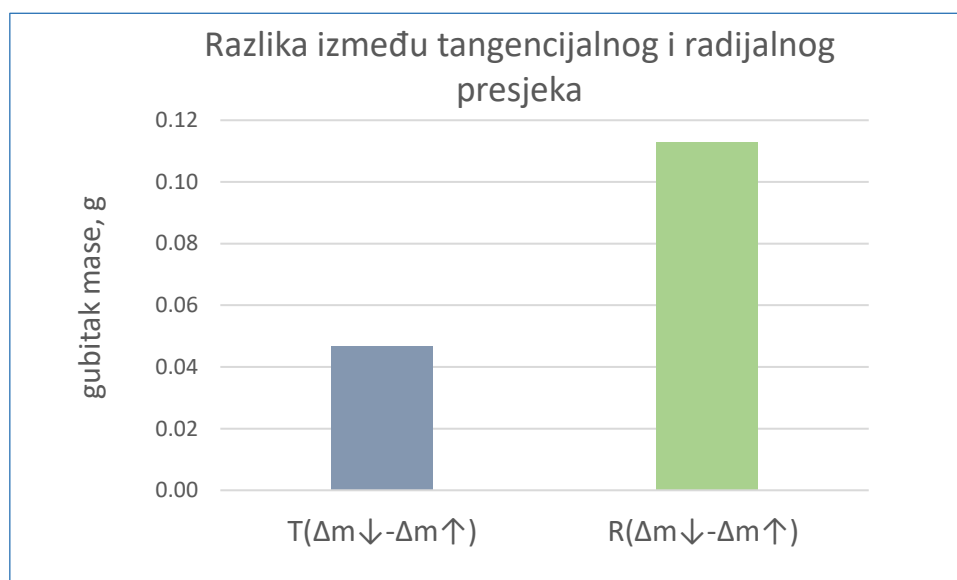
**Slika 37 Srednja vrijednost gubitka mase za tangencijalni presjek**

Iz prethodnih dijagrama vidi se puno veći gubitak mase pri abrazijskom trošenju u smjeru koji je suprotan smjeru rasta debla i smjeru vlakana. Ovaj trend je prisutan u radijalnom i tangencijalnom presjeku. Izuzetak su samo 2 od ukupno 21 uzorka u tangencijalnom presjeku kod kojih je gubitak mase neznatno veći u smjeru rasta vlakana (uzorak 12 i 18).

Također se može uočiti povećanje gubitka mase s udaljavanjem ispitnih uzoraka od korijena debla prema krošnji.

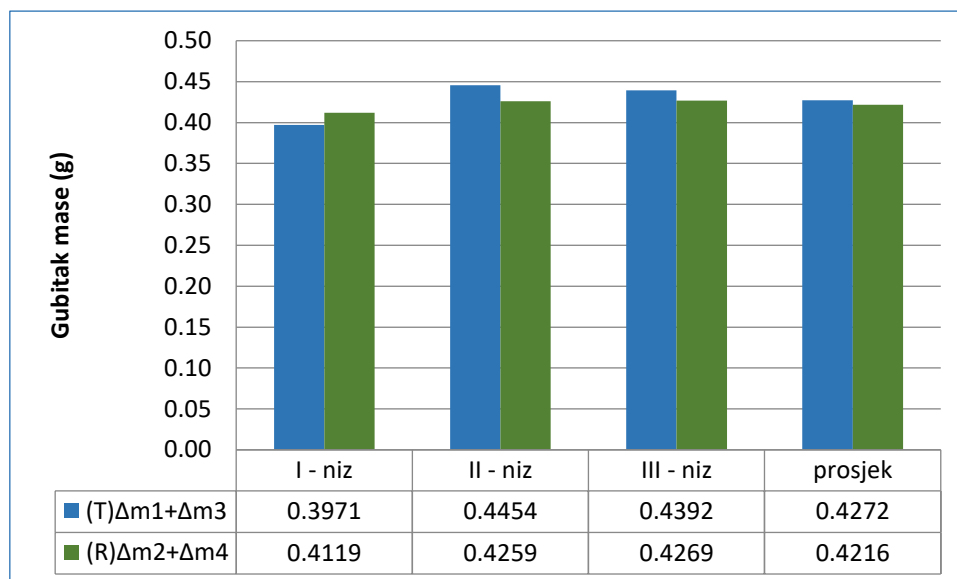
U dijagramu na slici 38 vidi se kako orijentacija vlakana utječe na razliku gubitka mase pri abraziji ( $\Delta m_{\downarrow} - \Delta m_{\uparrow}$ ) između promatranih presjeka.

Razlika u gubitku mase je veća u radijalnom nego u tangencijalnom presjeku. To bi značilo da orijentacija vlakana ima veći utjecaj na trošenje u radijalnom presjeku.



**Slika 38 Utjecaj orijentacije vlakana na gubitak mase pri abraziji u radijalnom i tangencijalnom presjeku**

Prosječni gubitak mase po uzorku u oba smjera zajedno ( $\Delta m_{\uparrow} + \Delta m_{\downarrow}$ ), u tangencijalnom i radijalnom presjeku za svaki niz prikazan je na slici 39. Jasno se vidi da nema velike razlike između radijalnog i tangencijalnog presjeka, ako se promatra ukupni gubitak mase u oba smjera zajedno. Prosječni gubitak mase u radijalnom presjeku nešto je manji što znači da je njegova otpornost na trošenje veća.



