

# Utjecaj veličine abrazivnog zrna na abrazijsku otpornost bagrema (*Robinia pseudoacacia*) u tri karakteristična presjeka

---

Jakopec, Sanja

Master's thesis / Diplomski rad

2022

*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:235:174008>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-06-26**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Sanja Jakopec**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

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

Student:

Sanja Jakopec

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na uloženom vremenu i trudu te odličnim savjetima pri izradi ovog diplomskog rada. Zahvaljujem se asistentici Heleni Lukšić na stručnoj pomoći prilikom eksperimentalnog dijela istraživanja.

Zahvaljujem tvrtki Topomatika d.o.o. na fotografijama mikrostrukture uzoraka.

Veliko hvala mojoj obitelji na obilju ljubavi i neizmjerne podršci tijekom cijelog školovanja. Posebno hvala mom šogoru, prof. dr. sc. Ivici Ančić na poticaju za studij strojarstva i vodstvo tijekom studija.

Hvala mom Darwinu na ljubavi i podršci te doniranom materijalu za izradu ovog diplomskog rada.

Sanja Jakopec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-14/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **SANJA JAKOPEC**

Mat. br.: 0035210942

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj veličine abrazivnog zrna na abrazijsku otpornost bagrema (*Robinia pseudoacacia*) u tri karakteristična presjeka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Effect of abrasive grain size on the abrasion resistance of black locust (*Robinia pseudoacacia*) in three characteristic sections**

Opis zadatka:

Usmjerenost strukture kod tehničkih materijala nužno ima za posljedicu usmjerenost svojstava, odnosno, različite vrijednosti većine mehaničkih i drugih svojstava u karakterističnim smjerovima. Većina tehničkih materijala ima usmjerenu strukturu, a osobito je to izraženo kod drva gdje je usmjerenost strukture i svojstava njegova prirodna datost. Različitim postupcima modifikacije usmjerenost se može smanjiti, ali ne i potpuno izbjeći.

U teorijskom dijelu diplomskog rada potrebno je opisati strukturu drva na mikro i makro razini te obraditi recentna istraživanja koja se bave ponašanjem drva pri abraziji.

U eksperimentalnim dijelu potrebno je odrediti tvrdoću i otpornost na abrazijsko trošenje drva bagrema (*Robinia pseudoacacia*) u tri karakteristična smjera: poprečnom, radijalnom i tangencijalnom. Ispitivanje abrazijske otpornosti provesti na uređaju Taber abrader, s različitim kvalitetama brusnog papira. Dobivene rezultate analizirati i na temelju analize donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:  
29. rujna 2022.

Rok predaje rada:  
1. prosinca 2022.

Predviđeni datum obrane:  
12. prosinca do 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao: *Rede*  
prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednica Povjerenstva:  
*Runje*  
prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
2. HIJERARHIJSKA STRUKTURA DRVA.....	2
2.1. MAKROSTRUKTURA DRVA .....	4
2.1.1. Botanička podjela.....	4
2.1.2. Karakteristični presjeci debla.....	5
2.1.2.1. Poprečni presjek.....	5
2.1.2.2. Godovi.....	6
2.1.2.3. Radijalni presjek .....	9
2.1.2.3. Tangencijalni presjek .....	9
2.2. MIKROSTRUKTURA DRVA .....	10
2.2.1. Stanična stijenka .....	11
2.2.2. Mikrostruktura četinjača .....	12
2.2.2.1. Longitudinalne traheide .....	12
2.2.2.2. Aksijalni parenhim.....	13
2.2.2.3. Drvni traci .....	14
2.2.2.4. Smolni kanali .....	14
2.2.3. Mikrostruktura listača .....	15
2.2.3.1. Traheje .....	16
2.2.3.2. Drvna vlakanca .....	17
2.2.3.3. Parenhimske stanice.....	18
2.2.3.4. Drvni traci .....	18
2.3. MOLEKULARNA STRUKTURA DRVA .....	18

---

2.4. Celuloza .....	19
2.5. Hemiceluloza .....	20
2.6. Lignin .....	20
2.7. Ekstrahirane tvari .....	21
2.8. Anorganske tvari .....	21
3. SVOJSTVA DRVA .....	22
3.1. Higroskopnost .....	22
3.2. Gustoća .....	22
3.3. Tvrdća .....	23
3.4. Otpornost na abrazijsko trošenje .....	25
3.4.1. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje između dvaju tijela .....	27
3.5. Krična veličina abrazivnog zrna .....	29
4. BAGREM ( <i>Robinia Pseudoacacia L.</i> ) .....	31
4.1. Primjena bagrema .....	33
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	35
5.1. Cilj rada i provedena ispitivanja .....	35
5.2. Materijal za ispitivanje .....	35
5.3. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje .....	40
5.4. Mikrostrukturalna analiza .....	42
5.5. Ispitivanje tvrdoće Brinellovom metodom .....	42
5.6. Rezultati mjerenja gustoće i udjela vlage .....	45
5.7. Rezultati mjerenja gubitka mase pri abrazijskom trošenju .....	45
5.8. Rezultati analize mikrostrukture .....	48
5.9. Rezultati mjerenja tvrdoće .....	51
5.10. Analiza rezultata .....	52
5.10.1. Osvrt na analizu mikrostrukture .....	52
5.10.2. Osvrt na rezultate mjerenja intenziteta abrazijskog trošenja .....	52
5.10.3. Osvrt na rezultate mjerenja tvrdoće .....	54
6. ZAKLJUČAK .....	56
LITERATURA .....	57

**POPIS SLIKA**

Slika 2.1	Hijerarhijska struktura drva [1] .....	2
Slika 2.2	Poprečni i uzdužni presjek pojedinačnog mikrovlakna [1] .....	3
Slika 2.3	Hijerarhijska drva na više razina [1] .....	3
Slika 2.4	Prikaz stabla s osnovnim elementima: 1 – krošnja, 2- lišće, 3 – grane, 4 – cvijet i plod, 5 – deblo, 6 – korijen [4] .....	4
Slika 2.5	Karakteristični presjeci debla [7] .....	5
Slika 2.6	Slojevi drvnog tkiva vidljivi u poprečnom presjeku [8].....	6
Slika 2.7	Poprečni presjek četinjače (crveni bor) i listače (crveni hrast) te razlika u njihovim godovima [9] .....	7
Slika 2.8	Prstenasto porozne, difuzno ili rastresito porozne i semi-difuzno porozne listače [11] .....	8
Slika 2.9	Prikaz godova u radijalnom presjeku [8] .....	9
Slika 2.10	Izgled godova u tangencijalnom presjeku [8] .....	9
Slika 2.11	Aksijalni i radijalni sustav stanica u drvu [8].....	10
Slika 2.12	Struktura stanične stijenke. Paralelni i okomiti smjer u staničnoj stjenki određen je poprečnom ravninom u odnosu na površinu lumena. Uzdužni smjer stanične stijenke (L) određen je uzdužnom osi stanice [12].....	11
Slika 2.13	Mikrostruktura četinjače [1] .....	12
Slika 2.14	Shematski prikaz traheide [13].....	13
Slika 2.15	Difuzne parenhimske stanice, [11] .....	13
Slika 2.16	Paralelne parenhimske stanice, [11] .....	13
Slika 2.17	Prikaz heterogenih drvnih traka, RT – radijalne traheide, RP – radijalni parenhim [14] .....	14
Slika 2.18	Smolni kanal obične smreke ( <i>Picea abies</i> ) [15].....	15
Slika 2.19	Mikrostruktura listača [1] .....	15
Slika 2.20	Shematski prikaz traheja [13].....	16
Slika 2.21	Prikaz skaliformnih i jednostavnih perforacijskih ploha [16] .....	16
Slika 2.22	Prikaz naizmjeničnih, nasuprotnih i skaliformnih jažica [17].....	17
Slika 2.23	Prikaz drvnih traka listača A - jednoredni, B - dvoredni, C - višeredni drvni traci [18] .....	18
Slika 2.24	Raspored glavnih biopolimera u staničnoj stjenki drva [12].....	19



Slika 2.25	Molekularna struktura celuloze [12] .....	19
Slika 2.26	Molekularna struktura hemiceluloze .....	20
Slika 2.27	Molekularna struktura lignina [12].....	20
Slika 3.1	Shema ispitivanja tvrdoće prema Janki metodi [19] .....	23
Slika 3.2	Shematski prikaz mjerenja tvrdoće metodom po Brinellu [21] .....	24
Slika 3.3	Metoda određivanje tvrdoće drva po Brinellu: a) kuglica pod opterećenjem, b) kuglica nakon uklanjanja opterećenja (P – opterećenje, D – promjer kuglice, d – promjer otiska, H – ukupna dubina prodiranja, h – trajni prodor, x – privremeni prodor) [20] .....	25
Slika 3.4	Mehanizmi abrazijskog trošenja A – mikrobrazdanje, B – mikrorezanje, C – mikroumor, D – mikronaprnuća [22].....	26
Slika 3.5	Abrazija između a) dvaju tijela b) triju tijela [23].....	27
Slika 3.6	Shematski prikaz abrazijskog trošenja između dvaju tijela [24].....	27
Slika 3.7	Taber abrader.....	28
Slika 3.8	Shema Taber abradera [25] .....	28
Slika 3.9	Dijagram ovisnosti intenziteta trošenja o veličini abrazivnog zrna [26].....	29
Slika 3.10	SEM prikaz abrazivnih čestica (a) veće veličine, (b) manje veličine, $F_n$ – normalna sila, $F_t$ - sila trenja [26] .....	30
Slika 3.11	SEM prikaz abrazivnog oštećenja površine aluminijske legure nakon testa brazdanjem za upadni kut abrazivne čestice od 30° (a) i 60° (b) [26] .....	30
Slika 4.1	Prikaz rasprostranjenosti drva bagrema u Europu, % [27].....	31
Slika 4.2	Obični bagrem ( <i>Robinia Pseudoacacia</i> ) [29].....	32
Slika 4.3	Struktura poprečnog presjeka bagrema [11] .....	32
Slika 4.4	Izgled tangencijalnog presjeka, lijevo – nakon sječe, desno – 4 tjedana nakon sječe [31] .....	34
Slika 4.5	Tekstura drva bagrema prije i nakon toplinske obrade pri različitim parametrima a) prirodna boja, b) svijetlosmeđa boja, $t = 5,5$ h, $T = 110$ °C, c) sivkasto - smeđa boja, $t = 6,5$ h, $T = 125$ °C d) sivo - smeđa boja, $t = 7,5$ h, $T = 135$ °C [32] .....	34
Slika 5.1	Prikaz podrijetla drva bagrema korištenog u ispitivanjima [33] .....	36
Slika 5.2	Poprečni presjek bagrema i točna pozicija rezanja uzoraka .....	36
Slika 5.3	Radijalni presjek.....	37
Slika 5.4	Tangencijalni presjek .....	37
Slika 5.5	Rezanje uzoraka .....	37

---

Slika 5.6	Uzorci za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje, P – poprečni presjek, R – tangencijalni presjek, T – tangencijalni presjek .....	38
Slika 5.7	Ohaus Analytical Plus .....	38
Slika 5.8	Uzorak za određivanje gustoće i udjela vlage .....	39
Slika 5.9	Sušionik .....	40
Slika 5.10	Ispitivanje otpornosti abrazijskog trošenja na uređaju Taber abrader A- poprečnog, B- radijalnog i C- tangencijalnog presjeka .....	41
Slika 5.11	Dijelovi CT uređaja [35] .....	42
Slika 5.12	Uređaj za ispitivanje tvrdoće metodom po Brinellu .....	43
Slika 5.13	Otisci kuglice pri mjerenju tvrdoće na tangencijalnom presjeku .....	44
Slika 5.14	Intenzitet trošenja na različitim kvalitetama brusnih papira u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku .....	48
Slika 5.15	Struktura poprečnog presjeka bagrema .....	49
Slika 5.16	Struktura radijalnog presjeka bagrema .....	49
Slika 5.17	Struktura tangencijalnog presjeka bagrema .....	50
Slika 5.18	Gubitak volumena svih presjeka pri abrazijskom trošenju .....	52
Slika 5.19	Intenzitet abrazijskog trošenja .....	53
Slika 5.21	Rezultati mjerenja tvrdoće na karakterističnim presjecima .....	55
Slika 5.22	Prosječne vrijednosti tvrdoće karakterističnih presjeka .....	55

**POPIS TABLICA**

Tablica 4.1 Usporedba svojstva bagrema i crvenog hrasta [31] .....	33
Tablica 5.1 Korištene kvalitete abrazivnih papira i srednje vrijednosti abrazivnih zrna .....	41
Tablica 5.2 Rezultati mjerenja gustoće i udjela vlage .....	45
Tablica 5.3 Gubitak mase uzoraka pri abraziji za udio vlage od 8,396 % .....	45
Tablica 5.4 Gubitak mase uzoraka pri abraziji za udio vlage od 12 % .....	46
Tablica 5.5 Gubitak volumena uzoraka pri abraziji za udio vlage od 12 % .....	46
Tablica 5.6 Intenzitet trošenja za udio vlage od 12 % .....	47
Tablica 5.7 Izmjerene vrijednosti tvrdoće HB .....	51
Tablica 5.8 Omjeri gubitka volumena pri abrazijskom trošenju za karakteristične presjeke (P – poprečni, R – radijalni, T- tangencijalni) za sve korištene granulacije abrazivnih papira .....	54

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$m_w$	kg	Masa drva
$V_w$	$m^3$	Volumen drva
$w$	%	Udio vlage
$H_j$	N	Tvrdoća po Janki
$N$	N	Primijenjena sila prodiranja na određenu dubinu
$K$	-	Koeficijent ovisan o dubini prodiranja
HB	$N/mm^2$	Tvrdoća po Brinellu
F	N	sila
$D$	mm	Promjer kuglice
$d$	mm	Promjer otiska kuglice
$\Delta m$	g	Gubitak mase
$\Delta V$	$cm^3$	Gubitak volumena
$\Delta V/A$	$mm^2$	Gubitak volumena po trošenoj površini
$\rho_w$	$kg/m^3$	Gustoća drva

## SAŽETAK

Osnovni cilj ovog rada bio je utvrditi kako usmjerenost strukture utječe na tvrdoću i abrazijsku otpornost drva bagrema (lat. *Robinia Pseudoacacia*) u njegova tri karakteristična presjeka.

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provedeno je na uređaju Taber abrader, a tvrdoća je izmjerena Brinellovom metodom.

U radu je utvrđeno da usmjerenost strukture ima značajnu ulogu na ispitana svojstva. Poprečni presjek pokazao je najveću otpornost na abrazijsko trošenje i najveću vrijednost tvrdoće. Radijalni i tangencijalni presjek su tijekom svih ispitivanja pokazivali slične vrijednosti te imali značajno manju otpornost na abrazijsko trošenje i tvrdoću.

Prilikom ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje uočen je fenomen „kritične veličine abrazivnog zrna“. Kritična veličina abrazivnog zrna slična je kod svih ispitanih presjeka i nalazi se između 125  $\mu\text{m}$  i 201  $\mu\text{m}$ .

Ključne riječi: otpornost na abrazijsko trošenje, tvrdoća, bagrem

**SUMMARY**

The main goal of this study was to determine how the orientation of the structure affects the hardness and abrasion resistance of black locust wood (lat. *Robinia Pseudoacacia*) in its three characteristic sections.

The abrasion resistance test was performed on a Taber abrader, and the hardness was measured using the Brinell method.

It was established that the orientation of the structure has a significant influence on tested properties. The cross section showed the highest resistance to abrasive wear and the highest hardness value. The radial and tangential sections showed similar values during all performed tests and had significantly lower abrasion wear resistance and hardness.

When testing resistance to abrasive wear, the phenomenon of "critical abrasive grain size" was observed. The critical abrasive grain size was similar for all tested sections and ranges between 125  $\mu\text{m}$  and 201  $\mu\text{m}$ .

Key words: abrasion wear resistance, hardness, black locust

## 1. UVOD

Šumska područja prekrivaju više od 30 % kopnene površine Zemlje te predstavljaju obnovljiv i održiv izvor energije. Drvo kao sirovina pružilo je čovjeku vrijedne mogućnosti od njegove pojave na Zemlji i uveliko je doprinijelo njegovom opstanku te razvitku. Tisućljećima je drvo korišteno kao građevinski materijal, materijal za izradu alata, oružja i oruđa te kao gorivo [1].

Stabla, baš kao i ljudi, osjetljivi su u ranoj dobi. U bogatoj i prikladnoj okolini silovito rastu. Zahtijevaju uravnotežen unos mineralnih tvari za održavanje zdravlja. Tkiva koja se razvijaju u mladoj dobi razlikuju se od tkiva zrelih stabala. Ona dišu i probavljaju hranu, ali za razliku od ljudi, sintetiziraju i vlastitu hranu. Prilikom ozljede slijedi brza reakcija njihovog zacjeljivanja. S vremenom životni procesi stabla se usporavaju, rane sve teže zacjeljuju i teže se bore protiv bolesti te na kraju, stabla umiru [2].

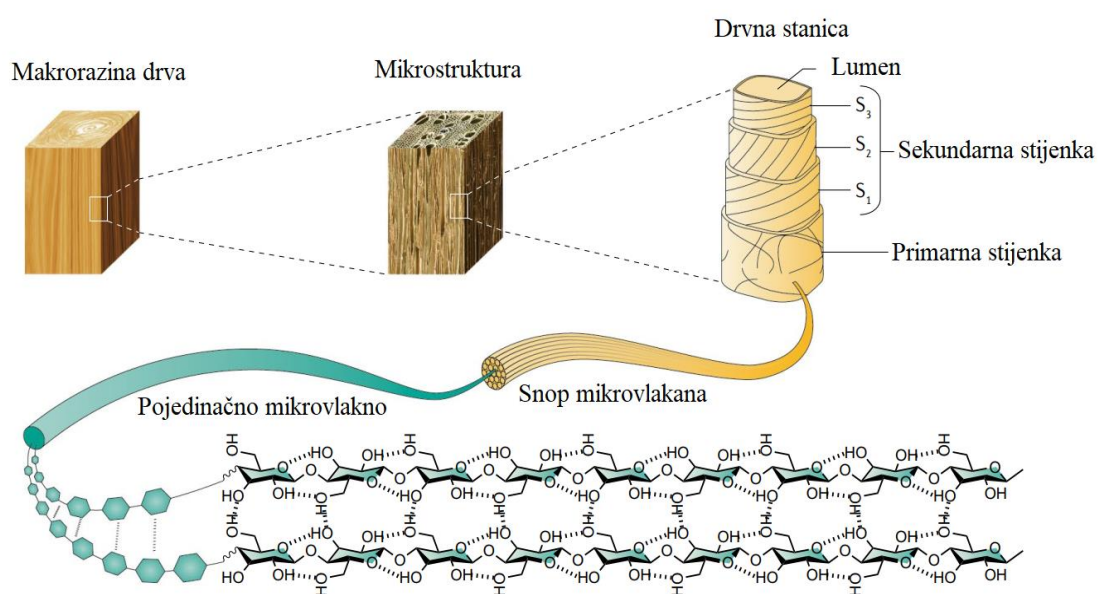
Složena struktura drva, najzastupljenijeg prirodnog materijala, optimizirala se preko 270 milijuna godina evolucije drva. Spomenuta optimizacija dovela je do visokoefikasnog prijenosa vode i hranjivih tvari, mehaničke stabilnosti te izdržljivosti drva. Jedinstvena struktura tog prirodnog materijala naglašene anizotropije omogućila je široki raspon svojstva i mogućnosti oblikovanja. Šira primjena drva razvija se u smjeru naglašavanja njegovih prirodnih prednosti i smanjenja nedostataka koji proizlaze iz njegove specifične strukture [1].

Kako bi drvo kao tehnički materijal ispunio svoj potpuni potencijal neophodno je razumjeti njegova temeljna svojstva te sagledati njegovu strukturu s makro, mikro i molekularne razine.

U ovom radu analizirat će se utjecaj usmjerenosti drvene strukture bagrema (lat. *Robinia Pseudoacacia*) na abrazijsku otpornost i tvrdoću.

## 2. HIJERARHIJSKA STRUKTURA DRVA

Drvo ima poroznu hijerarhijski uređenu strukturu, koja se može promatrati od nanorazine staničnih stijenki do makrorazine drvnih značajki. Strukturna anizotropija drva uzrokovana je naglašenom usmjerenošću drvnih stanica i celuloznih mikrovulkanaca na različitim razinama. Na mikrorazini većina lumena u trahejama, traheidama i vlaknima uzdužno je usmjerena. Na nanorazini, celulozna nanovlakna u staničnoj stijenki paralelno su orijentirana pod određenim kutom u odnosu na središnju os stanice ovisno o vrsti tkiva te sloja. Na slikama 2.1, 2.2 i 2.3 prikazana je hijerarhijska struktura drva [1].

