

# Utjecaj orijentacije goda na abrazijsku otpornost drva obične smreke

---

**Raič, Andro**

**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:235:726481>

*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

# ZAVRŠNI RAD

**Andro Raič**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Andro Raič

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na pomoći, trudu i izdvojenom vremenu pri izradi ovog rada. Zatim se želim zahvaliti svojoj obitelji, djevojci i prijateljima na razumijevanju i pruženoj podršci. Također se želim zahvaliti kolegi Janku Zechneru na pruženoj pomoći tijekom studija.

Andro Raič



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske 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	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Andro Raič** Mat. br.: 0035209149

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj orijentacije goda na abrazijsku otpornost drva obične smreke**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Annual ring orientation effect on abrasion resistance of European spruce**

Opis zadatka:

Drvo je prirodni kompozitni materijal s izrazito usmjerenom strukturom koja je određena njegovim biološkim funkcijama. Zbog usmjerene strukture usmjerena su i svojstva drva, osobito ona koja su važna za tehničku primjenu drva. Struktura i svojstva drva razlikuju se od vrste do vrste, a velike razlike su prisutne i unutar iste vrste pa čak i unutar istog debla. Također je poznato da kod nekih vrsta drva i orijentacija ispitnih uzoraka u odnosu na liniju goda može imati veliki utjecaj na rezultate ispitivanja različitih svojstava.

U završnom radu potrebno je odrediti otpornost na abrazijsko trošenje drva domaće smreke (*Picea abies*) u longitudinalnom (L) smjeru. Uzorke za ispitivanje treba izrezati iz debla tako da položaj ispitivane površine u odnosu na liniju goda pokrije cijeli raspon od tangencijalnog (LT) do radijalnog presjeka (LR), odnosno od 0° do 90°. Ispitivanje provesti standardnom metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“ prema normi ASTM G 65.

Dobivene rezultate potrebno je analizirati i na temelju provedene analize donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:

30. studenoga 2020.

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.

Zadatak zadala:

*Rede*

Prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednik Povjerenstva:

*Branko Bauer*

Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA .....	III
POPIS OZNAKA.....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. STRUKTURA DRVA .....	2
2.1. Botanička podjela drva.....	2
2.2. Makrostruktura drva .....	3
2.2.1 Sustavi i karakteristični presjeci u deblu.....	4
2.2.1. Godovi.....	7
2.3. Drvna stanica .....	11
2.3.1. Stanična stijenka .....	11
2.4. Mikrostruktura četinjača .....	12
2.5. Mikrostruktura listača .....	15
2.6. Kemijski sastav drva .....	16
2.7. Gustoća drva [1, 3, 20].....	18
3. ABRAZIJA.....	20
3.1. Otpornost na trošenje .....	20
3.2. Mehanizam trošenja abrazijom.....	20
3.3. Metoda „suhi pijesak – gumeni kotač“, .....	21
4. EKSPERIMENTALNI DIO .....	24
4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja .....	24
4.2. Materijal za ispitivanje.....	24
4.3. Ispitivanje abrazijskog trošenja .....	26
4.4. Rezultati mjerenja.....	29
4.5. Analiza rezultata .....	36
5. ZAKLJUČAK .....	40
LITERATURA.....	41

**POPIS SLIKA**

Slika 2.1	Botanička podjela vrst adrva [1].....	2
Slika 2.2	Uzdužni presjek kroz stablo [1].....	3
Slika 2.3	Aksijalni i radijalni sustav debla [1] .....	4
Slika 2.4	Tri karakteristična presjeka debla [6].....	5
Slika 2.5	Elementarni slojevi na poprečnom presjeku debla [7] .....	5
Slika 2.6	Radijalne i izodijametrične stanice kambija, tangencijalni presjek [1].....	6
Slika 2.7	Poprečni presjek kroz jedričavu (lijevo) i bakuljavu vrstu drva (desno) [1] .....	7
Slika 2.8	Kasni i rani dio goda na poprečnom presjeku, [9].....	8
Slika 2.9	Mikroskopski prikaz ranog i kasnog goda četinjače (lijevo) i listače (desno) [10] .....	8
Slika 2.10	Tri karakteristična tipa godova kod četinjača i listača [3] .....	9
Slika 2.11	Prikaz godova različite širine [1].....	10
Slika 2.12	Formiranje makrovlakana celuloze .....	11
Slika 2.13	Građa stanične stijenke drvene stanice [3].....	12
Slika 2.14	Mikrostruktura četinjača .....	14
Slika 2.15	Drvena vlakanca (v) i parenhimne stanice (p) pod mikroskopom [3] .....	15
Slika 2.16	Trodimenzionalni prikaz mikrostrukture listače [1].....	16
Slika 2.17	Usporedba molekularnog sastava četinjača i listača [17] .....	17
Slika 2.18	Kemijski sastav celuloze (lijevo); amorfno i kristalično područje celuloze (desno) [1, 18] .....	17
Slika 3.1	Jedinični događaji prilikom abrazijskog mehanizma trošenja [22].....	20
Slika 3.2	Tribosustav od dva funkcionalna tijela (a); tribosustav od dva funkcionalna tijela i međutijela (b) [22].....	21
Slika 3.3	Skica uređaja za metodu „suhi pijesak/gumeni kotač“ [22] .....	22
Slika 4.1	Raspored uzoraka na poprečnom presjeku .....	24
Slika 4.2	Izrezivane uzoraka na strojnoj pili .....	25
Slika 4.3	Izrezani i pripremljeni uzorci za ispitivanje .....	25
Slika 4.4	Shema označavanja uzorka .....	26
Slika 4.5	Kutovi između tangente na godove i trošene površine .....	26
Slika 4.6	Uzorak u čeljusti uređaja.....	27
Slika 4.7	Uređaj za ispitivanje abrazijskog trošenja .....	27
Slika 4.8	Precizna vaga Ohaus Analytical Plus.....	28
Slika 4.9	Rezultati mjerenja abrazijske otpornosti u ovisnosti o orijentaciji abradirane površine .	36
Slika 4.10	Prosječni gubitak mase u ovisnosti o orijentaciji abradirane površine .....	37
Slika 4.11	Rezultati mjerenja abradirane mase za tangencijalni presjek (0°) .....	37
Slika 4.12	Rezultati mjerenja abradirane mase za kut od 45° .....	38

**POPIS TABLICA**

Tablica 2.1	Elementarni sastav drva [3] .....	16
Tablica 3.1	Moguće varijante metode "suhi pijesak/gumeni kotač" [24].....	22
Tablica 4.1	Gubitak mase pri abrazijskom trošenju za I redak, g .....	29
Tablica 4.2	Gubitak mase pri abrazijskom trošenju za II redak, g.....	30
Tablica 4.3	Gubitak mase pri abrazijskom trošenju za III redak, g .....	31
Tablica 4.4	Gubitak mase pri abrazijskom trošenju za IV redak, g.....	32
Tablica 4.5	Gubitak mase pri abrazijskom trošenju za V redak, g .....	33
Tablica 4.6	Gubitak mase pri abrazijskom trošenju za VI redak, g.....	33
Tablica 4.7	Gubitak mase za izmjerene kutove.....	34
Tablica 4.8	Rezultati mjerenja gustoće.....	35



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	gustoća
$\rho_0$	g/cm <sup>3</sup>	gustoća drva pri udjelu vlage od 0 %
$\rho_{12}$	g/cm <sup>3</sup>	gustoća drva pri udjelu vlage od 12 %
$\rho_w$	g/cm <sup>3</sup>	gustoća drva pri određenom udjelu vlage
$m$	g	masa uzorka
$m_w$	g	masa uzorka pri određenom udjelu vlage
$\Delta m$	g	gubitak mase uzorka
$V$	cm <sup>3</sup>	volumen uzorka

## SAŽETAK

Cilj ovog rada bio je odrediti otpornost na abrazijsko trošenje drva domaće smreke (*Picea abies*) u longitudinalnom smjeru, od tangencijalnog (LT) do radijalnog presjeka (LR).

Ispitivanje otpornosti na abraziju provedeno je standardnom metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“.

S obzirom na relativno ujednačenu gustoću abradiranih uzoraka, otpornost na trošenje izražena je preko gubitka mase. Srednja vrijednost gustoće uzoraka drva smreke iznosila je  $0,433 \text{ g/cm}^3$ .

Utvrđeno je da otpornost na abraziju ovisi o orijentaciji abradirane površine. Iako je rasipanje rezultata vrlo veliko izražen je trend smanjenja abrazijskog trošenja s povećanjem kuta kojeg zatvara trošena površina s tangencijalnim presjekom, od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ . Najmanju otpornost na abrazijsko trošenje ima tangencijalni presjek, a najveću radijalni. Srednji gubitak mase u radijalnom presjeku je za 48 % manji u odnosu na tangencijalni, a na abradiranoj površini zakrenutoj za  $45^\circ$ , srednji gubitak mase manji je za oko 9 %.

**Ključne riječi:** abrazijsko trošenje, usmjerenost strukture, drvo, smreka

## SUMMARY

The aim of this study was to determine the abrasion resistance of domestic spruce wood (*Picea abies*) in the longitudinal direction, from tangential (LT) to radial cross section (LR).

The abrasion resistance test was performed by the standard method "dry sand – rubber wheel". Given the relatively uniform density of the abraded samples, the wear resistance is expressed through weight loss. The mean density of spruce wood samples was 0.433 g/cm<sup>3</sup>.

It was found that the abrasion resistance depends on the orientation of the abraded surface. Although the scattering of the results is very large, there is a pronounced trend of decreasing abrasion wear with increasing angle closed by the worn surface with a tangential cross section, from 0° to 90°. The tangential cross section has the lowest abrasion resistance and the radial cross-section the highest. The mean weight loss in radial cross section is 48% lower compared to the tangential, and on the abraded surface rotated by 45°, the mean weight loss is reduced by about 9%.

**Key words:** abrasion wear, structure orientation, wood, spruce

## 1. UVOD

Drvo je produkt šume, ekološke tvornice, najrasprostranjenija je biomasa na svijetu i ima vrlo važnu ulogu u životu ljudi. Kao živa tvar i neizostavan član ekosustava, upravo je drvo najvažniji čimbenik koji je omogućio život na kopnu jer ono putem procesa fotosinteze stvara dostanu količinu kisika, a na sebe veže štetni ugljikov dioksid te tako održava ekološku ravnotežu. Međutim, na drvo se može gledati i kao na mrtvu tvar i na materijal s kojim se civilizacija koristi od najranijih početka. Uz kamen i glinu, drvo se može smatrati prvim tehničkim materijalom, a i do današnjeg dana se zadržao kao konstrukcijski materijal te kao jedan od glavnih izvora toplinske energije za većinu populacije. Osim proizvodnje kisika, krasi ga i niz drugih vrлина pa se tako drvo izdvaja po specifičnim kemijskim, fizikalnim i mehaničkim svojstvima. Glavna prednost u odnosu na ostale materijale su visoka specifična čvrstoća, dobra žilavost, laka obradivost, mala osjetljivost na temperaturne promjene, dobra toplinska i zvučna izolacijska svojstva itd. Za drvo je važno naglasiti svojstvo recikličnosti i obnovljivost, koja su u današnjem svijetu sve cjenjenije karakteristike. U suvremenoj građevinskoj i proizvodnoj industriji pokušavaju se iskoristiti i njegova estetska i tehnološka superiornosti. S druge strane, drvo posjeduje i niz nedostatak poput dimenzijske ograničenosti, podložnost bubrenju i utezanju, nepostojanosti kvalitete, anizotropnosti i mnogih drugih. Svojstva drva su određena njegovom strukturom koju čine međusobno povezani lanci celuloze i hemiceluloze te lignin. Tako povezani oni čine složen anizotropan materijal. Upravo se anizotropnost i ortotropnost strukture odražava na svojstva koja su u različitim smjerovima građe drva raznovrsna i neujednačena. Osim anizotropne strukture, vlaga u drvu također predstavlja nezanemariv faktor kod karakterizacije drva kao materijala.

Tako je i u ovome radu naglasak stavljen na usmjerenost strukture, točnije analiziran je utjecaj orijentacije strukture na abrazijska svojstva drva obične smreke (lat. *Picea abies*).

## 2. STRUKTURA DRVA

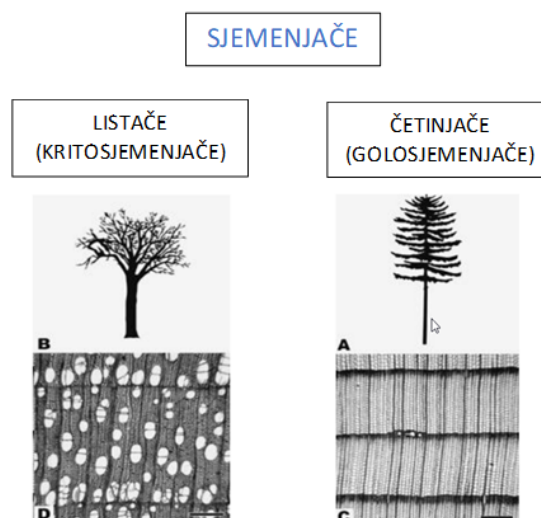
Drvo je prirodan, heterogen, anizotropan, higroskopan kompozitni materijal koji se dobiva iz drvenastih biljaka, uglavnom iz debla stabala. Karakterizira ga visoka specifična čvrstoća i visoka specifična krutost. Kao i kod svakog tehničkog materijala i kod drva struktura izravno utječe na svojstva. Ta svojstva materijala utječu i na svojstva proizvoda odnosno obratka.

