

Otpornost subfosilnog hrasta na abrazijsko trošenje

Gojanović-Rakić, Matej

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:969470>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-25**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Matej Gojanović-Rakić

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Matej Gojanović-Rakić

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad radio samostalno koristeći znanja stečena kroz studij te navedenu literaturu.

Zahvaljujem svojoj mentorici, prof.dr.sc. Veri Rede, na pomoći i dostupnosti prilikom izrade ovog rada.

Zahvaljujem svojoj obitelji – bratu Luki, majci Ani i ocu Šimi, koji su me podržavali prilikom preddiplomskog studija.

Matej Gojanović-Rakić



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:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Matej Gojanović-Rakić** Mat. br.: 0035199276

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Otpornost subfosilnog hrasta na abrazijsko trošenje**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The abrasive wear resistance of subfossil oak wood**

Opis zadatka:

Drvo je kao materijal prisutno kroz cijelu ljudsku povijest i od njega su se izrađivali proizvodi za raznolike ljudske potrebe. Unatoč tome što su se u međuvremenu razvili mnogi, vrlo različiti tehnički materijali, drvo je i danas vrijedan i vrlo cijenjen tehnički materijal.

Jedan od osnovnih nedostataka drva jest njegova osjetljivost na biološku razgradnju i starenje. U nekim uvjetima drvo brzo propada, a u nekim se može očuvati dugi vremenski period bez znatnije degradacije svojstava.

U okviru završnog rada potrebno je ispitati utjecaj proteklog vremena na strukturu i abrazijsku otpornost subfosilnog drva hrasta izvađenog iz korita rijeke Save na području Bosanske Posavine. Dobivene rezultate treba usporediti s vrijednostima dobivenim na recentnom hrastu s istog lokaliteta.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. studenog 2017.

Rok predaje rada:
1. rok: 23. veljače 2018.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadala:

Rede

Izv. prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednik Povjerenstva:

Branko Bauer

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

1	UVOD	7
2	SASTAV I STRUKTURA DRVA.....	8
2.1	Kemijski sastav drva.....	8
2.2	Struktura drva	8
2.2.1	Biljna stanica	10
2.2.2	Karakteristični presjeci stabla.....	11
3	3. SVOJSTVA DRVA.....	13
3.1	Osnovna fizikalno-kemijska i estetska svojstva drva	13
3.1.1	Osnovna fizikalno-kemijska svojstva drva.....	13
3.1.2	Estetska svojstva drva.....	16
3.2	Mehanička svojstva drva	18
3.2.1	Tvrdoća	18
3.2.2	Otpornost na trošenje (abraziju)	20
3.2.3	Modul elastičnosti.....	20
3.2.4	Vlačna čvrstoća.....	24
3.2.5	Tlačna čvrstoća	26
3.2.6	Svojna čvrstoća	28
3.2.7	Smična čvrstoća.....	29
3.2.8	Žilavost	30
3.3	Biološka degradacija drva.....	31
3.3.1	Hrastov Abonos (fosilizacija hrasta)	33
4	Eksperimentalni dio rada.....	36
4.1	Cilj rada i provođenje ispitivanja.....	36
4.2	Materijal za ispitivanje	36
4.3	Ispitivanje starosti uzoraka	37
4.4	Određivanje gustoće uzoraka.....	38
4.5	Struktura materijala	40
4.6	Ispitivanje otpornosti na trošenje abrazijom.....	43
4.7	Analiza rezultata	49
5	Zaključak	52
6	Popis literature.....	53

POPIS SLIKA

Slika 1.	Usporedba stvarnog i idealnog presjeka drva [2]	9
Slika 2.	Traheida (gore) i traheja (dolje) [3]	9
Slika 3.	Biljna stanica i njene komponente [4]	10
Slika 4.	Poprečni presjek debla [2]	11
Slika 5.	Karakteristični presjeci debla [6].....	12
Slika 6.	Postupak mjerenja tvrdoće drva po Brinellu [7].....	19
Slika 7.	Prikaz Janka testa tvrdoće [10].....	20
Slika 8.	Odnosi modula elastičnosti za drvo i druge tehničke materijale [7]	21
Slika 9.	Određivanje savojnog modula elastičnosti ispitivanjem u tri točke [7]	22
Slika 10.	Elastično područje dijagrama sila-progib [7]	23
Slika 11.	Odnos modula elastičnosti i gustoće za tehničke materijale [11].....	24
Slika 12.	Epruveta za vlačno ispitivanje po normi HRN D.A1.048 [13]	25
Slika 13.	Prikaz djelovanja tlačnog opterećenja [7].....	26
Slika 14.	Postupak ispitivanja savojne čvrstoće [12].....	28
Slika 15.	Djelovanje smičnih sila na drvo [7].....	29
Slika 16.	Charpyev bat [14]	31
Slika 17.	Ispiljene daske od abonosa [16].....	35
Slika 18.	Prikaz recentnog hrasta lužnjaka i hrastovog abonosa [17]	35
Slika 19.	Lokacija pronalska subofosilnog hrasta	37
Slika 20.	Uzorci za ispitivanje gustoće	39
Slika 21.	Makrostruktura poprečnog presjeka recentnog hrasta (uzorak 0)	40
Slika 22.	Makrostruktura poprečnog presjeka subfosilnog hrasta (uzorak 1)	41
Slika 23.	Makrostruktura poprečnog presjeka subfosilnog hrasta (uzorak 2)	41
Slika 24.	Mikrostruktura poprečnog presjeka uzorka 0 [19]	42
Slika 25.	Mikrostruktura poprečnog presjeka uzorka 1	42
Slika 26.	Mikrostruktura poprečnog presjeka uzorka 2	43
Slika 27.	Prikaz abrazijskog trošenja na Taber abraderu	44
Slika 28.	Uzorci prije trošenja	45
Slika 29.	Intenzitet trošenja uzorka 0 za različite kvalitete brusnog papira.....	47
Slika 30.	Intenzitet trošenja uzorka 1 za različite kvalitete brusnog papira.....	48
Slika 31.	Intenzitet trošenja uzorka 2 za različite kvalitete brusnog papira.....	48
Slika 32.	Abrazivno trošenje uzoraka za sve kvalitete brusnog papira	49
Slika 33.	Ovisnost intenziteta trošenja o kvaliteti brusnog papira.....	50
Slika 34.	Aproksimacija abrazijskog trošenja polinomom trećeg stupnja.....	50
Slika 35.	Abrazivno trošenje s obzirom na gustoću.....	51

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Prikaz masenog udjela kemijskih elemenata u prosječnom drvu [1]	8
Tablica 2.	Podjela drva s obzirom na udio vlage u drvu [1].....	13
Tablica 3.	Podjela vrsta drva prema tvrdoći (prema Janki) [7]	19
Tablica 4.	Prikaz modula elastičnosti za tri tipa zrelosti američke duglazije [12]	24
Tablica 5.	Prikaz tangencijalne i radijalne vlačne čvrstoće četinjača i listača [7].....	26
Tablica 6.	Prikaz tlačnih čvrstoća nekih domaćih vrsta drva [7].....	27
Tablica 7.	Trajnost nekih domaćih vrsta u godinama [7]	33
Tablica 8.	Usporedba osnovnih svojstava recentnog hrasta i abonosa [17]	34
Tablica 9.	Osnovna mehanička svojstva hrasta lužnjaka [7].....	37
Tablica 10.	Rezultati određivanja starosti [18].....	38
Tablica 11.	Vrijednosti gustoće uzoraka	39
Tablica 12.	Srednja širina godova	40
Tablica 13.	Brusni papiri korišteni za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje [20]	44
Tablica 14.	Gubitak mase nakon 150 okretaja	45
Tablica 15.	Veličine poprečnih presjeka trošenih površina uzoraka	46
Tablica 16.	Gubitak volumena uzoraka.....	46
Tablica 17.	Specifični gubitak materijala pri abrazijskom trošenju	47

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
w	%	udio vode u drvu
m	kg	masa tvari
δ	mm	željena dimenzija drva pri udjelu vode v
δ_s	mm	dimenzija drva pri zasićenju biljnih stanica
w_s	%	udio vode pri zasićenju biljnih stanica
ρ	g/cm^3	gustoća tvari
E	GPa	modul elastičnosti
L	mm	razmak između oslonaca
σ_{smjer}	Mpa	naprezanje u određenom smjeru
F	N	sila
F_{max}	N	maksimalna sila
A_0	mm^2	početna površina poprečnog presjeka
$KU(KV)$	J	udarni rad loma
G	N	težina bata
A_s	mm^2	srednja površina poprečnog presjeka
D	μm	prosječni promjer abrazivnog zrna
Δm	kg	promjena (gubitak) mase
ΔV	mm^3	promjena (gubitak) volumena
$\frac{\Delta V}{A_s}$	$\frac{\text{mm}^3}{\text{mm}^2}$	abrazivno trošenje

SAŽETAK

Cilj ovog rada bio je istražiti kako vrijeme provedeno u vodenom, anaerobnom okruženju utječe na abrazijska svojstva subfosilnog drva hrasta. To je određeno usporedbom abrazijskih svojstava subfosilnog drva hrasta, izvađenog iz korita rijeke Save, s recentnim hrastom iz istog područja. Zbog svojih mehaničkih svojstava hrast je jedna od naših najcjenjenijih vrsta, a osobito je cijenjeno subfosilno drvo hrasta.

Metodom ^{14}C radiokarbonskog datiranja subfosilnim uzorcima je određena starost. Također je određena gustoća te mikro i makrostruktura svih uzoraka. Abrazijska otpornost je ispitana na uređaju Taber abrader, korištenjem sedam različitih brusnih papira.

Oba subfosilna hrasta imaju nižu gustoću i troše se više od recentnog. Starost i gustoća subfosilnih uzoraka nisu direktno povezani s intenzitetom abrazijskog trošenja. Mlađi subfosilni hrast (890 god.) ima višu gustoću i više se troši od starijeg subfosilnog hrasta (1195 god.). Povećanjem abrazivnog zrna, intenzitet trošenja raste linearno kod svih uzoraka do granične veličine abrazivnog zrna, nakon čega blago pada.

Ključne riječi: otpornost na abrazijsko trošenje, hrast lužnjak, subfosilno drvo

SUMMARY

The goal of this paper was to determine how time spent in a wet, anaerobic environment influences the abrasive wear resistance of subfossil oak. That was determined by comparing abrasive properties of the subfossil wood, found in Sava river, with the abrasive properties of a recent oak specimen. Due to its mechanical properties, oak is one of the most esteemed trees in Croatia.

The age of the three samples was first measured using ^{14}C radiocarbon dating. Furthermore, their density as well as their their micro and macrostructure were determined, and were followed by measuring their abrasive properties using seven different sandpapers on a machine for Taber abrasion.

After the examination and analysis, it was concluded that both subfossil oaks have a lower density and abrasive resistance than the recent sample. Age and density of subfossil samples are not directly linked to their abrasive wear resistance. The younger subfossil oak (890 yrs.) has a higher density and wears out more than the older subfossil oak (1195 yrs.). By increasing abrasive size, wear rate intensity of all samples grows with a linear trend, up until a critical abrasive size, after which it declines.

Keywords: abrasive wear resistance, red oak, subfossil wood

1 UVOD

Drvo je prirodni materijal koji se dobiva od biljaka, uglavnom debla drvenastih, vlaknastih i višegodišnjih biljaka, koje imaju stablo. Drvo je jedan od temeljnih materijala ljudske civilizacije, ekološki je prihvatljivo i vrlo je korisno u svom prirodnom okruženju. Energiju za svoj rast i razvoj stabla dobivaju fotosintezom, pri kojoj nastaje kisik neophodan za životinjski svijet.

Kao tehnički materijal drvo se primjenjuje kako u obrađenom, tako i u neobrađenom stanju, u gotovo svim dijelovima industrije. Od drva kao sirovine dobivamo papir i celulozu. U današnjem svijetu drvo se nastoji zamijeniti raznim modernijim materijalima, poput polimera, metalnih pjena, kompozita i sl., no i nadalje ostaje u širokoj primjeni. Glavni razlog tome su izvrsna svojstva drva: mehanička, estetska, akustična i druga. Najznačajnija prednost drva je povoljan omjer čvrstoće i gustoće, bolji od mnogih drugih tehničkih materijala. Značajna prednost drva je i laka obrada koja može biti mehanička (piljenje, blanjanje, tokarenje i sl.) ili kemijska (ekstrakcija, hidroliza, suha destilacija i sl.).

Drvo kao tehnički materijal ima i svoje nedostatke: anizotropnost strukture i svojstava, dimenzijsku ograničenost i sklonost upijanju vlage. Svi navedeni nedostaci se mogu dosta uspješno otkloniti.

Drvo je potpuno organski materijal i zbog toga je podložno biološkom propadanju. Međutim, u određenim uvjetima drvene konstrukcije mogu izdržati dugi niz godina. Drvo je osobito osjetljivo na vlagu i brže propada ako je u vlažnijem okolišu.

Ukoliko je drvo potpuno uronjeno u vodu njegov vijek trajnja može biti dulji nego ako je opetovano izloženo bubrenju i utezanju.

Kada drvo odleži dugi niz godina u mulju vode tekućice, ono se anaerobno fosilizira, i nastaje subfosilno drvo. Najčešće se kao subfosilno drvo pronalaze vrste hrasta, brijesta i jasena. Ako je riječ o hrastu, nastaje hrastov abonos, odnosno "crni hrast". Trajnost subfosilnog drva je puno bolja zbog impregnacije drvnog tkiva različitim mineralnim tvarima.

U ovom radu je ispitana otpornost na abrazijsko trošenje subfosilnog hrasta.

2 SASTAV I STRUKTURA DRVA

2.1 Kemijski sastav drva

Drvo je skup organskih tvari što se očituje iz njegova sastava. Kemijski sastav drva, iako jako malo, varira od vrste do vrste. Maseni udio kemijskih elemenata u prosječnom drvu prikazan je u tablici 1.