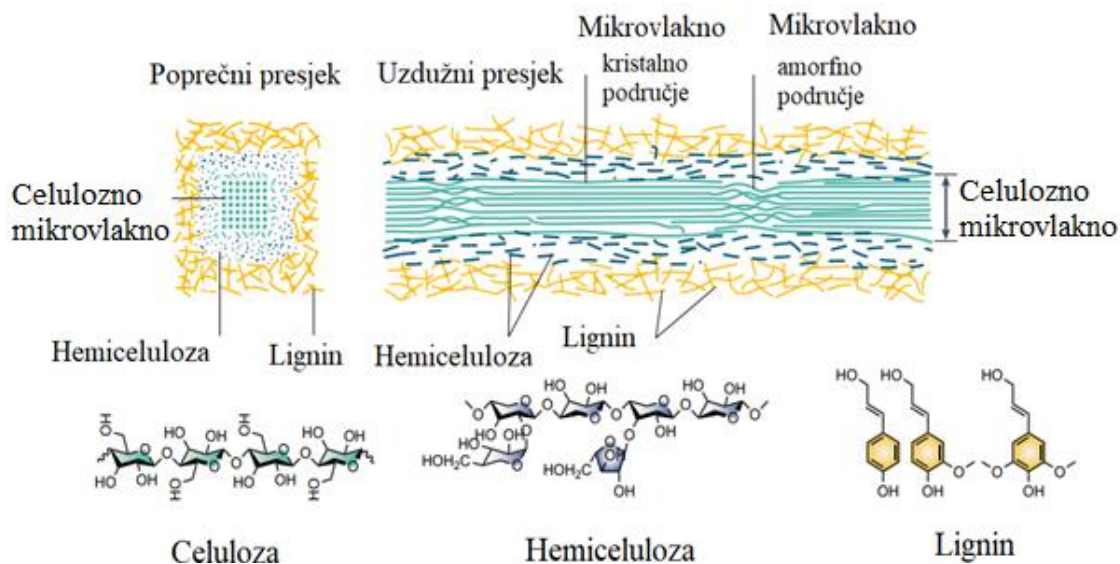


Slika 2.1 Hijerarhijska struktura drva [1]

Značajnu ulogu na razini stanične stijenke ima orijentacija celuloznih mikrovulkanaca, gustoća vodikovih veza te povezanost između celuloze, lignina i hemiceluloze. Celuloza ima povoljna mehanička svojstva s višim specifičnim modulom i specifičnom čvrstoćom od većine metala. Pod mehaničkim opterećenjem deformacija drva uključuje razne procese na razini stanične stijenke, pomicanje vukanaca te interakcije između celuloze i hemiceluloze koja se ostvaruje neprestanim razaranjem i ponovnim uspostavljanjem vodikovih veza. Razaranje i ponovno uspostavljanje vodikovih veza stvara dodatni utrošak energije koji je potreban za lom drva. Ponovno formiranje vodikovih veza je faktor koji doprinosi jedinstvenim svojstvima drva i njegovoj savitljivosti. U staničnoj stijenki svake drvene stanice nalaze se otvori preko kojih se odvija međustanična komunikacija i koji su nužni za biološke funkcije drva. Ti otvori se zovu

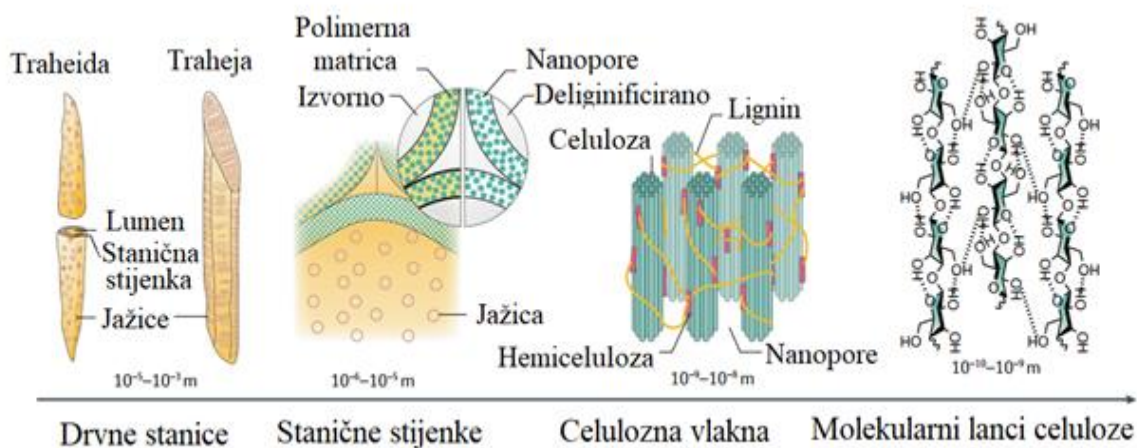


jažice i s tehničkog gledišta predstavljaju određenu vrstu grešaka u strukturi koje smanjuju nosivost drva [1].



Slika 2.2 Poprečni i uzdužni presjek pojedinačnog mikrovlakna [1]

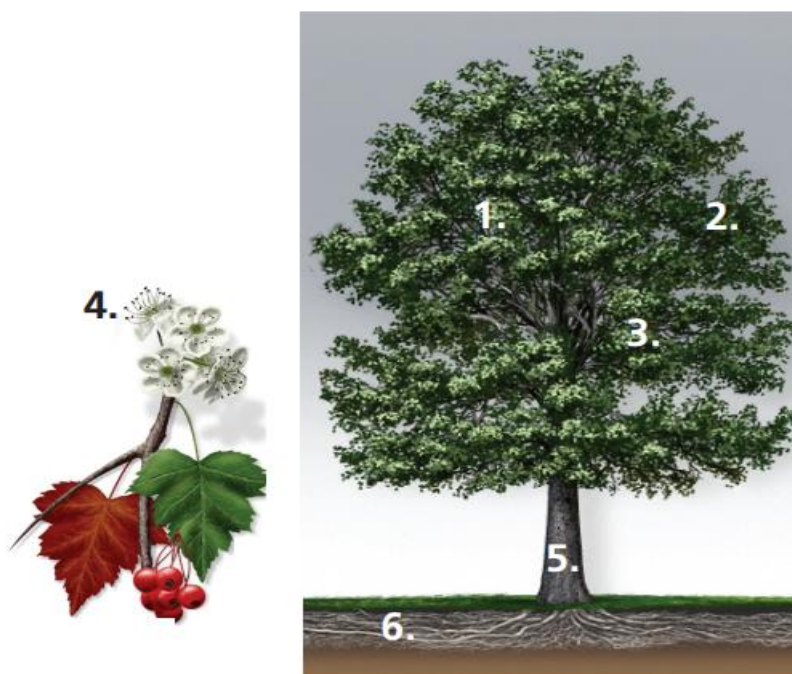
Iako je potrebno pojedinačno sagledati svaku vrstu stanica u drvu, prava vrijednost i kompleksnost nalazi se u razumijevanju integriranog sustava velikog broja stanica na više razina [2].



Slika 2.3 Hijerarhijska drva na više razina [1]

## 2.1. MAKROSTRUKTURA DRVA

Anatomija svakog stabla, neovisno o vrsti i o klimi u kojoj se nalazi, sastoji se od tri osnovna elementa – korijena, debla i krošnje. Korijen pruža strukturnu stabilnost te iz tla izvlači vodu i hranjive tvari koje prenosi u gornje dijelove stabla. Deblo nosi krošnju i sastoji se od provodnog tkiva koje prenosi prikupljene tvari iz korijena odozdo prema gore, a produkte fotosinteze u obrnutom smjeru, od lišća prema korijenu. Iznad debla nalazi se krošnja, koju čine grane, lišće, cvjetovi i plodovi. Krošnja se nalazi na najvišem dijelu stabla kako bi zaštitila deblo i korijen od okoline, kako bi lišće imalo što veći pristup sunčevoj svjetlosti te kako bi se plodovi bolje rasprostranjivali za razmnožavanje. Na slici 2.4 prikazani su osnovni dijelovi stabla [3].



Slika 2.4 Prikaz stabla s osnovnim elementima: 1 – krošnja, 2 – lišće, 3 – grane, 4 – cvijet i plod, 5 – deblo, 6 – korijen [4]

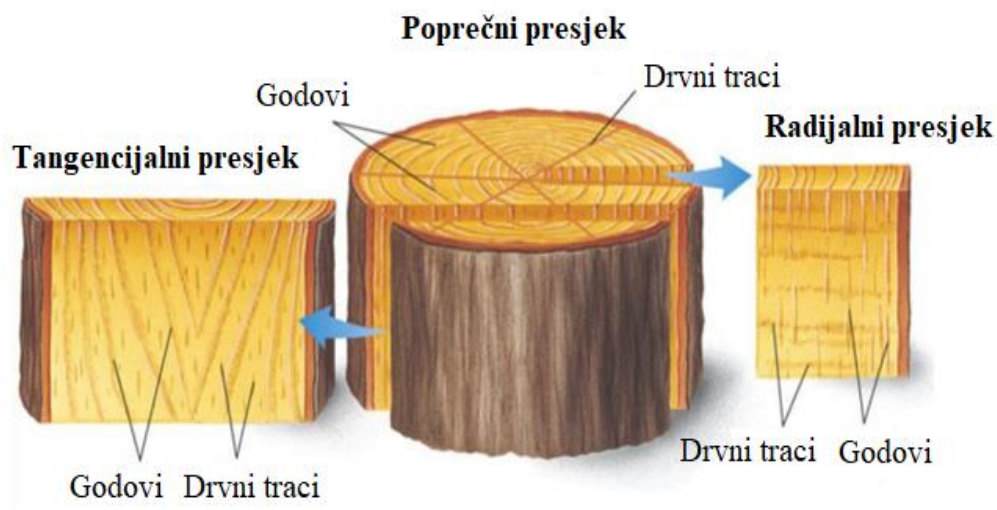
### 2.1.1. Botanička podjel

Uobičajena podjela drva je na listače (tvrdo drvo) i četinjače (meko drvo). Listovi nalik na iglice karakteriziraju četinjače koje su uglavnom zimzelene. Na sjevernoj polutci najpoznatije četinjače su bor (lat. *Pinus*), smreka (lat. *Picea*) i jela (lat. *Abies*). Listače, poznate i pod nazivom bjelogorica, imaju široko lišće koje uglavnom mijenja boju i na jesen opada. Najpoznatije vrste listača su bukva (lat. *Fagus*), hrast (lat. *Quercus*), jasen (lat. *Fraxinus*) breza (lat. *Betula*), obični bagrem (*Robinia pseudoacacia*) i dr.

Razvrstavanje na meko i tvrdo drvo nije uvijek povezano s njihovom stvarnom tvrdoćom već ta podjela proizlazi iz botaničke podjele vrsta na golosjemenjače (četinjače) te kritosjemenjače (listače). Kao što sami nazivi iniciraju, kritosjemenjače imaju sjemene zametke sakrivene plodom, dok su kod golosjemenjača sjemeni zametci otkriveni. Osim gore opisane razlike, velika razlika postoji i u njihovoj staničnoj strukturi [5,6].

### 2.1.2. Karakteristični presjeci debla

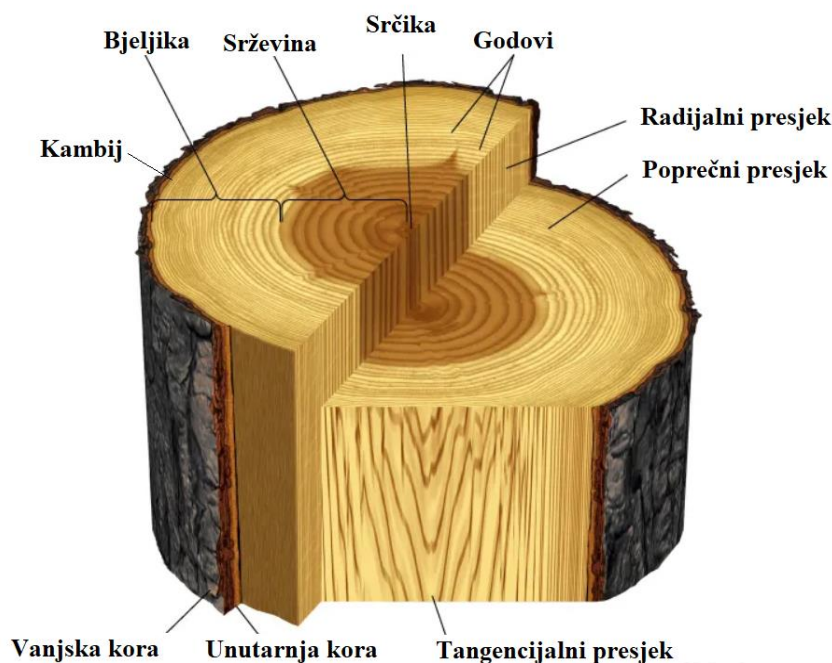
Radi orijentiranosti drvnih stanica, struktura debla treba se promatrati u tri međusobno okomita karakteristična presjeka: poprečnom, radijalnom i tangencijalnom. Navedeni presjeci prikazani su na slici 2.5 [5].



Slika 2.5 Karakteristični presjeci debla [7]

#### 2.1.2.1. Poprečni presjek

Poprečni presjek nastaje okomitim presijecanjem središnje osi debla. Promatrajući poprečni presjek, od središta debla prema rubovima, razlikuju se slijedeći slojevi: srčika, srževina, bjeljika, kambij, unutarnja kora te vanjska kora. Izgled poprečnog presjeka prikazan je na slici 2.6.



Slika 2.6 Slojevi drvnog tkiva vidljivi u poprečnom presjeku [8]

Vanjska kora pruža zaštitu stablu od napada bioloških organizama i isušivanja. Većina stanica vanjske kore je funkcionalna, ali nije živa. Karakteristike i debljina vanjske kore uveliko se razlikuje između pojedinih vrsta drva. Ispod vanjske kore nalazi se unutarnja kora koja provodi produkte fotosinteze od listova prema korijenu. Između drvnih stanica i kore nalazi se vaskularni kambij. Kambij je tanki sloj stanica čiji vanjski dio (sekundarni floem) tvori stanice kore, a unutarnji dio tvori stanice drva (ksilem). Kambij pretvara hranjive tvari u nove stanice te je tako zadužen za rast stabla u širinu. Bjeljika je svjetlije područje koje okružuje srževinu. Veći dio bjeljike čine mrtve stanice bez protoplasti koje provode mineralne tvari i vodu od korijena do listova. Također, bjeljika ima strukturu za pohranu škroba i lipida. Starenjem stabla događaju se kemijske promjene u pohranjenom materijalu i prestaje prijenos vode te se iz bjeljike formira srževina. U središtu debla nalazi se ostatak drvnog tkiva iz rane faze rasta koji se naziva srčika [5].

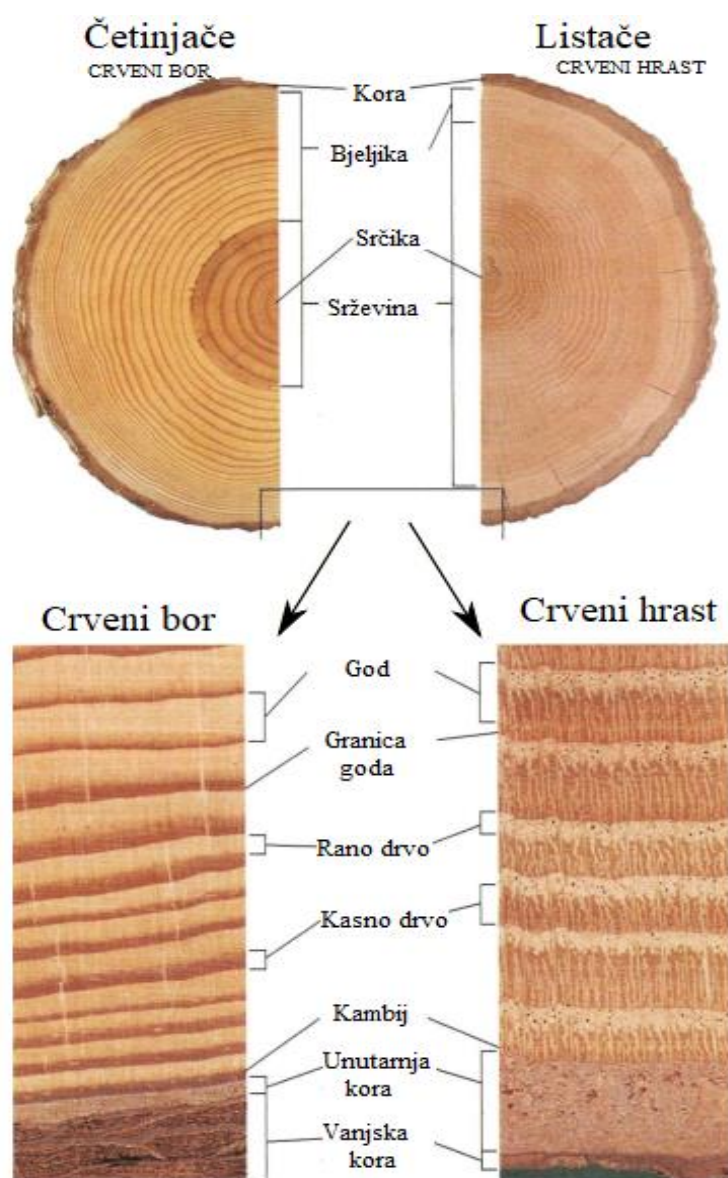
#### 2.1.2.2. Godovi

U klimatskim zonama gdje je pravilna izmjena godišnjih doba, stabla proizvode drveno tkivo, diskontinuiranim ili sezonskim djelovanjem vaskularnog kambija. Nagli rast stanica prisutan je u rano proljeće, a tijekom ljeta ili jeseni rast stanica se usporava te prestaje. Godovi ili godišnji prsteni su nakupine stanica koje se proizvedu u tom razdoblju. Svjetliji dio goda, čije su stanice



nastale na početku vegetacijske sezone, zove se rani dio goda ili rano drvo. Tamniji dio goda čine stanice koje su nastale kasnije i nazivaju se kasni dio goda ili kasno drvo. Godovi se mogu razlikovati po boji, tijeku granične linije, izraženosti te njihovoj širini. Izgled godova odraz je klimatskih uvjeta u kojem je stablo raslo. Generalno, širi godovi ukazuju na pogodne okolišne uvjete rasta stabla. Godovi utječu na svojstva drva te sprečavaju dimenzijske promjene u radijalnom smjeru [2].

Na slici 2.7 prikazani su poprečni presjeci crvenog bora i crvenog hrasta, odnosno listače i četinjače te razlike između njihovih godova [9].

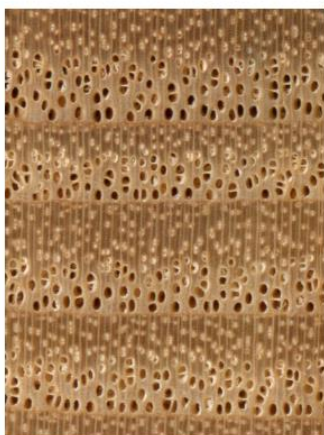


**Slika 2.7** Poprečni presjek četinjače (crveni bor) i listače (crveni hrast) te razlika u njihovim godovima [9]

Godovi se ne pojavljuju uvijek s uočljivim svjetlijim i tamnijim krugovima ranog i kasnog drva. Postoje tri temeljna uzorka godova koja se pojavljuju kod listača i četinjača s razlikom u anatomskoj strukturi: bez staničnih promjena (ujednačen izgled, tropski krajevi), postupno smanjenje unutarnjeg promjera provodnih elemenata od ranog drva do kasnog drva te nagla i jasna promjena unutarnjeg promjera provodnih elemenata po prstenu [10].

Listače se na temelju veličine i rasporeda pora ili provodnih sudova dijele u tri osnovne skupine, prema slici 2.8 [11].

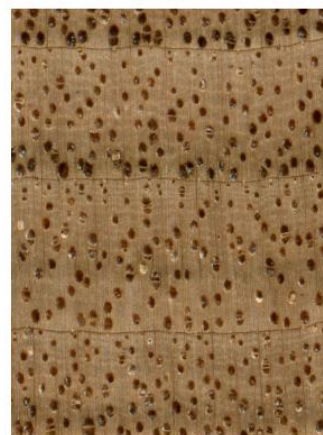
**Prstenasto porozno drvo**



**Difuzno ili rastresito porozno drvo**



**Semi-difuzno porozno drvo**



**Slika 2.8 Prstenasto porozne, difuzno ili rastresito porozne i semi-difuzno porozne listače [11]**

Prstenasto porozne vrste drva imaju traheje velikih promjera koje u poprečnom presjeku nalikuju porama. Ovi provodni elementi, osim u poprečnom, vide se i u radijalnom te tangencijalnom presjeku debla. Traheje većeg promjera formiraju se na početku vegetacijske sezone, a traheje manjeg promjera u kasnijem dijelu godine. Ovi provodni elementi su vidljivi u svim karakterističnim presjecima.

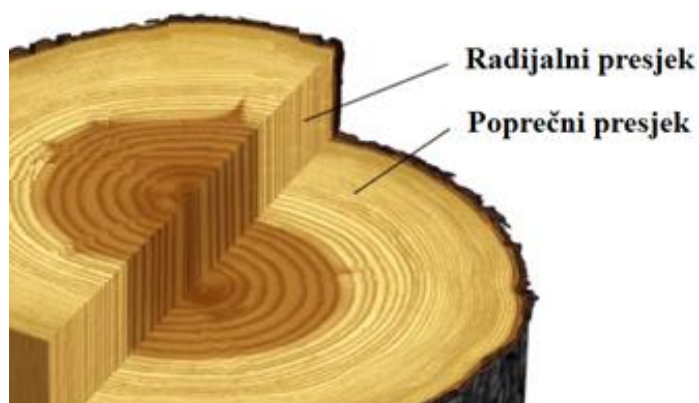
Difuzne ili rastresito porozne vrste drva nemaju jasnu razliku između ranog i kasnog drva radi ujednačenosti promjera i raspodjele provodnih elemenata.

U nekim slučajevima veličina promjera i raspodjela traheja nalazi se između dviju opisanih skupina te se takve vrste nazivaju semi-difuzna porozna drva [10].

Kod četinjača rano drvo karakteriziraju velike traheide s tankim stjenkama koje su potrebne za nagli rast i veliku provodljivost vode. Tkivo kasnog drva je veće gustoće i sastoji se od stanica relativno malih promjera s debelim stjenkama i malim lumenima koje doprinose čvrstoći debla. [9].

### 2.1.2.3. Radijalni presjek

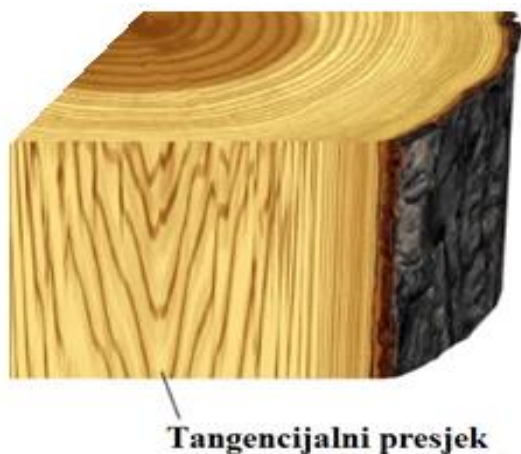
Radijalni presjek nastaje uzdužnim presijecanjem preko radijusa debla. Na njemu se mogu uočiti strukturne značajke od srčike do kore te uzdužne promjene u drvu. Godovi u radijalnom presjeku nalikuju paralelnim linijama, što se može vidjeti na slici 2.9.



**Slika 2.9 Prikaz godova u radijalnom presjeku [8]**

### 2.1.2.3. Tangencijalni presjek

Tangencijalni presjek nastaje okomitim presijecanjem radijusa debla ili presijecanjem po tangenti goda. Budući da zaobljenost godova varira na različitim mjestima, godovi u tangencijalnom presjeku nalikuju nizovima parabola ili obliku slova V, kako je prikazano na slici 2.10 [8].