Osim vrlina, drvo kao tehnički materijal posjeduje i određene mane, a da bi se iste reducirale na što nižu razinu i u konačnici čak eliminirale, potrebno je poznavati makroskopsku, mikroskopsku i sub-mikroskopsku građu drva. [1]

### 2.1. Botanička podjela drva

Vrste drva koje se smatraju tehnički zanimljivim materijalom pripadaju odjeljku biljnog carstva sjemenjača ili cvjetnjača, a one se dalje dijele na listače koje se nerijetko nazivaju i *tvrdo drvo* te na četinjače čiji se naziv ponekad poistovjećuje s *mekim drvom* iako to nije usko povezano s njihovom stvarnom tvrdoćom. [1]

Na slici 2.1. prikazana je botanička podjela vrsta drva na listače i četinjače. Razlikuju se i po obliku stabla i po mikrostrukтури.



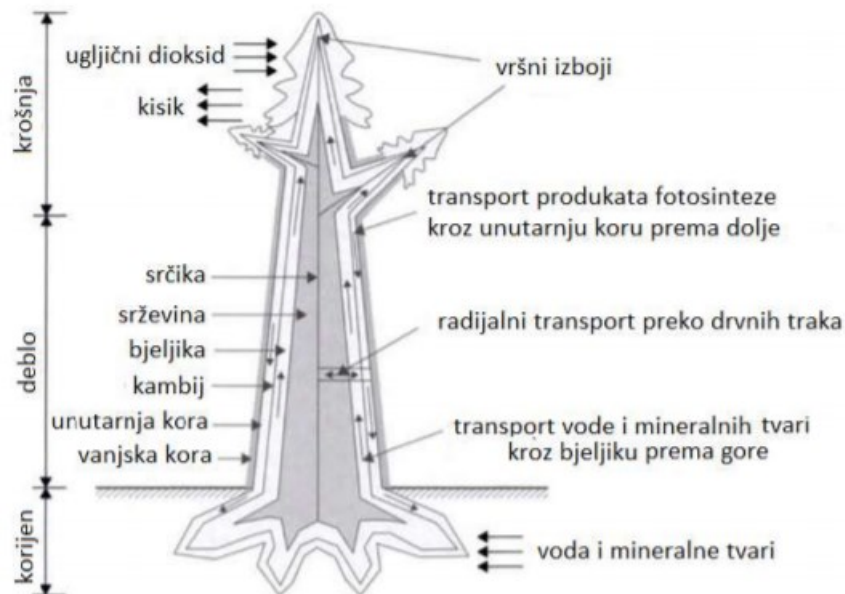
Slika 2.1 Botanička podjela vrst adrva [1]

Četinjače ili golosjemenjača svoj naziv su dobile prema obliku lista, za njih je karakteristično da obitavaju na sjevernoj hemisferi i da su zimzelene, odnosno u hladnijim godišnjim dobima ne gube lišće. Naše najčešće domaće vrste su: jela, smreka, bor i ariš. Listače, spadaju u skupinu

kritosjemenjača te sa svojih 2000 vrsta većinom su ograničene na tropska područja. Za razliku od četinjača, lišće im uglavnom opada u jesen. Najpoznatiji pripadnici listača u našim krajevima su: bukva, hrast, breza, javor, jasen i dr. [2, 3]

## 2.2. Makrostruktura drva

Da bi se u potpunosti razumjela svojstva tehničkog drva potrebno je poznavati njegu strukturu na svim razinama. Drvo se dobiva iz debla i grana stabala. Svako stablo se sastoji od tri osnovne cjeline kao što je prikazano na slici 2.2, a to su korijen, deblo i krošnja. Svaki dio ima određenu funkciju koja je važna za stablo u cjelini. [1]



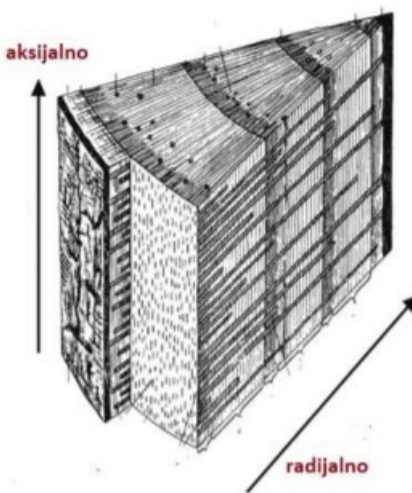
Slika 2.2 Uzdužni presjek kroz stablo [1]

Osnovna zadaća korijena je da crpi vodu i mineralne tvari iz tla te ju apsorbira u unutrašnjost stabla. Osim toga korijen drži i podupire ostatak stabla. Deblo, koje je najkompleksniji dio stabla, nosi krošnju, omogućuje protok vode i u njoj otopljenih mineralnih tvari od korijena prema gore, osigurava i radijalni transport preko drvnih traka, a u njegovim dubljim slojevima pohranjene su rezervne tvari i šećeri. Krošnju čine deblje i tanje grane, izboji i lišće. Primarna uloga lišća je obavljanje procesa fotosinteze koji se sastoji od upijanja ugljikovog dioksida i sunčeve svjetlosti te stvaranje ugljikohidrata i kisika. Proizvodi fotosinteze skladište se u deblu i transportiraju se do ostalih dijelova stabla kroz unutarnju koru. [1, 4]

### 2.2.1 Sustavi i karakteristični presjeci u deblu

Kada se pogleda građa drva, uočavaju se dva umrežena, isprepletена sustava koji spajaju i objedinjuju sve dijelove stabla. Drvo je građeno od drvnih stanica koje su nekoliko puta duže nego šire i koje su zbog toga prilagođene protoku tvari od korijena prema krošnji i obrnuto. Ovaj sustav koji je zadužen za takvo kolanje, temelj je i za čvrstoću stabla, a naziva se aksijalni sustav. Osim aksijalnog, u stablu je prisutan i radijalni sustav koji ima funkciju lateralnog protoka biokemijskih tvari. Drvne stanice koje tvore ovaj sustav također su izdužene, ali su usmjerene okomito na os debla. [3]

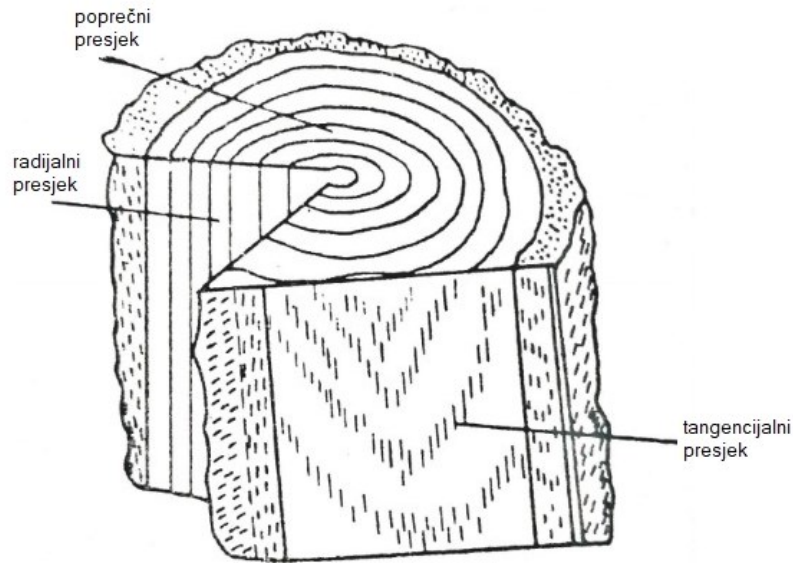
Na slici 2.3 prikazan je aksijalni i radijalni sustav debla.



**Slika 2.3 Aksijalni i radijalni sustav debla [1]**

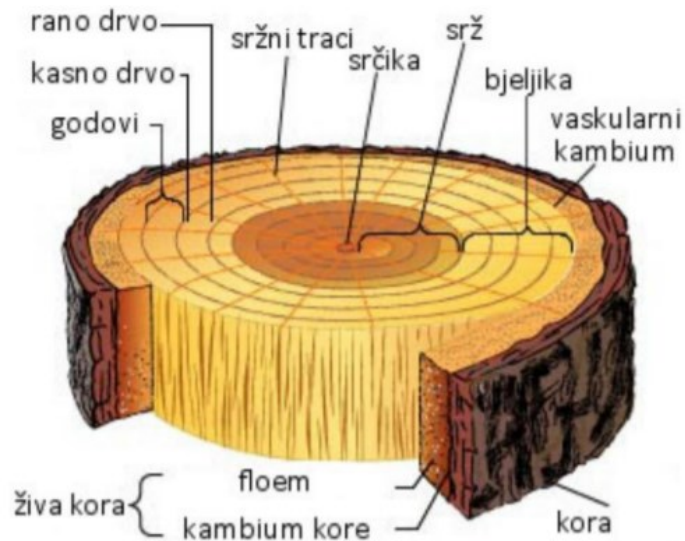
Osim usmjerenosti i rasporeda drvnih stanica u dva međusobno ovisna sustava, da bi se stvorila sveobuhvatna slika o građi i svojstvima drva, potrebno je istaknuti tri karakteristična presjeka kroz građu debla: [5]

- **POPREČNI (TRANSFERZALNI)** – presjek okomit na uzdužnu os debla na kojemu se vide značajke od srčike prema kori
  - **RADIJALNI** – presjek u ravnini koju određuje radijus i koji je paralelan je s uzdužnom osi biljnoga valjka
  - **TANGENCIJALNI** – presjek paralelan s uzdužnom osi debla i okomit na polumjer valjka drva
- Na slici 2.4 prikazana su tri karakteristična presjeka.



Slika 2.4 Tri karakteristična presjeka debla [6]

Poprečni presjek je posebno zanimljiv jer se na njemu vidi promjena strukture od središta debla do vanjske kore. Ovaj presjek prikazan je na slici 2.5.



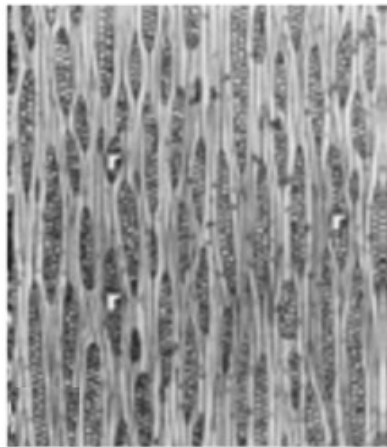
Slika 2.5 Elementarni slojevi na poprečnom presjeku debla [7]

Svaki sloj je zadužen za određenu funkciju koja je neophodna za rast i opstanak stabla. **Vanjska kora** štiti unutarnju koru i ostatak debla od isušivanja. Sloj ispod vanjske kore je **unutarnja (živa) kora** koja ima transportnu funkciju te provodi produkte fotosinteze od lišća prema ostalim dijelovima



biljke. Između kore i drvnoga tkiva nalazi se dio tvornoga tkiva (meristem) koji omogućuje sekundarni rast biljke, a naziva se **vaskularni kambij**. Kambij stvara dvije vrste provodnog tkiva vaskularnih biljaka; prema unutrašnjosti tvori novi sloj drva (sekundarni ksilem), a prema vani novi sloj unutarnje kore (sekundarni floem).

Na slici 2.6 vidi se tangencijalni presjek kroz vaskularni kambij. Uočavaju se dvije vrste inicijalnih stanica, vretenaste stanice iz kojih će se kasnije razviti uzdužni elementi sekundarnog tkiva (ksilem i floem) te izodijametриčne stanice iz kojih nastaju radijalno orijentirani ksilemski i floemski traci. [1, 3, 8]



**Slika 2.6** Radijalne i izodijametриčne stanice kambija, tangencijalni presjek [1]

U **bjeljici**, živom i metabolički aktivnom dijelu debla, sintetiziraju se i skladište organske molekule lipida i škroba. Kroz ovaj dio debla omogućen je protok vode i mineralnih tvari u smjeru od korijena prema gore. Sloj ispod bjeljike naziva se **srževina**. U stanicama srževine nataložene su biokemijske tvari koje se nazivaju ekstraktivi i kroz ovaj dio je transport vode onemogućen. Količina ekstraktiva utječe na tehnološka i mehanička svojstva drva. Zbog procesa osržavanja, čiji početak ovisi o nizu faktora (staništu, vrsti drva, klimi, tlu, položaju...), mijenja se sadržaj vode u drvu, iz bjeljike nestaje škrob te zbog taloženja sržnih tvari dolazi do promjene boje. Zato je srževina uglavnom tamnije obojena od bjeljike. Vrste kod kojih je osrženi dio puno tamniji od bjeljike zovu se jedričave vrste. Među njih se ubrajaju ariš, bagrem i bor. Vrste kod kojih nije jasno izražena razlika u boji između srževine i bjeljike zovu se bakuljave, a među njih se ubrajaju breza, bukva, jela i lipa. U središtu debla nalazi se **srčika**, jezgra debla sačinjena uglavnom od parenhimnih stanica iz rane faze rasta biljke. [1] Na slici 2.7 vide se predstavnici jedričavih i bakuljavih vrsta.



**Slika 2.7 Poprečni presjek kroz jedričavu (lijevo) i bakuljavu vrstu drva (desno) [1]**

### 2.2.1. Godovi

Rast je složeni proces koji uključuje diobu, elongaciju i diferencijaciju stanica. Tvorno tkivo (meristem) omogućuje stablu da raste, deblja se i obnavlja oštećeno tkivo. Na račun primarnog meristema stablo raste u visinu, a da bi ono moglo rasti u širinu (sekundarn rast) zaslužna su bočna tvorna tkiva u obliku vrlo tankog sloja kambija koji može djelovati kontinuirano ili diskontinuirano. Diskontinuirano funkcioniranje kambija ograničeno je na umjereni zemljopisni pojas gdje kambij djeluje samo tijekom jednog vegetacijskog perioda. Prirast ksilema u tom razdoblju naziva se **god**. Godovi se reproduciraju kao koncentrični krugovi vidljivi na poprečnom presjeku. Kambij je najaktivniji u proljeće, a njegovo djelovanje se postupno smanjuje i završava tijekom ljeta.

U tropskim krajevima kambij u stablima djeluje kontinuirano, i tamo ne dolazi do stvaranja godova, barem ne u onom smislu koji se povezuje uz umjerenu kontinentalnu klimu.