Tablica 1. Prikaz masenog udjela kemijskih elemenata u prosječnom drvu [1]

Ugljik	Kisik	Vodik	Dušik	Ostalo
50%	42%	6%	1%	1%

Ostalo: Ca, K, Na, Fe, Mg, S, Cl, Si, P

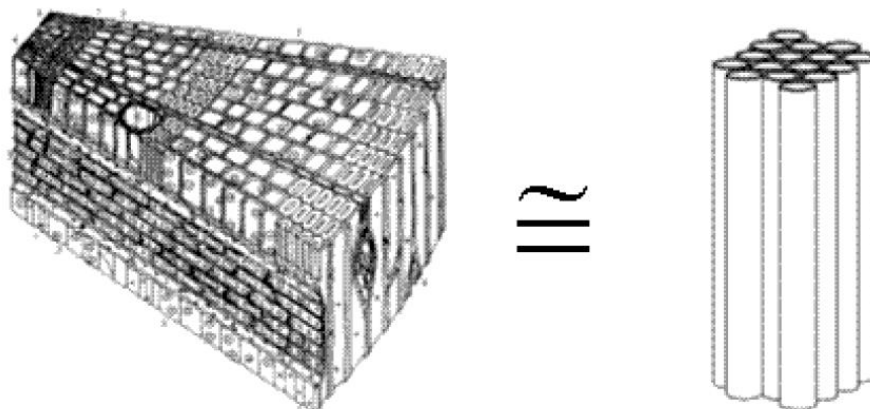
Isključujući vodu, drvo sadrži tri glavne komponente. Prva i osnovna je celuloza, koja čini 41-43% mase suhog drva. Celuloza je kristalni i čvrsti polisaharid sačinjen od par stotina do više tisuća monomera glukoze, i najčešći je organski polimer u prirodi. Iduća komponenta je hemiceluloza, koja čini oko 20-30% mase suhog drva. Za razliku od celuloze hemiceluloza je amorfna, slabije čvrstoće. Posljednja komponenta je lignin koji čini oko 23-27% mase suhog drva. Lignin je hidrofobni fenolni polimer koji doprinosi krutosti drva, a njegov udio definira radi li se o tvrdom ili mekom drvu.

Sporedne komponente su razni ekstrakti (masne kiseline, smole, voskovi i sl.) i drugi spojevi čiji je maseni udio vrlo mali.

Ove tri komponente su međusobno isprepletene, a direktna kovalentna veza postoji između hemiceluloze i lignina (veliki fokus industrije papira upravo je odvajanje lignina od celuloze). [1]

2.2 Struktura drva

Drvo ima nehomogenu strukturu sastavljenu od cjevčica koje su postavljene koncentrično kružno, odnosno cilindara koji se zrakasto šire od centra presjeka (srca) prema van. Jedna takva koncentrična kružnica naziva se god. U stvarnom presjeku drva godovi su nepravilni, dok su u idealiziranom pravilni kao što je prikazano na slici 1.

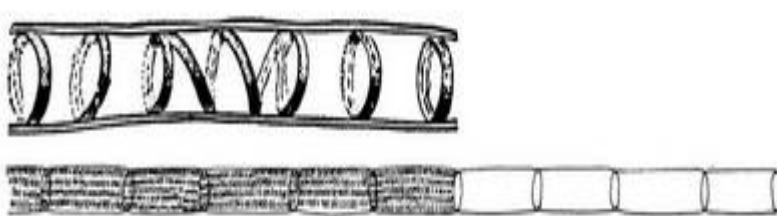


Slika 1. Usporedba stvarnog i idealnog presjeka drva [2]

Osnovni element strukture drva je drvena stanica – traheida. Traheide su izdužene mrtve biljne stanice. Njihova uloga je transport vode i mineralnih tvari od korijena preko stabljike do listova i drugih biljnih dijelova. Traheide su nalik šupljim cjevčicama, koje su s obje strane zatvorene i zašiljene. Duljina traheida kreće se od 0,7 do 9 mm, a najčešće su oko 3,5 mm.

Drugi bitni član strukture su traheje (puno šire od traheida). One su građene od nizova dužih ili malo produženih bačvastih pojedinačnih biljnih stanica, kod kojih su poprečne stijenke otopljene jedna u drugoj (fuzija stanica), a uzdužni zidovi odrvenjeni.

Različite vrste drva imaju različite udjele traheida i traheja, koje su prikazane na slici 2. [2]

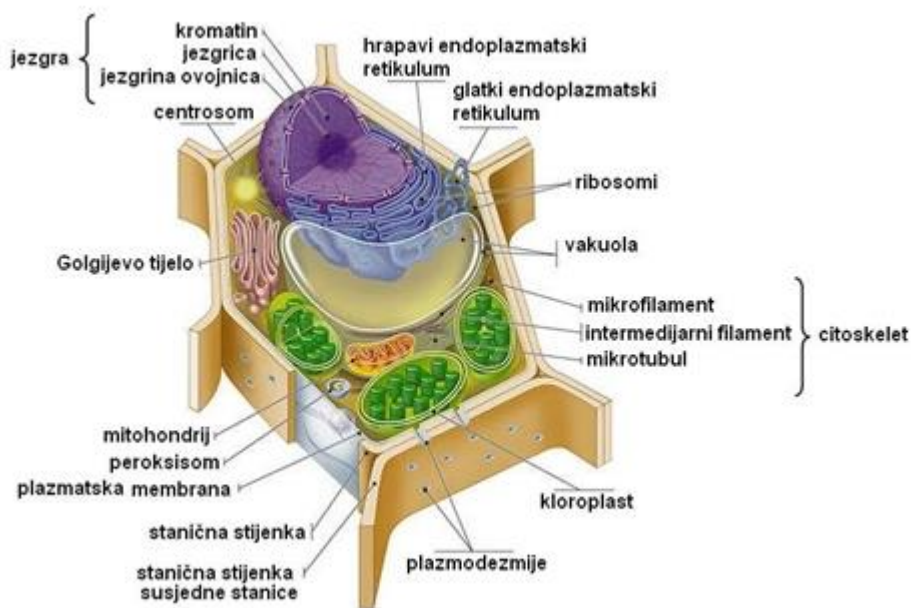


Slika 2. Traheida (gore) i traheja (dolje) [3]

2.2.1 Biljna stanica

Biljna stanica je tip stanice specifičan za biljke, pa tako i drvo. Sastoji se od protoplasta i stanične stijenke. Protoplast uključuje protoplazmu u koju su uklopljeni organele, vakuole, membranski sustavi i makromolekulne nakupine. Stanična stijenka građena je od celuloze, hemiceluloze i lignina, a njena uloga je štititi stanicu i davati joj oblik. Velika središnja vakuola je puna vode i koloida za održavanje turgorovog pritiska i služi kao jedinstvena organela za skladištenje i odvijanje metaboličkih procesa.

Biljna stanica sadrži i plastide, od kojih je najvažniji kloroplast, organela koja se nalazi u citoplazmi. Kloroplast posjeduje pigmente kao što su klorofil i karotenoidi te je mjesto sinteze i skladištenja hranjivih tvari. Klorofil je od posebne važnosti jer je njegova svrha korištenje svjetlosne energije za pretvorbu ugljikovog dioksida i vode u ugljikohidrate i kisik, odnosno klorofil je osnovni element procesa fotosinteze.

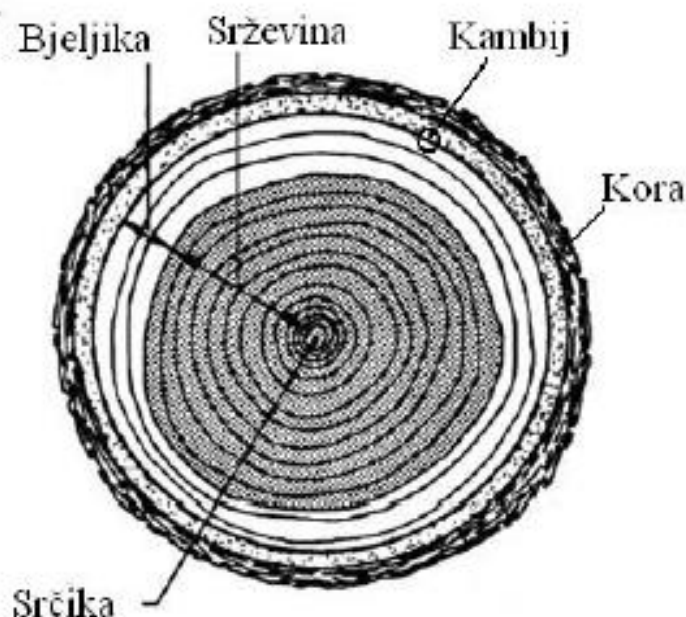


Slika 3. Biljna stanica i njene komponente [4]

Citoplazma je vodenasta masa izrazite kompleksnosti u kojoj se nalaze različiti organeli i makromolekulske nakupine. Ako promatramo citoplazmu bez organela onda govorimo o citosolu, u kojem se nalazi gusta, nitasta, trodimenzionalna proteinska mreža zvana citoskelet. Živa biljna stanica prikazana je na slici 3.[5]

2.2.2 Karakteristični presjeci stabla

Ako stablo presječemo u ravnini okomitoj na os rasta (poprečni presjek), na makroskopskoj razini uočavamo više karakterističnih elemenata, prikazanih na slici 4.

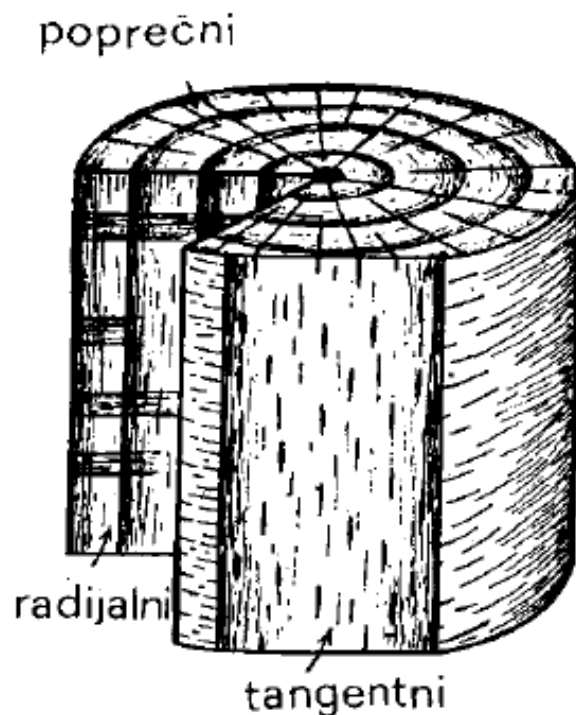


Slika 4. Poprečni presjek debla [2]

Srčika predstavlja sami centar stabla i poklapa se s glavnom osi stabla (anatomska os stabla). Srževina je dio stabla koji je prošao fazu rasta te ima ulogu nošenja stabla. Smatra se pravim drvom u užem smislu. Bjeljika je dio u kojem se odvija izmjena tvari, rijetko uporabljiva za tehničke svrhe. Kambij je tvorno biljno tkivo koje se nalazi u stablu i korijenu, u tankom sloju između unutarnje kore i bjeljike. Svake godine iz kambija nastaje novi sloj ksilema (novi god) i novi sloj floema (kore). Kora je vanjski sloj drva sastavljen od luba (unutarnja kora, nastala od

kambija) i lika (suha vanjska kora), čija je uloga da štiti drvo od vanjskih utjecaja. Kora gotovo nikad nije tehnički iskoristiva.

Makroskopska građa drva može se promatrati u različitim presjecima. S obzirom na to da je drvo valjkasto tijelo s centralnom uzdužnom osi simetrije, potrebno je promatrati tri karakteristična međusobno okomita presjeka drva: poprečni (p), tangencijalni (t) i radijalni (r). Poprečni presjek okomit je na anatomsku os stabla, dok su tangencijalni i radijalni presjek paralelni s njom, slika 5.



Slika 5. Karakteristični presjeci debla [6]

Zbog usmjerenosti strukture drva, mehanička i druga svojstva su anizotropna u smjeru okomitom na anatomsku os, ili smjeru paralelnom s njom. Zato je važno prilikom ispitivanja svojstava drva navesti vrstu presjeka i poziciju rezanja. [6]

3 3. SVOJSTVA DRVA

3.1 Osnovna fizikalno-kemijska i estetska svojstva drva

3.1.1 Osnovna fizikalno-kemijska svojstva drva

3.1.1.1 Higroskopnost i sadržaj vode

Drvo je higroskopan materijal, što znači da u sebi uvijek zadržava određeni udio vode koji se nalazi u higroskopskoj ravnoteži između drva i okoliša. Ukoliko je vlaga okoliša viša od one u drvu, drvo će upijati vlagu kako bi se što više približilo higroskopskoj ravnoteži. Također, ako je vlaga okoliša niža, drvo će otpuštati vlagu u okoliš. Voda u drvu može biti slobodna (u lumenu), ili kemijski vezana u staničnoj stijenci. Prilikom sušenja drva prvo isparava slobodna voda, a zatim i vezana.

Udio vode u drvu izražava se omjerom mase standardno suhog drva (nakon držanja u peći na temperaturi $103 \pm 3^\circ$ do konstantne mase) i mase vlažnog drva, prikazano u izrazu:

$$w = \frac{m_{mokro} - m_{suho}}{m_{suho}} * 100\%. \quad (1)$$

Vlaga u drvu najveća je prilikom rušenja. U tablici 2 prikazani su udjeli vlage za u drvu za različita stanja. [7]

Tablica 2. Podjela drva s obzirom na udio vlage u drvu [1]

Stanje drva	Sirovo	Provelo	Prosušeno	Zrakosuho	Sobosuho	Standardno (laboratorijski) osušeno
Udio vode, w	>40%	23%-40%	19%-22%	13%-18%	6%-12%	0%

3.1.1.2 Utezanje i bubrenje

Utezanje drva je proces promjene dimenzija drva prilikom njegova sušenja. Proces utezanja drva počinje kada više nema vode u lumenu, a stijenke drva su maksimalno zasićene ($w=25\%-30\%$) i traje sve dok se drvo potpuno ne osuši. Prilikom izlaska kemijski vezane vode iz stanične stijenke, spletovi lanaca celuloze približavaju se jedan drugome i tako smanjuju volumen drva. Budući da su ti spletovi u stijenkama orijentirani uzdužno ili pod blagim kutem na uzdužnu os, utezanje je

najmanje u tome smjeru (0,2-0,5 %), a najveće okomito na uzdužnu os (3,0-9,0%). Utezanje je proces linearno ovisan o padu udjela vode u drvu.

Obrnuti proces naziva se bubrenje.

Utezanje i bubrenje drva može se prikazati po izrazu:

$$\delta = \delta_s * \left(1 - \frac{w}{w_s}\right), \text{ mm}, \quad (2)$$

gdje je:

δ - željena dimenzija drva pri udjelu vode w ,

δ_s - dimenzija drva pri zasićenju biljnih stanica,

w - trenutni udio vode,

w_s - udio vode zasićenja biljnih stanica.

3.1.1.3 Volumna masa drva

S obzirom da drvene stanice čine drveno tkivo, odnosno kako je drvo sastavljeno od istih, potrebno je razlikovati gustoću drvene tvari i volumnu masu drva kao poroznog materijala. Gotovo kod svih vrsta drva možemo uočiti jednaku gustoću drvene tvari, odnosno gustoće stijenki, koja iznosi oko $1,5 \text{ g/cm}^3$. Kada imamo u vidu vrste drva koje se tehnološki koriste u Hrvatskoj, onda govorimo o vrijednostima volumne mase drva od $0,30 \text{ g/cm}^3$ (suha jelovina) do $1,00 \text{ g/cm}^3$ (sirova bukovina), dok u svjetskim okvirima najlakše drvo je balsa ($0,15 \text{ g/cm}^3$), dok je najteže *Piratinera guianensis* ($1,38 \text{ g/cm}^3$).