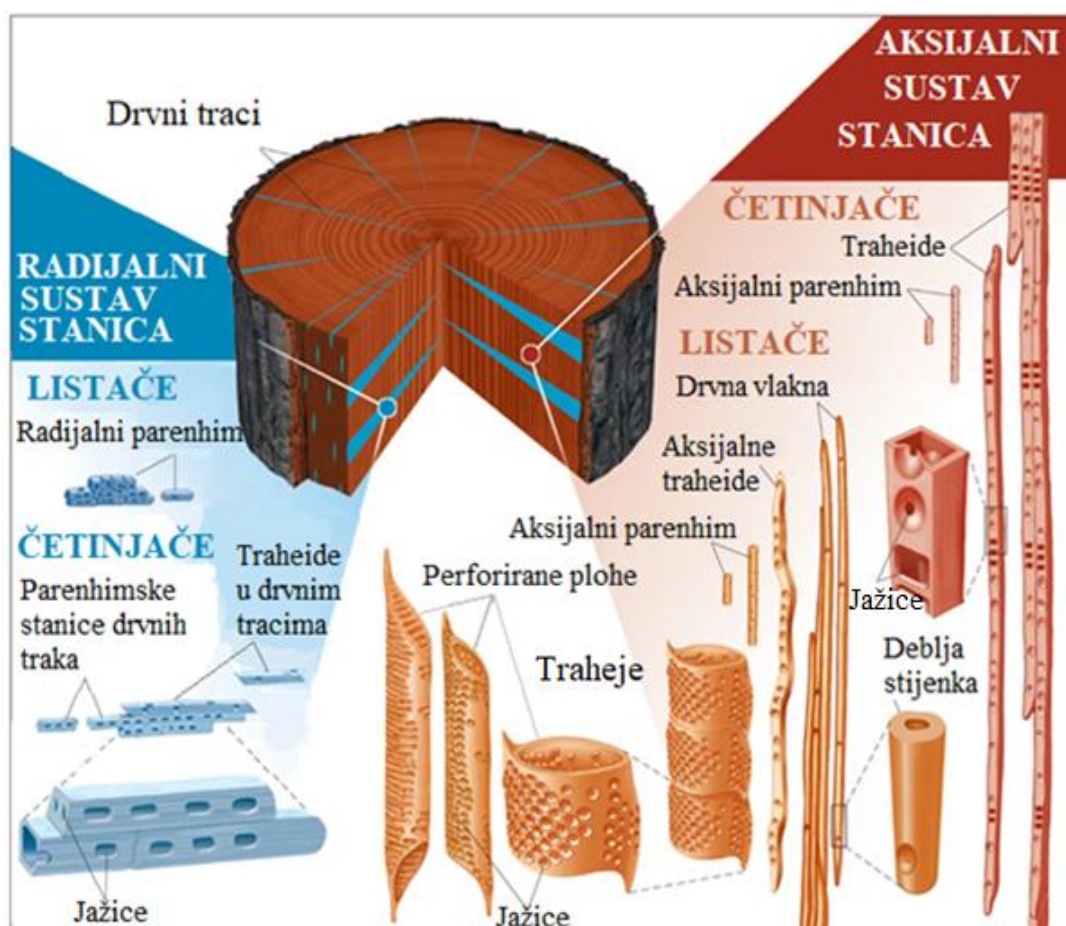


**Slika 2.10 Izgled godova u tangencijalnom presjeku [8]**

## 2.2. MIKROSTRUKTURA DRVA

Drvena stanica je temeljna mikrostrukturna jedinica drvnog tkiva. Sastoji se od stanične stijenke koja obavlja lumen. Lumen je prazni prostor koji je ostao nestankom živog dijela stanice. Stoga krajnja funkcija drvene stanice proizlazi iz same stanične stijenke.

Izdužene stanice međusobno su povezane na kompleksan način, tvoreći integrirani sustav od korijena do grančice. Stanice drva orijentirane su u aksijalni i radijalni sustav stanica. Stanice aksijalnog sustava protežu se paralelno sa središnjom osi debla te su zadužene za protok tvari po toj osi. U smjeru okomito na središnju os debla tvari se prenose od središta prema kori i obrnuto, za što su zadužene stanice radijalnog sustava. Na slici 2.11. prikazane su osnovne vrste drvnih stanica u aksijalnom i radijalnom sustavu [5].



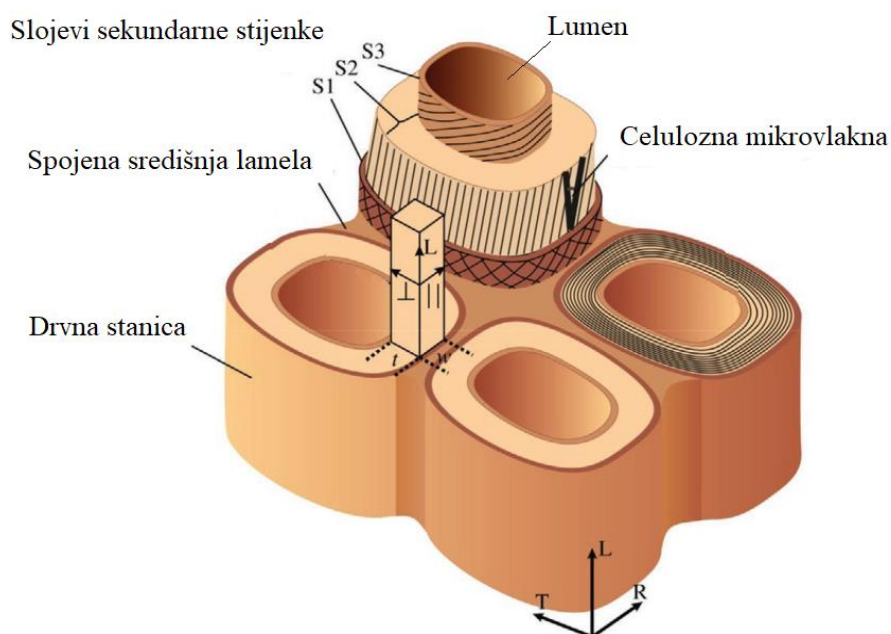
Slika 2.11 Aksijalni i radijalni sustav stanica u drvu [8]



### 2.2.1. Stanična stijenka

Drvena stanica sastoji se od središnje lamele, primarne stijenke, višeslojne sekundarne stijenke te otvorenog lumena, kao što je prikazano na slici 2.12. Debljina stanične stijenke razlikuje se ovisno o vrsti drva. Utječe na širinu i raspored godova. Središnja lamela je područje koje povezuje susjedne stanične stijenke u funkcionalnu cjelinu. Sastoji se od peptidnih tvari te postupno lignificira povećavajući svoju čvrstoću i strukturnu stabilnost. Primarna stijenka je vrlo tanka (0,1 do 0,2  $\mu\text{m}$ ), međutim, podnosi velika vlačna naprezanja koja nastaju prilikom upijanja vode i fizičkog povećanja stanice. Budući da ne postoji jasna granica između središnje lamele i primarne stijenke, često se za ova dva sloja upotrebljava izraz „spojena središnja lamela“.

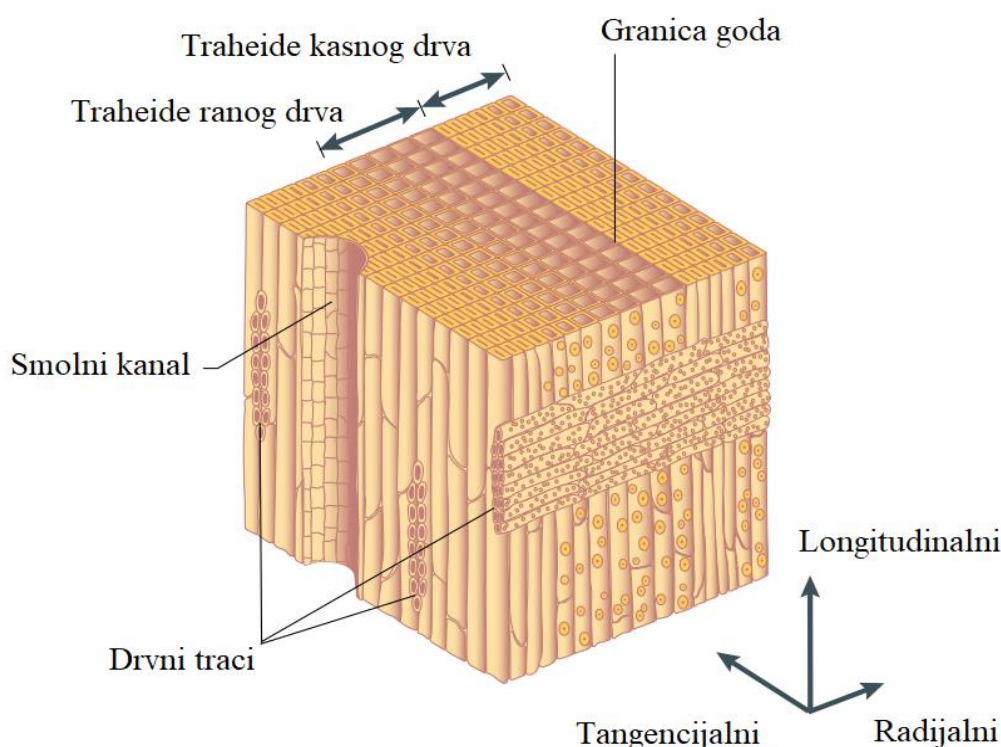
Na primarnu stijenku nastavlja se sekundarna stijenka koja se sastoji od tri sloja:  $S_1$ ,  $S_2$  i  $S_3$ . Navedeni slojevi razlikuju se prema orijentaciji celuloznih mikrovlaknaca u odnosu na središnju os stanice. U  $S_1$  sloju celulozna mikrovlakna obavijaju lumen pod kutom od  $50^\circ$  do  $70^\circ$ . U  $S_2$  sloju celulozna mikrovlakna orijentirana su aksijalno pod kutom od  $10^\circ$  do  $30^\circ$ .  $S_2$  sloj je najvažniji sloj stanične stijenke koji određuje mehanička svojstva ne samo stanične stijenke već i živog stabla jer podnosi većinu uzdužnog opterećenja u traheidama četinjača. Celulozna mikrovlakna u  $S_3$  sloju orijentirana su pod kutom od  $60^\circ$  do  $90^\circ$ . Sve drvene stanice međusobno su povezane preko jažica koje omogućuju protok vode između drvnih stanica [12].



**Slika 2.12** Struktura stanične stijenke. Paralelni i okomiti smjer u staničnoj stjenki određen je poprečnom ravninom u odnosu na površinu lumena. Uzdužni smjer stanične stijenke (L) određen je uzdužnom osi stanice [12]

### 2.2.2. Mikrostruktura četinjača

Jedan dio stanica u četinjačama usmjeren je u uzdužnom, a drugi dio u radijalnom smjeru. Kao što je prikazano na slici 2.13, četinjače su u uzdužnom smjeru građene od longitudinalnih traheida i aksijalnog parenhima. U radijalnom smjeru vide se drvni traci u kojima se nalaze parenhimske stanice i traheide drvnih traka koje se razlikuju od longitudinalnih traheida. Na slici se vide i smolni kanali koji mogu biti usmjereni aksijalno i radijalno.



Slika 2.13 Mikrostruktura četinjače [1]

#### 2.2.2.1. Longitudinalne traheide

Traheide su glavna komponenta četinjača. Čine više od 90 % svih stanica. Ovisno o svojoj funkciji, traheide se razlikuju po promjeru i debljini stanične stijenke. Traheide s većim promjerom stanice i tankom stijenkom omogućuju prijenos vode (rano drvo), dok traheide manjeg staničnog promjera i debljom staničnom stijenkom osiguravaju mehaničku čvrstoću (kasno drvo). Pravokutnog su poprečnog presjeka, a njihova duljina (3 do 4 mm) značajno je veća od njihovog promjera (25 do 45  $\mu\text{m}$ ). Traheide imaju sužavajuće krajeve i nastavljaju se jedna na drugu. Na slici 2.14 prikazan je izgled traheide [2].



**Slika 2.14** Shematski prikaz traheide [13]

#### 2.2.2.2. Aksijalni parenhim

Manji udio volumena drvnog tkiva četinjača čine stanice aksijalnog parenhima. Parenhimske stanice svojim oblikom nalikuju traheidama radi sličnih veličina promjera stanice, međutim, imaju manju debljinu stanične stijenke [10]. Parenhimske stanice su često ispunjene tamnijim sadržajem što olakšava njihovo prepoznavanje. Parenhimske stanice mogu biti raspoređene difuzno, bez određenog rasporeda kao što je prikazano na slici 2.15 ili mogu paralelno pratiti godišnje prstene kao na slici 2.16 [11].



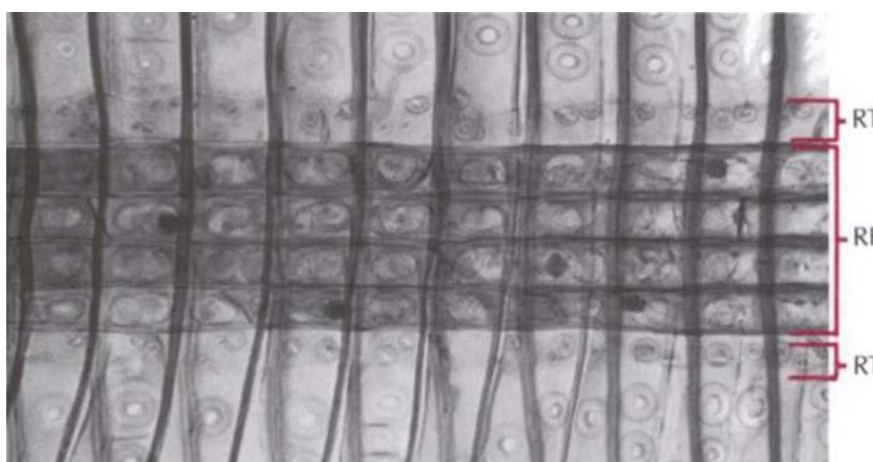
**Slika 2.15** Difuzne parenhimske stanice, [11]



**Slika 2.16** Paralelne parenhimske stanice, [11]

### 2.2.2.3. Drvni traci

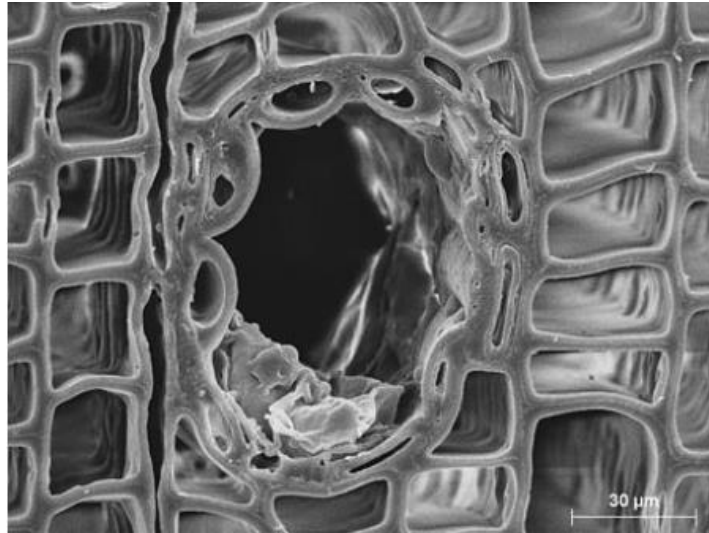
Drvni traci kod četinjača sastoje se od radijalnih parenhimskih stanica i/ili traheida. Homogeni drvni trak sastavljen je od samo jedne vrste stanica. Ukoliko se drvni trak sastoji od parenhimskih stanica i traheida, tada je on heterogen. Izgled heterogenog drvnog trakta prikazan je na slici 2.17. Drvni traci četinjača najčešće su široki samo jednu stanicu (jednoredni drvni traci), a u posebnim slučajima mogu biti široki i nekoliko stanica (višeredni drvni traci). Na mjestima gdje parenhimski drvni traci presijecaju longitudinalne traheide formiraju se posebne pore kako bi se povezali radijalni i aksijalni sustavi u drvu.



Slika 2.17 Prikaz heterogenih drvnih traka, RT – radijalne traheide, RP – radijalni parenhim [14]

### 2.2.2.4. Smolni kanali

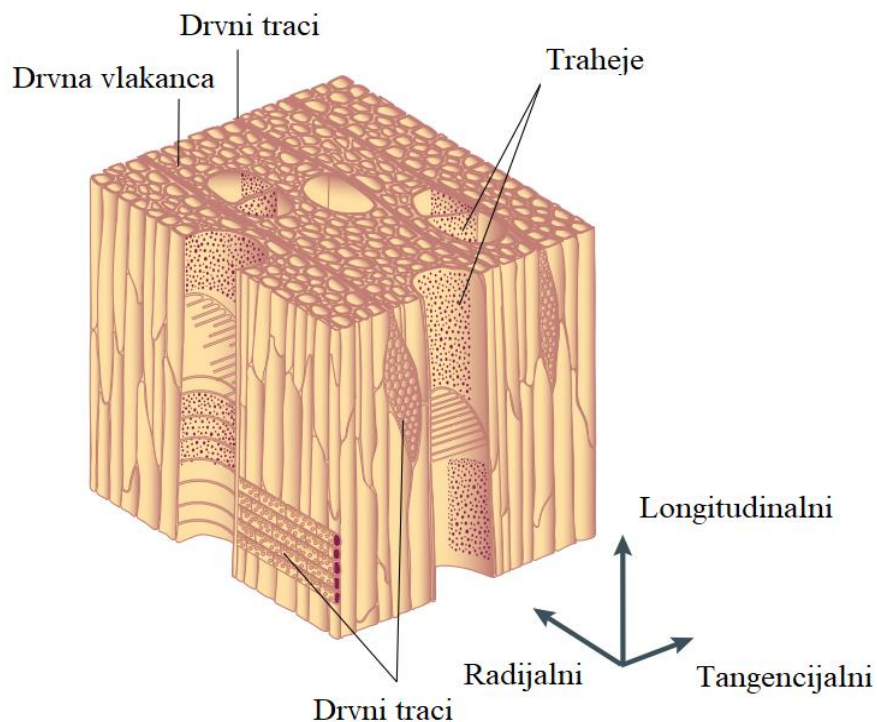
Smolni kanali su otvoreni cjevasti prostori između drvnih stanica. Razlikuju se aksijalni i radijalni smolni kanali, a postupak njihovog formiranja je vrlo sličan. Prilikom neuspješnog spajanja završetaka traheida, stanice koje zaostanu u tom međuprostoru nazivaju se epitelijalne stanice. To su specijalizirane parenhimske stanice koje su odgovorne za izlučivanje smole. Smola ima značajnu ulogu u zacjeljivanju drvnog tkiva prilikom napada insekata i drugih nametnika. Na slici 2.18 prikazan je izgled smolnog kanala obične smreke (*Picea abies*).



Slika 2.18 Smolni kanal obične smreke (*Picea abies*) [15]

### 2.2.3. Mikrostruktura listača

Budući da su se evolucijski listače razvile poslije četinjača, njihova je struktura značajno kompleksnija. Sadrže traheide i vlakanca, posebne vrste stanica koje ih razlikuju od stanica četinjača. Traheje služe za prijenos vode, a drvena vlakanca uglavnom za mehaničku potporu. Na slici 2.19 prikazana je mikrostruktura listača [1].



Slika 2.19 Mikrostruktura listača [1]



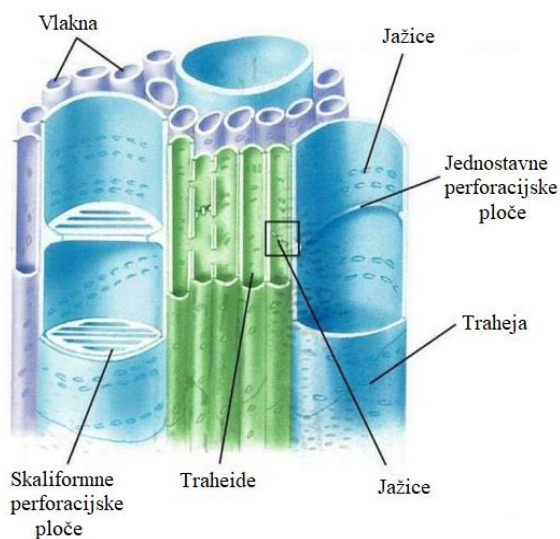
### 2.2.3.1. Traheje

Traheje su provodne stanice listača. Karakterizira ih širok promjer stanice, veliki lumen te relativno deblja stanična stijenka. Na slici 2.20 prikazan je shematski izgled traheje [2].

Traheje su značajno kraće od traheida. Tijekom procesa sazrijevanja ne rastu u duljinu već mogu postati i kraćim od kambijskih stanica od kojih su nastale, dok se njihov promjer može povećati od 2 do 50 puta. Sastoje se od više uzdužno položenih članaka. Na mjestu dodira dvaju članaka traheja formiraju se perforacijske plohe koje omogućuju protok vode i otopljenih mineralnih tvari od korijena do listova. Perforacijske plohe, kao što prikazuje slika 2.21, mogu biti jednostavne ili skaliformne, odnosno sastavljene od više poprečnih otvora [2].



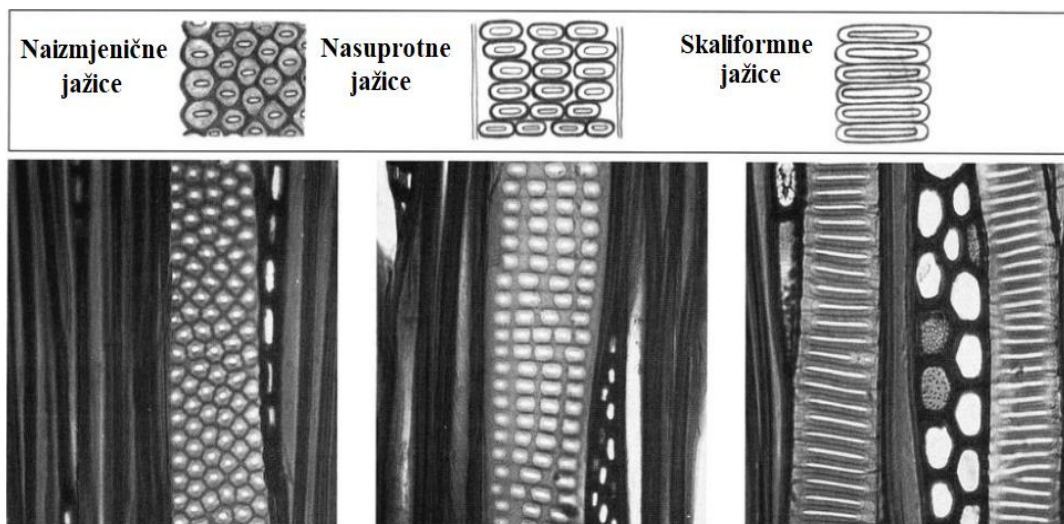
**Slika 2.20 Shematski prikaz traheja [13]**



**Slika 2.21 Prikaz skaliformnih i jednostavnih perforacijskih ploha [16]**

Traheje su posložene tako da svaka grana krošnje primi vodu i minerale iz više različitih grana korijena što pruža sigurnost od sušenja dijelova krošnje prilikom oštećenja jedne ili više grana korijena [2].