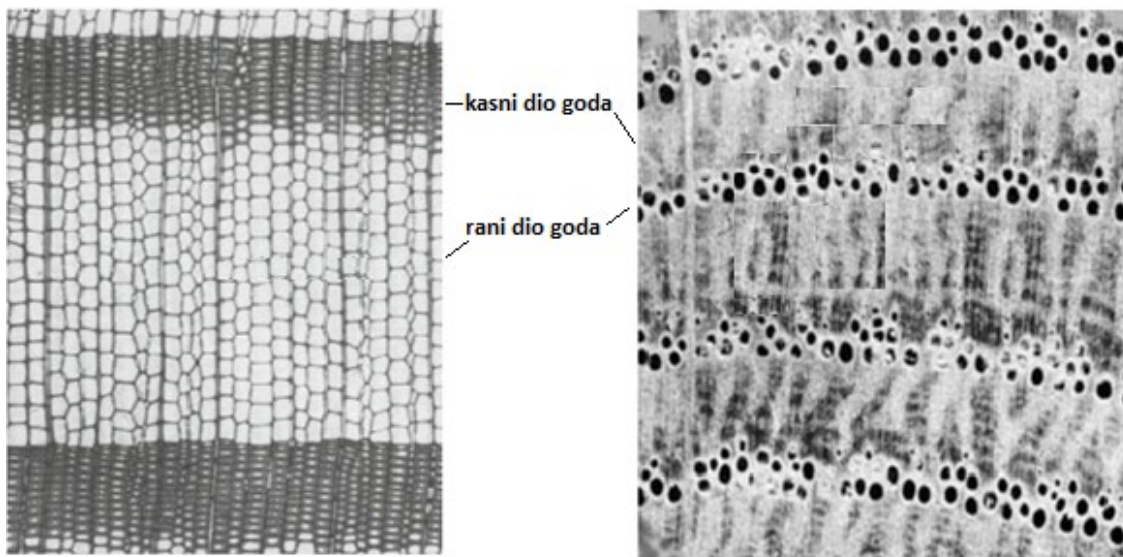
Stanice nastale na početku vegetacijskog razdoblja nazivaju se rani dio goda ili rano drvo. One koje nastaju kasnije čine kasni dio goda ili kasno drvo. [1, 3, 8]

Na slici 2.8 mogu se uočiti rani i kasni dijelovi goda na poprečnom presjeku debla.

Na slici 2.9 prikazana mikrostruktura godova kod četinjača i listača gdje se jasno može vidjeti razlika između drvnih stanica koje nastaju na početku vegetacijskog razdoblja i čine rani dio goda te stanica koje nastaju pri kraju vegetacijskog razdoblja i čine kasni dio goda.



**Slika 2.8** Kasni i rani dio goda na poprečnom presjeku, [9]

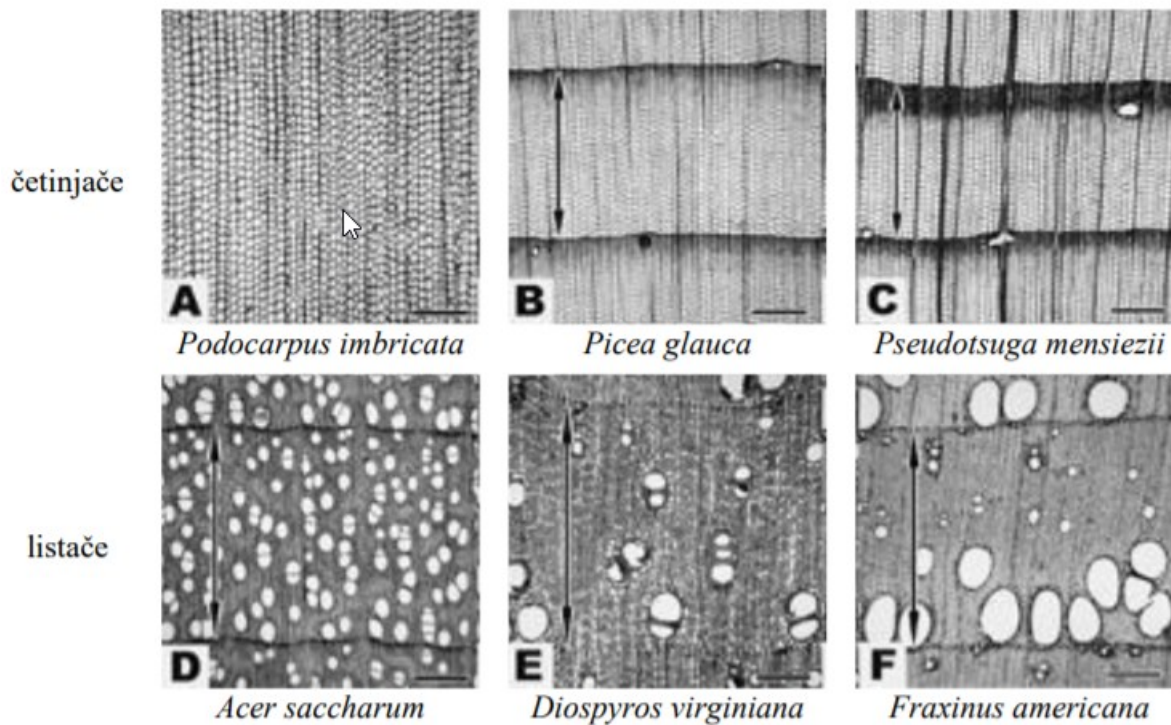


**Slika 2.9** Mikroskopski prikaz ranog i kasnog goda četinjače (lijevo) i listače (desno) [10]

Prema raspodjeli kasnog i ranog segmenta goda, vrste drva mogu se svrstati u tri kategorije: [1, 3]

- vrste kod kojih nema razlike između stanica (provodnih elemenata) ranog i kasnog dijela goda
- vrste kod kojih se unutarnji promjer provodnih elemenata postepeno smanjuje od ranog prema kasnom drvu
- vrste kod kojih se unutarnji promjer provodnih elemenata naglo smanjuje od ranog prema kasnom drvu

Na slici 2.10 prikazana je mikrostruktura triju navedenih kategorija kod četinjača i listača.



**Slika 2.10** Tri karakteristična tipa godova kod četinjača i listača [3]

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

U mikrostruktura listača prisutni su veliki provodni sudovi (pore) i po tome se jasno razlikuje od mikrostrukture četinjača. Prema rasporedu tih provodnih kanala, razlikujemo tri vrste drva listača:

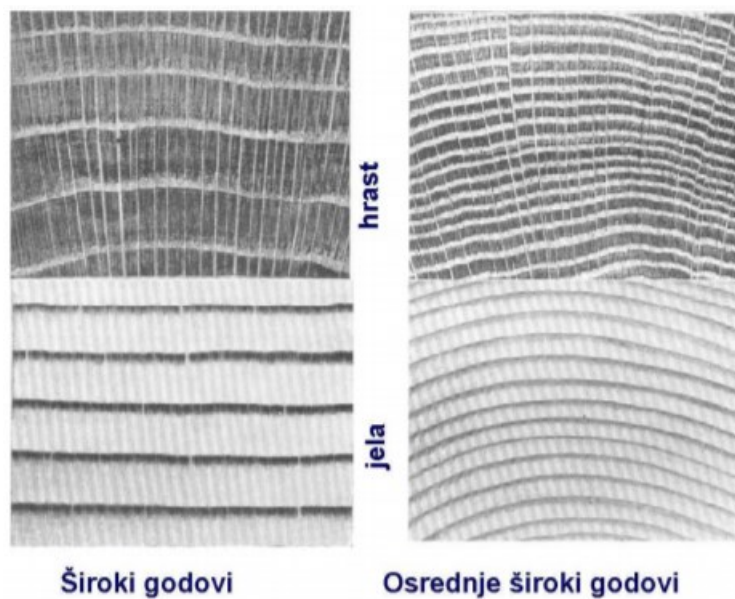
- DIFUZNO ILI RASTRESITO POROZNO DRVO – pore ravnomjerno raspoređene
- SEMI-DIFUZNO POROZNO DRVO – prijelazan oblik
- PRSTENASTO POROZNO DRVO – pore grupirane samo u ranom dijelu goda [1,3]

Godovi se međusobno mogu razlikovati prema:

- načinu rasporeda provodnih sudova (slika 2.10)
- stupnju markantnosti – markantnije je ono drvo kod kojeg su godovi jače izraženi; općenito su godovi markantniji na poprečnom nego na uzdužnom presjeku

- tijekom granične linije – paralelni s periferijom poprečnog presjeka, valoviti i uleknuti
- širni – fini (1/3 cm), polufini (1/3 do 2/3 cm), grubi (širi od 2/3 cm)
- načinu nizanja
- boji – od najsvjetlijih do vrlo tamnih

Na slici 2.11 prikazani su godovi različite širine kod hrasta (listača) i jele (četinjača).



**Slika 2.11** Prikaz godova različite širine [1]

### 2.3. Drvna stanica

Osnovna građevna i funkcionalna jedinica svih biljaka je biljna stanica. Živa biljna stanica građena je od stanične stijenke i protoplasta koji su smješteni unutar stanične stijenke. Stanična stijenka je izgrađena od ugljikohidrata i ima zadaću čuvati unutrašnjost stanice od previsokog osmotskog tlaka te istovremeno osigurati mehaničku potporu i stalan oblik stanice. Kada se govori o drvnoj stanici zapravo se misli na neživu biljnu stanicu, kod koje unutrašnjost nije ispunjena plazmatskim sadržajem. Taj prazni prostor zove se lumen. [11]

#### 2.3.1. Stanična stijenka

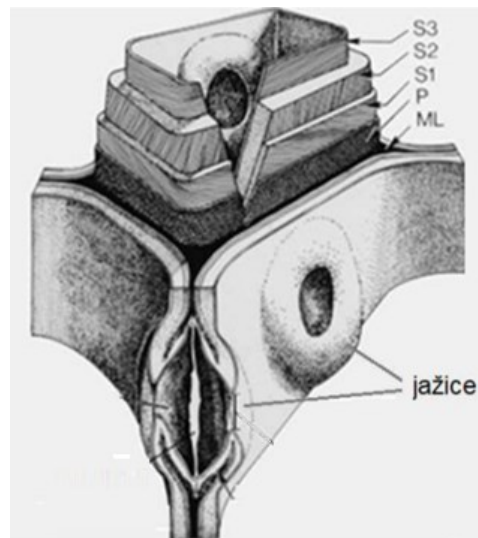
Stanična stijenka je čvrsta struktura koja u drvnoj stanici ima primarni zadatak štititi prazan prostor u svojoj unutrašnjosti (lumen) i na taj način povećati čvrstoću i dati stanici stalni oblik. Stanična stijenka građena je od celuloze, hemiceluloze te pektina i lignina. Makromolekule celuloze grupiraju se u micelle, a više micela čine mikrovlakna. Mikrovlakna se omataju jedna oko drugih i čine makrovlakna, kako je shematski prikazano na slici 2.12. [1, 3, 12]



**Slika 2.12 Formiranje makrovlakana celuloze**

Celulozna mikrovlakna su zajedno sa hemicelulozom ukalupljene u matricu koja je većinski sastavljena od pektina i lignina.

Na slici 2.13 prikazana je građa stanične stijenke koja se sastoji od: središnje lamele (ML), primarnog (P) i triju sekundarnih (S1, S2 i S3). Na slici se vide i jažice, otvori preko kojih su stanice međusobno povezane.



**Slika 2.13 Građa stanične stjenke drvene stanice [3]**

**Središnja lamela** je prostor između primarnih stjenki dviju susjednih stanica, a isto tako omogućuje međusobno povezivanje istih. Tako povezane, stanice mogu obavljati svoju funkciju – provođenje vode i tvari. Na središnju lamelu nastavlja se **primarni sloj** koji je građen od dugih mikrovlakana celuloze koja su u odnosu na središnju os stanice smještena pod kutom od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ . Ispod primarnog sloja nalazi se **sekundarni sloj** sastavljen od tri dijela. Prvi je relativno tanak (S1), a lanci celuloze omataju lumen pod kutom od  $50^\circ$  do  $70^\circ$  s obzirom na uzdužnu os. Drugi dio sekundarnog sloja (S2) je najdeblji i najviše utječe na svojstva stanične stjenke i drva u cjelini. Sadrži manji udio lignina nego prethodno opisani dijelovi, a kut između vlakana i središnje osi varira od  $5^\circ$  do  $30^\circ$ . Treći i posljednji dio (S3) sadrži najmanje lignina, a mikrovlakna su omotana pod kutom većim od  $70^\circ$ . [13]

#### 2.4. Mikrostruktura četinjača

Struktura četinjača na mikroskopskoj razini puno je jednostavnija od strukture listača. Većinski dio strukture zauzimaju traheide i parenhimske stanice.

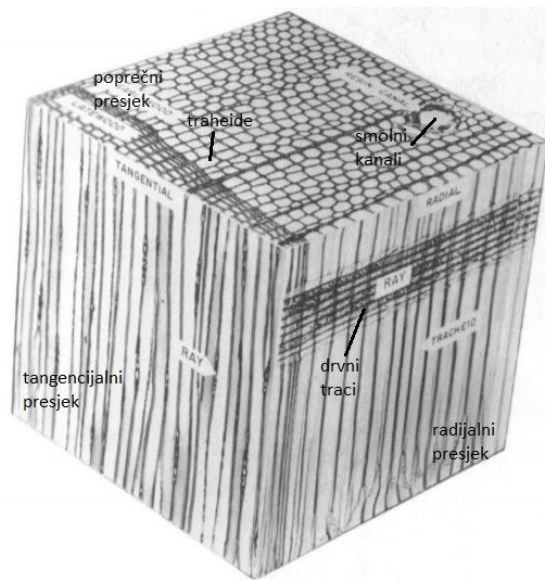
**Traheide**, koje čine 90% volumnog udjela četinjača, su provodne stanice koje karakterizira znatno veća duljina nego širina (100:1), a zadaća im je provođenje vode i mehanički suport. Smještene su u aksijalnom (uzdužnom) sustavu. Prema debljini stanične stjenke i veličini lumena jasno se mogu razlikovati traheide koje čine rani odnosno kasni dio goda. Tako traheide, koje su dio ranoga goda, imaju tanju staničnu stjenku i veći lumen jer u tom razdoblju stablo ima na raspolaganju veću količinu vode pa sukladno tome treba i veći volumni protok kroz prazni prostor unutar stanične stjenke. S druge strane, traheide kasnoga goda imaju deblju staničnu stjenku i manji lumen i više doprinose čvrstoći i mehaničkoj potpori debla.