3.1.1.4 Prirodna trajnost drva

Kada govorimo o prirodnoj trajnosti drva prvenstveno mislimo na mogućnost njegova otpora prema biološkim i abiološkim utjecajima. Pritom treba imati u vidu vrstu drva, kao i način i mjesto na kojem se drveni proizvod koristi.

U cilju produljenja prirodnog „života“, odnosno prirodne trajnosti drva, na raspolaganju su nam sredstva kojima se premazuje ili impregnira njegova površina, a kojima ga štitimo od napada

kukaca i ksilofagnih gljivica. Učinak zaštitnih sredstava na navedene štetnike ogleda se kroz sprječavanje prodora vlage, a koja je uvjet za život, odnosno razvoj, spomenutih organizama.

Osim toga, na trajnost drva loše djeluje i UV zračenje, pa drvo treba zaštititi od djelovanja sunčevih zraka.

S obzirom na prirodnu trajnost drvo se dijeli na:

- vrlo trajno (bagrem, kesten, hrast, duglazija)
- trajno (bor, jela, smreka jasen)
- slabo trajno (topola, bukva, lipa,).

3.1.1.5 Ogrjevna vrijednost drva

Suho drvo najbolji je izbor kada govorimo o energiji za ogrjev, s obzirom da povećanjem količine vlage pada i ogrjevna snaga drva, što je i razumljivo, jer se dio energije troši na isparavanje vode iz drva. Pored toga, za ogrjev se koristi drvo koje se ne može kvalitetnije iskoristiti, bilo da je riječ o određenim greškama (kao što su oštećenja zbog djelovanja kukaca, kvrge ili pak promjene boje i sl.), bilo da je riječ o tzv. „malim komadima“, odnosno drvu manjih dimenzija. Drvo za ogrjev se računa, pa onda i plaća, najčešće prema energiji po prostornom metru. Energetska vrijednost drva može se također izraziti u odnosu na masu drva. Treba napomenuti kako se ogrjevna vrijednost čiste drvne tvari kreće u uskim granicama; i to od 18,5 do 19 MJ/kg, a povećavaju je voskovi, ulja i smole koji se pojavljuju u drvu četinjača.

3.1.1.6 Zapaljivost drva

Strah od zapaljivosti drva jedan je od sigurnosnih momenata koje ljudi stavljaju u prvi plan kada je riječ o opasnostima kojima smo okruženi u svakodnevnom životu, iako u prostorima u kojima danas najčešće boravimo postoje brojni drugi, lakše zapaljivi materijali no što je to drvo i koji mogu stvoriti vrlo otrovne plinove. Pritom treba napomenuti kako drvo gori površinski, a konstrukcija ipak zadržava svoju čvrstoću, za razliku od betona i betonskih konstrukcija koje u tom slučaju pucaju, kao i metalnih konstrukcija kod kojih, uslijed povišene temperature, dolazi do deformacija. Postoje tvari kojima se drvo može modificirati u smislu smanjenja zapaljivosti.

Impregnacijom sredstvima na osnovi aluminijevog hidroksida, magnezijevog hidroksida, amonijevog polifosfata, antimonovog trioksida, te spojeva fosfora, dušika i bora, zapaljivost drva se može u potpunosti spriječiti.

3.1.1.7 Toplinska vodljivost drva

Toplinska vodljivost definira se kao mjera toplinskog toka kroz jedinicu duljine unutar određenog materijala jednoličnog presjeka, podređenog nekom temperaturnom gradijentu.

Kada se radi o toplinskoj vodljivosti standardnih drvenih konstrukcija, treba napomenuti kako je ona dva do četiri puta manja od vodljivosti topline standardnih konstrukcijskih materijala iz čega se da zaključiti da je drvo odličan izolator topline.

3.1.1.8 Akustična svojstva drva

Rezonancijsko-akustična svojstva daju drvu primat kada je riječ o izboru materijala za izradu glazbala. Uostalom, poznato je da je drvo izniman vodič zvuka, no s druge strane, ploče koje su izrađene od drvne građe mogu poslužiti kao zvučna izolacija zbog drugačijeg provođenja zvuka.

3.1.1.9 Vodljivost elektriciteta kroz drvo

Ukoliko je drvo suho, onda je riječ o dobrom izolatoru, što znači da vlaga u drvu povećava provodljivost. No, samo drvo loše provodi električnu struju.

3.1.2 Estetska svojstva drva

Kada je estetika u pitanju i kod drva moramo uzimati u obzir subjektivni doživljaj pojedinca; naime, estetska svojstva drva percipiramo osjetilima vida, dodira i mirisa, a posebno su važna kod odabira i primjena gdje je drvo podložno i izloženo dodiru.

3.1.2.1 Tekstura drva

Uz pomoć teksture raspoznavamo vrstu drva. Ovisno o presjeku, tekstura može biti čeona (poprečni presjek), radijalna (tekstura blistače) i tangenta (tekstura bočnice). Tekstura drva je uvjetovana

dimenzijama, oblikom i smjerom nizanja elemenata građe, te udjelom i raspredom pojedinih elemenata u građi drva. Pored prethodno navedene teksture drva, ona može biti i pravilna i nepravilna, s tim da predmeti nepravilne teksture mogu biti iznimno cijenjeni i atraktivni.

3.1.2.2 *Godovi*

Prema tipu godova sve vrste drva se mogu svrstati u nekoliko skupina:

- vrste bez izraženih godova,
- vrste s postupnim prijelazom iz ranog u kasno drvo,
- vrste s izraženim prijelazom iz ranog u kasno drvo,
- rastresito porozne vrste,
- semi-difuzno porozne vrste,
- prstenasto porozne vrste.

Godovi se mogu razlikovati i po stupnju markantnosti, po tijeku granične linije, po boji, po načinu nizanja te po širini.

3.1.2.3 *Sjaj drva*

Sposobnost površine da odražava svjetlosti predstavlja sjaj drva. Površinskom obradom predmeta pojačava se sjaj, posebice kod domaćih vrsta koje imaju malen ili gotovo nikakav sjaj. Čimbenici sjaja drva su atomska građa, udio infiltrata, presjek drva, kut upada svjetla...

3.1.2.4 *Miris drva*

Hlapljive tvari koje se nalaze u drvu utječu na njegov miris, koji kod nekih vrsta, kao što su bor i smreka, može biti ugodan, kod drugih, kao što je npr. cer, može biti neugodan, ali i ima i vrsta, kao što su bukva, jasen ili pak hrast, kod kojih je miris neutralan. Ukoliko je drvo napadnuto gljivicama, posebice ako je proces uznapredovao te je došlo do truljenja ili nekih drugih bolesti drva, miris može biti i neugodan. [1]

3.2 Mehanička svojstva drva

Drvo je porozan materijal anizotropnih svojstava. Njegova mehanička svojstva često nije moguće odrediti normiranim metodama koje se koriste za druge tehničke materijale. Tijekom određivanja osnovnih mehaničkih svojstava poput modula smicanja, vlačne i tlačne čvrstoće, modula elastičnosti, kontrakcije, žilavosti i ostalih, potrebno je navesti položaj ispitnih uzoraka u odnosu na karakteristične presjeke drva (radijalni, tangencijalni i poprečni presjek drva) na slici 5.

Prilikom ispitivanja također je bitno navesti iz koje komponente drva (u poprečnom presjeku) se uzimaju uzorci budući da drvo pokazuje razliku u svojstvima u ranim i kasnim godinama. Također se primjećuje razlika u svojstvima u longitudinalnom smjeru s obzirom na kut zakrenutosti u odnosu na tijek godova. Udio vlage u drvu značajno utječe na mehanička i druga svojstva pa se mora navesti uz vrijednosti ispitivanih svojstava. [7]

3.2.1 Tvrdoća

Tvrdoća materijala jest otpor što ga neko tijelo pruža prilikom prodiranja nekog tvrdog tijela u njegovu površinu. Prodiranje materijala može biti postepenim (gradualno) ili naglim djelovanjem sile (udarno). Budući da je drvo materijal anizotropnih svojstava, razlikujemo sljedeće tipove tvrdoće:

- longitudinalna,
- tangencijalna,
- radijalna.

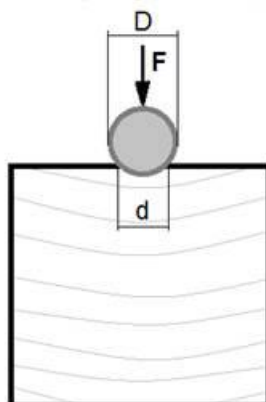
Tvrdoća drva, a tako i otpornost trošenju nisu u potpunosti točno definirani. Spomenute karakteristike, u kombinaciji s ostalim mehaničkim svojstvima, ukazuju na opću kvalitetu drva.

Tvrdoća drva ovisi o zbroju različitih anatomskih, fizikalnih i mehaničkih karakteristika. I upravo zbog navedene kombinacije tvrdoću se ne može jednostavno definirati. Ne postoji jedinstvena metoda za određivanje tvrdoće drva.

U praksi se koristi nekoliko metoda određivanja tvrdoće drva.

Tvrdoća se može mjeriti metodom po Brinellu. Brinellova metoda određivanja tvrdoće sastoji se od utiskivanja čelične kuglice radijusa 5 mm u drvo stalnom silom od 500 N ili 1000 N, ovisno o tvrdoći drva. Nakon 30 s, izmjeri se srednji promjer utora nastalog u površini drva s preciznošću od 0,1mm. [7,8]

Na slici 6 prikazan je postupak određivanja tvrdoće prema Brinellu.



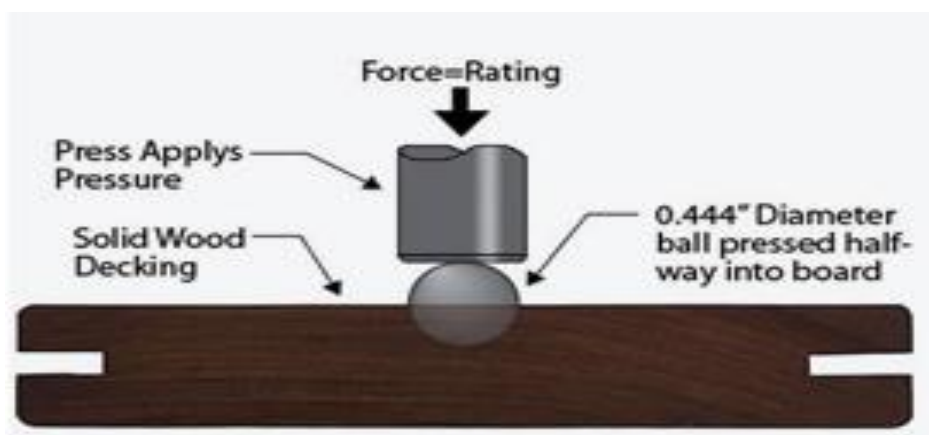
Slika 6. Postupak mjerenja tvrdoće drva po Brinellu [7]

Postoji još jedna metoda mjerenja tvrdoće drva, tzv. Janka test. Janka testom mjerimo silu potrebnu da čelična kuglica promjera 11,28 mm, opterećena odgovarajućom silom, prodre do polovice svojeg promjera i tako ostavi sferni otisak površine 200 mm². Janka test najčešće se koristi za provjeru tvrdoće drvnih materijala namijenjenih za izradu podova, odnosno parketa. [9]

Na slici 7 prikazan je postupak mjerenja tvrdoće po Janki. U tablici 3 prikaza je podjela nekih vrsta drva prema tvrdoći (prema Janki).

Tablica 3. Podjela vrsta drva prema tvrdoći (prema Janki) [7]

Razred tvrdoće	Broj tvrdoće, N/mm ²	Vrsta drva
vrlo meko drvo	do 35	paulovnja, smreka, topola crna, topola bijela, lipa, bor, vrba, jela, kesten divlji
meko drvo	35,1 do 50,0	ariš, joha, breza, borovica
srednje tvrdo drvo	50,1 do 65,0	kesten pitomi, platana, orah, brijest, dud
tvrd drvo	65,1 do 100	hrast, javor, trešnja, jasen, lijeska, tisa, bukva, cer, grab
vrlo tvrdo drvo	100,1 do 150,0	svib, maslina, crnika, žutika, mendulja
najtvrđe drvo	veći od 150,0	ebanovina, grenadil-drvo, gvajak



Slika 7. Prikaz Janka testa tvrdoće [10]

3.2.2 *Otpornost na abrazijsko trošenje*

Pojam koji izrazito ovisi o tvrdoći materijala, ali se ipak razlikuje od nje. Ovo mehaničko svojstvo predstavlja otpornost trošenju površine drva uslijed djelovanja malih čestica (abraziva), koje su tvrđe od same površine drva, nošenih vanjskim mehaničkim silama. Otpornost na abraziju također je povezana i s granicom razvlačenja te gustoćom drva, vrstom presjeka i sastavom drva (udio lignina, celuloze i hemiceluloze). Poprečni presjek drva ima najveću otpornost na trošenje. Radijalni presjek se troši malo više nego tangencijalni. Također je poznato da se porozne vrste drva troše manje od prstenasto poroznih vrsta jednake gustoće.

Otpornost na abraziju može se ispitati na različitim uređajima. Jedan od njih je i taber abrader. [7]

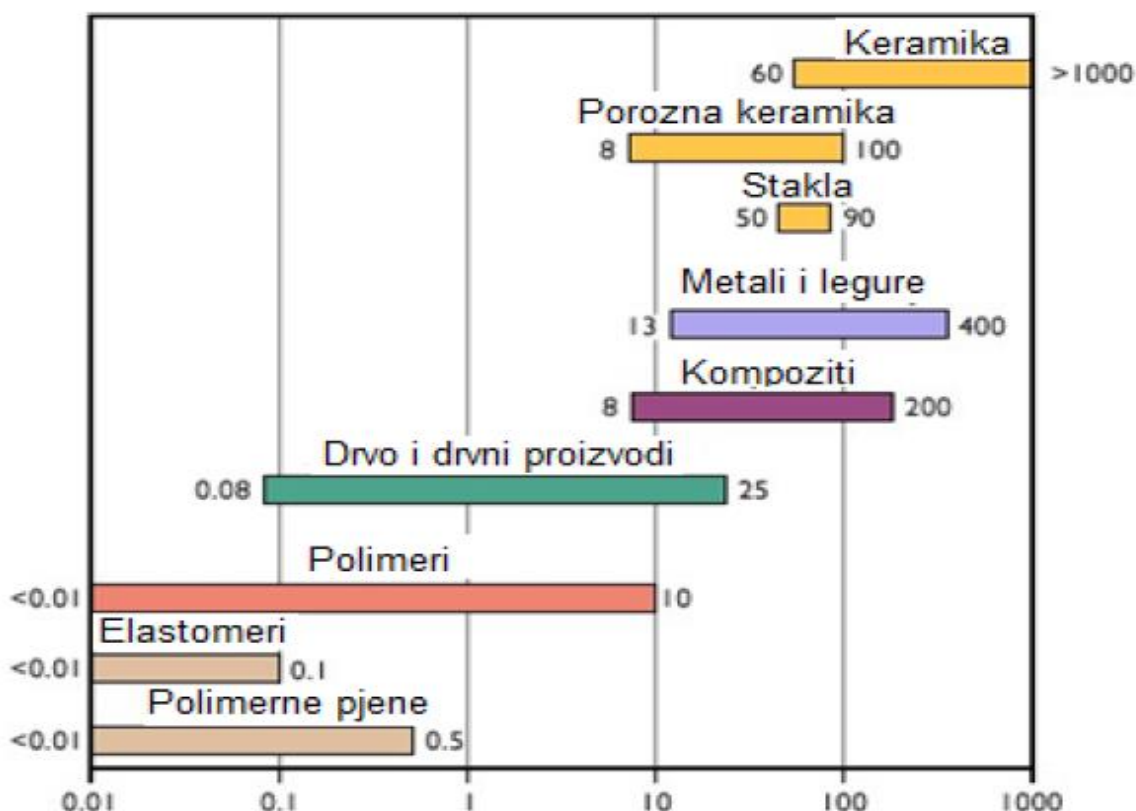
3.2.3 *Modul elastičnosti*

Modul elastičnosti je mjera za krutost ili elastičnost materijala i jedna je od važnijih mehaničkih karakteristika svih tehničkih materijala.