Traheje su u poprečnom smjeru međusobno povezane obrubljenim jažicama koje su najčešće naizmjenične, nasuprotne i skaliformne, kao što prikazuje slika 2.22.



Slika 2.22 Prikaz naizmjeničnih, nasuprotnih i skaliformnih jažica [17]

#### 2.2.3.2. Drvna vlakanca

Drvna vlakanca su kod listača najdulje, relativno uske stanice s debelom stijenkom. Na prvi pogled nalikuju longitudinalnim traheidama četinjača, ali se razlikuju po nekoliko značajki. U odnosu na traheide, drvna vlakanca su puno kraća, okruglog su oblika u poprečnom presjeku te imaju specijaliziraniju funkciju [2].

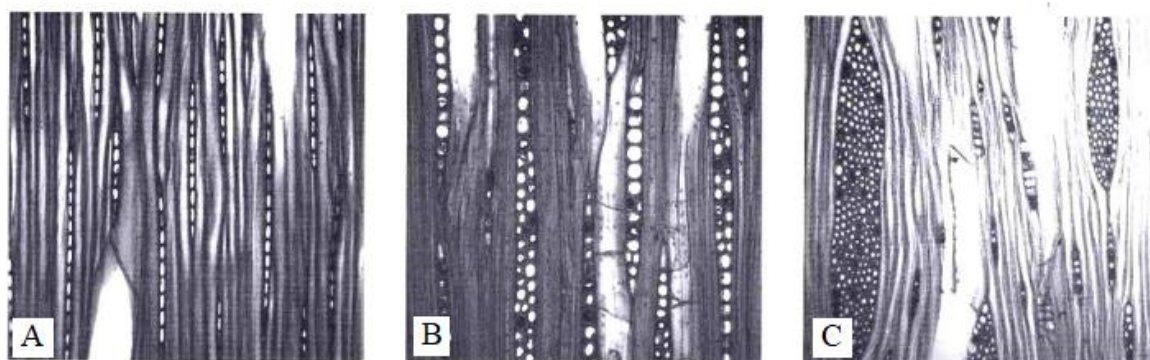
Longitudinalne traheide četinjača služe za prijenos tvari te ujedno osiguravaju čvrstoću drvnog tkiva. Veliki udio tankostijenih stanica u ranom drvu značajno utječe na čvrstoću drva. Kod listača je situacija drugačija radi specijalizacije funkcija stanica. Traheje primarno služe za prijenos tvari, dok su drvna vlakanca preuzela ulogu mehaničke potpore. Gustoća pa stoga i čvrstoća listača ovisi o udjelu drvnih vlakanca u odnosu na udio traheja u drvnom tkivu. Opće pravilo je da čvrstoća drva raste ako se poveća udio drvnih vlakanca [2].

### 2.2.3.3. Parenhimske stanice

Parenhimske stanice su stanice s tankom stijenkom koje služe za pohranu tvari i njihov prijenos u radijalnom i uzdužnom smjeru. Njihov udio je veći u listačama nego u četinjačama [2].

### 2.2.3.4. Drvni traci

Drvni traci listača sastoje se samo od parenhimskih stanica. Za razliku od četinjača gdje su drvni traci široki najčešće jednu do dvije stanice, drvni traci listača mogu biti širine i preko trideset stanica. Na slici 2.23 prikazani su jednoredni, dvoredni i višeredni drvni traci [2].

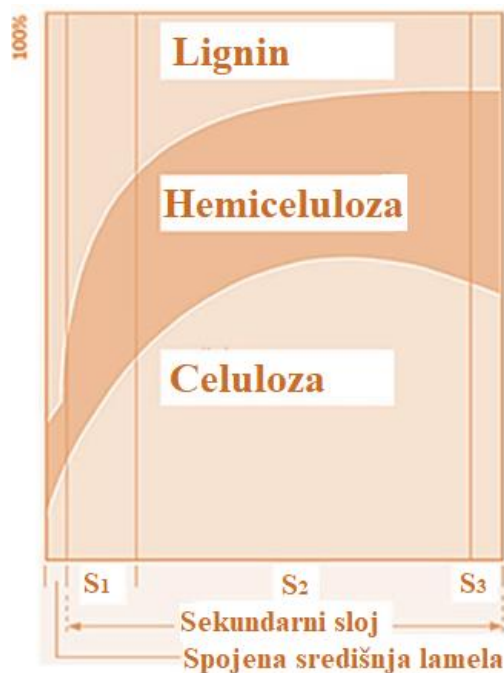


Slika 2.23 Prikaz drvnih traka listača A - jednoredni, B - dvoredni, C - višeredni drvni traci [18]

## 2.3. MOLEKULARNA STRUKTURA DRVA

Na molekularnoj razini drvo se većinom sastoji od tri biopolimera, celuloze, hemiceluloze i lignina. Također, sadrži i male količine ekstraktila i anorganskih tvari. Navedeni biopolimeri nalaze se u svakom sloju stanične stijenke te tvore prirodni vlaknasti kompozit čija su svojstva određena orijentacijom celuloznih vlaknaca u matrici sastavljenoj od hemiceluloze i lignina. Slika 2.24 prikazuje lokaciju i orijentaciju glavnih kemijskih komponenata stanične stijenke listača. Vrlo mala količina celuloze je prisutna u spojenoj središnjoj lameli te se njen udio povećava kroz sekundarni sloj. Lignin, s druge strane, je dominantna komponenta između slojeva. Njegov udio se postupno smanjuje približavajući se lumenu [12].

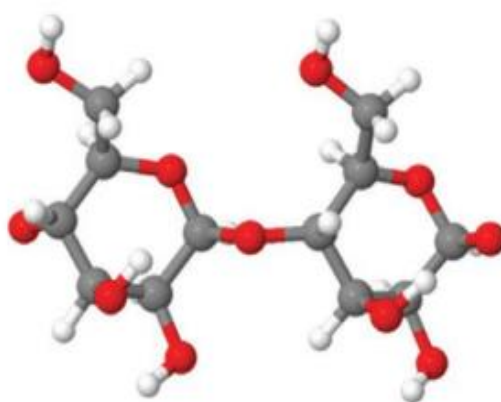




Slika 2.24 Raspored glavnih biopolimera u staničnoj stjenki drva [12]

## 2.4. Celuloza

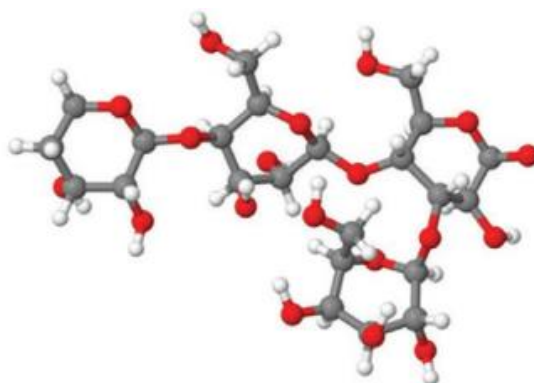
Celuloza je linearni polimerni lanac molekula glukoze međusobno povezanih  $\beta$ -1,4-glikozidnim vezama. Dvije povezane molekule glukoze tvore anhidroglukoznu jedinicu, kao što prikazuje slika 2.25. Par povezanih anhidroglukoznih jedinica naziva se celobioza i to je ponavljajući entitet u celuloznom polimeru. Nekoliko lanaca celuloze povezani su vodikovim vezama i Van der Waalsovima silama kako bi se formirala celulozna mikrovlakna koja sadrže kristalne i amorfne dijelove [12].



Slika 2.25 Molekularna struktura celuloze [12]

## 2.5. Hemiceluloza

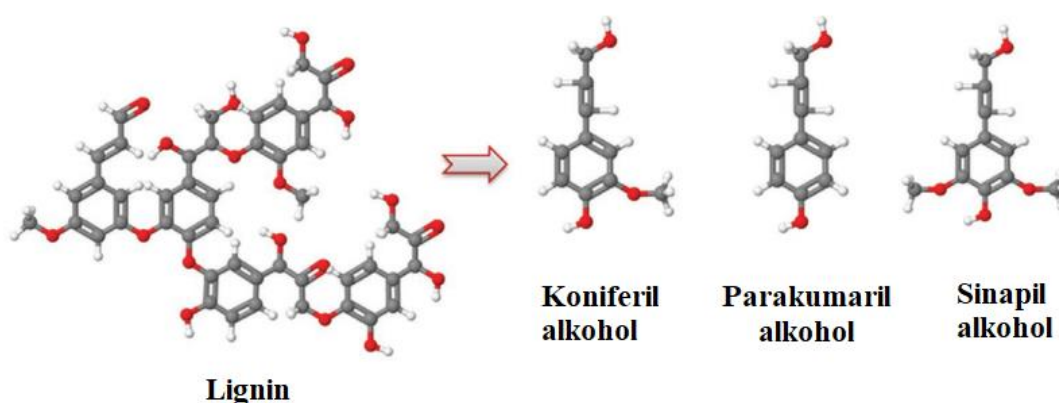
Hemiceluloza je heteropolisaharid koji ujedinjuje različite jedinice šećera. Izgled molekularne strukture hemiceluloze prikazan je na slici 2.26. Hemiceluloza je amorfni i razgranati polimer koji povezuje celulozu i lignin. Hemiceluloza je važna za prijenos vode, pružanje mehaničke potpore i fleksibilnosti staničnoj stijenci [12].



Slika 2.26 Molekularna struktura hemiceluloze

## 2.6. Lignin

Lignin (lat. *Lignum*, drvo) je fenilpropanski polimer u staničnoj stijenci drva. Molekularna struktura lignina prikazana je na slici 2.27. Lignin je važna komponenta primarnog i sekundarnog sloja stanične stijenske. Osigurava strukturni integritet pružajući čvrstoću i krutost te omogućuje prijenos vode i otopljenih tvari kroz provodne elemente. Pruža barijeru protiv fitopatogenih oštećenja. Lignifikacija stanične stijenske imala je ključnu ulogu u evoluciji kopnenih biljaka od morskih predaka prije više od 450 milijuna godina [12].



Slika 2.27 Molekularna struktura lignina [12]

## **2.7. Ekstrahirane tvari**

Drvni ekstraktivi obuhvaćaju smole, masti, masne kiseline, vosak te mnoge druge tvari. Kao što samo ime implicira, ekstrahirane tvari nastale su ekstrakcijom iz biljnih sokova. Odgovorni su za boju, miris i izdržljivost drva te raspoznavanje razlika između vrsta [10].

## **2.8. Anorganske tvari**

Anorganske tvari u drvu imaju bitnu ulogu tijekom njegovog rasta. Najčešće su to slijedeći kemijski elementi: Na, Mn, Al, B, Fe, Zn, Si i Ag. Apsorbiraju se iz tla preko korijena te dospijevaju u sve dijelove stabla [10].

### 3. SVOJSTVA DRVA

#### 3.1. Higroskopnost

Voda je prirodni i nužni konstituent svih dijelova živog drva te ima veliki utjecaj na fizička i mehanička svojstva, otpornost biološkoj degradaciji te dimenzijsku stabilnost.

Hidroksilne skupine na molekulnim lancima celuloze i hemiceluloze čine staničnu stijenku vrlo higroskopnom. S druge strane, lignin koji međusobno povezuje stanice načelno je hidrofobna tvar, što znači da stanična stijenka ima veliki afinitet prema vodi, ali je njena mogućnost adsorpcije ograničena.

Voda u drvu nalazi se unutar stanične stijenke, ali i unutar lumena. Količina vode unutar stanične stijenke živog drva pretežno je konstantna tijekom svih godišnjih doba i to je vezana voda. Voda unutar lumena zove se slobodna voda i njezina količina se mijenja. Voda unutar lumena može sadržavati otopljene hranjive tvari proizvedene fotosintezom kao i organske i anorganske tvari. Stanje u kojem je uklonjena sva voda iz lumena, dok su stanice u staničnoj stijenci zasićene vodom naziva se točka zasićenja vlakanaca. To je kritična razina vode u drvu jer daljnjim sušenjem drva dolazi do gubitka vezane vode te se lančane molekule celuloze i hemiceluloze međusobno približavaju i nastupa utezanje odnosno, volumno skupljanje drva [2].

#### 3.2. Gustoća

Gustoća je dominantni faktor koji upravlja svim mehaničkim svojstvima drva. Budući da je drvo higroskopan materijal i da su svojstva ovisna o udjelu vlage, potrebno je uspoređivati njegova svojstva pri istom sadržaju vlage u drvu. Uobičajeno je to udio vlage od 12 %. Gustoća se izražava kao omjer mase drva i njegovog volumena te vrijedi izraz:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w}, \text{ g/cm}^3 \quad (1)$$

gdje je:

$\rho_w$  – gustoća drva pri udjelu vlage od  $w$  %,  $\text{g/cm}^3$  ili  $\text{kg/m}^3$

$m_w$  – masa drva pri udjelu vlage od  $w$  %, g

$V_w$  – volumen drva pri udjelu vlage od  $w$  %,  $\text{cm}^3$ .

Osim gustoće, za opisivanje mase materijala po jedinici volumena koristi se i relativna gustoća ili specifična težina koja se definira kao omjer gustoće drva i gustoće vode mjerene pri jednakim uvjetima [10].

### 3.3. Tvrdoća

Tvrdoća je važno mehaničko svojstvo drva koje je u korelaciji s gustoćom i količinom vlage. Također, uveliko ovisi o orijentiranosti stanica u drvnom tkivu koje se ispituje. Tvrdoću je moguće odrediti na svim presjecima drva, a najpoznatije metode ispitivanja tvrdoće drva su metoda po Janki i Brinellova metoda.

Ispitivanje tvrdoće metodom prema Janki je najčešće korištena metoda za ispitivanje tvrdoće drva. Pripada standardu ASTM D 1037-12, prema kojem dimenzije ispitnih uzoraka moraju biti 50 mm × 50 mm × 30 mm. Čelična kuglica promjera 11,284 mm utiskuje se u površinu materijala do polovice svojeg promjera (5,64 mm) kada ploština otiska iznosi točno 1 mm<sup>2</sup>. Primijenjena sila određuje iznos tvrdoće ispitivanog materijala. Kuglica se utiskuje konstantnom brzinom u rasponu između 0,05 i 1 mm/s. Na slici 3.1. prikazana je shema ispitivanja tvrdoće prema Janki metodi.

Izraz za dobivanje vrijednosti tvrdoće prema Janki metodi je:

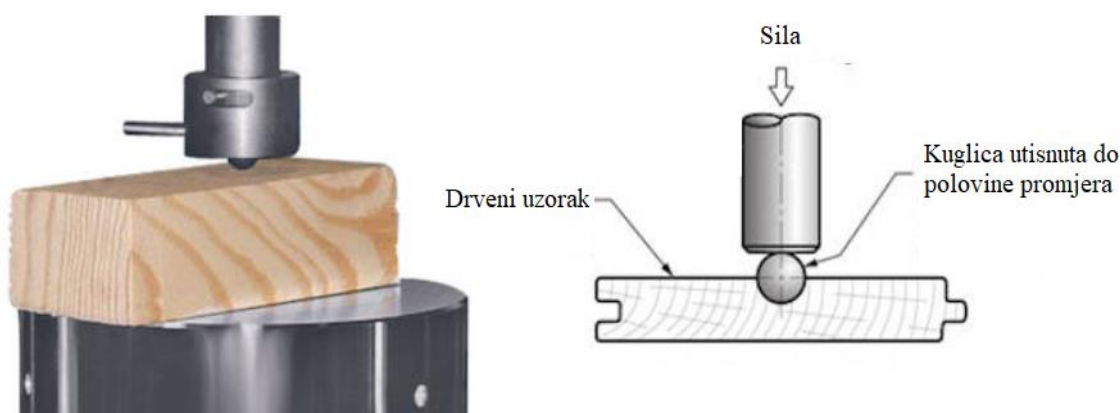
$$H_J = K \cdot F, N \quad (2)$$

gdje je:

$H_J$  – tvrdoća po Janki, N

$K$  – koeficijent prodiranja kuglice

$F$  – sila utiskivanja kuglice na određenu dubinu, N.



Slika 3.1 Shema ispitivanja tvrdoće prema Janki metodi [19]

Brinellova metoda se najčešće koristi prilikom ispitivanja tvrdoće metalnih materijala, a metodu je moguće primijeniti i za ispitivanje tvrdoće drva. Kod Brinellove metode koristi se čelična ili karbidna kuglicu promjera 1 - 10 mm koja se utiskuje u uzorak. Primijenjene sile obično su u rasponu od 500 do 3000 N. Nakon uklanjanja kuglice s površine materijala, mikroskopom ili povećalom se mjeri nastali promjer [20]. Slika 3.2 prikazuje opisani postupak mjerenja tvrdoće Brinellovom metodom.

Tvrdoća mjerena po Brinellovoj metodi računa se prema izrazu:

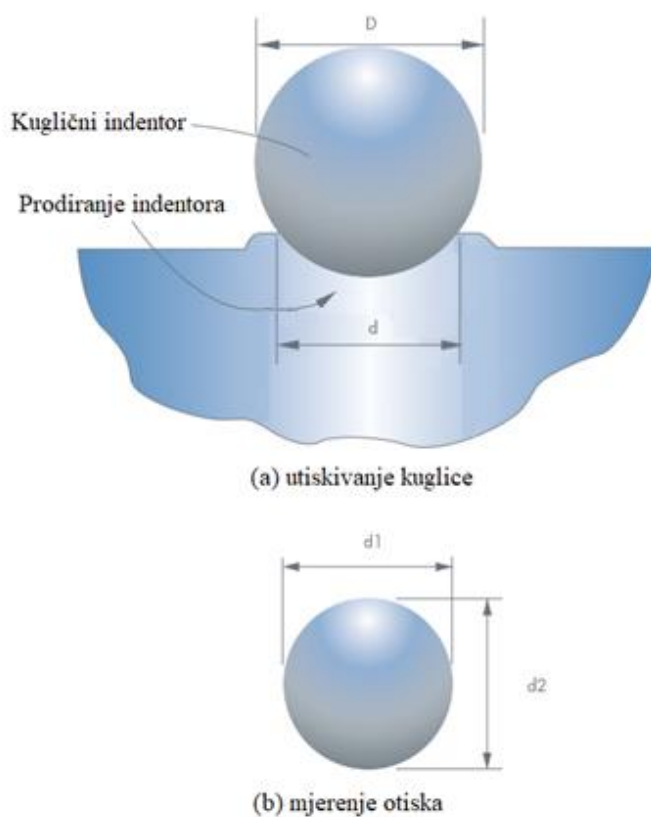
$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3)$$

gdje je:

$F$  – primijenjena sila prodiranja, N

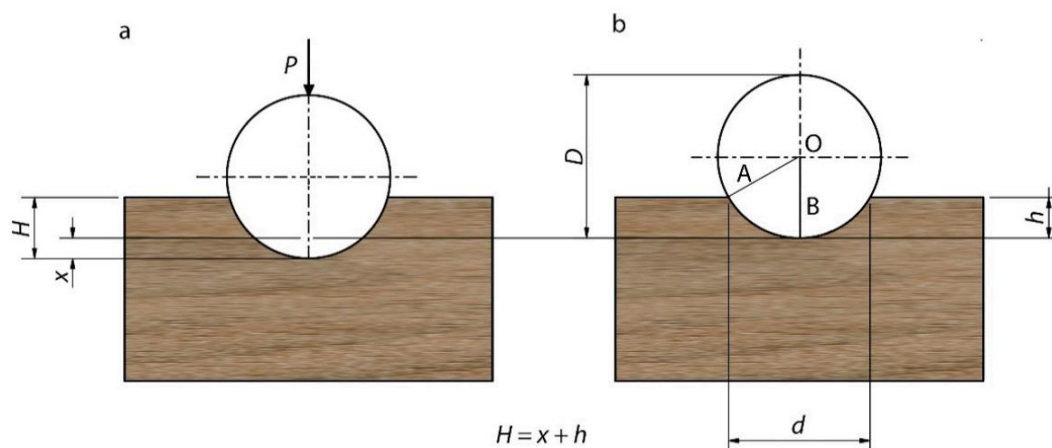
$D$  – promjer kuglice, mm

$d$  – promjer otiska kuglice, mm.



**Slika 3.2 Shematski prikaz mjerenja tvrdoće metodom po Brinellu [21]**

Najveći prodor kuglice postiže se tijekom ispitivanja pod djelovanjem sile. Uklanjanjem sile događa se djelomični elastični oporavak materijala. Budući da se različite vrste drva razlikuju po čvrstoći i krutosti, mogu se očekivati i različiti postoci trajne plastične deformacije prilikom utiskivanja. Stoga je predložena modifikacija metode po Brinellu, prikazana na slici 3.3, kojom bi se mjerila dubina prodiranja kuglice pod opterećenjem. Na taj način bi se vrijednosti tvrdoće bolje povezivale s gustoćom drva [20].

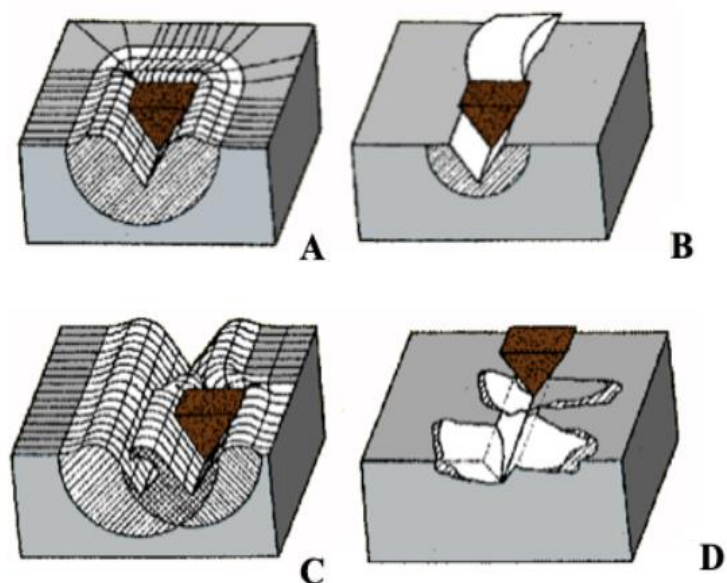


**Slika 3.3 Metoda određivanja tvrdoće drva po Brinellu: a) kuglica pod opterećenjem, b) kuglica nakon uklanjanja opterećenja ( $P$  – opterećenje,  $D$  – promjer kuglice,  $d$  – promjer otiska,  $H$  – ukupna dubina prodiranja,  $h$  – trajni prodor,  $x$  – privremeni prodor) [20]**

### 3.4. Otpornost na abrazijsko trošenje

Abrazijsko trošenje je proces istiskivanja materijala uslijed pomicanja čestica veće tvrdoće po njegovoj površini. Ovisno o prirodi materijala i načinu kontakta abrazijskih čestica i površine pojavljuju se osnovni mehanizmi abrazijskog trošenja, a to su kao što prikazuje slika 3.4, mikrorezanje, mikrobrazdanje, mikroumor i mikroprsnuća [22].