**Smolni kanali** mogu biti prisutni i u aksijalnom i u radijalnom sustavu nekih četinjača (bor, ariš, smreka...). To su šupljine oko kojih se koncentriraju parenhimske stanice i proizvode smolu. Radijalni smolni kanali uklopljeni su u drvne trake koji su zbog toga puno širi od drvnih traka koji ne sadrže smolne kanale. Kod određenih vrsta četinjača, kao odgovor na mehanička oštećenja mogu se formirati klasteri smolnih kanala.

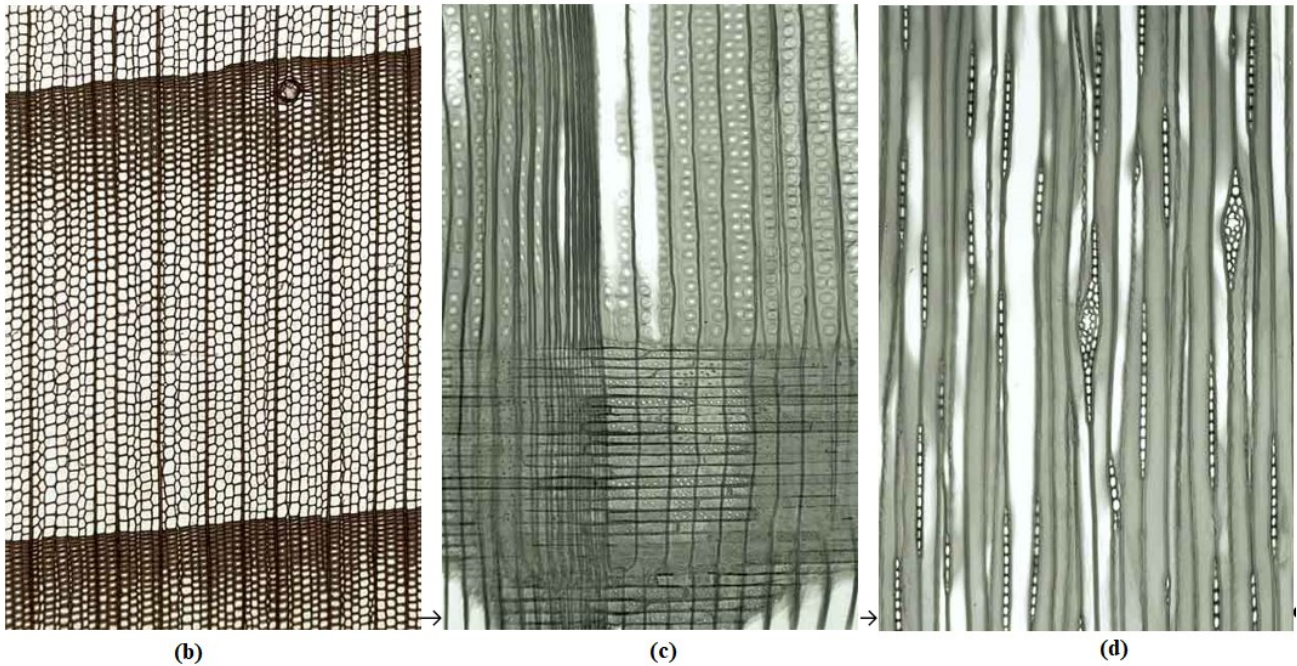
**Drvni traci** sastavljeni su od parenhimskih stanica te čine osnovu radijalnog sustava od srčike prema kori debla. Osnovni zadatak ovih stanica je sinteza, skladištenje i lateralni transport biokemijskih tvari. Duljina im je u većoj mjeri dominantnija u odnosu na širinu koja oscilira u ovisnosti o tome jesu li u njihovu građu uklopljeni smolni kanali. Na području gdje se parenhimske stanice križaju s traheidama formiraju se posebni pitovi preko kojih surađuju aksijalni i radijalni sustav unutar četinjača. [3, 11, 14]

Na slici 2.14 prikazana je trodimenzionalna mikrostruktura četinjača (a) i mikrostruktura obične smreke u poprečnom (b), radijalnom (c) i tangencijalnom (d) presjeku.





(a)



(b)

(c)

(d)

Slika 2.14 Mikrostruktura četinjača

(a) trodimenzionalni prikaz [1]

(b) mikrostruktura smreke u poprečnom presjeku [15]

(c) mikrostruktura smreke u radijalnom presjeku [15]

(d) mikrostruktura smreke u tangencijalnom presjeku [15]

## 2.5. Mikrostruktura listača

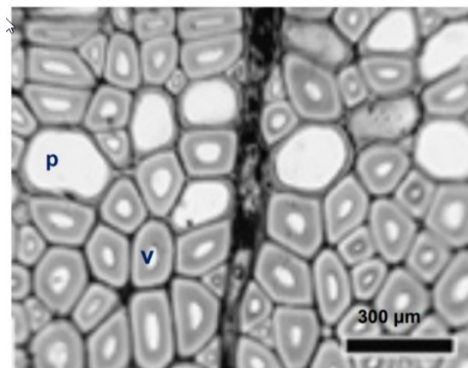
U usporedbi s četinjačama, listače imaju znatno složeniju strukturu jer u aksijalnom sustavu sadrže tri vrste stanica, drvena vlakanca, traheje (pore) i traheide, a radijalni sustav izgrađen je od parenhimnih stanica koje se razlikuju po veličini i obliku.

**Traheje** ili pore su strukturni elementi na temelju kojih se listače na prvu razlikuju od četinjača. Smještene su u uzdužnome sustavu, puno su manje duljine nego traheide i velikog su promjera (preko 300  $\mu\text{m}$ ) te iz tog razloga omogućuju protjecanje velike količine vode od korijena prema ostalim dijelovima stabla. Međusobno su povezane preko perforiranih površina i na isti ili sličan način su spojene s radijalnim sustavom.

**Drvena vlakanca** su duguljasti elementi koje obilježava puno deblja stanična stijenka i manji lumen. Sukladno tome, oni intenzivno doprinose mehaničkoj potpori drva. O debljini stijenke ovisit će gustoća i čvrstoća svake pojedine vrste.

Aksijalni sustav čine i **parenhimske stanice** koje imaju tanku stijenku i veliki lumen, a po građi su istovjetne s onima kod četinjača, samo što se kod listača pojavljuju nešto češće i u različitim formacijama ovisno o vrsti. U uzdužnom sustavu mogu se naći i traheide, duljinom kraće od drvnih vlakanca, ali i dalje obavljaju svoju provodnu funkciju. [3, 11, 16]

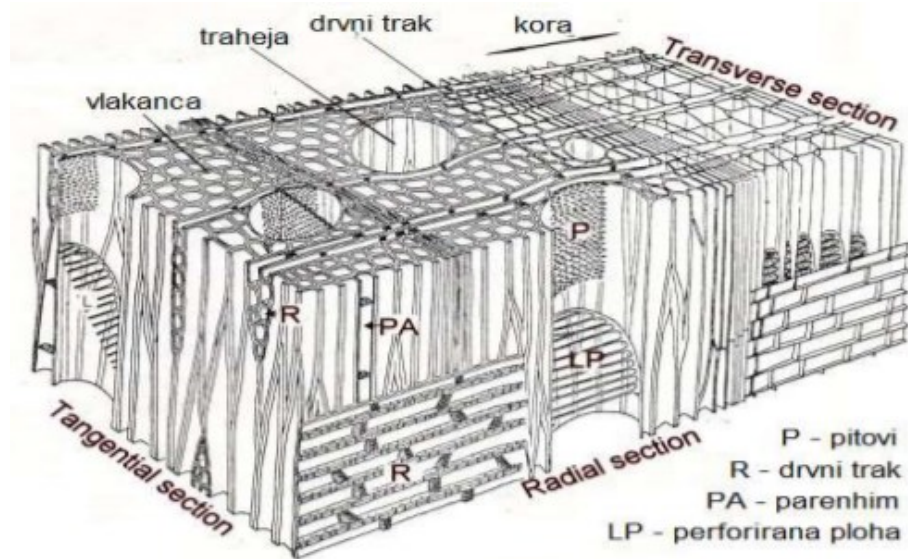
Na slici 2.15 vidi se poprečni presjek vlakanca i parenhimskih stanica.



**Slika 2.15** Drvena vlakanca (v) i parenhimne stanice (p) pod mikroskopom [3]

U radijalnom sustavu prepoznatljivi su drveni traci koji se kod listača pojavljuju u puno više oblika nego kod četinjača. Sadrže 1 do 5 stanica u širinu, a visine im je oko 1 mm.

Na slici 2.16 vidi se trodimenzionalni prikaz strukture listača.



Slika 2.16 Trodimenzionalni prikaz mikrostrukture listača [1]

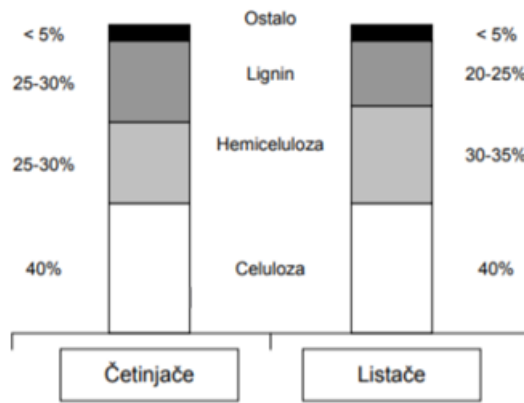
## 2.6. Kemijski sastav drva

Drveno tkivo se na elementarnoj razini sastoji od ugljika, kisika i vodika. Udjeli navedenih elemenata prikazani su u tablici 2.1.

Tablica 2.1 Elementarni sastav drva [3]

ELEMENT	UDIO
Ugljik (C)	50 %
Kisik (O)	44 %
Vodik (H)	6 %
Dušik (N)	1 %

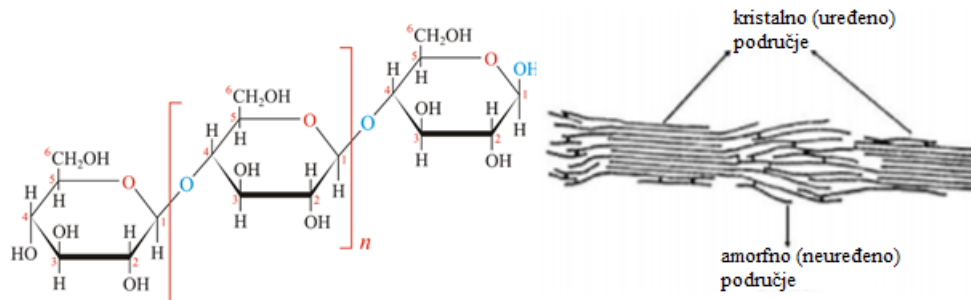
Na razini slojeva drveno tkivo sastoji se od umreženih lanaca celuloze i hemiceluloze (65-75 %) te lignina (18-35 %). Osim glavnih strukturnih makromolekula, u tragovima se pronalaze ekstraktivi i anorganske tvari. Općeniti sastav drva listača i četinjača prikazan je na slici 2.17. [3]



**Slika 2.17 Usporedba molekularnog sastava četinjača i listača [17]**

**Celuloza** je bijela vlaknasta tvar netopljiva u vodi i organskim otapalima, ujedno najrasprostranjeniji polisaharid i organski spoj na zemlji. Isto tako, celuloza je ugljikohidratni polimer, čiji stupanj polimerizacije tj. broj glukoznih jedinica u makromolekuli može dosegnuti i 15000. Njezine molekule dijelom čine kristaličnu strukturu (65 %), a dijelom amorfnu (35 %). U unutrašnjosti četinjača celuloza je zastupljena oko 45 %, a kod listača između 38 i 49 %. [2, 18]

Na slici 2.18 prikazan je kemijski sastav celuloze i mogući načini slaganja makromolekula.



**Slika 2.18 Kemijski sastav celuloze (lijevo); amorfno i kristalično područje celuloze (desno) [1, 18]**

**Hemiceluloza**, isto kao i celuloza, je ugljikohidratni polimer kod kojeg je razina polimerizacije makromolekula dosta niža i sadrži otprilike 100-200 glukoznih jedinica. Također se može definirati kao polisaharid s razgranatom strukturom. Drvo četinjača sadrži između 7 do 14 % hemiceluloze, dok kod listača taj postotak raste do 26 %.

**Lignin** je ne-ugljikohidratni, amorfni, heterogeni organski polimer koji povezuje celulozna vlakna u izrazito čvrstu izvanstaničnu strukturu. Stupanj polimerizacije se teško određuje zbog raznovrsnih strukturnih jedinica koji mogu varirati od vrste do vrste, a temeljna uloga mu je povećanje stabilnosti i krutosti stjenke. Važno svojstvo lignina je hidrofobnost jer na osnovu toga olakšava se provod vode kroz lumen. Kod četinjača udio lignina je 25 do 35 %, a kod listača 18 do 25 %.