Modul elastičnosti je omjer između opterećenja na jedinici površine i deformacije na jedinici dužine, dok je krutost svojstvo materijala da se nakon deformacije uzrokovane vanjskom silom vraća u prvobitni oblik.

Vrijednost modula elastičnosti izrazito je različita za određene vrste drva. I unutar jedne vrste može biti velikih odstupanja.

Na slici 8 prikazane su vrijednosti modula elastičnosti za drvo i druge tehničke materijale.



Slika 8. Odnosi modula elastičnosti za drvo i druge tehničke materijale [7]

Ispitivanje ovog svojstva provodi se normiranim metodama na univerzalnoj kidalici. Tijekom mjerenja važno je poznavati udio vlage u drvu, temperaturu okoline te osigurati sljedivost rezultata mjerenja.

Modul elastičnosti različit je za tri karakteristična presjeka drva:

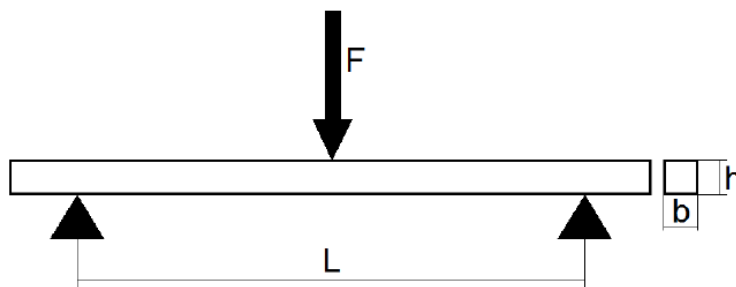
- modul elastičnosti u longitudinalnom smjeru - E_L ,

- modul elastičnosti u radijalnom smjeru - E_R ,
- modul elastičnosti u tangencijalnom smjeru - E_T .

Vrijednosti modula elastičnosti u longitudinalnom pravcu (E_L) su 10 do 20 puta više od modula elastičnosti u radijalnom (E_R) i tangencijalnom smjeru (E_T). Prema nekim literaturnim izvorima te razlike su još i veće – E_L je 42 do 122 puta viši od E_R i E_T za četinjače, a 12 do 62 puta viši za listače. U radijalnoj osi modul elastičnosti je 1,5 do 6 puta viši od onoga u tangencijalnoj.

Poznato je da na vrijednost modula elastičnosti u longitudinalnom smjeru može utjecati kut između sile i linije godova. U odnosu na tijek godova sila može djelovati pod kutom od 0 do 90 stupnjeva. Određivanje savojnog modula elastičnosti provodi se prema normama ISO ili EN.

Savojni modul elastičnosti se najčešće određuje standardnom metodom u tri točke, slika 9.



Slika 9. Određivanje savojnog modula elastičnosti ispitivanjem u tri točke [7]

Vrijednost modula elastičnosti računa se prema izrazu:

$$E = \frac{L^3(F_2 - F_1)}{4bh^3(a_2 - a_1)}, \text{ GPa}, \quad (3)$$

gdje je:

E – modul elastičnosti u GPa,

L - razmak između oslonaca u mm,

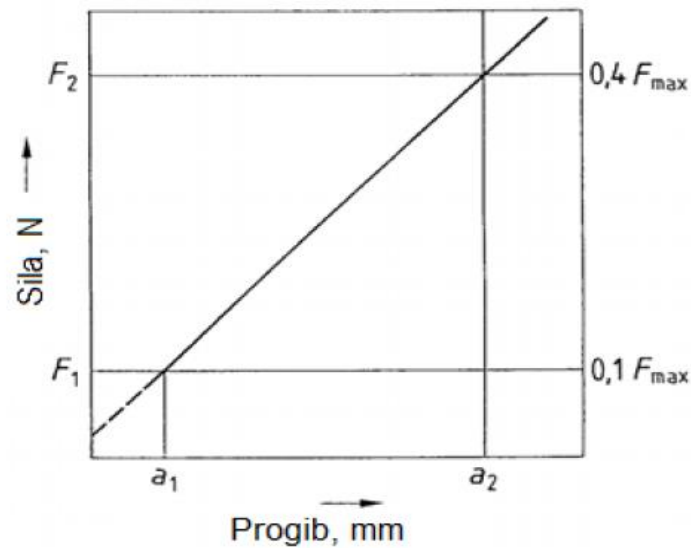
b - širina uzorka u mm,

h - visina uzorka u mm,

$F_2 - F_1$ – prirast sile u području linearnog dijela sila-progib dijagrama,

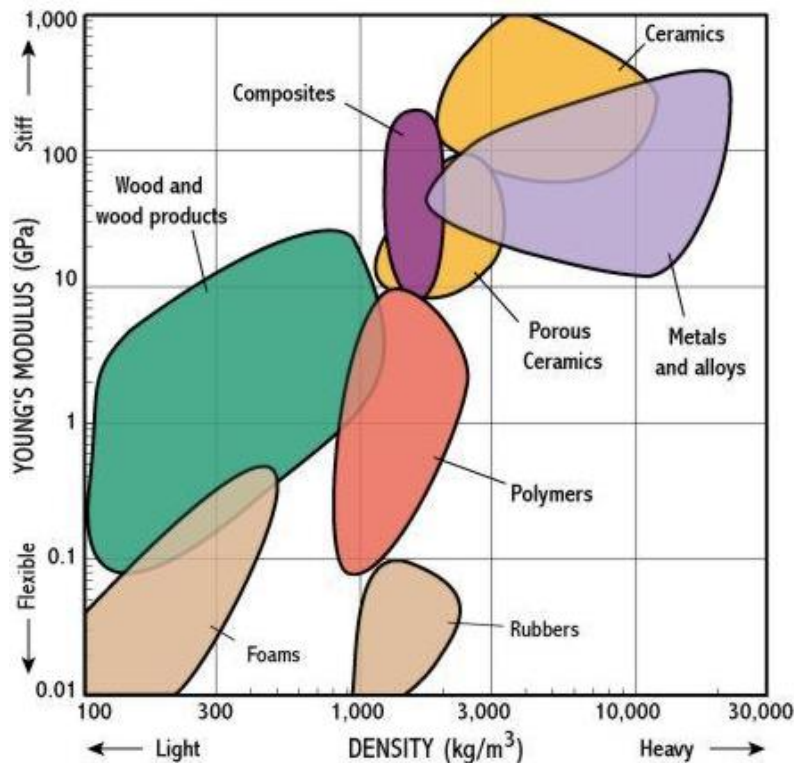
$a_2 - a_1$ – prirast progiba u području linearnog dijela sila-progib dijagrama.

Na slici 10 prikazan je način određivanja savojnog modula elastičnosti.



Slika 10. Elastično područje dijagrama sila-progib [7]

Drvo je vrijedan materijal u odnosu na druge materijale zbog izrazito povoljnog omjera modula elastičnosti i gustoće, tzv. Specifične krutosti, prikazane na slici 11.



Slika 11. Odnos modula elastičnosti i gustoće za tehničke materijale [11]

U tablici 3. prikazana su tri različita modula elastičnosti za običnu američku duglaziju.

Vidljivo je da se vrijednosti razlikuju s obzirom na položaj uzorka unutar goda (rani i kasni dio goda). [7]

Tablica 4. Prikaz modula elastičnosti za tri tipa zrelosti američke duglazije [12]

	Puno drvo	Rani dio goda	Kasni dio goda
E_L (MPa)	14500	10400	2070
E_R (MPa)	960	566	1752
E_T (MPa)	620	152	1215

3.2.4 Vlačna čvrstoća

Vlačna čvrstoća opisuje se kao najveći otpor koji nastane u uvjetima djelovanja opterećenja iste orijentacije, ali suprotnog smjera, koja uzorak nastoje rastegnuti usporedno ili okomito na smjer vlakana. Vlačna čvrstoća kod drva se razlikuje se s obzirom na djelovanje sile pa može biti

paralelna i okomita na vlakanca. Standardni test ispitivanja vlačne čvrstoće provodi se na kidalici, a čvrstoća se računa prema izrazu:

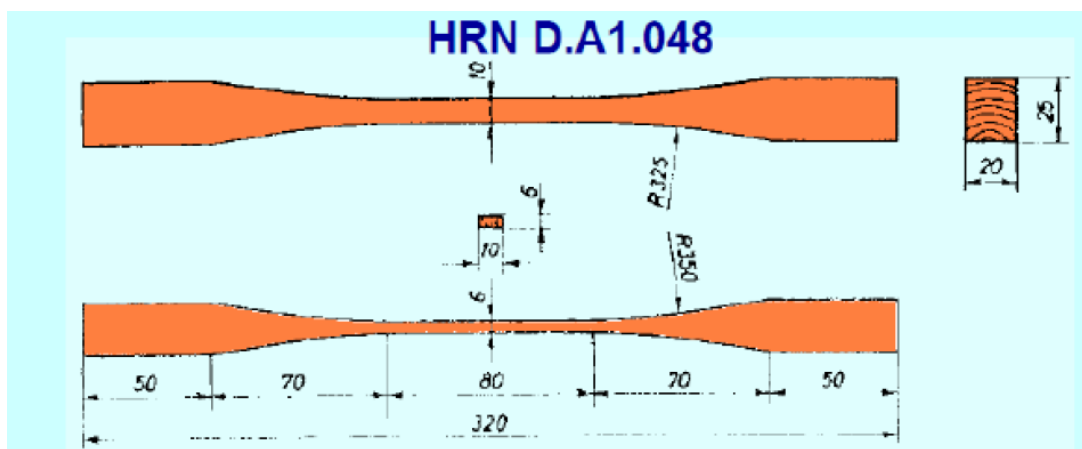
$$\sigma = \frac{F_{max}}{A_0}, \text{ MPa}, \quad (4)$$

gdje je:

F_{max} – maksimalna vlačna sila u N,

A_0 – početna površina poprečnog presjeka u mm².

Način ispitivanja je normiran kao i sama priprema epruvete za vlačno ispitivanje, slika 12.



Slika 12. Epruveta za vlačno ispitivanje po normi HRN D.A1.048 [13]

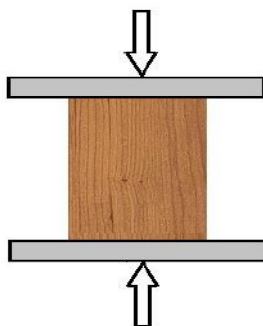
Realna vrijednost velike vlačne čvrstoće drva nije nužno iskoristiva u eksploataciji. Treba voditi računa o tome da je smična čvrstoća poprilično manja od vlačne i iznosi najviše 10% vlačne čvrstoće u smjeru vlakanca, što će biti objašnjeno u sljedećem poglavlju. U praksi se lomovi događaju tijekom smicanja i cijepanja drva, iako vlačna čvrstoća zadovoljava uvjete rada. S obzirom na pogreške u građi drva vlačna čvrstoća je izrazito sklona smanjivanju. Zbog anizotropnosti svojstava drva, ovo svojstvo se ispituje i u tangencijalnom i radijalnom presjeku. U tablici 7 prikazane u vrijednosti radijalne i tangencijalne vlačne čvrstoće za četinjače i listače. [7]

Tablica 5. Prikaz tangencijalne i radijalne vlačne čvrstoće četinjača i listača [7]

	$\sigma_T \left(\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right)$	$\sigma_R \left(\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right)$
četinjače	0,025-0,030	0,040-0,050
listače	0,040-0,065	0,070-0,100

3.2.5 Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća najveće je naprezanje koje se javlja na uzorku smještenom na horizontalnoj podlozi, kad na njega djeluje opterećenje okomito na podlogu i nastoji ga stlačiti, slika 13.

**Slika 13. Prikaz djelovanja tlačnog opterećenja [7]**

Kao i kod vlačne čvrstoće, ovdje treba razlikovati čvrstoću u smjeru vlakanaca i okomito na njih. Tlačna čvrstoća okomita na smjer vlakanaca u pravilu je tri do deset puta manja od čvrstoće u smjeru vlakanaca. Tlačna čvrstoća okomito na vlakanca važna je kod mnogih građevinskih konstrukcija kao i kod željezničkih pragova.

Tlačna čvrstoća računa se prema izrazu:

$$\sigma = \frac{F_T}{A_0}, \text{ MPa}, \quad (5)$$

gdje je:

F_T – maksimalna tlačna sila u N,

A_0 – početna površina poprečnog presjeka u mm^2 .

Vrijednosti tlačne čvrstoće u smjeru vlakana upola su manje od vrijednosti vlačne čvrstoće u istom smjeru. Tlačna čvrstoća četinjača u tangencijalnom smjeru iznosi od 12,8 do 17,5 % tlačne čvrstoće u smjeru vlakana, a veća je za 8,5 do 10,5 % od tlačne čvrstoće u radijalnom smjeru. Listače imaju tlačnu čvrstoću u radijalnom smjeru za 22,6 do 35,2 % veću od vrijednosti tlačne čvrstoće u smjeru vlakana. U odnosu na tangencijalni smjer viša je za 15,4 do 23,1 %.

Pri tlačnom opterećenju može doći do izvijanja. Neke vrste drva, prije nego dosegnu granicu izvijanja, pucketaju. Na taj način upozoravaju na predstojeću opasnost od loma. To svojstvo je izuzetno važno u građevinarstvu i rudarstvu. Pucketanje je izražajnije što je temperatura viša i drvo suhlje. Smreka, jela, ariš, bor, bukva, grab, breza, hrast i bagrem imaju izraženo ovo svojstvo. [7] U tablici 6 prikazane su vrijednosti tlačnih čvrstoća nekih domaćih vrsta drva.