Mikrobrazdanje je proces plastične deformacije površine materijala u kojem se prilikom prolaza abrazijskih čestica formiraju udubljenja (brazde) te povišeni bočni rubovi oko udubljenja. Mikrorezanje je proces u kojem prolazak abrazijskih čestica uzrokuje formiranje zarezova. Mikroumor je proces potaknut djelovanjem izmjeničnog opterećenja. Trenutne deformacije na površini materijala indiciraju nastajanje i širenje mikropukotina. Mehanizam nastanka i širenja pukotina kod krhkih površina uzrokuje proces mikronaprsnuća [22].

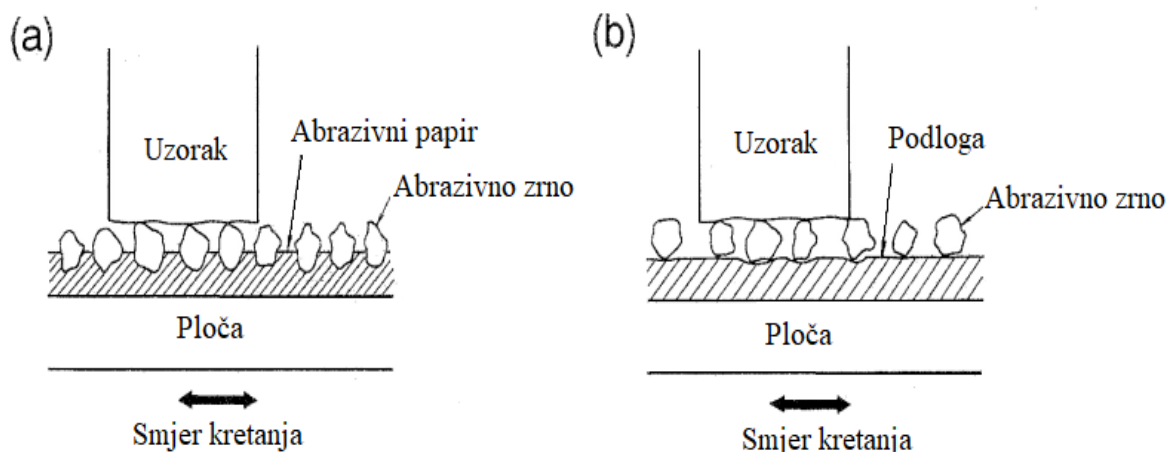


**Slika 3.4** Mehanizmi abrazijskog trošenja A – mikrobrazdanje, B – mikrorezanje, C – mikroumor, D – mikronaprsnuća [22]

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje je osnovni način određivanja otpornosti drva na trošenje. Ovisno o broju tijela koji sudjeluju u procesu, prema slici 3.5 razlikuje se:

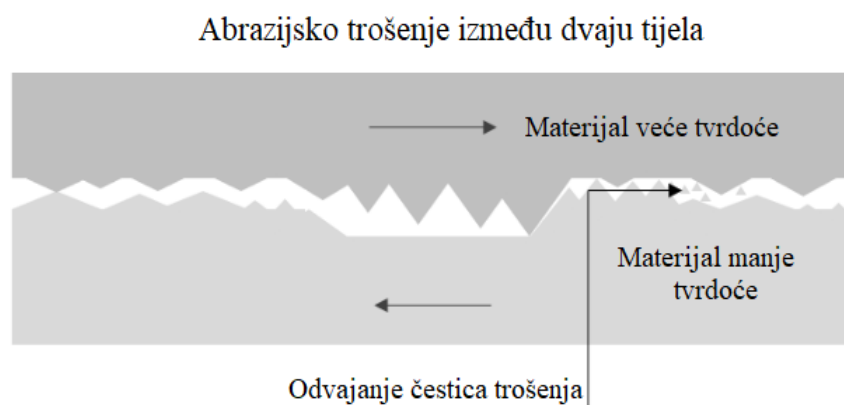
- a) abrazija između dvaju tijela – proces trošenja odvija se između dvaju tijela koja se međusobno gibaju. Abrazivne čestice su fiksirane na jednom tijelu te uzrokuju istiskivanje materijala s drugog tijela,
- b) abrazija između triju tijela – proces trošenja odvija se između dvaju tijela koja se međusobno gibaju te je između njih prisutno i treće tijelo. Abrazivne čestice su u slobodnom gibanju između dvaju tijela. Abrazija između triju tijela se najčešće ispituje ukoliko će obrađeno drvo biti primijenjeno u vanjskim uvjetima [23].





Slika 3.5 Abrazija između a) dvaju tijela b) triju tijela [23]

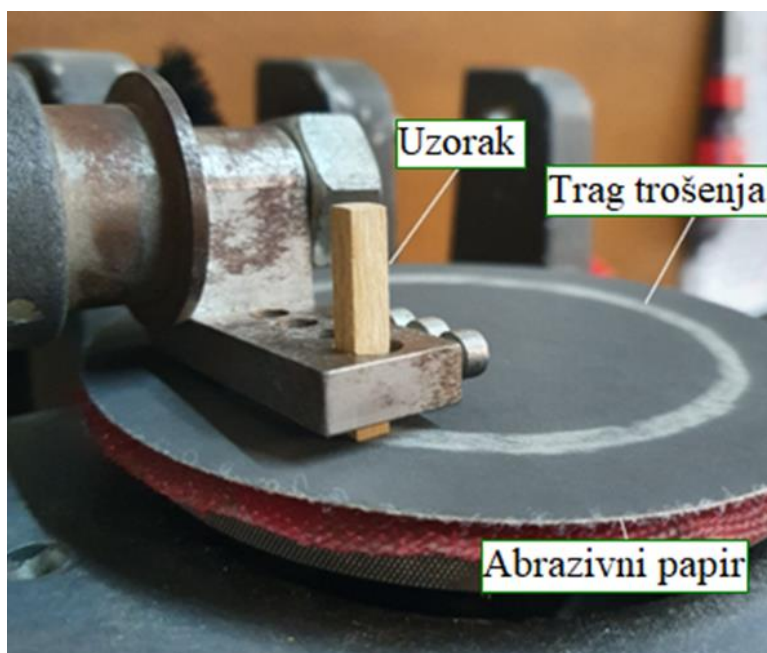
Kod abrazije između dvaju tijela materijal veće tvrdoće prodire u materijal manje tvrdoće te istiskuje čestice s njegove površine. Shematski prikaz procesa prikazan je na slici 3.6 [24].



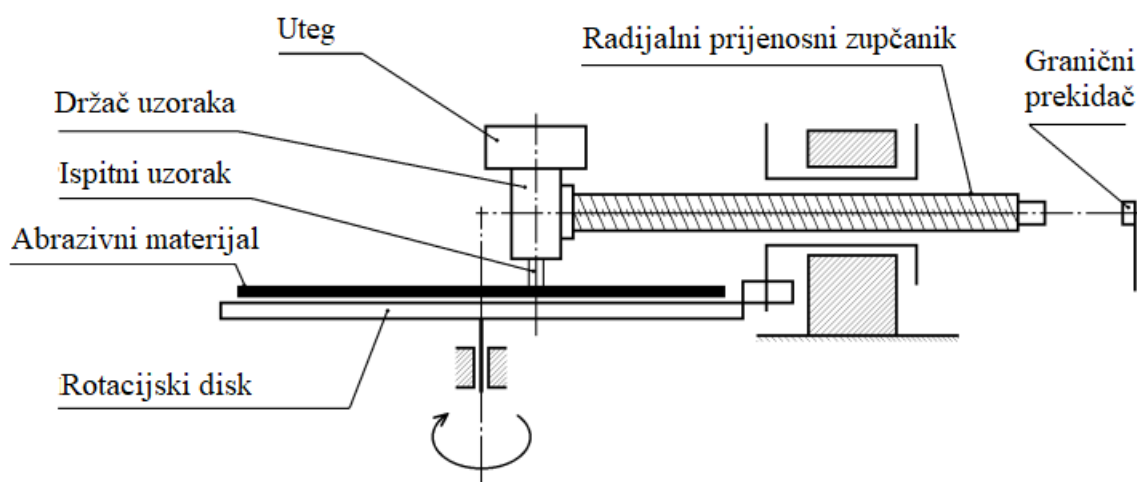
Slika 3.6 Shematski prikaz abrazijskog trošenja između dvaju tijela [24]

### 3.4.1. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje između dvaju tijela

Jedna metoda ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje između dvaju tijela uključuje ispitivanje na uređaju Taber abrader prikazanog na slici 3.7. Uređaj se sastoji od rotacijskog diska na kojeg se postavlja abrazivni papir različite finoće. Uzorci se pričvršćuju na držač koji je ujedno i uteg te pritišće uzorke na abrazivni papir određenom konstantnom silom. Okretanjem diska uzorci se izlažu abrazijskom trošenju i s njihove površine se odnose čestice trošenja. Shema rada Taber abradera prikazana je na slici 3.8 [25].



Slika 3.7 Taber abrader



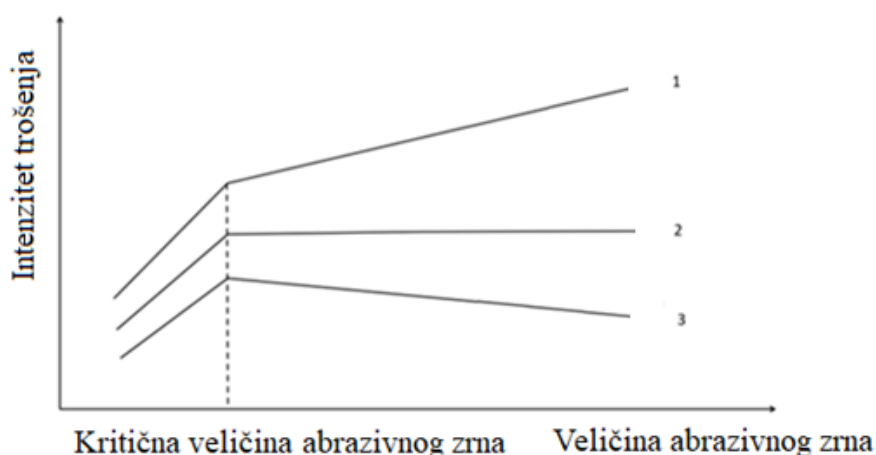
Slika 3.8 Shema Taber abradera [25]

### 3.5. Kritična veličina abrazivnog zrna

Poznato je da veličina abrazivnih čestica utječe na gubitak volumena pri abrazivskom trošenju ( $\text{mm}^3$ ) tj. na intenzitet abrazivskog trošenja ( $\text{mm}^3/\text{mm}^2$ ). Intuitivno se čini da se s povećanjem abrazivnih čestica može očekivati i veći intenzitet trošenja. Međutim, situacija je kompleksnija nego što se čini. Korelacija između ovih dviju veličina je pozitivna i linearna dok se ne dosegne određena veličina abrazivnih zrna. Ta određena vrijednost naziva se kritična veličina abrazivnih zrna. Nakon što se dosegne ova kritična vrijednost, daljnjim rastom abrazivnih zrna intenzitet trošenja može:

1. nastaviti se povećavati s manjim intenzitetom
2. ostati konstantan
3. smanjivati se.

Slika 3.9 ujedinjuje moguće slučajeve ponašanja intenziteta trošenja nakon dostizanja kritične veličine abrazivnih zrna [26].

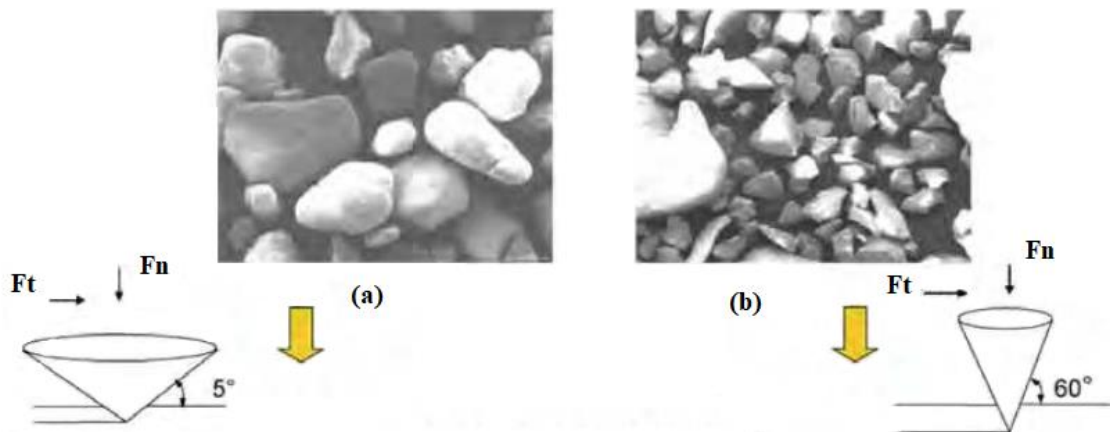


Slika 3.9 Dijagram ovisnosti intenziteta trošenja o veličini abrazivnog zrna [26]

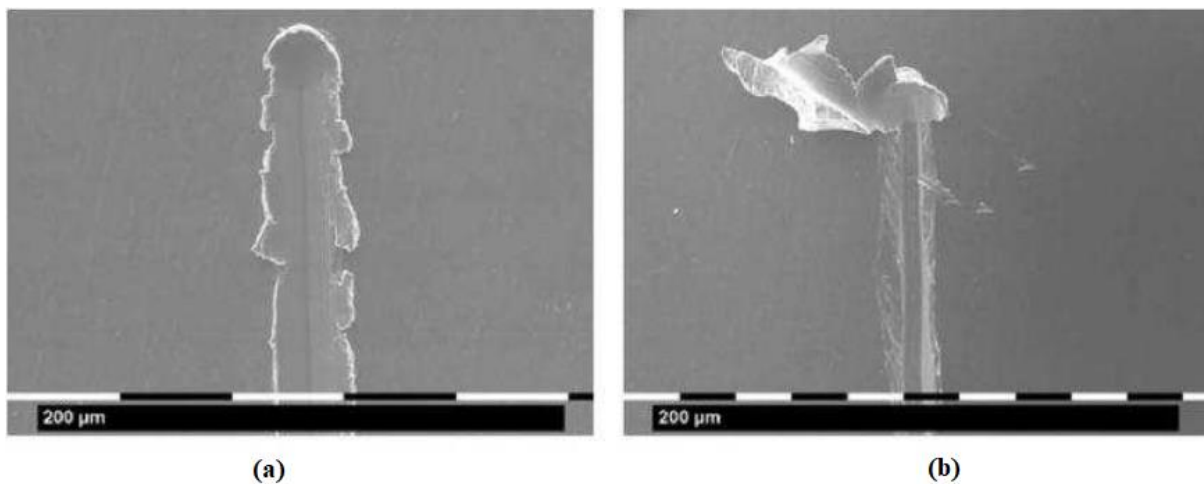
Fenomen kritične veličine abrazivnog zrna pojavljuje se kod abrazije između dvaju tijela, abrazije između triju tijela, erozije i strojne obrade. Česta je pojava kod homogenih metalnih materijala te kod drva.

Iako postoji nekoliko teorija, opće objašnjenje uzroka ove pojave još uvijek nije generalno razjašnjeno. Prilikom abrazije između dvaju tijela kod metalnih materijala, smatra se da veličina abrazivnih čestica utječe na oštrinu vrhova čestica, odnosno, na kut kojim abrazivna čestica odnosi materijal, prikaz na slici 3.10. Istraživanjem geometrije abrazivnih čestica ustanovljeno

je da manje veličine abrazivnih zrna imaju veći kut u kontaktnoj zoni s materijalom trošenja te je dominantni abrazivni mehanizam mikrorezanje. Veće abrazivne čestice imaju manji kut u kontaktnoj zoni i glavni mikromehanizam abrazije zapravo postaje mikrobrazdanje. Prilikom penetracije veće čestice, materijal trošenja se pomiče uz rubove brazde te je manji gubitak materijala, a time i manji intenzitet trošenja. Ovu pojavu prikazuje slika 3.11.



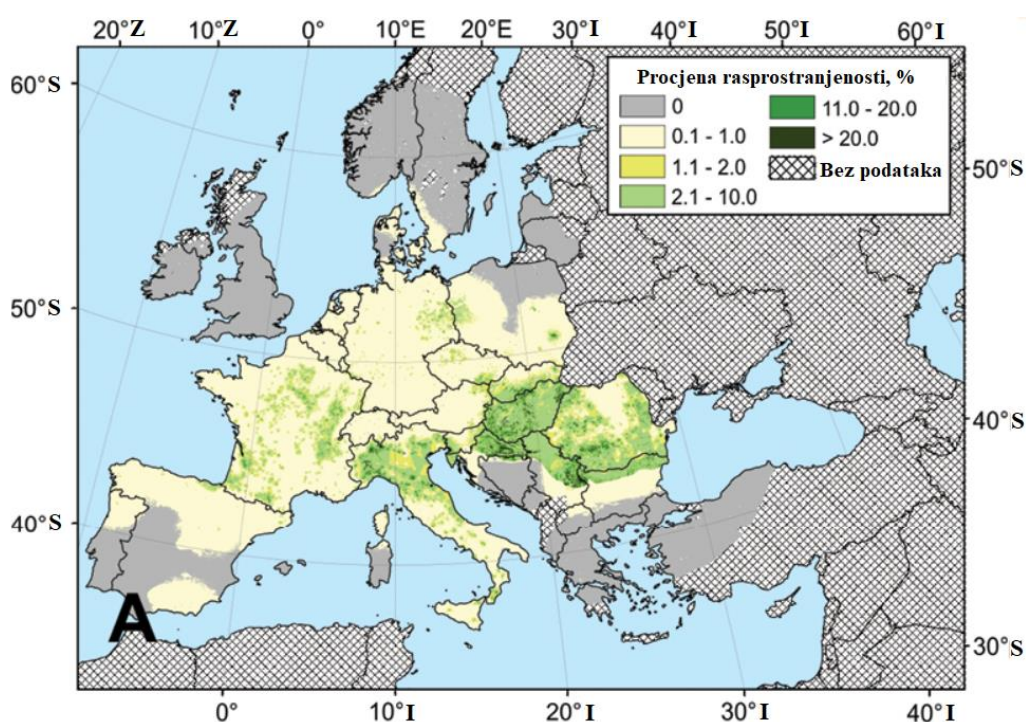
Slika 3.10 SEM prikaz abrazivnih čestica (a) veće veličine, (b) manje veličine,  $F_n$  – normalna sila,  $F_t$  - sila trenja [26]



Slika 3.11 SEM prikaz abrazivnog oštećenja površine aluminijeve legure nakon testa brazdanjem za upadni kut abrazivne čestice od  $30^\circ$  (a) i  $60^\circ$  (b) [26]

#### 4. BAGREM (*Robinia Pseudoacacia L.*)

Bagrem (*Robinia pseudoacacia L.*) je listopadno drvo koje potječe iz istočnog dijela Sjedinjenih Američkih Država. Smatra se da je bagrem prva sjevernoamerička drvena vrsta uvezena u Europu. Njegova prvobitna namjena u Europi bila je isključivo estetska i sađen je u parkovima i vrtovima. U drugoj polovici 18-og stoljeća započela je njegova planska sadnja u središnjoj Europi s osnovnim ciljem proizvodnje biomase. Postupnim rasprostranjivanjem, njegova zastupljenost porasla je na gotovo cijelo područje umjerenog pojasa te posebice mediteranskog područja. Slika 4.1 prikazuje podatke rasprostranjenosti drva bagrema u Europi iz 2016. godine.



Slika 4.1 Prikaz rasprostranjenosti drva bagrema u Europi, % [27]

Danas, ova vrsta se može pronaći na gotovo svim kontinentima. Ključ prilagodbe bagrema na različite okolišne uvjete je njegova sposobnost razvijanja dubokog i razgranatog korijena. Tijekom dugotrajnih suša, produženi sustav korijena nastoji doseći do vode i hranjivih tvari u dubljim slojevima tla [28].

Bagrem je brzorastuća drvena vrsta, osobito u ranom stadiju razvoja. Unatoč brzom rastu, umjereno je tvrdo drvo, veće gustoće. Prirast visine, volumena i širine dolazi do vrhunca prije dobi od 20 godina. Za čovjeka su dijelovi bagrema, sjemenke, mahune, lišće te posebice kora otrovni, dok su cvjetovi jestivi. Otrovnost proizlazi iz spoja robinin koji uzrokuje zgušnjavanje

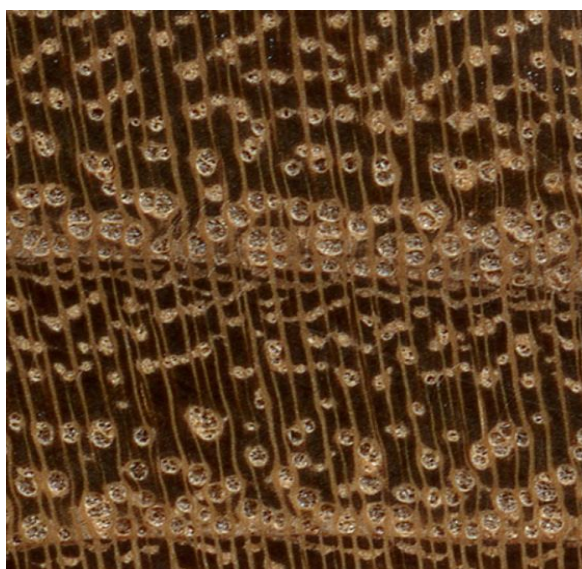


i sljepljivanje eritrocita u krvi. Cvjetovi bagrema imaju ljekovito djelovanje te su vrlo medonosni [28]. Na slici 4.2 prikazano je drvo bagrema te izgled cvijeta i lista.



**Slika 4.2** Obični bagrem (*Robinia Pseudoacacia L.*) [29]

Budući da je bagrem prstenasto porozna drvena vrsta, na poprečnom presjeku provodni elementi nalikuju porama. Traheje velikog promjera formiraju se na početku vegetacijske sezone, dok se traheje manjeg promjera oblikuju kasnije tijekom godine. Iz navedenih razloga postoje razlike u svojstvima ranog i kasnog drva. Na slici 4.3 prikazana je mikrostruktura poprečnog presjeka s provodnim elementima, granicama godova te drvnim tracicima [11].



**Slika 4.3** Struktura poprečnog presjeka bagrema [11]

#### 4.1. Primjena bagrema

Unatoč klasifikaciji invazivne vrste u nekim državama, bagrem se uspješno integrirao u ekosustav Europe. Radi svojih jedinstvenih tehničkih svojstava prikladan je za upotrebu u širokom rasponu proizvoda. Najčešće se koristi u graditeljstvu, za proizvodnju biomase, namještaja, peleta, parketa te stupova za vinograd [28].