**Pektini, škrob i proteini** su ugljikohidratni polimeri koji se nalaze u strukturi kako listača tako i četinjača. Pektin je heteropolisaharid, ima ga u središnjoj lameli i u membrani graničnih jažica. Škrob je osnovni rezervni polisaharid u drvu, sintetizira se iz glukoze i pohranjen je u obliku škrobnih zrnaca, a može se naći u staničnoj stjenki.

Ostale molekule koje se mogu naći u strukturi stanične stjenke su neznatne količine **anorganskih tvari** i prirodni produkti nastali ekstrakcijom iz biljnih sokova, koji su u većoj koncentraciji kod četinjača nego kod listača. Postoje različite vrste **ekstrahiranih tvari** za koje se ne zna točna uloga, ali se povezuje sa skladištenjem hrane, zaštitom od kukaca ili kao reakcija na različita mehanička oštećenja. [2, 3, 19]

## 2.7. Gustoća drva [1, 3, 20]

Gustoća drva je fizikalno svojstvo drva, ovisno o sadržaju vode, a definira se kao odnos između volumena drvene tvari (materijala stanične stjenke) i volumena šupljine (lumena), s tim da je gustoća drvena tvari podjednaka za sve vrste i iznosi 1,53 g/cm<sup>3</sup>.

Općenito, gustoća predstavlja omjer mase i volumena i računa se prema izrazu:

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

gdje je:

$\rho$  – gustoća, g/cm<sup>3</sup>

$m$  – masa uzorka, g

$V$  – volumen uzorka, cm<sup>3</sup>

Kako je gustoća drva usko povezana sa sadržajem vlage u istom, potrebno je odrediti postotak vlage pri određivanju gustoće. Izraz za računanje gustoće pri određenom udjelu vlage glasi:

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

gdje je:

$\rho_w$  – gustoća pri nekom udjelu vlage, g/cm<sup>3</sup>

$m_w$  – masa uzorka pri nekom udjelu vlage, g

$V_w$  – volumen uzorka pri nekom udjelu vlage, cm<sup>3</sup>

Ako se gustoća uzorka računa u apsolutno suhom stanju tada formula glasi:

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

gdje je:

$\rho_0$  – gustoća u apsolutno suhom stanju, g/cm<sup>3</sup>

$m_0$  – masa uzorka u apsolutno suhom stanju, g

$V_0$  – volumen uzorka u apsolutno suhom stanju, cm<sup>3</sup>

Međutim, ponekada je potrebno preračunati izračunatu gustoću za udio vlage od 12 %, pa se s toga koristi izraz u nastavku:

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

Važno je napomenuti da je gustoća drva obrnuto proporcionalna poroznosti što znači da što je veća gustoća drva, to je manji volumen pora. [16]

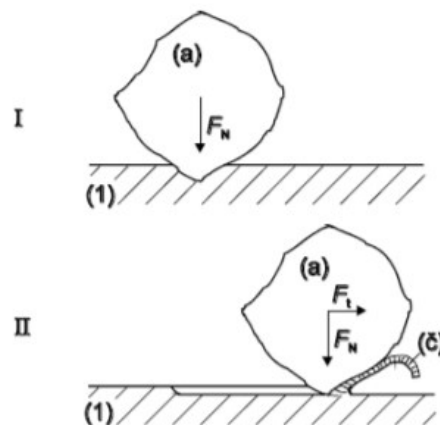
### 3. ABRAZIJA

#### 3.1. Otpornost na trošenje

Od četiri moguća mehanizma trošenja, kod mehaničkog trošenja drva najučestaliji je abrazivski mehanizam trošenja. Ovaj mehanizam nastaje pri relativnom gibanju tvrdih čestica po površini drva. Iako je trošenje određeno s nizom parametara glavni utjecajni faktori su tvrdoća, granica razvlačenja, gustoća i orijentacija mikrostrukture. Na osnovi do danas napravljenih istraživanja zna se da se najveća otpornost abrazijski postiže na poprečnom presjeku te da se radijalni presjek troši nešto više u odnosu na tangencijalni presjek. Također je poznato da se difuzno porozne vrste troše u manjoj količini od prstenasto poroznih vrsta. Na intenzitet trošenja također utječe i veličina abrazivnih čestica.[20, 21]

#### 3.2. Mehanizam trošenja abrazijskim

Abrazija je jedan od mehanizama trošenja kod kojeg dolazi do istiskivanja osnovnog materijala tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Jedinični događaji abrazijski se mogu podijeliti u dvije faze kako je prikazano na slici 3.1. [22]



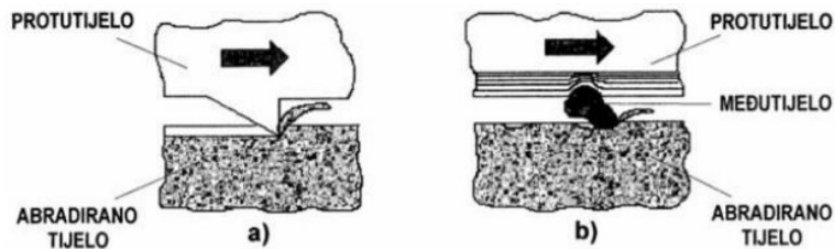
Slika 3.1 Jedinični događaji prilikom abrazijskog mehanizma trošenja [22]

1. faza – prodiranje abraziva u površinu materijala zbog djelovanja normalne komponente sile ( $F_N$ )
2. faza – istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja pod djelovanjem tangencijalne komponente opterećenja ( $F_t$ )

Prema broju tijela koje sudjeluju u kontaktu mehanizam trošenja je moguće podijeliti u dvije skupine: [22]

- kada se u tribosustavu nalaze 2 funkcionalna tijela; abrazivno tijelo i protutijelo (tokarenje, glodanje, brušenje...)
- kada su u dodiru nalaze tri tijela, odnosno pored abrazivnog tijela i protutijela postoji još međutijelo to jest čestica koja se giba slobodno između dva funkcionalna dijela.

Na slici 3.2 vide se oba tipa tribosustava.



**Slika 3.2 Tribosustav od dva funkcionalna tijela (a); tribosustav od dva funkcionalna tijela i međutijela (b) [22]**

Odnošenje materijala izraženije je u dodiru samo dva tijela jer u drugome slučaju međutijelo samo 10 % vremena provede u skidanju materijala dok se u preostalom vremenu slobodno giba ne obavljajući nikakvu funkciju. [22]

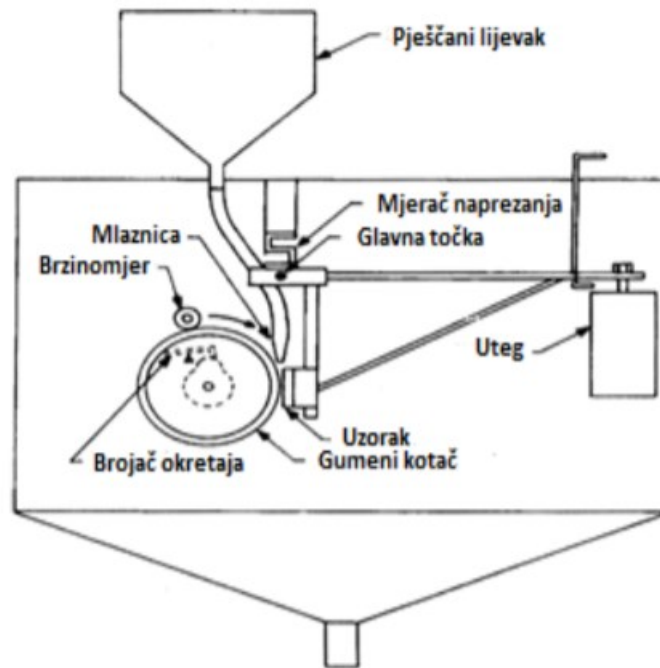
### 3.3. Metoda „suhi pijesak – gumeni kotač“,

Metoda „suhi pijesak-gumeni kotač“ simulira abrazijsko trošenje u slučaju tri tijela u dodiru i uključuje abrazijsko trošenje standardnog uzorka s česticama (abrazivom) kontrolirane veličine i sastava. Abrazivno sredstvo se dovodi između uzorka i kotača koji je građen od klorobutilne gume ili naplatka određene tvrdoće i uz to se rotira u istom smjeru u kojem curi suhi pijesak u slobodnom padu. Standardni uređaj za ovu metodu se sastoji od: [22]

- čeličnog kotača s naplatkom gume promjera 228×12,77 mm
- pješčanog lijevka povezanog preko cijevi s brizgalicom koja dopušta protok od 250 do 350 g/min
- kočnice koja zaustavlja motor nakon određenog broja okretaja
- poluga koja pritišće uzorak na kotač.



Na slici 3.3 prikazana je skica uređaja za ispitivanje otpornosti na abrazivsko trošenje metodom „suhi pijesak – gumeni kotač“.



Slika 3.3 Skica uređaja za metodu „suhi pijesak/gumeni kotač“ [22]

Standardni uzorak je pravilna četverostrana prizma širine 25 mm, visine 75 mm i debljine od 3 do 13 mm. Osim dimenzija potrebno je poznavati i gustoću materijala kako bi se izračunala promjena volumena nakon gubitka mase uslijed ispitivanja.

Tablica 3.1 Moguće varijante metode "suhi pijesak/gumeni kotač" [23]

Varijanta postupka	Sila na uzorak, N	Broj okretaja kotača
A	130	6000
B	130	2000
C	130	100
D	45	6000

Samo ispitivanje se provodi prema sljedećim koracima:

1. čišćenje i vaganje uzorka
2. postavljanje i učvršćivanje uzorka u čeljust
3. puštanje pijeska
4. pokretanje kotača koji je pogonjen motorom
5. pomicanje uzorka kako bi se ostvario kontakt s kotačem
6. zaustavljanje kotača i curenja pijeska
7. skidanje uzorka
8. čišćenje i vaganje uzorka kako bi se utvrdila izgubljena masa

Nedostatak ove metode ispitivanja abrazije je u tome što uslijed trenja između 3 tijela u dodiru dolazi do gubitka mase i površine uzorka pa se sukladno tome povećava kontaktna površina između kotača i uzorka. Zbog toga se ne može direktno usporediti gubitak mase između uzoraka.

[23]

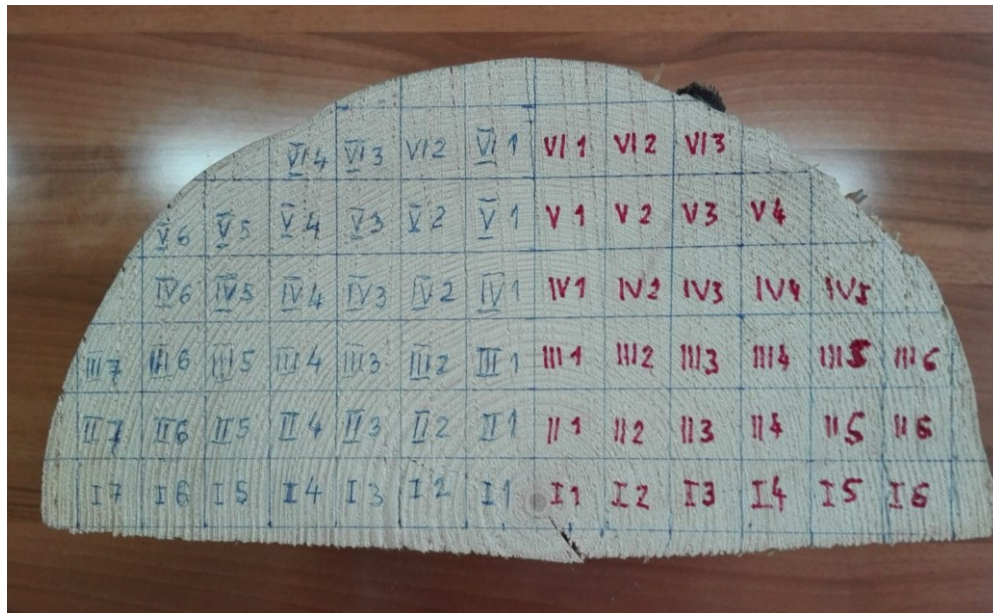
## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

### 4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja

Cilj rada bio je istražiti utjecaj orijentacije strukture na abrazijska svojstva drva obične smreke. S obzirom na kut koji trošena (ispitivana) površina zatvara s tangentom na god, uzorak se zakretao u rasponu od 0° do 90°. Testiranje se provodilo metodom „suhi pijesak - gumeni kotač“, a kasnije su se na temelju abradirane mase uzoraka i provedene statističke analize podataka donose zaključci o otpornosti drva na abrazijski mehanizam trošenja.

### 4.2. Materijal za ispitivanje

Provođenje eksperimentalnog dijela rada, odnosno trošenje pripremljenih uzoraka provedeno je u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, na uređaju koji simulira abrazijski mehanizam trošenja materijala. Primijenjena metoda „suhi pijesak - gumeni kotač“ standardizirana je po standardu ASTM G 65-94 te omogućuje četiri varijante koje se razlikuju prema primijenjenoj sili i brzini okretaja kotača koje se izabiru sukladno ispitivanom materijalu. Osim parametara ispitivanja, normom se propisuju oblik i dimenzije uzoraka, pa su korišteni uzorci u ovom radu dimenzija 25×25×85 mm. Uzorci su izrezani iz polovice debla na tračnoj pili. Raspored uzoraka na poprečnom presjeku polovice debla prikazan je na slici 4.1, a izrezivanje uzoraka na tračnoj pili vidi se na slici 4.2.



**Slika 4.1** Raspored uzoraka na poprečnom presjeku



**Slika 4.2 Izrezivane uzoraka na strojnoj pili**

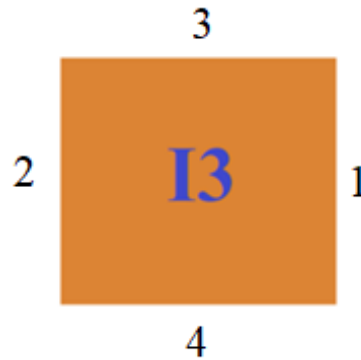
Nakon izrezivanja uzorci su pregledani, zadržani su reprezentativni uzorci, a oni s greškama i nepravilnostima (najčešće kvrgama) se odbacuju. Na slici 4.3 prikazani su izrezani uzorci spremni za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje.