**Slika 39** Prosječni gubitak mase po uzorku u oba smjera i oba presjeka

## 6. ZAKLJUČCI

Na temelju provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- analizom mikrostrukture dokazano je da ispitivano drvo pripada rodu hrastova (*Quercus*), a prema zemljopisnom porijeklu vrlo vjerojatno se radi o hrastu kitnjaku (*Quercus petraea*)
- srednja vrijednost gustoće uzoraka hrasta kitnjaka na kojima je ispitana otpornost na abrazijsko trošenje iznosila je  $0,984 \text{ g/cm}^3$
- razlike u gustoći pojedinih uzoraka su zanemarive pa se otpornost prema abrazijskom trošenju ne treba preračunavati u gubitak volumena već se može izraziti preko gubitka mase.
- orijentacija vlakanaca ima veliki utjecaj na gubitak mase pri abrazijskom trošenju u radijalnom i tangencijalnom presjeku
- intenzitet trošenja u oba promatrana presjeka puno je veći u slučaju kada je smjer trošenja obrnut od smjera vlakanaca, a osobito je to izraženo u radijalnom presjeku
- ako se promatra ukupni gubitak mase u oba smjera zajedno, intenzitet trošenja je malo veći u tangencijalnom nego u radijalnom presjeku
- udaljenost od srčike prema kori debla nema veliki utjecaj na intenzitet trošenja
- može se naslutiti da intenzitet trošenja raste s povećanjem udaljenosti od podnožja debla, ali za pouzdanije rezultate trebalo bi napraviti puno više mjerenja

---

**LITERATURA**

- [1] Vera Rede: *Drvo – tehnički materijal*, [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1496408466-0-drvo-skripta.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1496408466-0-drvo-skripta.pdf), 07.01.2021.
- [2] *Drvo*, [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1401970934-0-drvo\\_14.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1401970934-0-drvo_14.pdf), 07.01.2021.
- [3] Chris Woodford: *Wood*, 11.09.2019, <https://www.explainthatstuff.com/wood.html>, 07.01.2021.
- [4] Užar, J.: *Drvo materijal u suglasnosti s prirodom*, Tehnički glasnik, <https://hrcak.srce.hr/109570>, 07.01.2021.
- [5] Rowell, R. M.: *Handbook of wood chemistry and wood composites*, CRC Press, 2005.
- [6] Gordić, Milan V.: *Sinteza i mehanička svojstva keramike*, <https://goo.gl/1hM3zS>, 09.01.2021
- [7] H.G. Richter, K. Gembruch, G. Koch: *CITESwoodID: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval*, <https://www.delta-intkey.com/citeswood/en/intro.htm>, 09.01.2021.
- [8] <http://www.microlabgallery.com/gallery/Pinus%20PonderosaCS40X.aspx>, 09.01.2021.
- [9] <http://sitn.hms.harvard.edu/art/2017/oak-wood-cross-section/>, 09.01.2021.
- [10] *Microscopic structure of wood*, [https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz\\_cast.pl?cast=19204](https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=19204), 11.01.2021.
- [11] Marja Sisko: *Fiber Atlas*, 1995, [https://libgen.is/search.php?req=Marja-Sisko%20Ilvessalo-Pf%C3%A4fli%20\(auth.\)&column\[\]=author](https://libgen.is/search.php?req=Marja-Sisko%20Ilvessalo-Pf%C3%A4fli%20(auth.)&column[]=author), 12.01.2021.
- [12] <https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=celuloza>, 12.01.2020.
- [13] *Structure and Properties of Hemicellulose Hemicellulose*, <http://web.nchu.edu.tw/pweb/users/taiwanfir/lesson/10393.pdf>, 12.01.2021.
- [14] Eric Meier: *Wood and moisture*, <http://www.wood-database.com/wood-articles/wood-and-moisture/>, 14.01.2021.
- [15] Enciklopedija leksikarskog zavoda, M.Krleža: *Drvo*, <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=16354>, 14.01.2021.
- [16] Ivan Trupina: Diplomski rad, *Utjecaj mikrostrukture na abrazijska svojstva drva*, 2017. [http://repozitorij.fsb.hr/7789/1/Trupina\\_2017\\_diplomski.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/7789/1/Trupina_2017_diplomski.pdf), 14.01.2021.
- [17] I. Horvat: *I. Tehnologija drva*, Drvnoindustrijski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb

- [18] *Strength*, [http://www.materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive\\_charts/strength-toughness/basic.html](http://www.materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/strength-toughness/basic.html), 16.01.2020.
- [19] *Ispitivanje* *tvrdće* *drveta*, <http://www.gradjevinarstvo.rs/tekstovi/1012/820/ispitivanje-tvrdce-drveta>, 16.01.2020.
- [20] Jeff Hosking: *Wood Hardness Chart*, <https://www.hoskinghardwood.com/Department/Hardwood-Floors/Janka-Wood-Hardness-Chart.aspx?dId=7&pageId=12>, 17.01.2021.
- [21] HRN EN 1534:2010 *Određivanje otpornosti na utiskivanje (Brinell)-metoda ispitivanja*
- [22] *Abrazijsko trošenje*, [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1333523730-0im5-trosenje12.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1333523730-0im5-trosenje12.pdf), 18.01.2021.
- [23] *The Operating Instructions Of Taber Abrasion Test*, <https://qinsunlab2016.zohosites.com/the-operating-instructions-of-taber-abrasion-test.html>, 20.01.2021.
- [24] [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-ASTM-G-65-dry-sand-rubber-wheel-abrasion-test\\_fig2\\_232380196](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-ASTM-G-65-dry-sand-rubber-wheel-abrasion-test_fig2_232380196), 20.01.2021.
- [25] David W. Green, Jerrold E. Winandy, and David E. Kretschmann: *Mechanical Properties of Wood*, <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr113/ch04.pdf>, 21.01.2021.