Drvo bagrema ima visoku tvrdoću i čvrstoću te dimenzijsku stabilnost. Svojstva bagrema klasificiraju ga u vrlo otpornu biološku vrstu koja je lako strojno obradiva i ne zahtjeva značajniju kemijsku modifikaciju [30]. Tablica 4.1 prikazuje usporedbu vrijednosti svojstava bagrema i crvenog hrasta.

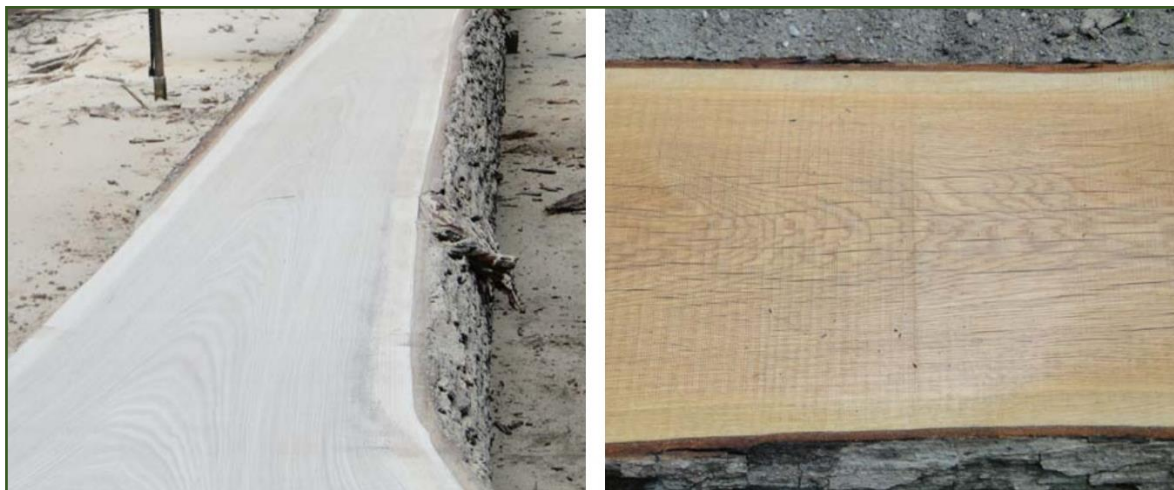
**Tablica 4.1 Usporedba svojstva bagrema i crvenog hrasta [31]**

	Udio vlage	Modul loma, kPa	Modul elastičnosti, MPa	Rad do maksimalnog opterećenja, kJm <sup>-3</sup>	Tlačna čvrstoća paralelna s vlakancima, kPa	Tlačna čvrstoća paralelna s vlakancima, kPa
Bagrem	svježe	95	12,8	106	46,9	8
	12 %	134	14,1	127	70,2	12,6
Crveni hrast	svježe	57	9,3	91	23,7	4,2
	12 %	99	12,5	100	46,6	7

Boja drva je važno estetsko svojstvo koje proizlazi iz karakteristika drvnih stanica. Promjene u boji drvnog tkiva počinju se događati neposredno nakon sječe stabla radi oksidacije i izlaganja UV zračenju. Na slici 4.4 prikazan je izgled tangencijalnog presjeka bagrema neposredno nakon sječe te 4 tjedana poslije [31].

Drvo bagrema može se toplinski modificirati. Time se mijenjaju se mehanička, fizička i kemijska svojstva drva. Postizanje tamnije boje drva primjenjuje se kako bi se uklonile neželjene razlike između svijetlije srževine i tamnije bjeljike ili kako bi se uklonile mrlje od plijesni.

Modifikacija prirodne boje bagrema postala je zanimljiva radi naglašavanja njegove teksture za proizvodnju namještaja, parketa i dekorativnih proizvoda. Toplinskom obradom sa zasićenom vodenom parom se u kratkom vremenu uz relativno niski utrošak energije postižu tamnosmeđi ili sivi tonovi [32].



**Slika 4.4 Izgled tangencijalnog presjeka, lijevo – nakon sječe, desno – 4 tjedana nakon sječe [31]**

Na slici 4.5 prikazana je postupna promjena boje bagrema tijekom toplinske obrade zasićenom vodenom parom. Prirodna svijetlo žuta boja bagremove srževine nakon 5,5 sati na temperaturi preko 110 °C postaje svijetlosmeđa, daljnjim zagrijavanjem postiže se sivkasto-smeđa boja koja naglašava teksturu bagrema u tangencijalnom presjeku. Krajnji rezultat je tamna sivo-smeđa boja [32].



**Slika 4.5 Tekstura drva bagrema prije i nakon toplinske obrade pri različitim parametrima a) prirodna boja, b) svijetlosmeđa boja, t = 5,5 h, T = 110 °C, c) sivkasto - smeđa boja, t = 6,5 h, T = 125 °C d) sivo - smeđa boja, t = 7,5 h, T = 135 °C [32]**



## **5. EKSPERIMENTALNI DIO**

### **5.1. Cilj rada i provedena ispitivanja**

Osnovni cilj ovog rada je analizirati korelaciju između veličine abrazivnih zrna i otpornosti na abrazijsko trošenje u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku drva bagrema.

Abrazijsko trošenje ispitano je standardnom metodom ASTM G40-21a, na uređaju Taber abrader, na različitim kvalitetama brusnog papira. Otpornost na abrazijsko trošenje izraženo je preko gubitka volumena po površini trošenja.

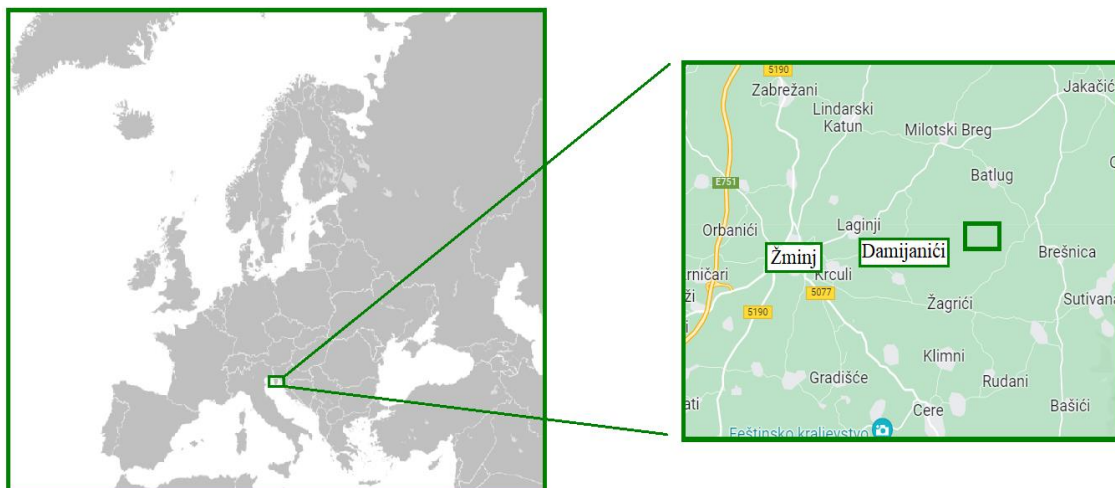
Na uzorcima na kojima je ispitana otpornost na abrazijsko trošenje provedena je i analiza mikrostrukture metodom računalne tomografije (eng. Copmuterized Tomography - CT), na uređaju ZEISS METROTOM 6 Scout.

Tvrdoća poprečnog, radijalnog i tangencijalnog presjeka ispitana je metodom po Brinellu, a gustoća ispitnih uzoraka određena je gravimetrijskom metodom.

Na uzorcima je određen udio vlage pri ispitivanju, a svi rezultati preračunati su na udio vlage od 12 %.

### **5.2. Materijal za ispitivanje**

Drvo bagrema korišteno u ovom istraživanju pronađeno je u blizini mjesta Damijanići u središtu Istre, u Hrvatskoj (45.0846, 13.5640). Lokacija je prikazana na slici 8.1. Stablo je srušeno u nevremenu koje se dogodilo na tom području oko 6 mjeseci prije njegovog spremanja u natkriveni prostor. Stablo je raslo u tipičnim uvjetima za ovu vrstu, u vlažnoj i umjereno sunčanoj okolini na dubokom plodnom tlu. Bagremova šuma pružala je stablu pogodnu mikroklimu i zaštitu. Nakon vizualnog pregleda ustanovljeno je da je stablo u optimalnom stanju bez naznaka gljivičnih i drugih oboljenja. Dimenzije stabla bile su otprilike 17 m visine i prsnog promjera 0,31 m. Deblo je izrezano na valjke duljine 30 cm koji su skladišteni u suhim i prozračnim uvjetima, na period od 5 mjeseci.



**Slika 5.1** Prikaz podrijetla drva bagrema korištenog u ispitivanjima [33]

Starost drva određena je brojanjem godova. Procijenjeno je da je stablo imalo preko 35 godina kada je bilo srušeno. Na slici 5.2 prikazan je poprečni presjek drva bagrema, a na slikama 5.3. i 5.4 prikazani su radijalni te tangencijalni presjek. Na poprečnom presjeku naznačeno je područje s kojeg su izrezani uzorci za planirana ispitivanja. Odabrano je područje u kojem su godovi paralelni te relativno uski i slične širine, bez bilo kakvih anatomskih nepravilnosti ili pukotina.

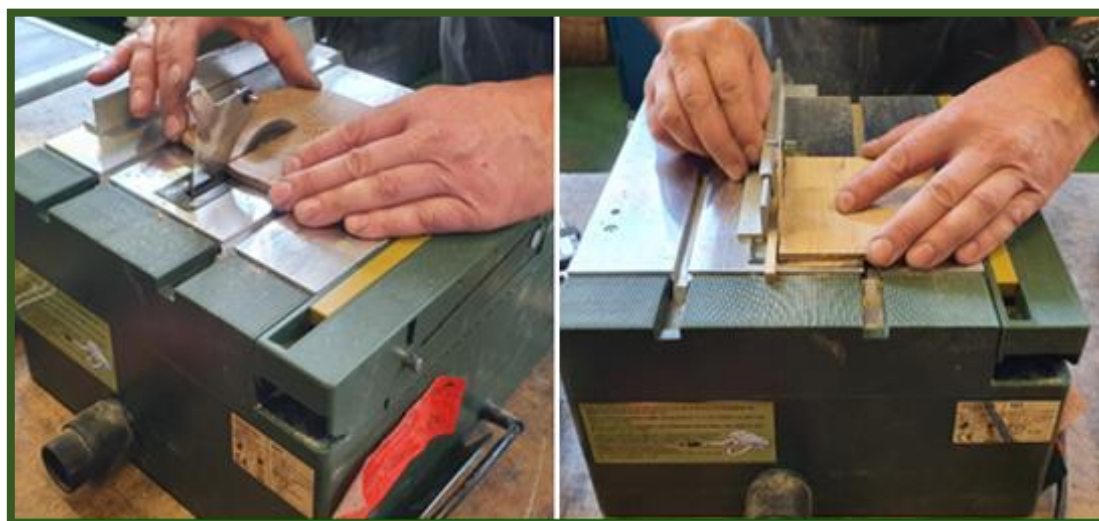


**Slika 5.2** Poprečni presjek bagrema i točna pozicija rezanja uzoraka

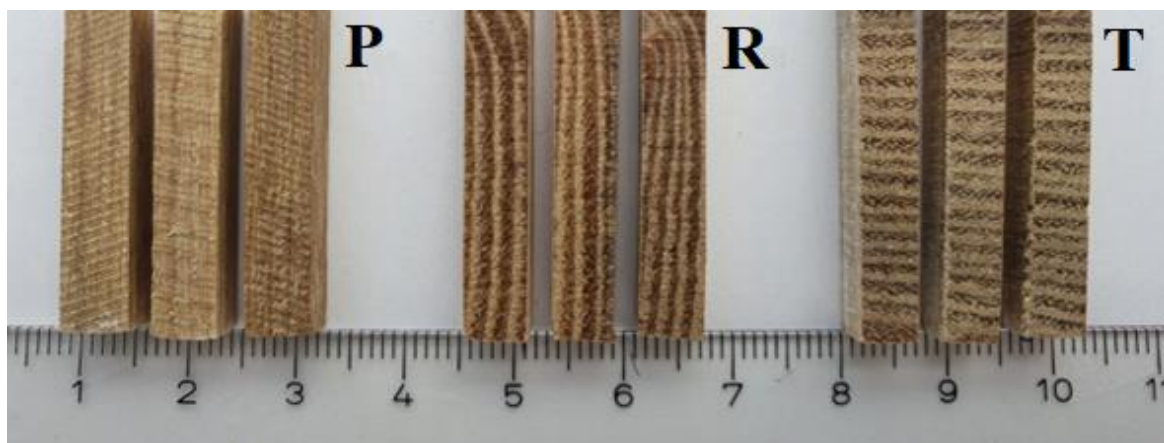


**Slika 5.3 Radijalni presjek****Slika 5.4 Tangencijalni presjek**

Uzorci za sva potrebna ispitivanja pripremljeni su u Laboratoriju za alatne strojeve, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Na slici 5.5 prikazano je rezanje uzoraka za ispitivanje na Taber abraderu.

**Slika 5.5 Rezanje uzoraka**

Uzorci za određivanje otpornosti na abrazijsko trošenje izrezani su na dimenzije 5 mm × 5 mm × 30 mm. Prikazani na slici 5.6. Po 5 uzoraka izrezano je za svaki od tri karakteristična presjeka: poprečni, radijalni i tangencijalni. Na navedenim presjecima ispitana je otpornost na abrazijsko trošenje, a abradirana je površina dimenzija 5 mm × 5 mm.



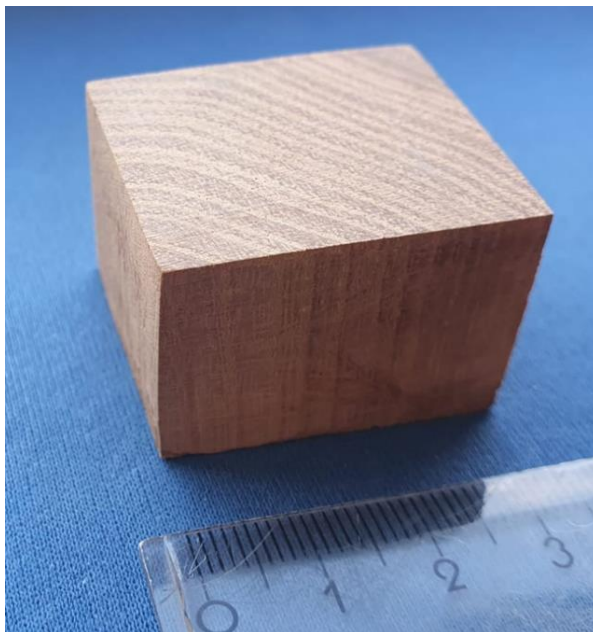
**Slika 5.6** Uzorci za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje, P – poprečni presjek, R – tangencijalni presjek, T – tangencijalni presjek

Uzorci su nakon rezanja izbrušeni na preciznije dimenzije i očetkani. Masa svakog uzorka izmjerena je u Laboratoriju za analizu metala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, na analitičkoj vagi Ohaus Analytical Plus, koja je prikazana na slici 5.7.



**Slika 5.7** Ohaus Analytical Plus

Za određivanje gustoće u apsolutno suhom stanju i udjela vlage u materijalu izrezan je uzorak prikazan na slici 5.8, neposredno ispod područja rezanja uzorka za određivanje otpornosti na abrazijsko trošenje. Oblik i dimenzije uzorka propisane su normom ISO-13061-2 te iznose 30 mm × 30 mm × 20 mm.



**Slika 5.8** Uzorak za određivanje gustoće i udjela vlage

Pomičnim mjerilom određene su dimenzije uzorka te je izvagana njegova masa. Kako bi se odredio udio vlage u drvu, uzorak je sušen u peći na temperaturi  $103 \pm 2$  °C do apsolutno suhog stanja. Norma propisuje da je apsolutno suho stanje postignuto kada je između dva uzastopna vaganja razlika mase manja od 0,1 %.

Na slici 5.9 prikazan je sušionik u kojem je provedeno sušenje uzorka.

Udio vlage ( $w$ ) računa se prema izrazu:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100, \% \quad (4)$$

gdje je:

$m_1$ - masa uzorka prije sušenja, g

$m_2$ - masa uzorka nakon sušenja, g.

Gustoća ( $\rho_w$ ) pri nekom udjelu vlage određuje se izrazom:



$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w}, \text{ g/cm}^3 \quad (5)$$

gdje je:

$m_w$  – masa pri nekom udjelu vlage, g

$V_w$  – volumen pri nekom udjelu vlage,  $\text{cm}^3$ .

Dobivene vrijednosti gustoće preračunate su na vrijednost gustoće za udio vlage od 12 % ( $\rho_{12}$ ) izrazom:

$$\rho_{12} = \frac{1+0,01 \cdot (12-w)}{1+0,01 \cdot (12-w) \cdot \frac{\rho_w}{\rho_{H_2O}}}, \text{ g/cm}^3 \quad (6)$$

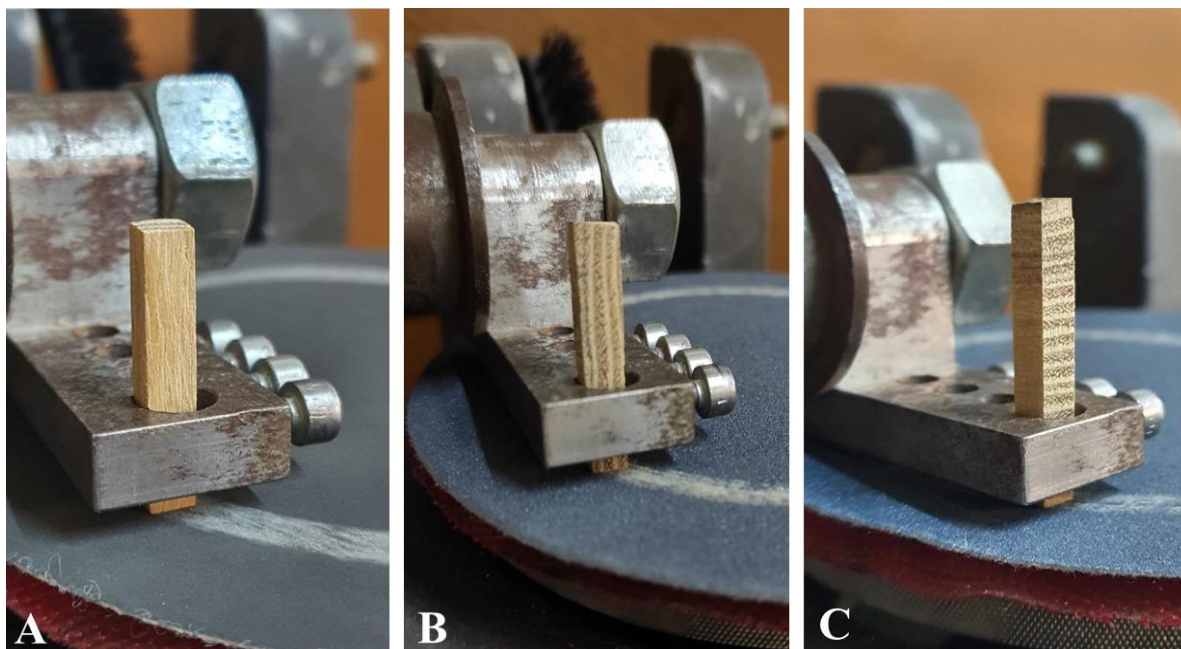


Slika 5.9 Sušionik

### 5.3. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provedeno je u Laboratoriju za tribologiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, na uređaju Taber abrader s rotacijskim diskom promjera 125 mm. Po 5 uzoraka iz svakog presjeka bilo je izloženo abrazijskom trošenju kroz 60 okretaja diska. Ukupno je ispitano 15 uzoraka. Rotacijska brzina diska bila je 1 okr/s, a primijenjena sila iznosila je 4,91 N. Tijekom ispitivanja korišten je usisivač za uklanjanje

čestica trošenja. Na slici 5.10 prikazani su uzorci svih triju karakterističnih presjeka tijekom ispitivanja. Jasno je vidljiva razlika u teksturi bočnih ploha uzoraka. Na brusnim papirima vidi se trag abrazijskog trošenja.



Slika 5.10 Ispitivanje otpornosti abrazijskog trošenja na uređaju Taber abrader A - poprečnog, B - radijalnog i C - tangencijalnog presjeka

Korištene kvalitete abrazivnih papira i srednje veličine abrazivnih zrna navedene su u tablici 5.1. Uzorci svakog presjeka ispitani su na svakom i zasebnom abrazivnom papiru. Nakon 60 okretaja izmjeren je gubitak mase svakog uzorka ( $\Delta m$ ).

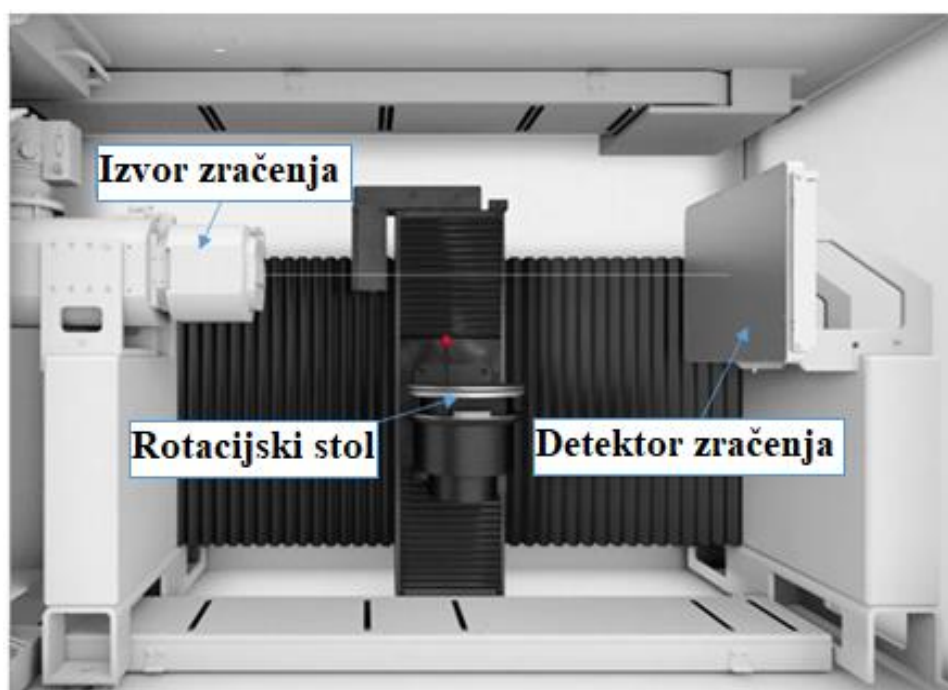
Tablica 5.1 Korištene kvalitete abrazivnih papira i srednje vrijednosti abrazivnih zrna

Kvalitete abrazivnog papira	Srednja veličina abrazivnog zrna, $\mu\text{m}$
P800	21,8
P220	68
P120	125
P80	201



#### 5.4. Mikrostrukturna analiza

Mikrostrukturna analiza provedena je na svim uzorcima računalnom tomografijom u firmi Topomatika d.o.o. Korišten je CT uređaj ZEISS METROTOM 6 Scout s 360° rotacijom predmeta. Industrijski CT sustavi sastoje se od tri glavna elementa: izvora zračenja, rotacijskog stola i detektora, slika 5.11. Izvor zračenja generira rendgenske zrake koje prolaze kroz predmet skeniranja i dopijevaju do detektora zračenja. Rendgenske zrake se prigušuju ovisno o gustoći materijala i debljini predmeta koji se skenira. Na temelju očitano zračenja na detektoru se generira fotografija sivih tonova u softveru. Prigušene zrake se prikazuju svijetlijim područjima na fotografiji i ukazuju na veću gustoću ili debljinu materijala. Zatim se uz pomoć rotacijskog stola objekt rotira te se postupak ponavlja. Skeniranje je završeno u trenutku kada se objekt okrene za 360°. Nakon skeniranja, rekonstrukcijski algoritam spaja dobivene slike i generira volumen [34].