**Slika 4.3 Izrezani i pripremljeni uzorci za ispitivanje**

Sustav označavanja uzoraka prikazan je na slici 4.4. Boja određuje iz koje četvrtine presjeka je uzet uzorak, rimski broj označava pripadnost redu, a arapski stupcu.

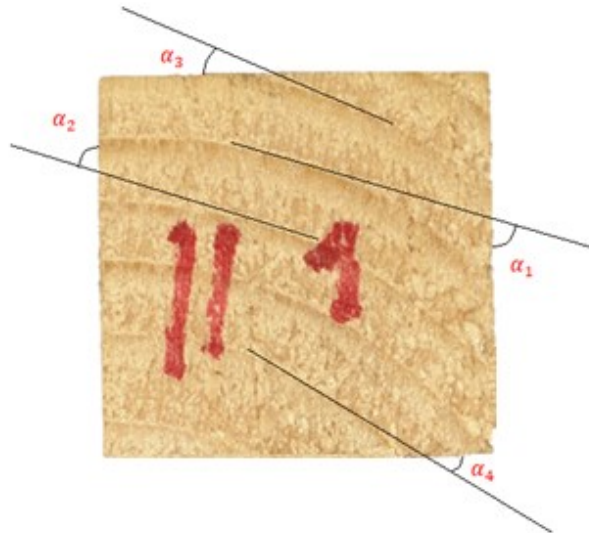
Radi lakšeg razumijevanja i unošenja podataka prilikom ispitivanja, površine na kojima se ispitivalo trošenje označene su brojevima od 1 do 4, kako je prikazano na slici.



**Slika 4.4 Shema označavanja uzorka**

### 4.3. Ispitivanje abrazijskog trošenja

Prije samog ispitivanja abrazijskog trošenja na uzorcima su izmjereni kutovi koje tangente na godove zatvaraju s trošenom površinom dimenzija 25 mm × 85 mm. Na slici 4.5 prikazan je način na koji su određivani kutovi.

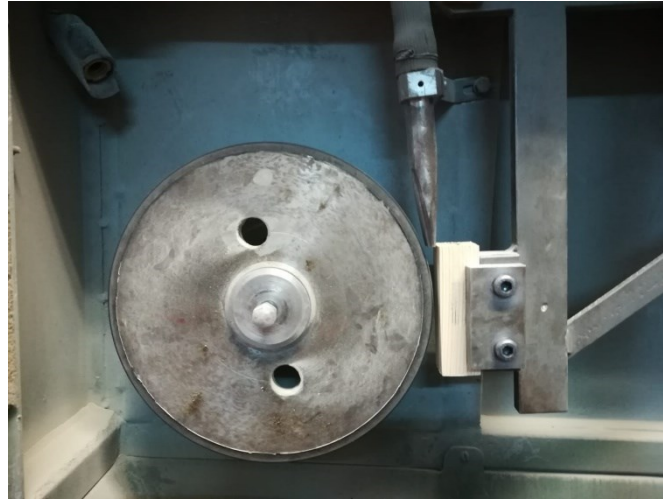


**Slika 4.5 Kutovi između tangente na godove i trošene površine**

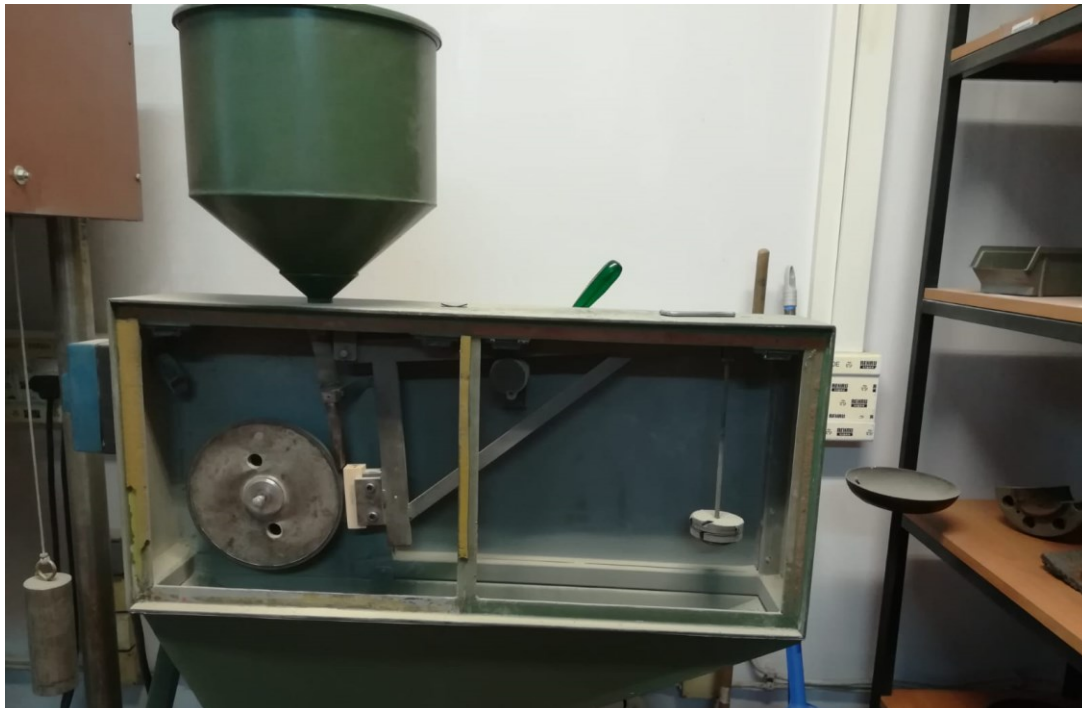
Uzorcima je prije abrazijskog ispitivanja izmjerena masa. Nakon toga uzorci se stavljaju i pričvršćuju u nosač, a zatim se sustavom poluga ispitivana površina pritišće uz gumeni kotač. Brzina okretanja

gumenog kotača je  $100 \text{ min}^{-1}$ . Između uzorka i kotača kroz sapnicu curi mlaz pijeska ( $\text{SiO}_2$  – silicijev dioksid) u slobodnom padu i abradira ispitivanu površinu. Sila kojom je uzorak pritisnut na gumeni kotač iznosila  $45 \text{ N}$ , a abradiranje svake površine trajalo je 30 sekundi. Prilikom abradiranja svih površina, uzorci su u čeljusti bili postavljeni s oznakom prema gore. Na taj način izbjegnuto je utjecaj usmjerenosti vlaknaca na rezultate ispitivanja.

Na slici 4.6 prikazan je uzorak prislonjen uz gumeni kotač, a na slici 4.7 uređaj za ispitivanje.



**Slika 4.6**      **Uzorak u čeljusti uređaja**



**Slika 4.7**      **Uređaj za ispitivanje abrazijskog trošenja**

Nakon što je provedeno abradiranje površine mjeri se gubitak mase na preciznoj vagi prikazanoj na slici 4.8.



**Slika 4.8**      **Precizna vaga Ohaus Analytical Plus**

#### 4.4. Rezultati mjerenja

U tablici 4.1. prikazani su rezultati mjerenja gubitka mase i pripadajući kutovi za sve četiri abradirane površine. U zadnjem stupcu prikazan je ukupni gubitak mase za svaki uzorak. Slovo A označava uzorke iz lijevog kvadranta, a slovo B iz desnog

**Tablica 4.1 Gubitak mase pri abrazijskom trošenju za I redak, g**

Uzorak	$m_0$	$\alpha_1, ^\circ$	$\alpha_2, ^\circ$	$\alpha_3, ^\circ$	$\alpha_4, ^\circ$	$\Delta m_{uk}$
		$\Delta m_1$	$\Delta m_2$	$\Delta m_3$	$\Delta m_4$	
<b>A I3</b>	19,1473	0	0	90	90	0,4149
		0,1387	0,1686	0,0652	0,0424	
<b>A I4</b>	23,7864	0	0	90	90	0,4161
		0,1142	0,1767	0,0470	0,0782	
<b>A I5</b>	23,2704	0	0	90	90	0,3949
		0,1294	0,1803	0,0395	0,0457	
<b>A I6</b>	23,3284	0	0	90	90	0,3510
		0,0968	0,1553	0,0510	0,0479	
<b>A I7</b>	21,3848	0	0	90	90	0,4095
		0,0989	0,1925	0,0614	0,0567	
<b>B I2</b>	20,5645	0	0	90	90	0,4356
		0,1343	0,1789	0,0647	0,0577	
<b>B I3</b>	24,2107	0	0	90	90	0,3868
		0,1232	0,1532	0,0403	0,0701	
<b>B I4</b>	27,0138	10	12	90	90	0,3787
		0,1319	0,1270	0,0841	0,0357	
<b>B I5*</b>	24,4037	15	10	75	83	0,3648
		0,1425	0,1377	0,0657	0,0189	
<b>B I6</b>	23,6656	10	80	78	82	0,3711
		0,1302	0,1455	0,0534	0,0420	



U tablicama od 4.2. do 4.5. prikazan je gubitak mase za uzorke od drugog do šestog retka.

**Tablica 4.2 Gubitak mase pri abrazijskom trošenju za II redak, g**

Uzorak	$m_0$	$\alpha_1, ^\circ$	$\alpha_2, ^\circ$	$\alpha_3, ^\circ$	$\alpha_4, ^\circ$	$\Delta m_{uk}$
		$\Delta m_1$	$\Delta m_2$	$\Delta m_3$	$\Delta m_4$	
A III	21,1707	72	68	22	18	0,5193
		0,1619	0,1797	0,0760	0,1017	
A II2	23,2582	45	35	65	45	0,4787
		0,1259	0,2023	0,0996	0,0500	
A II3	22,6462	33	25	55	65	0,4438
		0,1202	0,1713	0,0853	0,0670	
A II4	24,7466	25	23	68	72	0,4325
		0,1124	0,1844	0,0797	0,0560	
A II5	22,1914	30	20	73	80	0,4213
		0,1127	0,1568	0,1000	0,0518	
A II6	21,2848	22	20	70	78	0,4320
		0,1056	0,1670	0,0878	0,0716	
A II7	21,5599	19	20	75	82	0,5468
		0,1370	0,1967	0,0964	0,1167	
B III	23,1422	51	80	20	28	0,4705
		0,0928	0,1958	0,0966	0,0853	
B II2	21,1008	36	40	47	61	0,4453
		0,1267	0,1520	0,1202	0,0464	
B II3	21,2728	25	23	61	72	0,4344
		0,1213	0,1558	0,1222	0,0351	
B II4	24,7529	20	13	68	81	0,3786
		0,1150	0,1530	0,0746	0,0360	
B II5	26,7995	11	9	79	83	0,4067
		0,1090	0,1255	0,1031	0,0691	
B II6*	27,7941	0	0	90	90	0,3780
		0,1067	0,1241	0,0774	0,0698	

Tablica 4.3 Gubitak mase pri abrazijskom trošenju za III redak, g

Uzorak	$m_0$	$\alpha_1, ^\circ$	$\alpha_2, ^\circ$	$\alpha_3, ^\circ$	$\alpha_4, ^\circ$	$\Delta m_{uk}$
		$\Delta m_1$	$\Delta m_2$	$\Delta m_3$	$\Delta m_4$	
A III1	23,2836	85	71	18	16	0,4269
		0,0728	0,1574	0,0939	0,1028	
A III2	26,7674	62	60	29	32	0,4519
		0,0998	0,1457	0,0927	0,1137	
A III3	25,4594	51	53	36	46	0,4039
		0,0852	0,1698	0,0919	0,0570	
A III4	25,4024	45	38	42	58	0,4241
		0,0906	0,1891	0,0935	0,0509	
A III5	24,0491	40	35	51	65	0,4923
		0,1163	0,1900	0,0899	0,0961	
A III6	22,2206	30	30	55	60	0,5180
		0,1237	0,2020	0,1001	0,0922	
A III7	23,4834	27	28	62	70	0,5734
		0,1374	0,2362	0,0922	0,1076	
B III1	25,0904	70	82	18	10	0,4697
		0,1026	0,1477	0,1128	0,1066	
B III2	25,6874	61	56	31	37	0,4272
		0,0929	0,1298	0,0786	0,1259	
B III3	22,2380	45	48	42	48	0,4135
		0,0963	0,1141	0,1145	0,0886	
B III4	19,1023	35	37	51	53	0,4265
		0,1301	0,1107	0,1127	0,0730	
B III5	21,6559	25	22	58	68	0,5002
		0,1371	0,1767	0,1062	0,0802	
B III6	23,0102	22	20	60	65	0,5082
		0,1134	0,2042	0,1027	0,0879	

Tablica 4.4 Gubitak mase pri abrazijskom trošenju za IV redak, g

Uzorak	$m_0$	$\alpha_1, ^\circ$	$\alpha_2, ^\circ$	$\alpha_3, ^\circ$	$\alpha_4, ^\circ$	$\Delta m_{uk}$
		$\Delta m_1$	$\Delta m_2$	$\Delta m_3$	$\Delta m_4$	
A IV1	21,4708	82	75	10	7	0,4103
		0,0766	0,1576	0,0997	0,0764	
A IV2	23,8025	72	62	28	25	0,4107
		0,0929	0,1205	0,1148	0,0825	
A IV3	26,4357	70	60	21	31	0,4356
		0,0878	0,1702	0,0944	0,0832	
A IV4	23,3260	59	55	28	36	0,3886
		0,0730	0,1656	0,0798	0,0702	
A IV5	20,4187	48	45	48	47	0,5189
		0,1222	0,1989	0,0884	0,1094	
A IV6	19,3668	40	36	50	55	0,5223
		0,1314	0,2040	0,0895	0,0974	
B IV1	23,5225	70	85	16	6	0,4187
		0,0871	0,1141	0,1233	0,0942	
B IV2*	29,1681	66	62	30	32	0,4445
		0,1372	0,1152	0,0917	0,1004	
B IV3	20,1388	58	60	29	32	0,4622
		0,1182	0,1103	0,1257	0,1080	
B IV4*	17,4525	45	45	47	46	0,5580
		0,1459	0,1549	0,1408	0,1164	