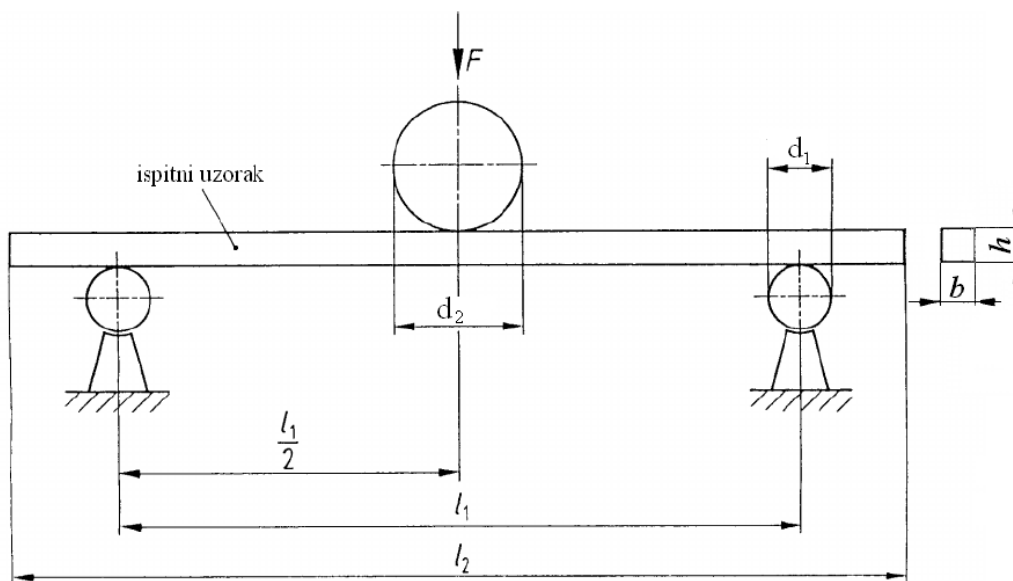
Tablica 6. Prikaz tlačnih čvrstoća nekih domaćih vrsta drva [7]

Vrsta drva	Tlačna čvrstoća (N/mm ²)
	$\sigma_R \dots \sigma_T \dots \sigma_L$
Hrast	54,0...61,0...67,0
Jasen	23,0...52,0...80,0
Breza	38,0...58,0...100,0
Bukva	41,0...62,0...99,0
Brijest	37,0...56,0...73,0
Orah	46,5...72,0...89,0
Ariš	35,0...47,0...69,0
Bor	35,0...55,0...94,0
Smreka	35,0...50,0...79,0
Jela	31,0...47,0...59,0

3.2.6 Savojna čvrstoća

Kada na drvo djeluje sila koja ga nastoji saviti, javlja se savojno naprezanje. Količina savojnog naprezanja koju tijelo može podnijeti prije nego se slomi naziva se savojna čvrstoća. Ona je kao takva jako specifična, jer predstavlja kompleksni otpor djelovanju sile. Izrazito je bitna za sve konstrukcije u drvnim gradnjama, stolariji i izradi namještaja. Kada neko opterećenje pokušava saviti tijelo, javlja se više tipova normalnog naprezanja u tom tijelu. Kada računamo savojna naprezanja izotropnih tijela pretpostavljamo linearnu raspodjelu normalnih naprezanja unutar tijela. U anizotropnim materijalima, linearna raspodjela naprezanja vrijedi samo do granice proporcionalnosti.

Savojna čvrstoća ispituje se najčešće na malim gredicama pravokutnog presjeka. Dužina grede je jednaka ili veća od $18 \times h$, slika 14. Grede je poduprta s dva oslonca, s međusobnim razmakom od $15 \times h$. Mehanička sila F djeluje na sredini uzorka. Postupak određivanja savojne čvrstoće predočen je slikom 14. [7]



Slika 14. Postupak ispitivanja savojne čvrstoće [12]

Savojna čvrstoća računa se prema izrazu:

$$\sigma_s = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}, \text{ MPa}, \quad (6)$$

gdje su:

F – savojna sila u N,

L – razmak između oslonaca u mm,

b – širina grede u mm,

h – visina grede u mm.

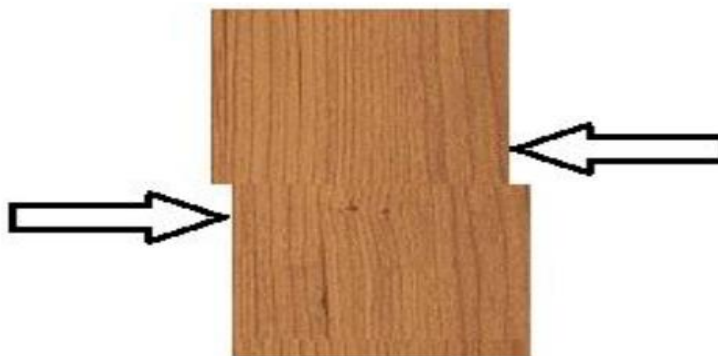
3.2.7 Smična čvrstoća

Smična čvrstoća je otpornost tijela prema smičnom naprezanju. Smično naprezanje je ono naprezanje koje nastaje djelovanjem smičnih sila, tj. onih sila koje djeluju paralelno. Te smične sile mogu djelovati uzdužno na vlakanca ili okomito na njih, odnosno paralelno ili okomito na smjer širenja godova.

Vrijednosti smične čvrstoće u smjeru vlakanca u tangencijalnoj ravnini veće su za 15 do 35 % nego u radijalnoj. Smična čvrstoća u smjeru vlakanca je u rasponu od 2,0 do 16,0 N/mm².

Smična čvrstoća u smjeru vlakanca za četinjače je u rasponu od 4,5 do 10,0 N/mm², a za listače od 4,5 do 16,0 N/mm². Egzotične vrste drva imaju smičnu čvrstoću u smjeru vlakanca od 2,0 do 15,0 N/mm². [7]

Na slici 15 prikazano je djelovanje smičnih sila na ispitini uzorak pri određivanju smične čvrstoće.



Slika 15. Djelovanje smičnih sila na drvo [7]

Smična čvrstoća računa se prema izrazu:

$$\sigma_w = \frac{F_{\max}}{b \cdot l}, \text{ MPa}, \quad (7)$$

gdje je:

F_{\max} – maksimalna smična sila u N,

b i l – dimenzije površine smicanja u mm.

Ovaj tip čvrstoće važan je kod pojave smičnih sila, odnosno kod uklještenih dijelova i pri kontaktu dijelova.

3.2.8 Žilavost

Žilavost je svojstvo koje govori kako će se neki materijal ponašati u specifičnim uvjetima udarnog opterećenja. Često se koristi naziv udarni rad loma. Ispituje se na Charpyjevom batu prikazanom na slici 16, a računa se prema izrazu:

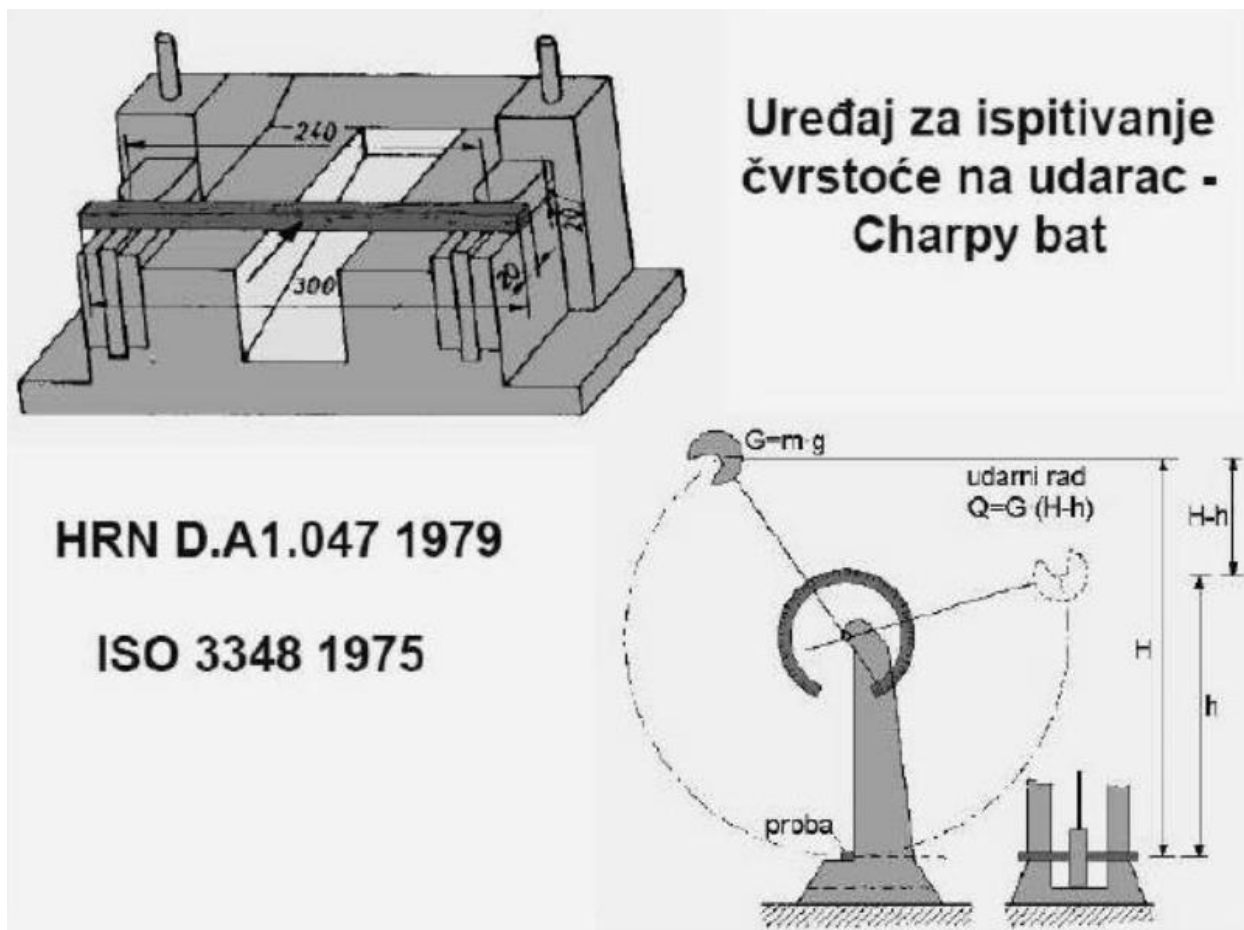
$$KU(KV) = G(H - h), \text{ J}, \quad (8)$$

gdje je:

G – težina bata u N,

H – početna visina bata u m,

h - visina bata nakon loma epruvete u m.



Slika 16. Charpyev bat [14]

Kao i druga mehanička svojstva, žilavost je ovisna o usmjerenosti strukture. Najmanja žilavost postiže se kada strano tijelo udara tangencijalno na godove, a najveća kada udara radijalno na godove. Izrazito je bitna kod svih drvenih konstrukcija koje su izložene udarnom naprezanju ili kod konstrukcija čiji bi lom izazvao veliku opasnost. [7]

3.3 Biološka degradacija drva

Drvo je materijal koji nastaje isključivo u prirodi, i kao takav je biokompatibilan, ali i biorazgradljiv. Budući da je drvo većinski sastavljeno od ugljikohidrata (celuloza, hemiceluloza), ali i drugih tvari (smole, voskovi i sl.), ono predstavlja izrazito primamljiv izvor energije za mnoge parazite i štetočine, kao što su kukci, gljivice i bakterije – upravo zbog kojih drvo mora biti

adekvatno zaštićeno, jer inače postaje podložno propadanju. Propadanje kreće od vanjskih dijelova drva (kore i bjeljike), te se rijetko nastavlja do srževine drva. Iako je srževina zaštićena okolnim dijelovima drva i sadržajem fenolnih smola, u lošijim uvjetima zaštite, te uz ključne elemente temperature i vlage, i ona može biti sklona propadanju. [7]

Norma HRN EN 350-2 razvrstava sve vrste drva prema prirodnoj trajnosti u nekoliko kategorija:

Prema otpornosti na gljivice:

- 1 – vrlo otporne,
- 2 – otporne,
- 3 – srednje otporne,
- 4 – slabo otporne,
- 5 – neotporne.

Prema otpornosti na kukce:

- 1 – otporne,
- 2 – neotporne.

Prema otpornosti na termite i morske organizme:

- 1 – otporne,
- 2 – srednje otporne,
- 3 – neotporne.

Primjeri vrlo otpornih vrsta su bagrem i hrast, primjeri srednje otpornih vrsta su bor i jasen, a primjeri slabo otpornih su bukva i lipa. [15]

Trajnost drva ovisi i o uvjetima eksploatacije [Tablica 8.] .

Tablica 7. Trajnost nekih domaćih vrsta u godinama [7]

Vrsta drva	Nezaštićen prostor	Natkriven prostor	Suhi prostor
Jela	do 50	do 50	do 900
Bor	do 85	do 120	do 1000
Smreka	do 70	do 70	do 900
Hrast	do 100	do 200	do 800
Bukva	do 60	do 100	do 800

U svrhu zaštite od propadanja, drvo se može impregnirati određenim tvarima (impregntorima) koje se u drvo unose sa ili bez povišenog tlaka. Način primjene impregnatora ovisi o samoj vrsti drva, te odnosu između unutarnjeg i vanjskog dijela drva. Ova sredstva se dijele na sredstva topiva u vodi ili u ulju, a na njihovu učinkovitost zaštite direktno djeluju dubina prodiranja, trajnost i toksičnost.[7]

3.3.1 *Hrastov Abonos (fosilizacija hrasta)*

Kada drvo odleži dugi niz godina u mulju vode tekućice, ono se fosilizira, i nastaje tzv. abonos (eban). Ako je riječ o hrastu, nastaje hrastov abonos, odnosno “crni hrast”. Crna boja rezultat je dugogodišnje infiltracije različitih tvari u tkivo drva kao i kemijskih reakcija unutar drva. Nedostatkom kisika sprječeno je destruktivno djelovanje mikroorganizama i gljiva. Taloženje minerala iz tekuće vode abonosu daje njegovu trajnost. Kod hrastovog abonosa se, skupa s bojom, mijenjaju fizikalna i mehanička svojstva drva. [16]

U tablici 7. prikazana je usporedba nekih fizikalnih i mehaničkih svojstava recentnog hrasta i abonosa. Iako su neka od svojstava abonosa lošija od svojstava recentnog hrasta, radi se o vrlo skupocjenom i traženom drvu koje se upotrebljava za razne primjene, no najčešće za skupi namještaj, izradu dijelova glazbala i rezbarske radove. Hrastovina koja je dugo godina provela u mulju očuvana je od truljenja zahvaljujući anaerobnom, kiselom okruženju, u kojem može odležati i nekoliko tisuća godina. Određivanje starosti tako starog drva zahtjeva radiokarbonsko datiranje, odnosno određivanje starosti na temelju vremena poluraspada izotopa ugljika ^{14}C , koja se u

Hrvatskoj provode na Institutu Ruđer Bošković. Najstariji abonos datiran na Institutu Ruđera Boškovića bio je star nevjerojatnih 8290 godina. Skladištenje ovog drva je iznimno zahtjevno, jer postoji veliki rizik od pucanja na suhom zraku. [16]

Na slici 20. prikazane su ispiljene daske masiva abonosa, dok su slici 21. prikazani su uzorci recentnog hrasta i abonosa gdje se vidi velika razlika u boji.