Slika 5.11 Dijelovi CT uređaja [35]

#### 5.5. Ispitivanje tvrdoće Brinellovom metodom

Ispitivanje tvrdoće provedeno je prema normi HRN EN 1534:2010, u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Na slici 5.12 prikazan je tvrdomjer na kojem je provedeno ispitivanje. Model uređaja je HP250, a proizvođač VEB WPM. Tijekom ispitivanja, utiskivala se kuglica od kaljenog čelika, promjera

2,5 mm. Sila utiskivanja iznosila je 490,5 N, a njezin prirast bio je postupan. Maksimalna sila utiskivanja postignuta je nakon  $15 \pm 3$  sekunde. Maksimalno opterećenje zadržano je 30 sekundi.

Tvrdoća je mjerena na području s kojeg su uzeti uzorci za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje. Na svakom karakterističnom presjeku napravljeno je po 14 mjerenja tvrdoće.



**Slika 5.12 Uređaj za ispitivanje tvrdoće metodom po Brinellu**

Promjeri otisaka kuglice na poprečnom presjeku izmjereni su pomoću uređaja za precizno mjerenje. Na slici 5.13 prikazani su otisci nastali mjerenjem tvrdoće na tangencijalnom presjeku.



**Slika 5.13** Otisci kuglice pri mjenju tvrdoće na tangencijalnom presjeku

## 5.6. Rezultati mjerenja gustoće i udjela vlage

Tablica 5.2 prikazuje rezultate mjerenja udjela vlage, gustoće pri ispitivanju i gustoću pri udjelu vlage od 12 %.

**Tablica 5.2 Rezultati mjerenja gustoće i udjela vlage**

Udio vlage pri ispitivanju	8,396 %
Gustoća pri 8,396 % vlage	0,789 g/cm <sup>3</sup>
Gustoća pri 12 % vlage	0,799 g/cm <sup>3</sup>

## 5.7. Rezultati mjerenja gubitka mase pri abrazijskom trošenju

Tablica 5.3 prikazuje gubitak mase nakon abrazijskog trošenja svih uzoraka na svim kvalitetama brusnih papira. Udio vlage u uzorcima pri ispitivanju iznosio je 8,396 %.

Tablica 5.4 prikazuje rezultate gubitka mase pri abrazijskom trošenju za udio vlage od 12 %.

**Tablica 5.3 Gubitak mase uzoraka pri abraziji za udio vlage od 8,396 %**

Presjek	Uzorak	Gubitak mase, g			
		P800	P220	P120	P80
		21,8 μm	68 μm	125 μm	201 μm
poprečni	1	0,0016	0,0214	0,0264	0,0316
	2	0,0017	0,0164	0,0251	0,0324
	3	0,0017	0,0188	0,0271	0,0337
	4	0,0025	0,0175	0,0241	0,0321
	5	0,0029	0,0172	0,0268	0,0309
	$\bar{x}$	<b>0,00205</b>	<b>0,01826</b>	<b>0,02588</b>	<b>0,0321</b>
radijalni	1	0,0039	0,0325	0,0501	0,0703
	2	0,0043	0,0307	0,0441	0,0706
	3	0,0029	0,0260	0,0500	0,0488
	4	0,0046	0,0390	0,0473	0,0772
	5	0,0037	0,0293	0,0531	0,0783
	$\bar{x}$	<b>0,0039</b>	<b>0,0315</b>	<b>0,0489</b>	<b>0,0690</b>
tangencijalni	1	0,0039	0,0358	0,0512	0,0697
	2	0,0037	0,0291	0,0534	0,0711
	3	0,0035	0,0374	0,0433	0,0730
	4	0,0036	0,0289	0,0499	0,0640
	5	0,0038	0,0329	0,0582	0,0714
	$\bar{x}$	<b>0,0037</b>	<b>0,0328</b>	<b>0,0512</b>	<b>0,0698</b>

**Tablica 5.4 Gubitak mase uzoraka pri abraziji za udio vlage od 12 %**

Presjek	Uzorak	Gubitak mase, g			
		P800	P220	P120	P80
		21,8 $\mu\text{m}$	68 $\mu\text{m}$	125 $\mu\text{m}$	201 $\mu\text{m}$
poprečni	1	0,0019	0,0261	0,0322	0,0386
	2	0,0020	0,0201	0,0306	0,0396
	3	0,0020	0,0230	0,0331	0,0412
	4	0,0030	0,0214	0,0295	0,0393
	5	0,0035	0,0211	0,0328	0,0378
	$\bar{x}$	<b>0,0025</b>	<b>0,0223</b>	<b>0,03164</b>	<b>0,0393</b>
radijalni	1	0,0048	0,0397	0,0613	0,0859
	2	0,0053	0,0376	0,0540	0,0863
	3	0,0035	0,0318	0,0611	0,0596
	4	0,0056	0,0477	0,0578	0,0944
	5	0,0045	0,0358	0,0650	0,0958
	$\bar{x}$	<b>0,0047</b>	<b>0,0385</b>	<b>0,0598</b>	<b>0,0844</b>
tangencijalni	1	0,0047	0,0438	0,0626	0,0852
	2	0,0045	0,0356	0,0653	0,0869
	3	0,0043	0,0456	0,0530	0,0892
	4	0,0044	0,0353	0,0610	0,0783
	5	0,0046	0,0402	0,0712	0,0873
	$\bar{x}$	<b>0,0045</b>	<b>0,0401</b>	<b>0,0626</b>	<b>0,0854</b>

Gubitak mase za 12 % vlage preračunat je u gubitak volumena, a rezultati su prikazani u tablici 5.5.

**Tablica 5.5 Gubitak volumena uzoraka pri abraziji za udio vlage od 12 %**

Presjek	Uzorak	Gubitak volumena, $\text{mm}^3$			
		P800	P220	P120	P80
		21,8 $\mu\text{m}$	68 $\mu\text{m}$	125 $\mu\text{m}$	201 $\mu\text{m}$
poprečni	1	0,002	0,033	0,041	0,049
	2	0,003	0,025	0,039	0,049
	3	0,003	0,029	0,042	0,052
	4	0,004	0,027	0,037	0,049
	5	0,004	0,027	0,041	0,048
	$\bar{x}$	<b>0,003</b>	<b>0,028</b>	<b>0,040</b>	<b>0,049</b>
radijalni	1	0,006	0,050	0,077	0,108
	2	0,007	0,047	0,068	0,109
	3	0,004	0,040	0,077	0,075
	4	0,007	0,060	0,073	0,119
	5	0,006	0,045	0,082	0,121

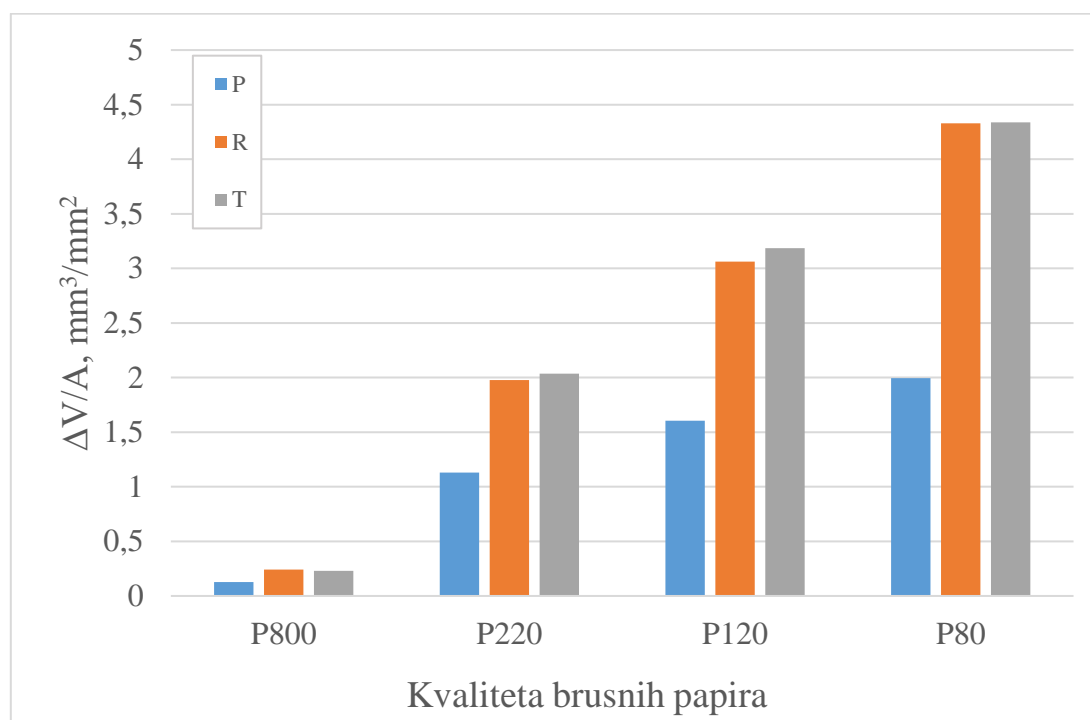
	$\bar{x}$	<b>0,006</b>	<b>0,049</b>	<b>0,075</b>	<b>0,106</b>
tangencijalni	1	0,006	0,055	0,079	0,107
	2	0,006	0,045	0,082	0,109
	3	0,005	0,058	0,067	0,112
	4	0,006	0,044	0,077	0,099
	5	0,006	0,051	0,090	0,110
	$\bar{x}$	<b>0,006</b>	<b>0,051</b>	<b>0,079</b>	<b>0,108</b>

Tablica 5.6. prikazuje rezultate gubitka volumena za 12 % vlage podijeljenih sa površinama trošenja.

**Tablica 5.6 Intenzitet trošenja za udio vlage od 12 %**

Presjek	Uzorak	Intenzitet trošenja, mm <sup>3</sup> /mm <sup>2</sup>			
		$\Delta V_{800}/A$	$\Delta V_{220}/A$	$\Delta V_{120}/A$	$\Delta V_{80}/A$
		21,8 $\mu\text{m}$	68 $\mu\text{m}$	125 $\mu\text{m}$	201 $\mu\text{m}$
poprečni	1	0,095	1,287	1,588	1,900
	2	0,102	1,006	1,533	1,984
	3	0,104	1,180	1,701	2,118
	4	0,156	1,099	1,518	2,021
	5	0,181	1,086	1,687	1,947
	$\bar{x}$	<b>0,127</b>	<b>1,132</b>	<b>1,605</b>	<b>1,994</b>
radijalni	1	0,241	2,012	3,102	4,351
	2	0,263	1,864	2,680	4,283
	3	0,177	1,604	3,085	3,008
	4	0,301	2,567	3,112	5,085
	5	0,233	1,841	3,339	4,921
	$\bar{x}$	<b>0,243</b>	<b>1,978</b>	<b>3,064</b>	<b>4,330</b>
tangencijalni	1	0,234	2,164	3,096	4,213
	2	0,230	1,812	3,323	4,419
	3	0,215	2,295	2,661	4,483
	4	0,226	1,825	3,154	4,045
	5	0,239	2,085	3,697	4,533
	$\bar{x}$	<b>0,229</b>	<b>2,036</b>	<b>3,186</b>	<b>4,339</b>

Rezultati iz tablice 5.6 prikazani su grafički u dijagramu na slici 5.14.

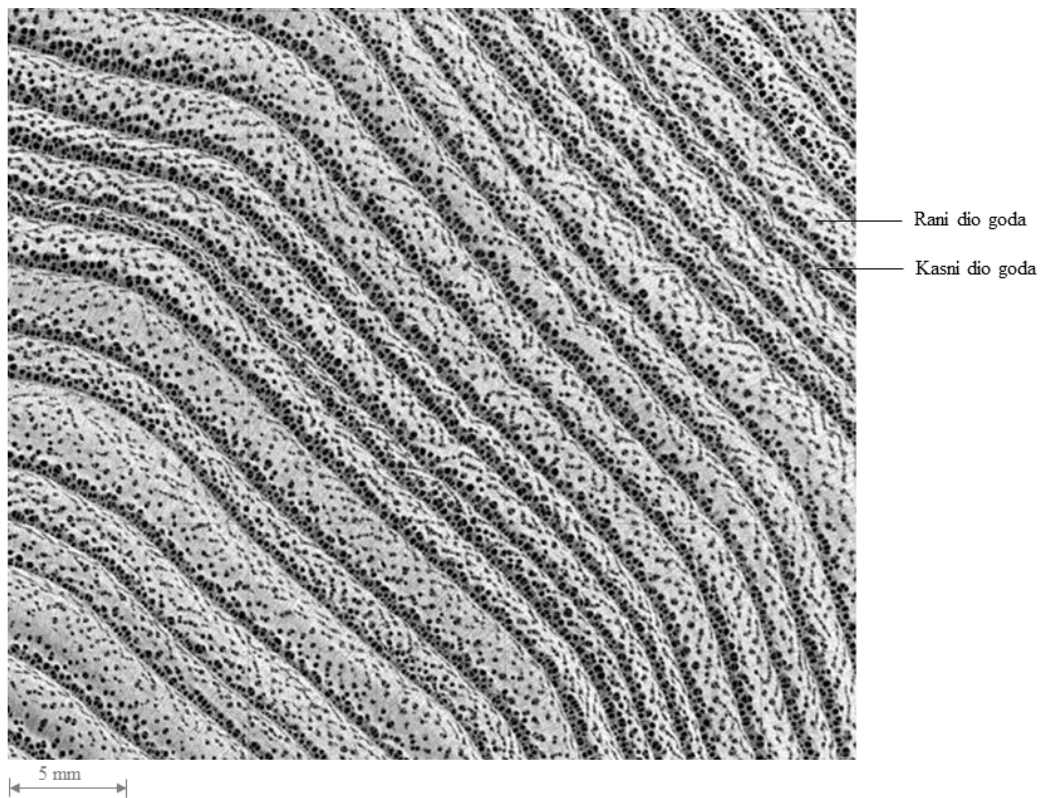


**Slika 5.14** Intenzitet trošenja na različitim kvalitetama brusnih papira u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom presjeku

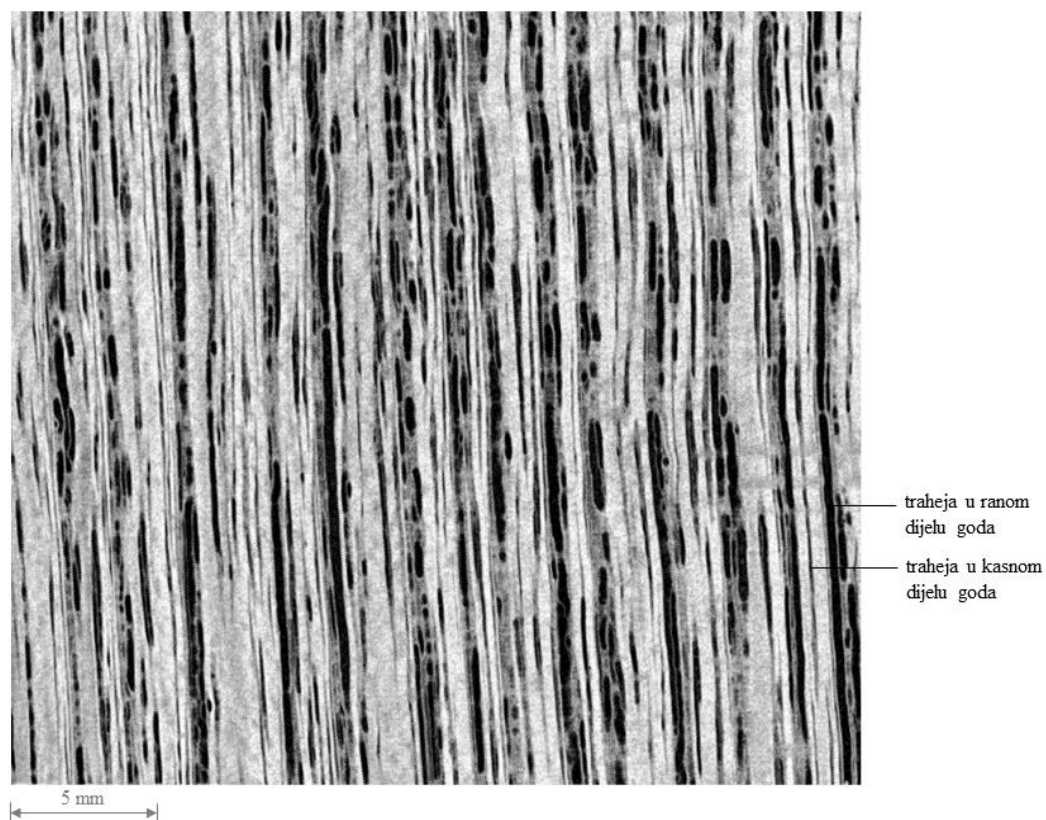
### 5.8. Rezultati analize mikrostrukture

Na slikama 5.15, 5.16 i 5.17 prikazane su fotografije poprečnog, radijalnog i tangencijalnog presjeka dobivene CT skeniranjem. Tamnija područja na slici ukazuju na manju gustoću materijala, a svjetlija na veću gustoću. Na fotografiji poprečnog presjeka jasno se vidi da je analizirani bagrem prstenasto porozna vrsta drva. Na svakom godu može se razlučiti rani i kasni dio goda. U ranom dijelu goda vide se traheje velikog promjera koje su nastale na početku vegetacijske sezone i koje su, u ovom presjeku poprečno prerezane. U kasnom dijelu goda nalaze se traheje manjeg promjera koje su nastale kasnije. Ovi provodni elementi vidljivi su i na radijalnom te tangencijalnom presjeku. U ova dva presjeka traheje su presječene uzdužno. Drvni traci nisu jasno vidljivi i samo se naziru u poprečnom presjeku.

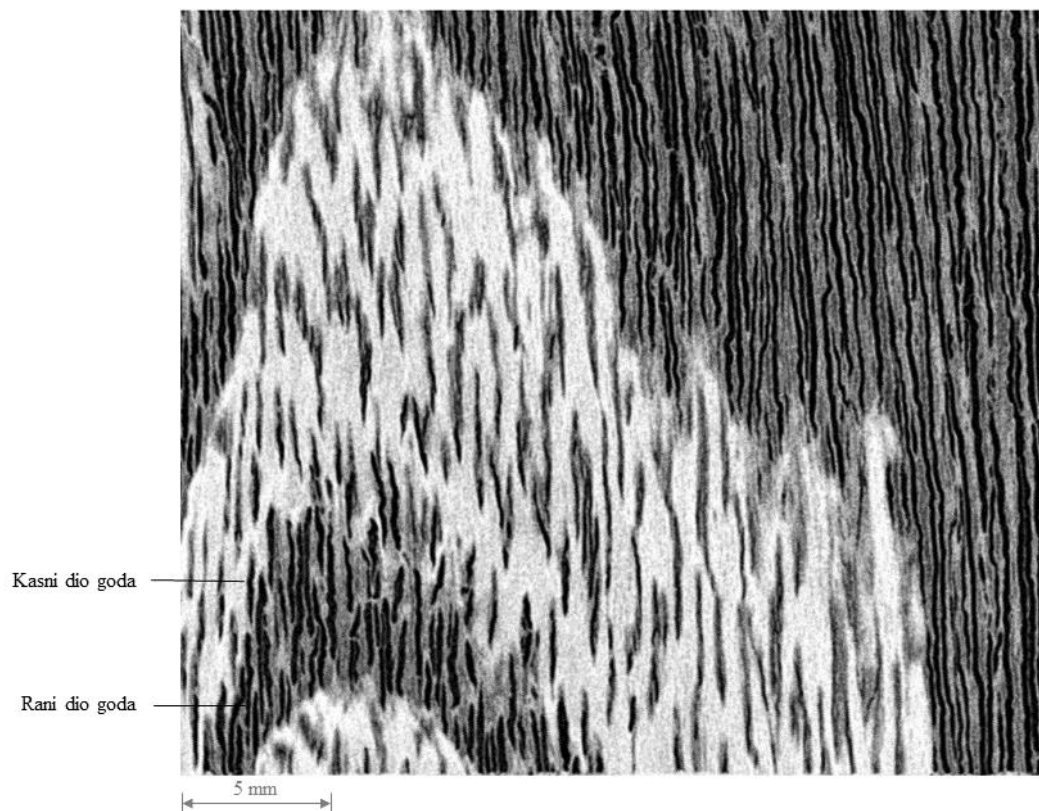




Slika 5.15 Struktura poprečnog presjeka bagrema



Slika 5.16 Struktura radijalnog presjeka bagrema



**Slika 5.17** Struktura tangencijalnog presjeka bagrema

### 5.9. Rezultati mjerenja tvrdoće

U tablici 5.7 prikazane su vrijednosti tvrdoće izmjerene na svim karakterističnim presjecima. U svakom presjeku napravljeno je 14 mjerenja. Najviše vrijednosti tvrdoće izmjerene su u poprečnom presjeku (111,8 HB), a tvrdoća u tangencijalnom i radijalnom presjeku je podjednaka.