Tablica 4.5 Gubitak mase pri abrazijskom trošenju za V redak, g

Uzorak	$m_0$	$\alpha_1, ^\circ$	$\alpha_2, ^\circ$	$\alpha_3, ^\circ$	$\alpha_4, ^\circ$	$\Delta m_{uk}$
		$\Delta m_1$	$\Delta m_2$	$\Delta m_3$	$\Delta m_4$	
A VI	22,1606	90	90	8	7	0,4918
		0,1370	0,1613	0,1011	0,0924	
A V5	22,8586	62	58	30	33	0,4964
		0,1317	0,2000	0,0861	0,0786	
B VI	22,6648	71	82	12	11	0,5131
		0,1295	0,1866	0,0829	0,1141	
B V4	18,6736	57	60	45	35	0,5457
		0,1408	0,1507	0,1299	0,1243	

Tablica 4.6 Gubitak mase pri abrazijskom trošenju za VI redak, g

Uzorak	$m_0$	$\alpha_1, ^\circ$	$\alpha_2, ^\circ$	$\alpha_3, ^\circ$	$\alpha_4, ^\circ$	$\Delta m_{uk}$
		$\Delta m_1$	$\Delta m_2$	$\Delta m_3$	$\Delta m_4$	
A VII	21,5559	90	90	0	0	0,4554
		0,1115	0,1798	0,0782	0,0859	
A VI3	23,0664	71	60	22	26	0,4730
		0,1369	0,1589	0,1025	0,0747	
B VII	20,5567	83	82	10	12	0,5165
		0,1369	0,1531	0,1122	0,1116	

Kako je glavni cilj rada bio povezati intenzitet abrazijskog trošenja i usmjerenost strukture u tablici 4.7 prikazani su rezultati mjerenja gubitka mase za pojedine kutove (kako je objašnjeno na slici 4.5). Zbog ponavljanja određenih kutova, odnosno kod više mjerenja za isti kut, u tablici je prikazana prosječna vrijednost gubitka mase.

Tablica 4.7 Gubitak mase za izmjerene kutove

kut mjerenja $\alpha_i, ^\circ$	gubitak mase $\Delta m_i, g$	kut mjerenja $\alpha_i, ^\circ$	gubitak mase $\Delta m_i, g$	kut mjerenja $\alpha_i, ^\circ$	gubitak mase $\Delta m_i, g$
0	0,1360	30	0,1036	59	0,0730
6	0,0942	31	0,0809	60	0,1393
7	0,0844	32	0,1074	61	0,0872
8	0,1233	33	0,0994	62	0,1119
9	0,1255	35	0,1499	65	0,0876
10	0,1212	36	0,1232	66	0,1372
11	0,1116	37	0,1183	68	0,1381
12	0,1072	38	0,1891	70	0,0946
13	0,1530	40	0,1332	71	0,1413
15	0,1425	42	0,1040	72	0,0865
16	0,1131	45	0,1241	73	0,1000
18	0,1028	46	0,0867	75	0,1066
19	0,1370	47	0,1235	78	0,0716
20	0,1390	48	0,1033	79	0,1031
21	0,0944	50	0,0895	80	0,1238
22	0,1152	51	0,0952	81	0,0360
23	0,1558	53	0,1214	82	0,1205
25	0,1253	55	0,1121	83	0,0759
27	0,1374	56	0,1298	85	0,0728
28	0,1290	57	0,1408	90	0,0720
29	0,1092	58	0,1188		

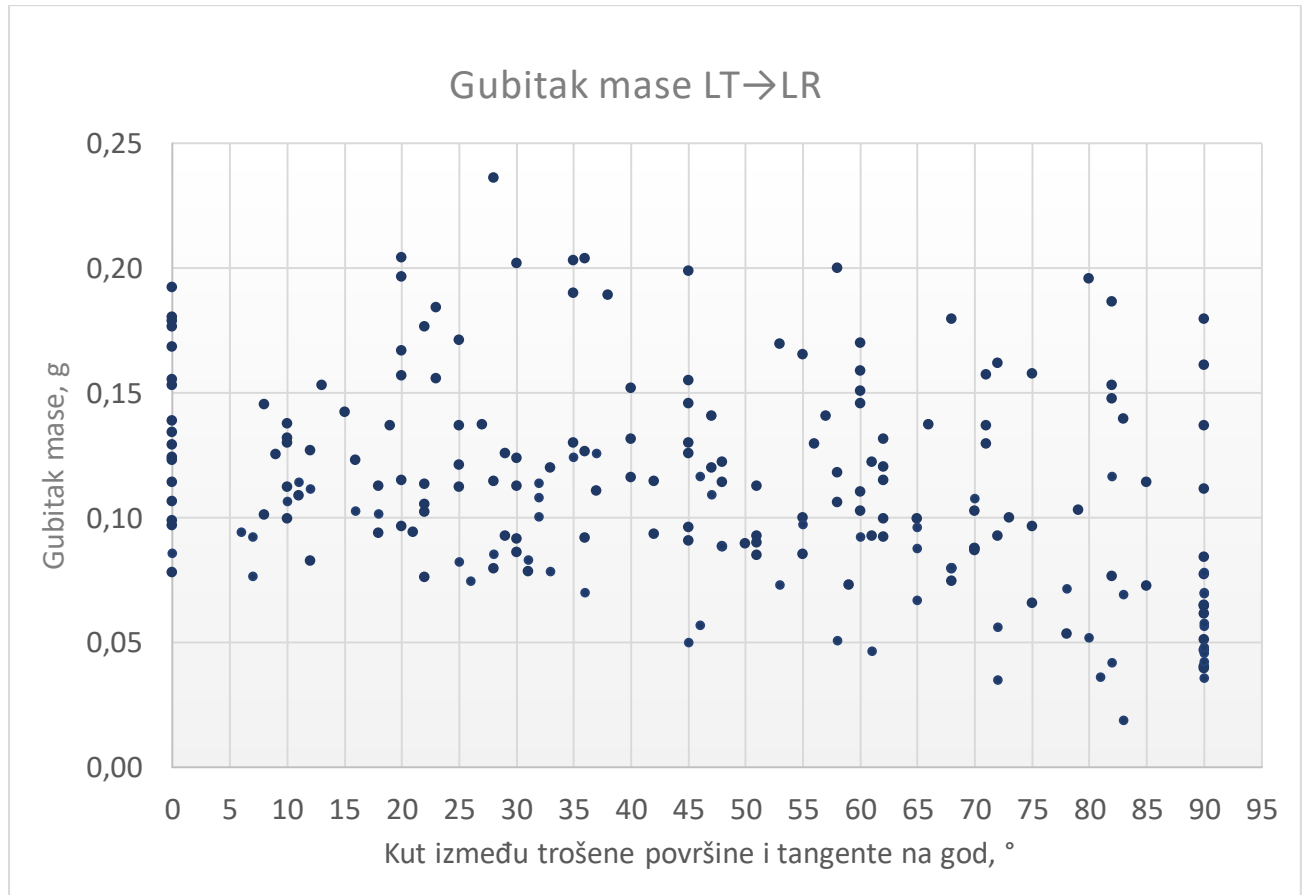
U tablici 4.8 prikazani su rezultati mjerenja gustoće uzoraka koji nisu imali nikakve vidljive nepravilnosti u strukturi. Takvih uzoraka je bilo ukupno 21. Rasipanja nisu velika, najmanja izmjerena vrijednost je 0,400 g/cm<sup>3</sup>, a najveća 0,476 g/cm<sup>3</sup>. Srednja vrijednost gustoće je 0,433 g/cm<sup>3</sup>.

**Tablica 4.8 Rezultati mjerenja gustoće**

uzorak	volumen, mm <sup>3</sup>	masa, g	gustoća, g/cm <sup>3</sup>
<b>A I4</b>	49971,64	23,7864	0,476
<b>A I5</b>	50369,12	23,2704	0,462
<b>A I6</b>	49649,33	23,3284	0,470
<b>A I7</b>	51635,45	21,3848	0,414
<b>A II5</b>	49840,55	22,1914	0,445
<b>A II3</b>	48944,70	22,6462	0,463
<b>A II6</b>	50732,64	21,2848	0,420
<b>A II7</b>	50823,95	21,5599	0,424
<b>A III4</b>	54751,29	25,4024	0,464
<b>A III5</b>	54689,40	24,0491	0,440
<b>A III6</b>	52788,00	22,2206	0,421
<b>A IV5</b>	48705,76	20,4187	0,419
<b>A IV6</b>	47965,12	19,3668	0,404
<b>A V5</b>	52513,73	22,8586	0,435
<b>B III3</b>	51152,54	22,2380	0,435
<b>B III4</b>	45757,59	19,1023	0,417
<b>B III5</b>	52668,34	21,6559	0,411
<b>B IV4</b>	43122,97	17,4525	0,405
<b>B V1</b>	51518,84	22,6648	0,440
<b>B V4</b>	44416,85	18,6736	0,420
<b>B VI1</b>	51343,70	20,5567	0,400
<b>Srednja vrijednost gustoće</b>			<b>0,433</b>

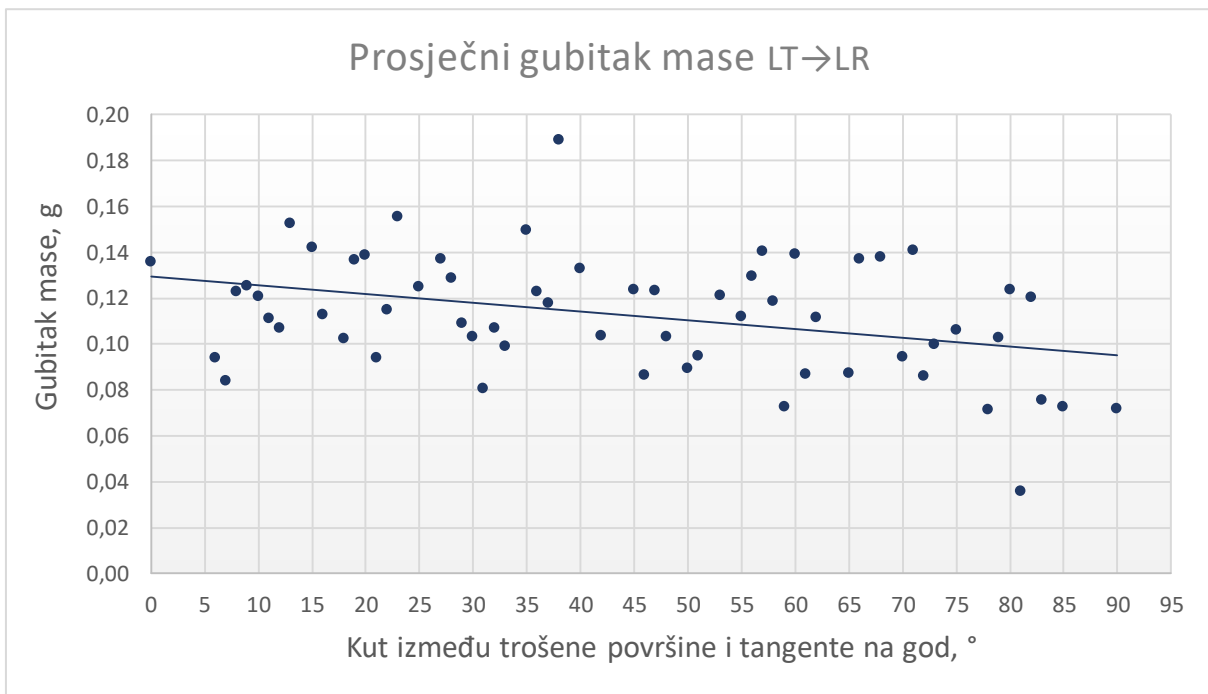
#### 4.5. Analiza rezultata

U dijagramu na slici 4.9 prikazana je ovisnost gubitka mase pri abrazijskom trošenju o orijentaciji površine odnosno o kutu koji trošena površina zatvara s tangencijalnim presjekom. Navedeni kut mijenjao se od  $0^\circ$  (LT-presjek) do  $90^\circ$  (LR-presjek). Prikazani su svi dobiveni rezultati, ukupno 212 mjerenja. Vrlo se jasno uočava veliko rasipanje rezultata. Usprkos velikom rasipanju rezultata, nazire se blagi trend smanjenja abradirane mase odnosno smanjenja intenziteta abrazijskog trošenja.



**Slika 4.9**      **Rezultati mjerenja abrazijske otpornosti u ovisnosti o orijentaciji abradirane površine**

Za neke kutove napravljeno je više mjerenja pa su na slici 4.10 u dijagramu prikazane srednje vrijednosti gubitka mase za sve kutove. Na ovom dijagramu jasnije se vidi trend smanjenja abrazijskog trošenja s povećanjem kuta kojeg zatvara trošena površina s tangencijalnim presjekom.



**Slika 4.10** Prosječni gubitak mase u ovisnosti o orijentaciji abradirane površine

Na sljedeća tri dijagrama prikazani su rezultati abrazijskog trošenja za tri kuta s najvećim brojem mjerenja. Na slici 4.11 prikazani su rezultati za tangencijalni presjek odnosno za kut od  $0^\circ$ . Pri ovom kutu napravljeno je 17 mjerenja, rasipanja rezultata su vrlo velika, a raspon gubitka mase pri abraziji je od 0,04 g do 0,19 g. Srednja vrijednost gubitka mase iznosi 0,136 g.