Tablica 8. Usporedba osnovnih svojstava recentnog hrasta i abonosa [17]

Svojstvo	Recentni hrast	Abonos
Srednja gustoća u apsolutno suhom stanju [g/cm^3]	0,608	0,704
Srednja vrijednost utezanja u radijalnom smjeru [%]	5,1	10,5
Srednja vrijednost utezanja u tangencijalnom smjeru [%]	9,1	18,6
Srednja vrijednost totalnog volumnog utezanja [%]	13,7	27,6
Srednja vrijednost savojne čvrstoće [MPa]	91,4	101,3
Srednja vrijednost tlačne čvrstoće paralelno s vlakancima [MPa]	53,1	52,3



Slika 17. Ispiljene daske od abonosa [16]



Slika 18. Prikaz recentnog hrasta lužnjaka i hrastovog abonosa [17]

4 Eksperimentalni dio rada

4.1 Cilj rada i provođenje ispitivanja

Cilj ovog završnog rada bio je odrediti utjecaj proteklog vremena na abrazijsku otpornost subfosilnog drva hrasta izvađenog iz korita rijeke Save s područja Bosanske Posavine. Dobiveni rezultati uspoređeni su s abrazijskom otpornošću recentnog hrasta s istog područja. Danas u tom području raste hrast lužnjak pa se pretpostavlja da su i abonosi pripadnici iste vrste. Zbog svojih mehaničkih svojstava hrast je jedna od najcjenjenijih vrsta s našeg područja. U literaturi nema puno podataka o njegovoj abrazijskoj otpornosti, a u tablici 6 prikazana su neka mehanička svojstva hrasta lužnjaka.

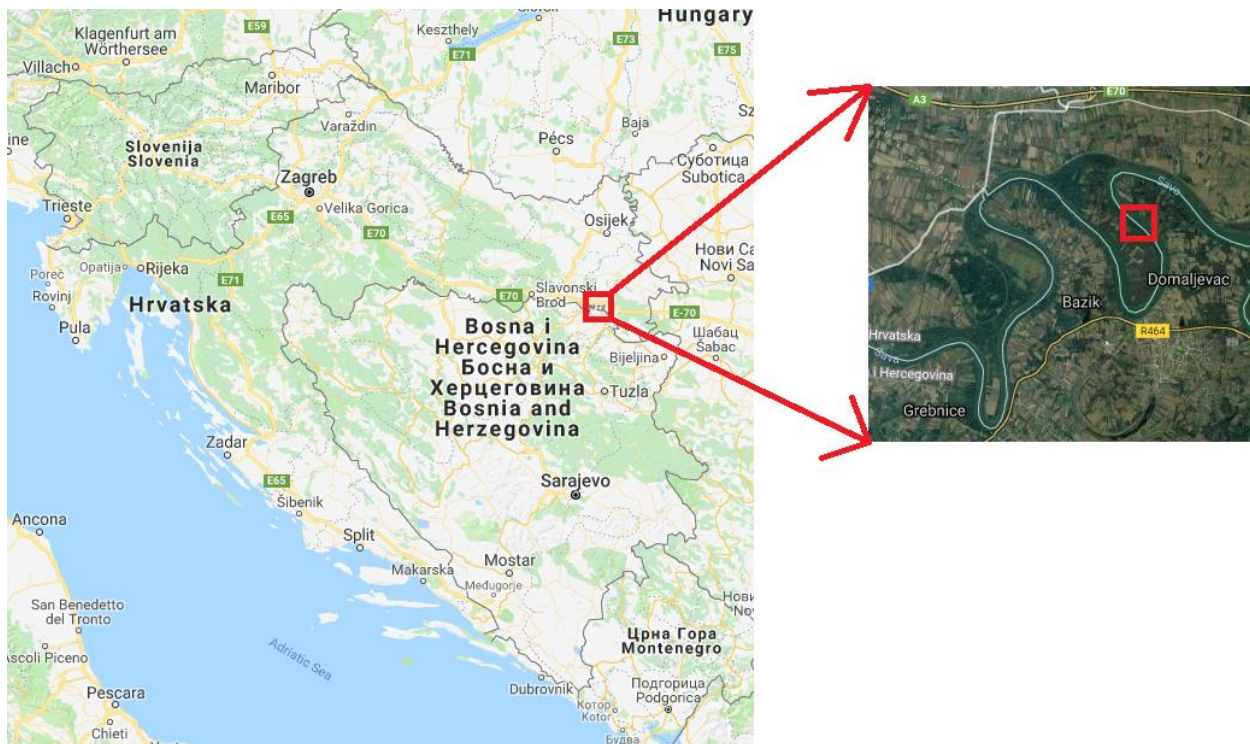
U svrhu postizanja zadanog cilja napravljena su sljedeća ispitivanja:

- određivanje starosti uzoraka
- određivanje gustoće uzoraka
- analiza strukture uzoraka
- određivanje abrazijske otpornosti uzoraka

4.2 Materijal za ispitivanje

Ispitivanja su provedena na uzorcima recentnog i subfosilnog hrasta. Uzorci subfosilnog hrasta izvađeni su tijekom eksploatacije šljunka iz korita rijeke Save s područja prikazanog na slici 19. S istog zemljopisnog područja potječe i recentni uzorak.

Uzorci za sva potrebna ispitivanja izrezani su iz vanjskog dijela srževine.



Slika 19. Lokacija pronalaska subfosilnog hrasta

Tablica 9. Osnovna mehanička svojstva hrasta lužnjaka [7]

Mehaničko svojstvo	Iznos (R...T...L)
Modul elastičnosti [GPa]	10,0...11,7...13,2
Savojna čvrstoća [MPa]	74,0...88,0...105,0
Tlačna čvrstoća [MPa]	54,0...61,0...67,0
Smična čvrstoća [MPa]	6,0...11,0...13,0
Vlačna čvrstoća [MPa]	50,0...90,0...180,0
Janka tvrdoća [MPa]	28,0...65,0...101,0

4.3 Ispitivanje starosti uzoraka

Starost subfosilnih uzoraka određena je istraživačkom metodom određivanja starosti radioaktivnog izotopa ugljika ^{14}C na Institutu Ruđer Bošković.

U tablici 9 prikazani su dobiveni rezultati.

Tablica 10. Rezultati određivanja starosti [18]

	Konvencijska starost BP [godine]	Kalibrirana starost [godine]	Medijan [godine]
Uzorak 1	890 ± 50	1046-1212 cal AD	1135 cal AD
Uzorak 2	1195 ± 50	769-892 cal AD	828 cal AD

Konvencijska starost je apsolutna starost u godinama računana „od sadašnjosti“ (*BP – before present*), a kao relevantna godina uzima se 1950. Rezultat je izračunat uz konvencijski usvojeno vrijeme poluraspada izotopa ^{14}C od 5570 godina.

Kalibrirana starost je starost izražena u povijesnim godinama (cal AD/BC), određena na osnovi dendrokronološke kalibracijske krivulje. [18]

Uzorak recentnog hrasta (uzorak 0) sušen je u natkrivenom prostoru zadnjih 10 godina.

4.4 Određivanje gustoće uzoraka

Gustoća uzoraka ispitana je prema normi ISO 13061 (2014), na posebno izrezanim uzorcima u obliku četverostrane prizme dimenzija $30 \times 30 \times 20$ mm.

Na slici 20 prikazani su uzorci s pomoću kojih je određena gustoća.

Gustoća se određuje prema izrazu:

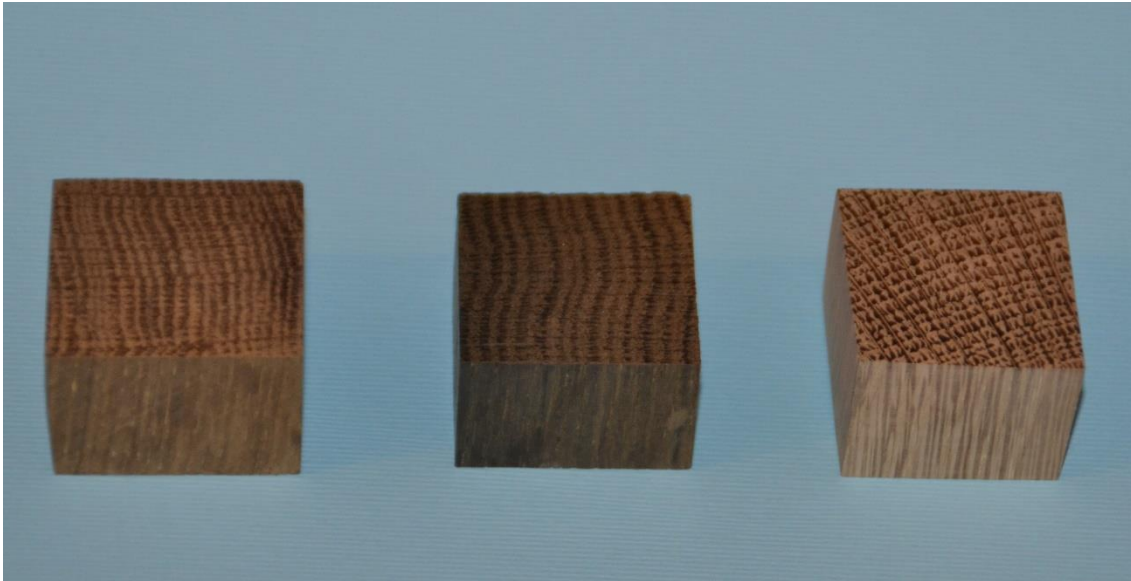
$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w}, \text{ g/cm}^3$$

gdje je:

- ρ_w – gustoća za neki udio vlage (w),
- m_w – masa za neki udio vlage,
- V_w – volumen za neki udio vlage.

Masa uzoraka određena je na vagi s točnošću većom od 0,001 g, a dimenzije su izmjerene pomičnom mjerkom.

Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 10.



Slika 20. Uzorci za ispitivanje gustoće

Tablica 11. Vrijednosti gustoće uzoraka

Uzorak	Gustoća, g/cm ³
0	0,7587
1	0,726
2	0,673

4.5 Struktura materijala

Na svim uzorcima izmjerena je srednja širina goda u području s kojeg su uzeti uzorci za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje.

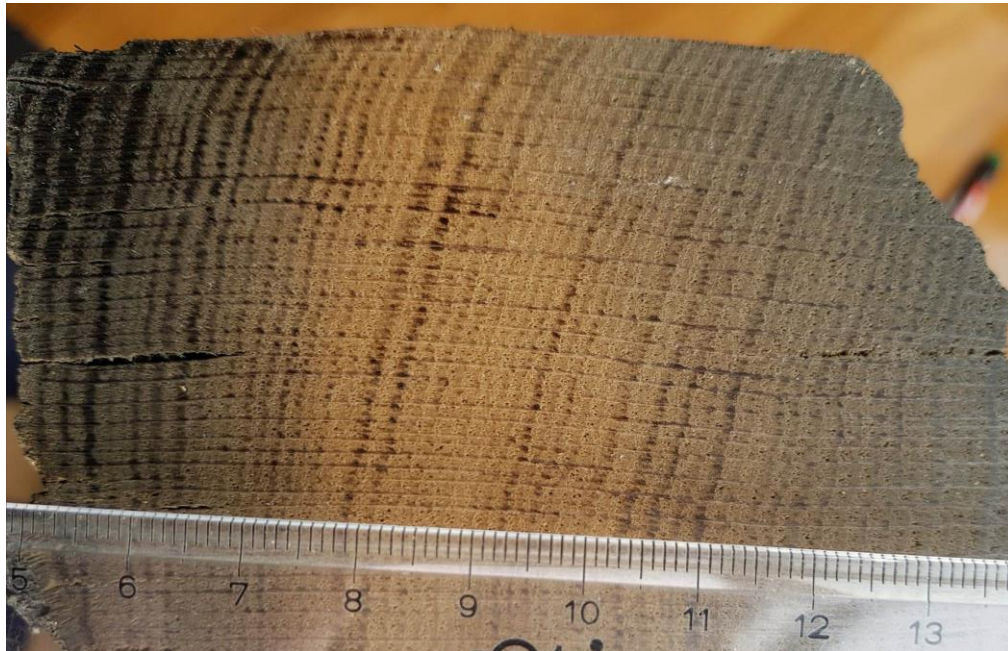
Na slikama 21, 22 i 23 prikazani su popečni presjeci uzoraka gdje se vide tijek i širina godova, a u tablici 11 vide se rezultati mjerenja srednje širine godova.

Tablica 12. Srednja širina godova

Uzorak	Srednja širina goda, mm
0	2,11
1	1,72
2	1,79



Slika 21. Makrostruktura poprečnog presjeka recentnog hrasta (uzorak 0)



Slika 22. Makrostruktura poprečnog presjeka subfosilnog hrasta (uzorak 1)



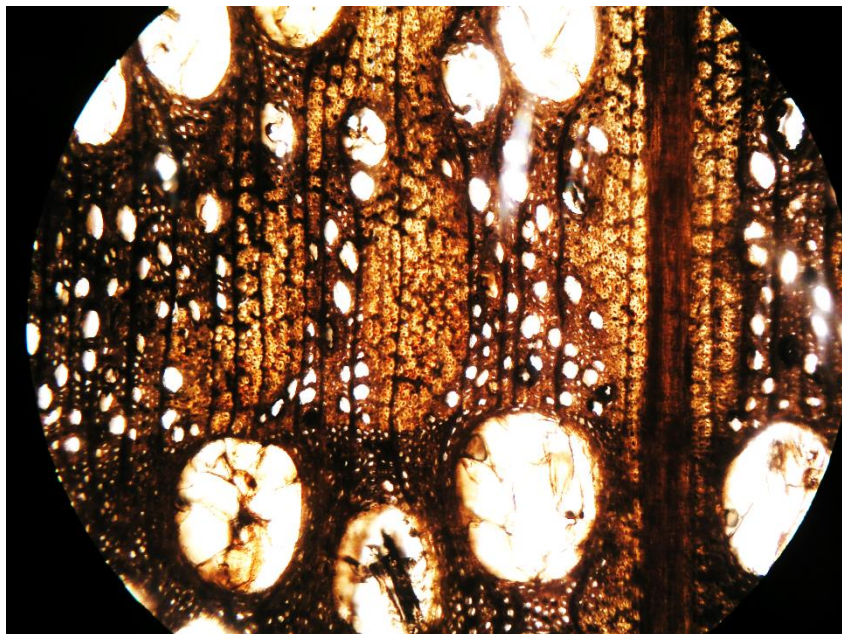
Slika 23. Makrostruktura poprečnog presjeka subfosilnog hrasta (uzorak 2)

Mikrostruktura poprečnog presjeka analizirana je u Laboratoriju za polimere i kompozite, Fakulteta strojarstva i brodogradnje, na svjetlosnom mikroskopu OLYMPUS BX 51-5.