**Tablica 5.7 Izmjerene vrijednosti tvrdoće HB**

Mjerenje	HB		
	Poprečni	Radijalni	Tangencijalni
1	105,9	61,8	90,8
2	105,9	69,6	69,6
3	125,5	79,1	79,1
4	105,9	90,8	90,8
5	105,9	79,1	61,8
6	125,5	90,8	79,1
7	105,9	90,8	90,8
8	105,9	69,6	90,8
9	125,5	90,8	61,8
10	125,5	90,8	90,8
11	105,9	79,1	79,1
12	125,5	90,8	90,8
13	105,9	90,8	61,8
14	90,8	61,8	69,6
$\bar{x}$	111,8	81,1	79,1
standardna devijacija	11,3	11,4	12,1
koeficijent varijacije	10,1	14,0	15,3

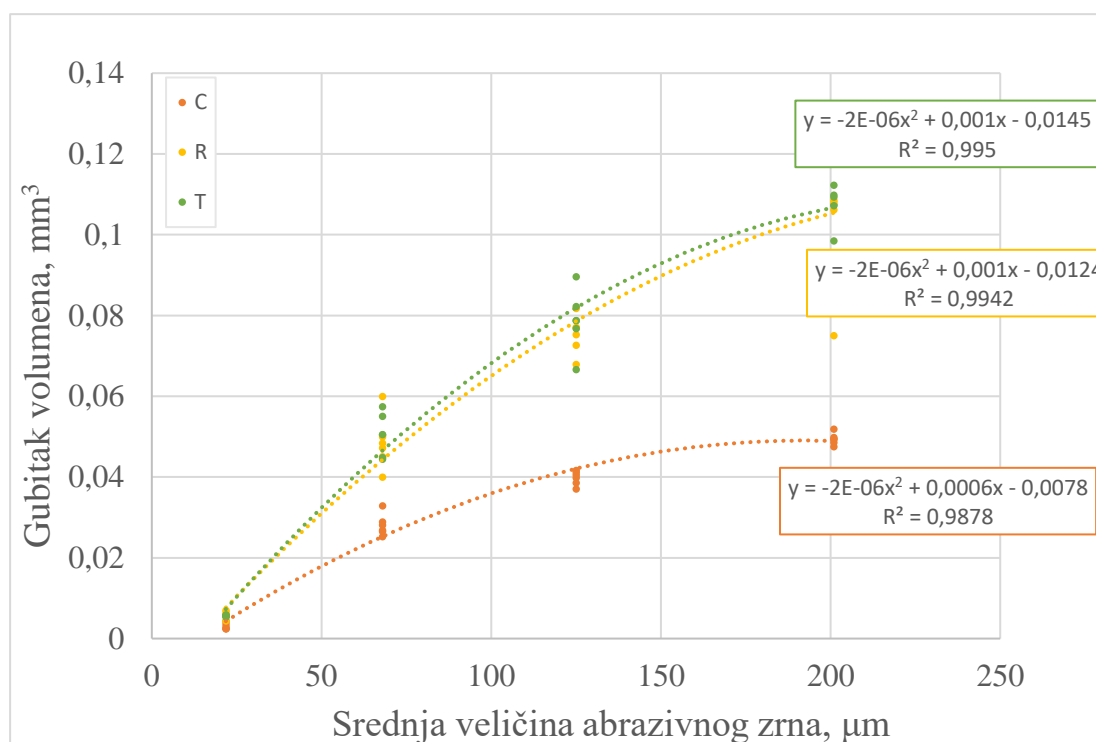
## 5.10. Analiza rezultata

### 5.10.1. Osvrt na analizu mikrostrukture

Analiza mikrostrukture u poprečnom, radijalnom i tangencijalnom smjeru pokazala je da bagrem, kao i sve vrste drva, ima izrazito usmjerenu mikrostrukturu. Na poprečnom presjeku vrlo jasno se vidi da pripada prstenasto poroznim vrstama. Veliki provodni sudovi koncentrirani su u ranom dijelu goda. U kasnom dijelu goda prevladavaju vlakanca i zato je gustoća ovog dijela viša. Ovakva heterogena i izrazito usmjerena mikrostruktura utječe na usmjerenost svojstava.

### 5.10.2. Osvrt na rezultate mjerenja intenziteta abrazijskog trošenja

Dijagram na slici 5.20 prikazuje sve izmjerene vrijednosti gubitka volumena pri abrazijskom trošenju za poprečni, radijalni i tangencijalni presjek drva bagrema u ovisnosti o kvaliteti brusnog papira odnosno, srednjem promjeru abrazivnog zrna.



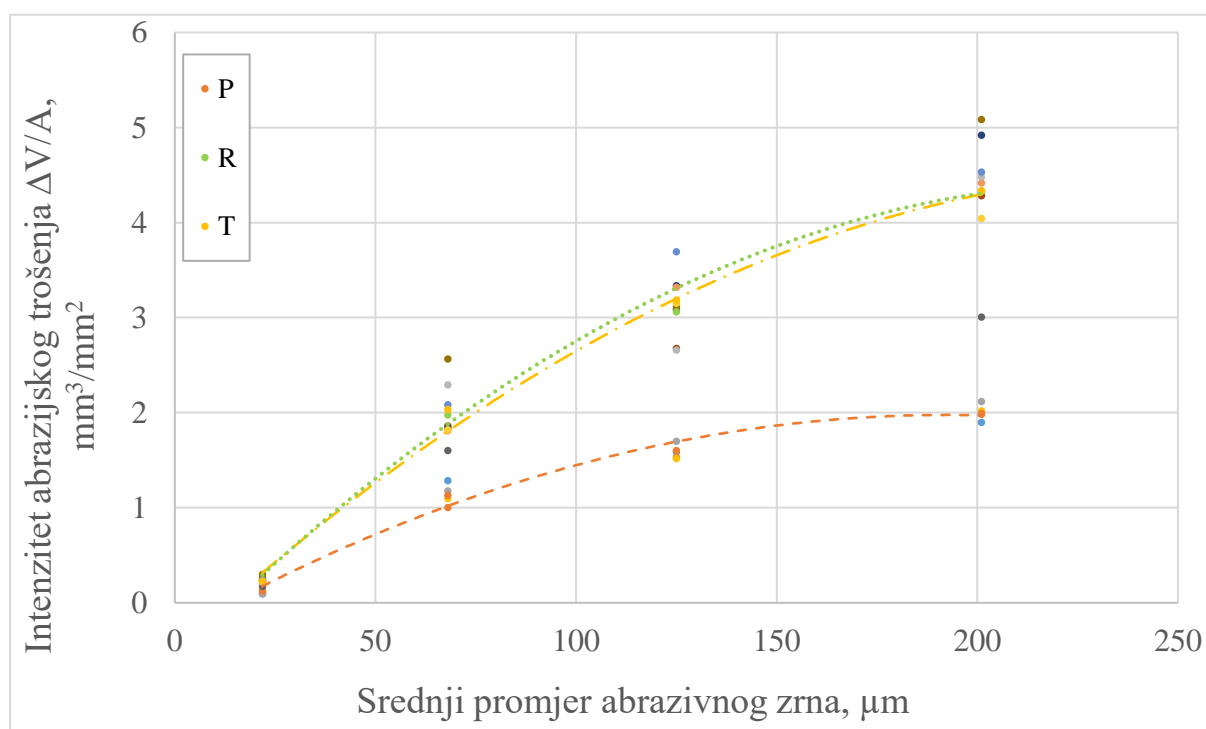
Slika 5.18 Gubitak volumena svih presjeka pri abrazijskom trošenju

Najmanji gubitak volumena za sve kvalitete brusnih papira izmjeren je na poprečnom presjeku. Na tangencijalnom i radijalnom presjeku pri ispitivanju su dobiveni vrlo slične vrijednosti za sve kvalitete brusnih papira.

Kod finijih brusnih papira na svim presjecima ovisnost između gubitka volumena i veličine abrazivnih zrna je skoro pa linearana. S povećanjem abrazivnih čestica korelacija prestaje biti linearna, a prirast gubitka volumena postaje sve manji. Ova pojava opisana je u literaturi kao kritična veličina abrazivnog zrna. Kritičnu veličinu abrazivnog zrna teško je precizno odrediti. Kreće se u rasponu od 125 do 201  $\mu\text{m}$  za sva tri presjeka, a za poprečni presjek je niža nego za druga dva presjeka. Za preciznije određivanje kritične vrijednosti abrazivnog zrna potrebno je napraviti dodatna ispitivanja u tom području granulacije.

Dobiveni rezultati za sve presjeke mogu se aproksimirati polinomom drugog stupnja uz vrlo visoki koeficijent korelacije ( $> 0,99$ ).

Na slici 5.22 prikazan je intenzitet abrazijskog trošenja za sva tri karakteristična presjeka. Intenzitet trošenja predstavlja gubitak volumena pri abraziji sveden na površinu trošenja. Kako su ispitni uzorci precizno izrezani i bili vrlo sličnih dimenzija, ovisnost između intenziteta trošenja i veličine abrazivnih čestica je vrlo slična prikazu na prethodnom dijagramu.



**Slika 5.19** Intenzitet abrazijskog trošenja

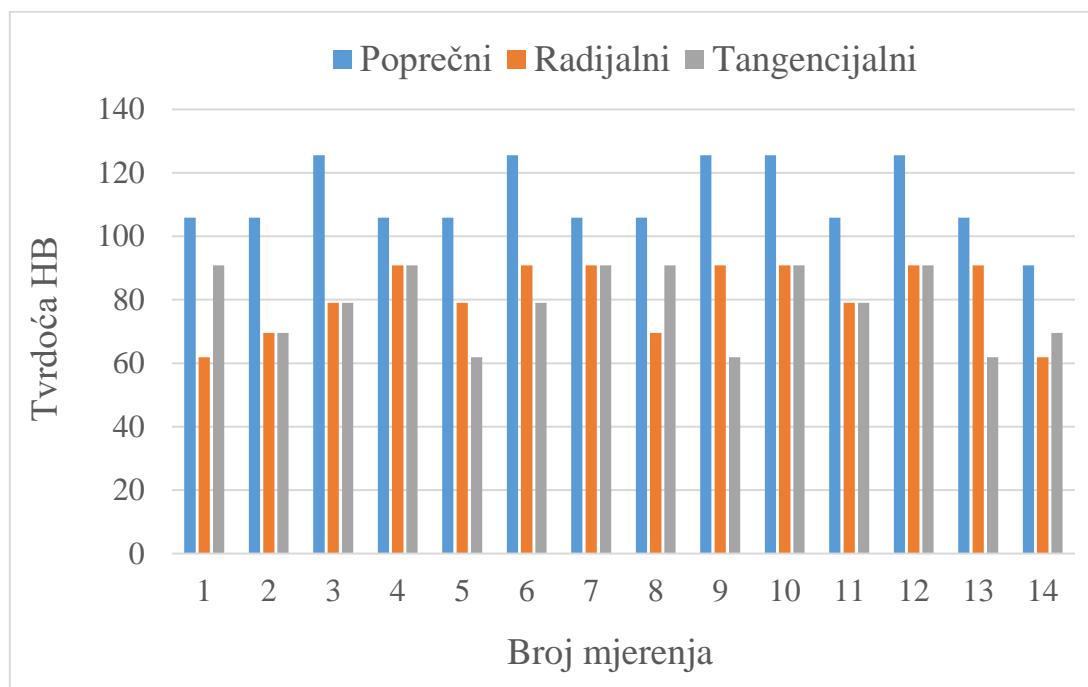
Tablica 5.8 pokazuje omjere srednjeg gubitka volumena pri abrazijskom trošenju za tri karakteristična presjeka pri svim korištenim granulacijama abrazivnih papira. Vidljivo je da su koeficijenti proporcionalnosti vrlo slični za svaku granulaciju abrazivnog papira.

**Tablica 5.8 Omjeri gubitka volumena pri abrazivskom trošenju za karakteristične presjeke (P – poprečni, R – radijalni, T - tangencijalni) za sve korištene granulacije abrazivnih papira**

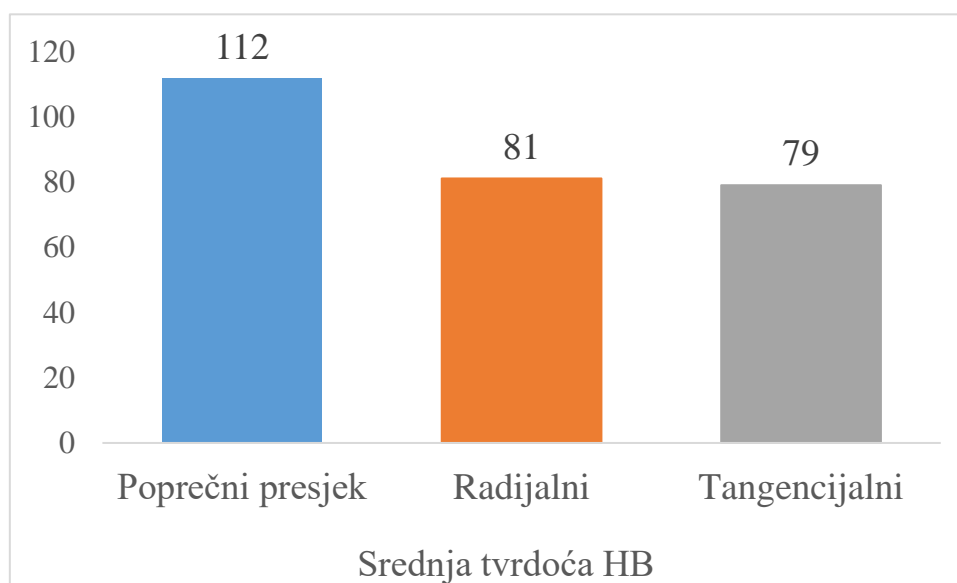
Omjeri presjeka	Srednja veličina abrazivnog zrna, $\mu\text{m}$			
	21,8	68	125	201
P/R	0,53	0,58	0,53	0,47
P/T	0,56	0,56	0,51	0,46
R/T	1,05	0,96	0,96	0,99

### 5.10.3. Osvrt na rezultate mjerenja tvrdoće

Na slici 8.23 prikazan je dijagram svih izmjerenih vrijednosti tvrdoće. Ukupno je napravljeno 42 mjerenja, 12 po svakom presjeku. Najviše vrijednosti tvrdoće izmjerene su na poprečnom presjeku gdje srednja vrijednost iznosi 112 HB. Tangencijalni i radijalni presjek imaju niže i međusobno podjednake vrijednosti tvrdoće, 79 HB i 81 HB. Za sve drvene vrste karakteristično je rasipanje vrijednosti tvrdoće, što je vidljivo i u ovom slučaju. Raspon vrijednosti tvrdoće kretao se od 61,8 HB do 125,5 HB. Koeficijent varijacije kod svih presjeka manji je od 17 %, što je u granicama koje propisuje norma ISO 13061. Poprečni presjek ima najmanji koeficijent varijacije, dok su vrijednosti koeficijenta varijacije kod radijalnog i tangencijalnog presjeka veće.



Slika 5.20 Rezultati mjerenja tvrdoće na karakterističnim presjecima



Slika 5.21 Prosječne vrijednosti tvrdoće karakterističnih presjeka



## 6. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata može zaključiti sljedeće:

- Orijehtacija drvnog presjeka i veličina abrazivnih zrna imaju značajan utjecaj na otpornost drva bagrema na abrazijsku trošenje.
- Na poprečnom presjeku izmjeren je najmanji intenzitet trošenja što znači da ovaj presjek ima najveću otpornost na abrazijsko trošenje. Radijalni i tangencijalni presjek imaju značajno nižu otpornost na abrazijsko trošenje od poprečnog i dosta su se slično ponašali pri abrazijskom trošenju.
- Fenomen kritične veličine abrazivnih zrna uočen je na svim ispitanim presjecima i nalazi se između 125 i 201  $\mu\text{m}$ . Za preciznije određivanje kritične veličine abrazivnih zrna potrebno je provesti dodatna ispitivanja u navedenom području.
- Omjeri vrijednosti gubitka volumena za sva tri karakteristična presjeka (poprečni, radijalni, tangencijalni) su slični za svaki korišteni brusni papir.
- Najviše vrijednosti tvrdoće izmjerene su na poprečnom presjeku (112 HB), a znatno niže na tangencijalnom (79 HB) i radijalnom (81 HB) presjeku. Najmanji koeficijent varijacije pri mjerenju tvrdoće dobiven je u poprečnom presjeku, a u svim presjecima niži je od normom dopuštene vrijednosti od 17 %.

**LITERATURA**

- [1] Chen C, Kuang Y, Zhu S, Burgert I, Keplinger T, Gong A, et al. Structure–property–function relationships of natural and engineered wood. *Nat Rev Mater* [Internet]. 2020;5(9):642–66. Dostupno na: <http://dx.doi.org/10.1038/s41578-020-0195-z> doi: 10.1038/s41578-020-0195-z
- [2] Shmulsky R, Jones PD. *Forest Products and Wood Science An Introduction: Sixth Edition*. Forest Products and Wood Science An Introduction: Sixth Edition. 2011. doi: 10.1002/9780470960035
- [3] The Parts of Trees and Their Functions [Internet]. (pristupljeno: 03/22/2022). Dostupno na: <https://sciencing.com/the-parts-of-trees-and-their-functions-12620561.html>
- [4] Tree Trails [Internet]. (pristupljeno: 03/22/2022). Dostupno na: [http://texasforestinfo.tamu.edu/treetrails/pdf/4 Tree Structure and Function.pdf](http://texasforestinfo.tamu.edu/treetrails/pdf/4%20Tree%20Structure%20and%20Function.pdf)
- [5] Rowell RM. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. 2005.
- [6] Arzola-Villegas X, Lakes R, Plaza NZ, Jakes JE. Wood moisture-induced swelling at the cellular scale—Ab intra. *Forests*. 2019;10(11). doi: 10.3390/f10110996
- [7] Stems, Plant Organs: [Internet]. (pristupljeno: 03/23/2022). Dostupno na: <https://slideplayer.com/amp/4207850/>
- [8] Wood as a material [Internet]. (pristupljeno: 03/21/2022). Dostupno na: <https://www.britannica.com/science/wood-plant-tissue/Wood-as-a-material>
- [9] Sandquist D. Poplar wood formation : genotypical influence on structure and chemistry. 2011.
- [10] Wiedenhoef AC, Miller RB, Service F. Structure and Function 2 Structure of Wood. 2005;9–34.
- [11] Wood Database [Internet]. (pristupljeno: 07/19/2022). Dostupno na: <https://www.wood-database.com/wood-articles/hardwood-anatomy/>
- [12] Kumar A, Jyske T, Petrič M. Delignified Wood from Understanding the Hierarchically Aligned Cellulosic Structures to Creating Novel Functional Materials: A Review. *Adv Sustain Syst*. 2021;5(5). doi: 10.1002/adsu.202000251
- [13] Differentiated Plant cells [Internet]. Dostupno na: <https://schoolbag.info/biology/concepts/concepts.files/image603.jpg>
- [14] *Identifying Wood*, The Taunton Press,. 1990;

- [15] Canal R. Smolni kanal [Internet]. Dostupno na: [https://www.wikiwand.com/en/Resin\\_canal](https://www.wikiwand.com/en/Resin_canal)
- [16] Biologie F, Helmling S. Identification of Mixed Tropical Hardwood ( MTH ) by characteristic morphological features – a contribution to species protection. 2020;
- [17] Hardwood Anatomy [Internet]. Dostupno na: <https://slideplayer.com/slide/14887479/91/images/5/Intervessel+pitting+%28Hoadley%29.jpg>
- [18] Hardwood cell type [Internet]. Dostupno na: <https://slideplayer.com/slide/4681700/>
- [19] Janka hardness test [Internet]. Dostupno na: [http://www.hobbitouseinc.com/personal/woodpics/\\_discussion\\_janka.htm](http://www.hobbitouseinc.com/personal/woodpics/_discussion_janka.htm)
- [20] Sydor M, Pinkowski G, Jasińska A. The Brinell method for determining hardness of wood flooring materials. *Forests*. 2020;11(8). doi: 10.3390/f11080878
- [21] BRINELL HARDNESS TESTERS [Internet]. Dostupno na: <https://manualzz.com/doc/7243400/brinell-hardness-testers>
- [22] Mohamed MAHW. University of Southampton Research Repository. 2021;(April 2021):310.
- [23] Sci W. Two-body and three-body abrasive wear properties of katsura wood. 2001;87–93.
- [24] What is Abrasive Wear – Definition [Internet]. Dostupno na: <https://material-properties.org/what-is-abrasive-wear-definition/>
- [25] Brožek M. Abrasive wear resistance of selected woods. *Res Agric Eng*. 2017;63(2):91–7. doi: 10.17221/74/2015-RAE
- [26] Rabinowicz E, Mutis A. Effect of abrasive particle size on wear. *Wear*. 1965;8(5):381–90. doi: 10.1016/0043-1648(65)90169-9
- [27] Richard Mally, Samuel F. Ward, Jiří Trombik, Jaroslav Buszko, Vladimír Medzihorský AML. Non-native plant drives the spatial dynamics of its herbivores: the case of black locust (*Robinia pseudoacacia*) in Europe.
- [28] Nicolescu VN, Rédei K, Mason WL, Vor T, Pöetzelsberger E, Bastien JC, et al. Ecology, growth and management of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.), a non-native species integrated into European forests. *J For Res*. 2020;31(4):1081–101. doi: 10.1007/s11676-020-01116-8

- [29] 10 Types Of Locust Tree Varieties For Landscaping [Internet]. Dostupno na: <https://americangardener.net/types-of-locust-trees/>
- [30] Kamperidou V, Barboutis I, Vassiliou V. Prospects for the utilization of black locust wood (*robinia pseudoacacia* L.) coming from plantations in furniture manufacturing. 27th Int Conf Wood Sci Technol ICWST 2016 Implement Wood Sci Woodwork Sect - Proc. 2016;(October):123–8.
- [31] Valkenburgh M Van, Associates VV, Architects L. Black Locust Lumber : A Sustainable Alternative. 2011;
- [32] Dzurenda L. Colour modification of *Robinia pseudoacacia* L. During the processes of heat treatment with saturated water steam. *Acta Fac Xylologiae*. 2018;60(1):61–70. doi: 10.17423/afx.2018.60.1.07
- [33] Wikipedia. the Free Encyclopedia: Blank Maps [Internet]. (pristupljeno: 05/23/2022). Dostupno na: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Blank\\_map\\_of\\_Europe\\_\(with\\_disputed\\_regions\).svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Blank_map_of_Europe_(with_disputed_regions).svg)
- [34] Kruth JP, Bartscher M, Carmignato S, Schmitt R, De Chiffre L, Weckenmann A. Computed tomography for dimensional metrology. *CIRP Ann - Manuf Technol* [Internet]. 2011;60(2):821–42. Dostupno na: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.006> doi: 10.1016/j.cirp.2011.05.006
- [35] CT brošura [Internet]. (pristupljeno: 10/19/2022). Dostupno na: <https://www.zeiss.co.uk/metrology/products/systems/computed-tomography/metrotom-6-scout.html#brochuredownload>