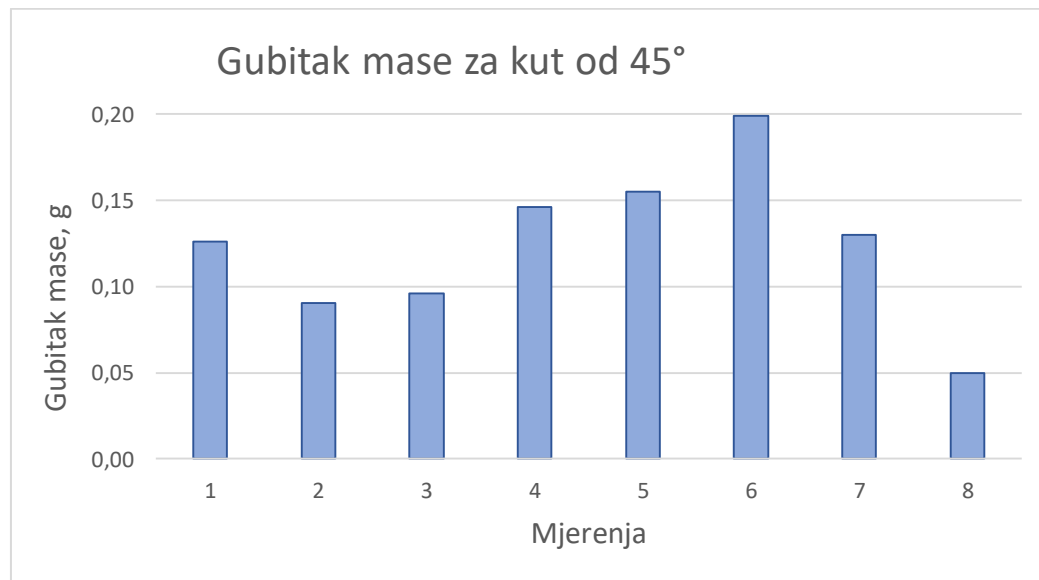


**Slika 4.11** Rezultati mjerenja abradirane mase za tangencijalni presjek ( $0^\circ$ )

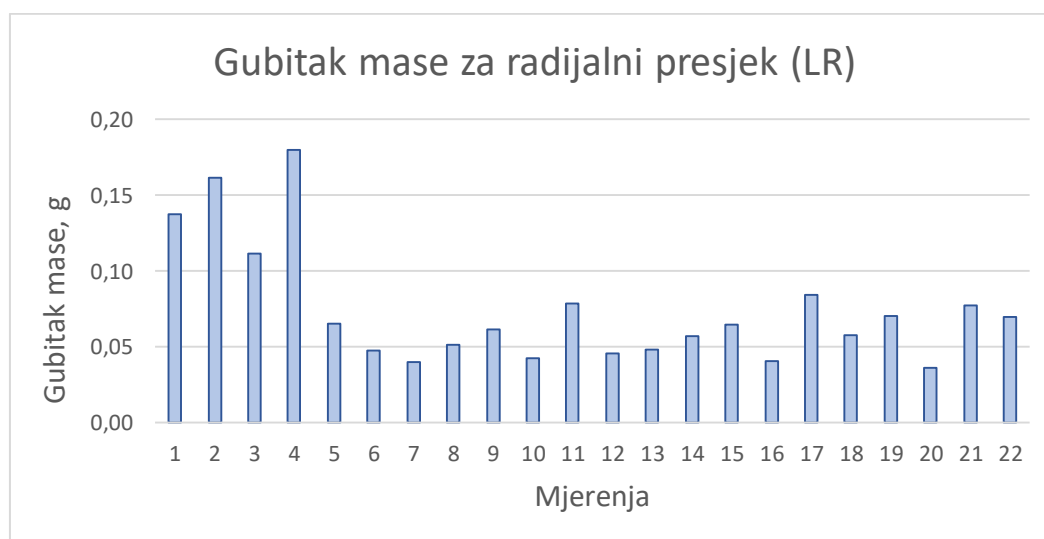


Za kut od  $45^\circ$  napravljeno je ukupno 8 mjerenja. Kao što se vidi na slici 4.12 i ovdje su rasipanja dosta velika. Najmanja vrijednost gubitka mase pri abraziji je 0,05 g, a najveća je 0,20 g. Srednja vrijednost gubitka mase iznosi 0,124 g.

Na slici 4.13 vide se rezultati mjerenja abrazijskog trošenja za radijalni presjek odnosno za kut od  $90^\circ$ . Ukupno je napravljeno 22 mjerenja. Rasipanja su nešto manja nego za prethodna dva kuta. Najmanja vrijednost gubitka mase je 0,036 g, a najveća vrijednost je 0,18 g. Srednja vrijednost gubitka mase iznosi 0,072 g.



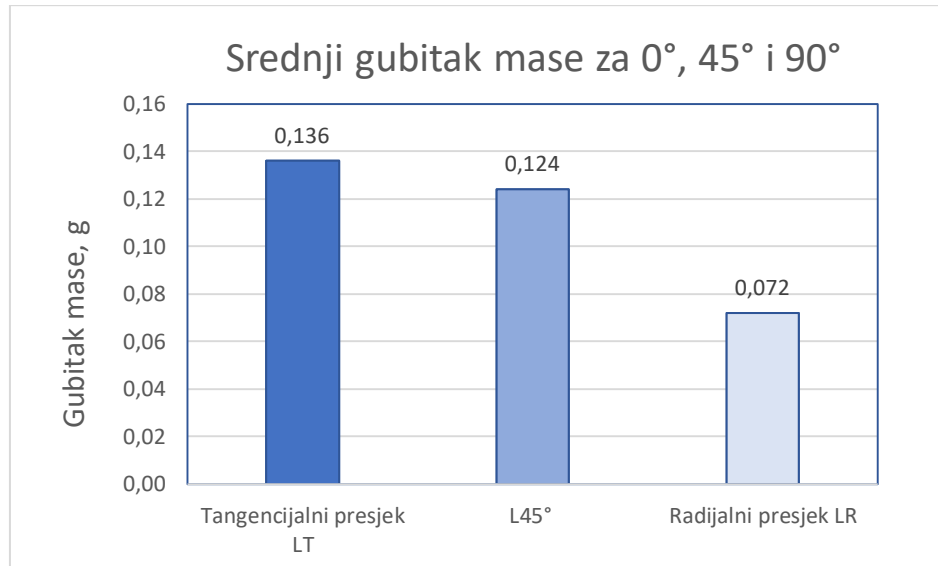
**Slika 4.12** Rezultati mjerenja abradirane mase za kut od  $45^\circ$



**Slika 4.13** Rezultati mjerenja abradirane mase za radijalni presjek ( $90^\circ$ )

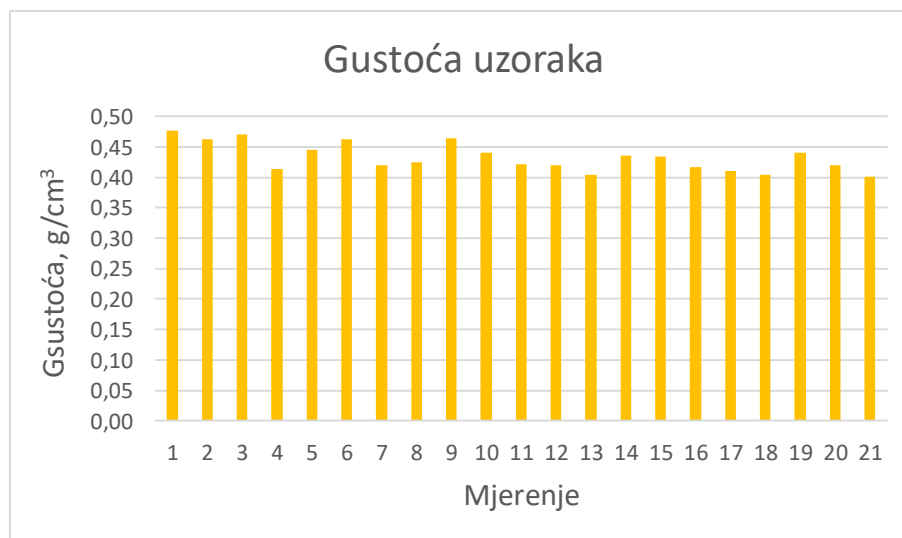
Na slici 4.14 prikazan je srednji gubitak abradirane mase za tri kuta:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $90^\circ$ . Kut od  $0^\circ$  predstavlja tangencijalni presjek, a kut od  $90^\circ$  predstavlja radijalni presjek.

Na ovom dijagramu je smanjenje gubitka mase povećanjem kuta vrlo jasno izraženo, puno jasnije nego na slikama 6.9 i 6.10.



**Slika 4.14 Srednji gubitak mase za tri karakteristična kuta**

Na slici 4.15 prikazani su rezultati mjerenja gustoće. Iz prikaza su isključeni uzorci s uočenim nepravilnostima u strukturi, a ostavljeni su samo uzorci s relativno pravilnom strukturom. Rasipanja nisu velika i zato se otpornost na abrazijsko trošenje materijala prikazuje kao gubitak mase.



**Slika 4.15 Rezultati mjerenja gustoće**

## 5. ZAKLJUČAK

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

- Gubitak mase pri abrazijskom trošenju drva smreke (*Picea abies*) ovisi o orijentaciji abradirane površine
- Iako je rasipanje rezultata vrlo veliko nazire se trend smanjenja abrazijskog trošenja s povećanjem kuta kojeg zatvara trošena površina s tangencijalnim presjekom, od  $0^\circ$  do  $90^\circ$
- Trend smanjenja abrazijskog trošenja jasnije je izražen ako se promatraju srednje vrijednosti gubitka mase pri abraziji
- Najmanja otpornost na abrazijsko trošenje utvrđena je na tangencijalnom presjeku (LT  $\rightarrow$   $0^\circ$ ), a najveća otpornost na abrazijsko trošenje je na radijalnom presjeku (RT  $\rightarrow$   $90^\circ$ )
- Srednji gubitak mase u radijalnom presjeku je za 48 % manji u odnosu na srednji gubitak mase u tangencijalnom presjeku
- Na abradiranoj površini zakrenutoj za  $45^\circ$ , srednji gubitak mase manji je za oko 9 % u odnosu na srednji gubitak mase u tangencijalnom presjeku koji se najviše troši
- S obzirom na relativno malo rasipanje rezultata pri mjerenja gustoće abradiranih uzoraka, otpornost na trošenje izražena je preko gubitka mase
- Srednja vrijednost gustoće uzoraka drva smreke iznosila je  $0,433 \text{ g/cm}^3$

**LITERATURA**

- [1] *Keramika, beton i drvo*, recenzirani materijali za predavanje, [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), 16.02.2021.
- [2] *Drvo*, Enciklopedija leksikarskog zavoda, M.Krleža, <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=16354>, 16.02.2021.
- [3] Rede, V.: *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), 16.02.2021.
- [4] *Svojstva drva kao materijala*, recenzirani materijali za predavanje [https://www.grad.unizg.hr/download/repository/Svojstva\\_drva\\_2014.pdf](https://www.grad.unizg.hr/download/repository/Svojstva_drva_2014.pdf), 16.02.2021.
- [5] <https://www.delta-intkey.com/citeswood/en/intro.htm>, 16.02.2021.
- [6] <https://www.savokusic.com/blog/drvo/drvo-i-njegove-osobine>, 16.02.2021.
- [7] *Drvo*, <http://mendthegap.agr.hr/wp-content/uploads/2017/09/Prezentacija-drvo-radionica.pdf> 16.02.2021.
- [8] Žuna Pfeiffer, T., Krstin, Lj., Štolfa, I., Lovaković, T., Tikas, V.: *Praktikum iz anatomije biljaka*, Osijek, 2014.
- [9] Novak, M.: *Analysis of Holocen Slope Mass Movements in Valleys of Planica and Tamar* [magistarski rad], Ljubljana. Naravoslovnotehniška fakulteta, 2017.
- [10] *Pinus Ponderosa, Cross Section*, <http://www.microlabgallery.com/gallery/Pinus%20PonderosaCS40X.aspx>, 17.02.2021.
- [11] Horvat, I., Krpan, J.: *Drvno industrijski priručnik*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1997.
- [12] *Structure and arrangement of pits*, [https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz\\_cast.pl?cast=19204](https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=19204), 17.02.2012
- [13] Volarić, I.: *Stručni članak: Svojstva drva* Zagreb, siječanj 2017. <https://www.proentaris.hr/static/files/Svojstva%20drva.pdf>, 16.02.2021.
- [14] *Softwood anatomy*, <https://www.wood-database.com/wood-articles/softwood-anatomy/>, 17.02.2021.
- [15] *Picea Abies Carsten*, <http://www.woodanatomy.ch/species.php?code=PCAB#>, 17.02.2021.
- [16] *Hardwood anatomy*, <https://www.wood-database.com/wood-articles/hardwood-anatomy/>, 17.02.2021.
- [17] Barišić, J.: *Otpornost na abrazijsko trošenje subfosilnog drva hrasta* [diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2018., 17.02.2021.
- [18] *Celuloza*, <https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=celuloza>, 17.02.2021.

- [19] *Structure and Properties of Hemicellulose*, <http://web.nchu.edu.tw/pweb/users/taiwanfir/lesson/10393.pdf>, 17.02.2021.
- [20] *Wood – Hygroscopicity*, <https://www.britannica.com/science/wood-plant-tissue/Hygroscopicity>, 17.02.2021.
- [21] *Strength Mechanical Properties of Wood*, <https://www.tneutron.net/seni/strength-mechanical-properties-of-wood/>, 16.02.2021.
- [22] Bogdanić, D.: *Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje tvrdih prevlaka proizvedenih PACVD postupkom* [završni rad], Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015.
- [23] Laino, S., Sikora, J. A., Dommarco, R. C.: *Development of wear resistant carbidic austempered ductile iron (CADI)*. *Wear* 265(2008)1-2, 1-7.