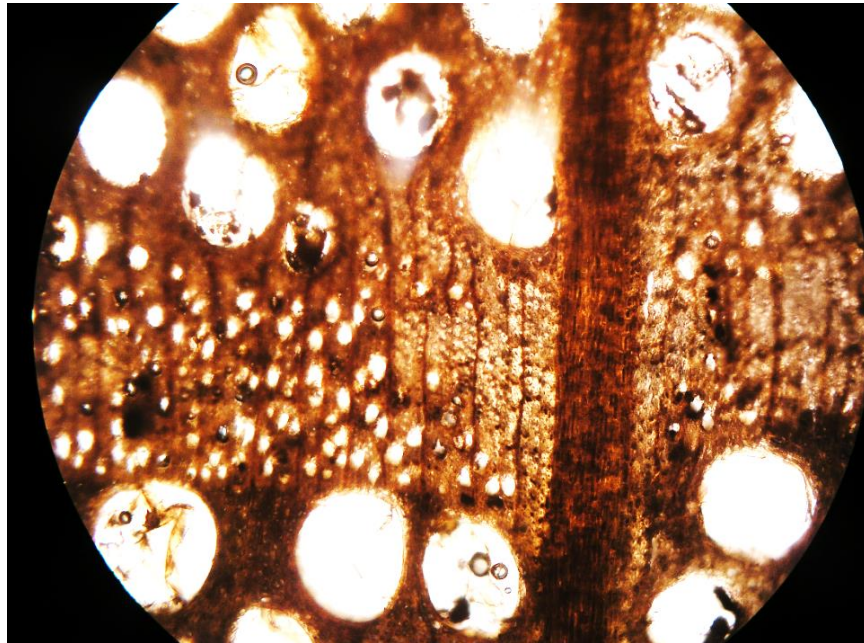
Na slikama 27, 28 i 29 prikazane su mikrostrukture poprečnih presjeka uzoraka 0, 1 i 2.



Slika 24. Mikrostruktura poprečnog presjeka uzorka 0 [19]



Slika 25. Mikrostruktura poprečnog presjeka uzorka 1



Slika 26. Mikrostruktura poprečnog presjeka uzorka 2

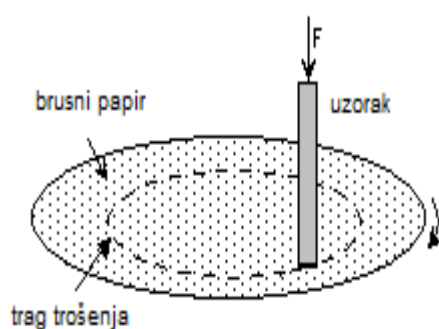
4.6 Ispitivanje otpornosti na trošenje abrazijom

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provedeno je u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Uzorci su abradirani na uređaju Taber abrader, prikazanom na slici 30, s abrazivnim rotirajućim diskom promjera 125 mm. Brzina vrtnje bila je 1 %/s, obodne brzine 0,251 m/s. Tijekom ispitivanja uzorci su na površinu brusnog papira pritisnuti konstantom silom od 4,91 N. Površina uzoraka abradirana je brusnim papirom s abrazivnim česticama od silicijevog karbida.

U tablici 12 prikazani su primjenjeni brusni papiri, njihova gradacija i srednja veličina promjera abrazivnih čestica.

Tablica 13. Brusni papiri korišteni za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje [20]

Oznaka papira prema ISO/FEPA	Prosječni promjer abrazivnog zrna D [μm]
P600	25,8
P400	35
P280	52,2
P120	125
P80	201
P60	269
P40	425

**Slika 27. Prikaz abrazijskog trošenja na Taber abraderu**

Kod svih uzoraka broj ciklusa trošenja bio je jednak i iznosio je 150 okretaja. Dimenzije abradirane površine uzoraka bile su $4,5 \times 4,5$ mm. Kod svih uzoraka abradiran je poprečni presjek. Uzorci prije trošenja prikazani su na slici 28.

Prije i nakon ispitivanja na svakom brusnom papiru izmjerena je masa uzoraka, na temelju čega je izračunat gubitak mase nakon 150 okretaja na svakom brusnom papiru, kao što je prikazano u tablici 11.



Slika 28. Uzorci prije trošenja

Zbog različite gustoće uzoraka gubitak mase je sveden na gubitak volumena, a otpornost na abrazijsko trošenje je definirana preko gubitka volumena svedenog na površinu poprečnog presjeka trošenih uzoraka (specifični gubitak materijala pri abraziji).

U tablicama 12, 13 i 14 prikazane su vrijednosti veličine poprečnog presjeka, gubitak volumena, i specifični gubitak materijala pri abraziji za sve uzorke i kvalitete brusnog papira.

Tablica 14. Gubitak mase nakon 150 okretaja

Kvaliteta brusnog papira	Uzorak 0 $\Delta m, g$	Uzorak 1 $\Delta m, g$	Uzorak 2 $\Delta m, g$
P600	0,00213	0,00336	0,00236
P400	0,00537	0,01179	0,00578
P280	0,01479	0,02632	0,017
P120	0,04448	0,09083	0,0754
P80	0,05468	0,08555	0,0743
P60	0,04467	0,1018	0,08464
P40	0,02950	0,07147	0,06488

Tablica 15. Veličine poprečnih presjeka trošenih površina uzoraka

Kvaliteta brusnog papira	Uzorak 0 A_0, mm^2	Uzorak 1 A_1, mm^2	Uzorak 2 A_2, mm^2
P600	18,61	19,14	21,39
P400	18,55	19,34	21,39
P280	18,68	19,62	21,62
P120	19,23	20,02	22,47
P80	19,80	20,32	23,33
P60	21,51	23,67	25,07
P40	22,07	24,99	25,99

Tablica 16. Gubitak volumena uzoraka

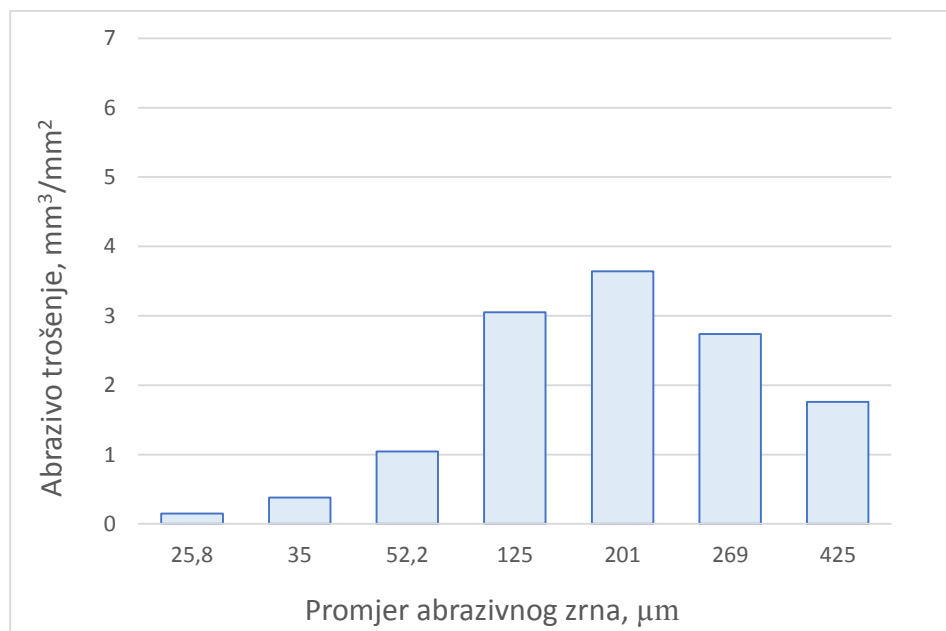
Kvaliteta brusnog papira	Uzorak 0 $\Delta V_0, \text{mm}^3$	Uzorak 1 $\Delta V_1, \text{mm}^3$	Uzorak 2 $\Delta V_2, \text{mm}^3$
P600	2,81	4,63	3,51
P400	7,08	16,24	8,59
P280	19,49	36,25	25,26
P120	58,63	125,11	112,04
P80	72,07	117,84	110,40
P60	58,88	140,22	125,77
P40	38,88	98,44	96,40

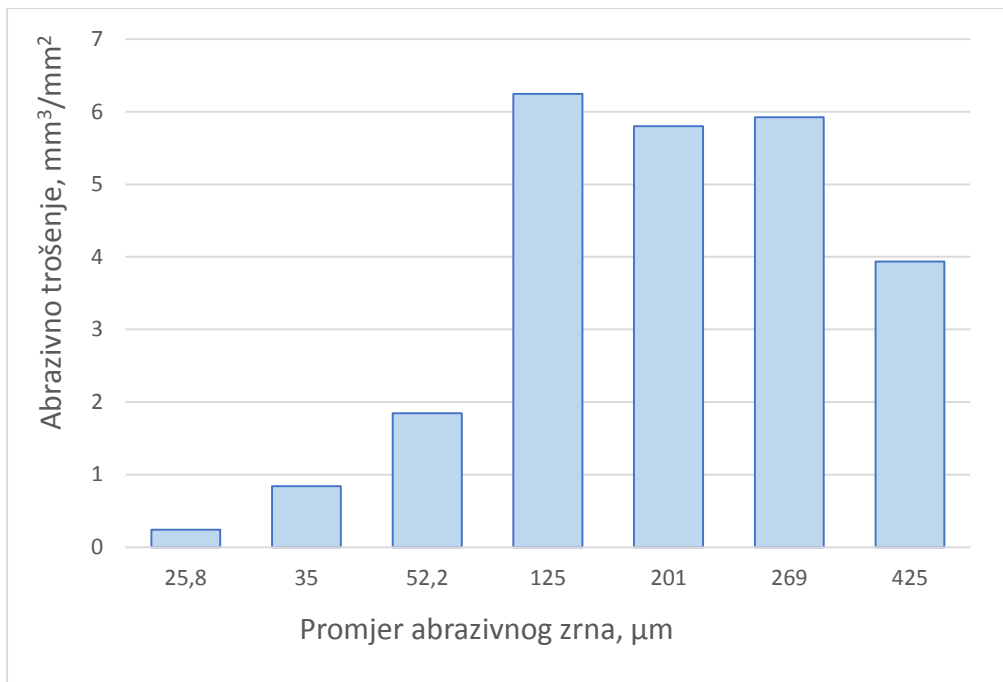
Tablica 17. Specifični gubitak materijala pri abrazijskom trošenju

Kvaliteta brusnog papira	Uzorak 0 $\Delta V_0/A_0$, mm^3/mm^2	Uzorak 1 $\Delta V_1/A_1$, mm^3/mm^2	Uzorak 2 $\Delta V_2/A_2$, mm^3/mm^2
P600	0,15	0,24	0,16
P400	0,38	0,84	0,40
P280	1,04	1,85	1,17
P120	3,05	6,25	4,99
P80	3,64	5,80	4,73
P60	2,74	5,92	5,02
P40	1,76	3,94	3,71

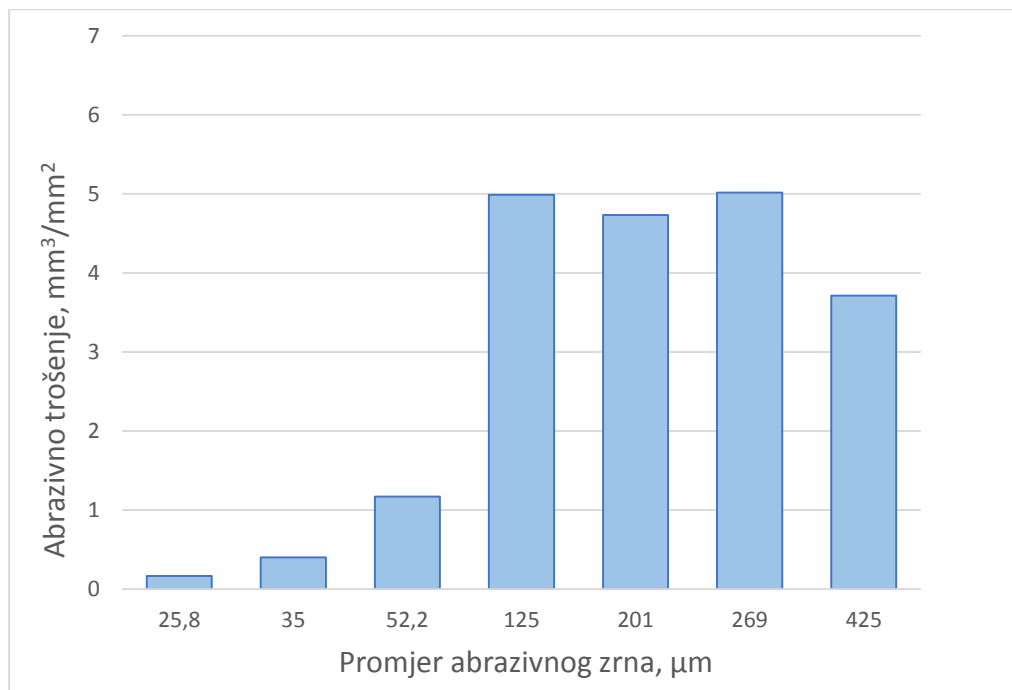
Na sljedećim slikama su grafički prikazi rezultata ispitivanja abrazijskog trošenja.

Na slikama 29, 30 i 31 prikazano je trošenje uzorka za sve brusne papire.

**Slika 29. Intenzitet trošenja uzorka 0 za različite kvalitete brusnog papira**



Slika 30. Intenzitet trošenja uzorka 1 za različite kvalitete brusnog papira



Slika 31. Intenzitet trošenja uzorka 2 za različite kvalitete brusnog papira

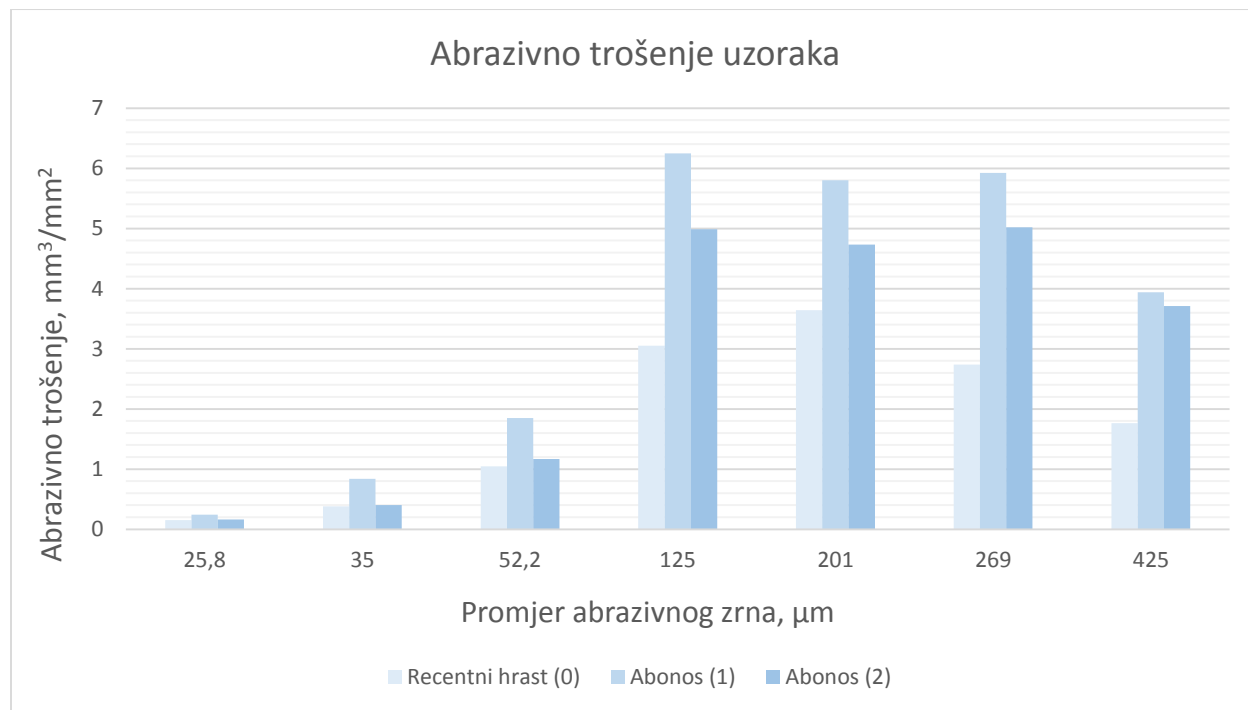
4.7 Analiza rezultata

Iz dijagrama na slici 32 može se vidjeti da s porastom abrazivnog zrna trošenje općenito raste do određene veličine abrazivnog zrna. Nakon toga intenzitet trošenja se smanjuje. Ovaj fenomen se opisuje preko granične veličine abrazivnog zrna. Za recentni hrast ta veličina iznosi 201 μm , dok za oba uzorka subfosilnog hrasta granična veličina abrazivnog zrna je nešto niža i iznosi 125 μm .

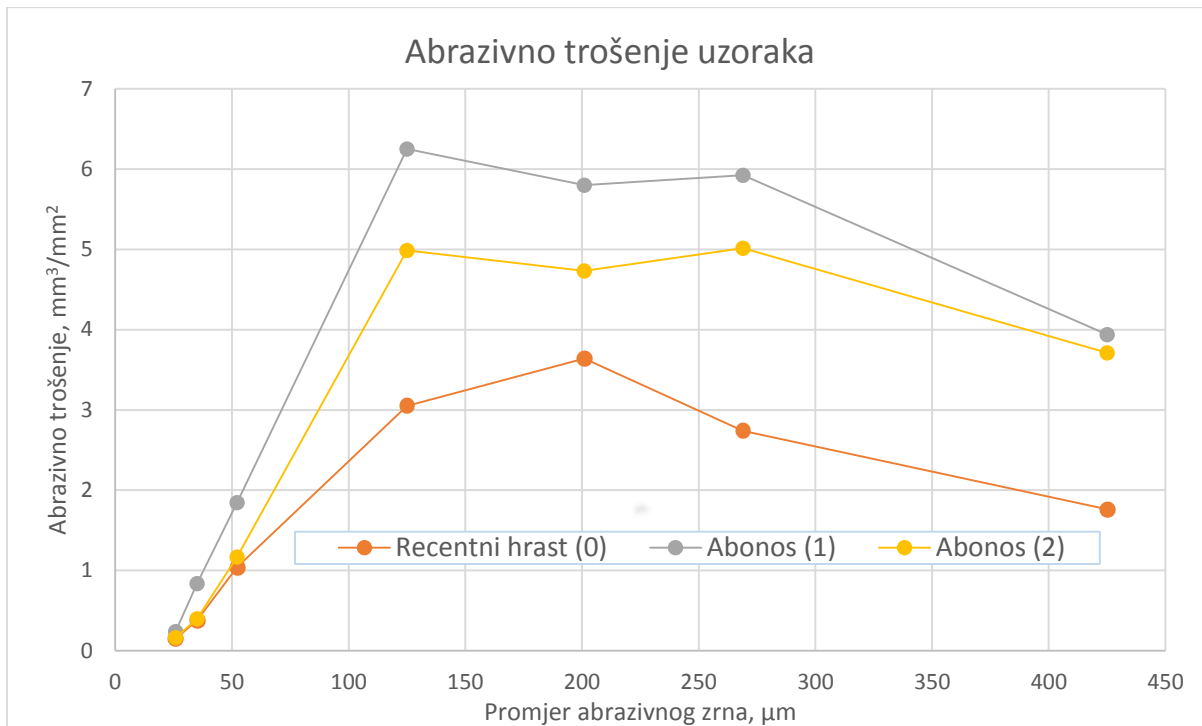
Recentni hrast se najmanje troši za sve kvalitete brusnog papira. Uzorak 1, iako je 200-300 godina „mlađi“ od uzorka 2, više se troši na svim brusnim papirima. Važno je za napomenuti da uzorak 1 ima veću gustoću od uzorka 2, a najveću gustoću ima recentni hrast.

Također se može uočiti da je razlika u trošenju među uzorcima to veća što je papir grublji, osobito između recentnog i subfosilnih uzoraka.

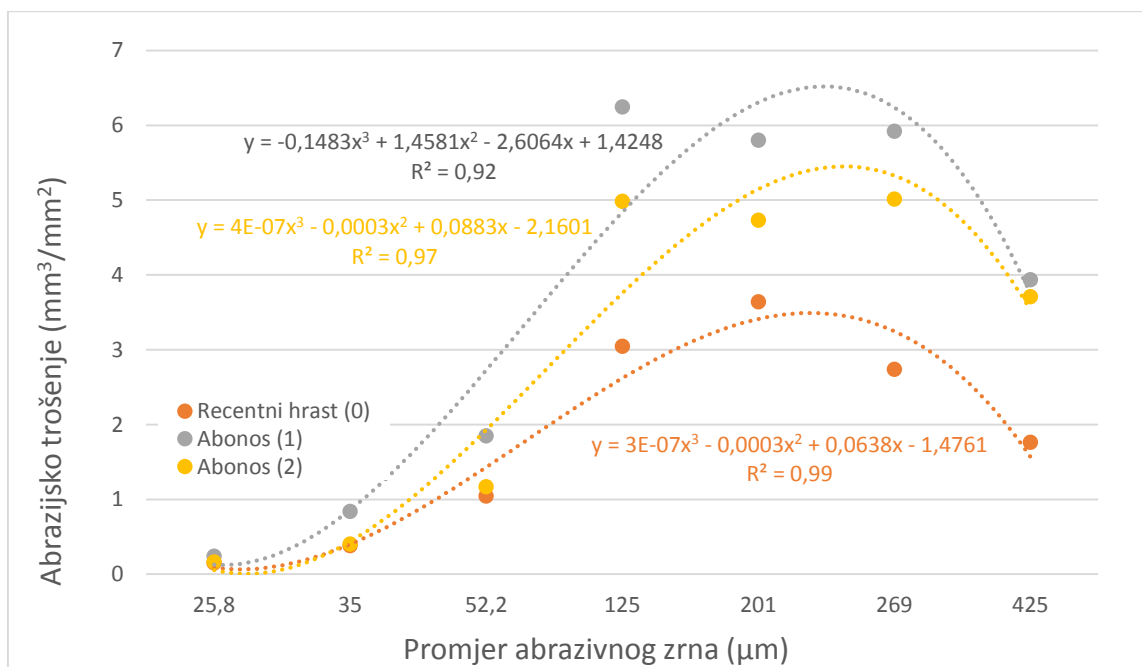
Na slici 33 prikazano je trošenje uzoraka u ovisnosti o veličini abrazivnog zrna, na kojoj se jasno vidi razlika između pojedinih uzoraka. Zanimljivo je da se s povećanjem abrazivnog zrna (nakon granične veličine abrazivnog zrna) smanjuje razlika u trošenju između dva subfosilna uzorka.



Slika 32. Abrazivno trošenje uzoraka za sve kvalitete brusnog papira



Slika 33. Ovisnost intenziteta trošenja o kvaliteti brusnog papira

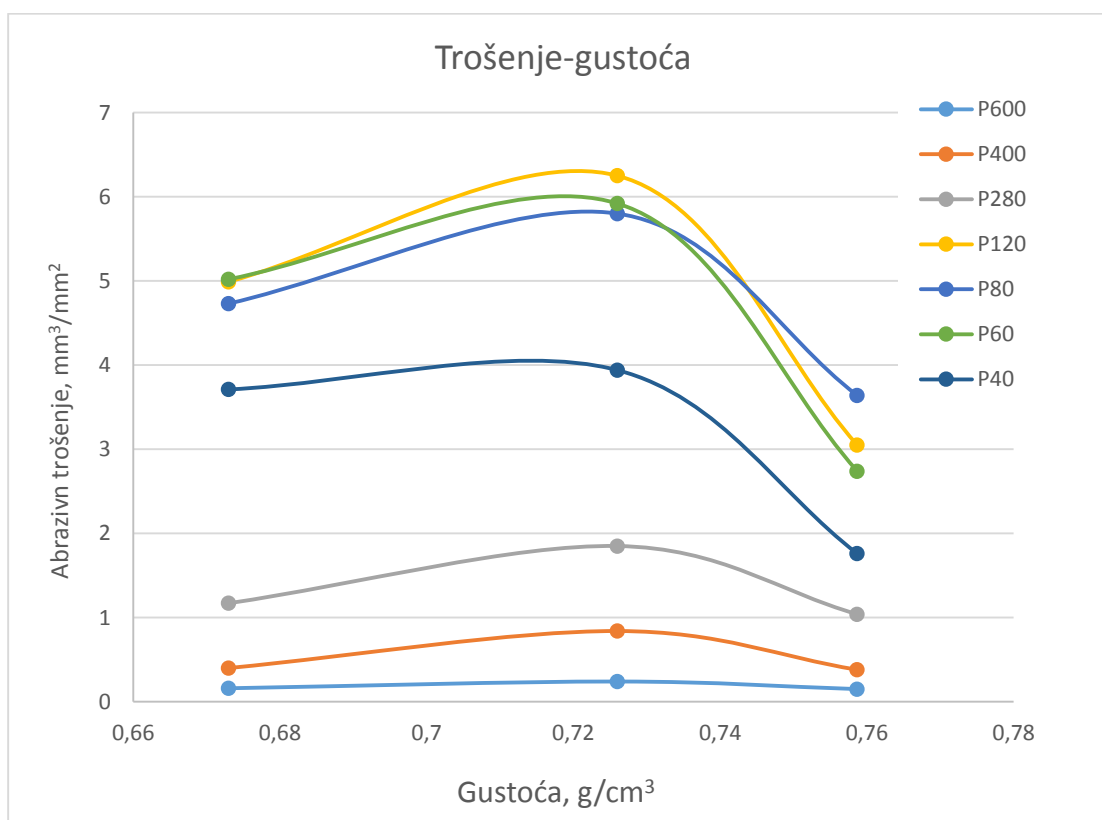


Slika 34. Aproximacija abrazijskog trošenja polinomom trećeg stupnja

Na slici 34 prikazana je aproksimacija rezultata dobivenih pri ispitivanju abrazijskog trošenja polinomima trećeg stupnja. Koeficijenti determinacije za sva tri uzorka su dosta visoki.

Na slici 35 prikazana je ovisnost intenziteta abrazijskog trošenja o gustoći za sve uzorke i sve primjenjene kvalitete brusnog papira.

Gustoća recentnog hrasta je najviša i njegovo trošenje je najmanje. Gustoća uzorka 1 je viša od gustoće uzorka 2 pa je bilo za očekivati da se on troši manje. Međutim, za sve kvalitete brusnog papira, uzorak 1 se troši više od uzorka 2. Razlog tome treba tražiti u mikrostrukturnim promjenama koje su se tijekom stoljeća dogodile u tkivu drva. Najvjerojatnije je, zbog duljeg boravka uzorka 2 (1195 godina) u riječnom mulju, došlo do impregnacije strukture različitim mineralima, koji su na neki način očvrsnuli strukturu i povećali joj otpornost na abraziju.



Slika 35. Abrazivno trošenje s obzirom na gustoću

5 Zaključak

Na temelju provedenog ispitivanja i pritom dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Oba subfosilna hrasta troše se više od recentnog kod svih kvaliteta brusnog papira. Starost subfosilnih uzoraka nije direktno povezana s intenzitetom abrazijskog trošenja. Mlađi subfosilni hrast (star 890 godina) više se troši od starijeg subfosilnog hrasta (starog 1195 godina).
- Povećanjem abrazivnog zrna, intenzitet trošenja raste linearno kod svih uzoraka do granične veličine abrazivnog zrna, nakon čega blago pada.
- Što je kvaliteta brusnog papira veća (finija abrazivna zrna), to je utjecaj gustoće na intenzitet abrazijskog trošenja manji.
- Gustoća subfosilnih uzoraka manja je od gustoće recentnog hrasta i nije direktno povezana s intenzitetom trošenja.
- Što je brusni papir grublji, razlika u trošenju između recentnog i subfosilnih uzoraka raste do granične veličine abrazivnog zrna. Nakon toga, razlika uglavnom ostaje jednaka.
- Duljina boravka subfosilnog hrasta u riječnom mulju mijenja mikrostrukturu drva i utječe na abrazijsku otpornost.

6 Popis literature

- [1] <https://en.wikipedia.org/wiki/Wood> (25.01.2018.) (korištene su i engleska i hrvatska stranica)
- [2] Keramika, beton i drvo , https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1465474326-0-drvo_vjezacompatibilitymode.pdf (27.01.2018.)
- [3] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=61979> (27.01.2018.)
- [4] http://instrukcije-kemija.blogspot.hr/2011/05/instrukcije-iz-biologije_27.html (27.01.2018.)
- [5] https://hr.wikipedia.org/wiki/Biljna_stanica (27.01.2018.)
- [6] Anatomija drva – Makroskopska građa drva – tekst prilagođen iz Šumarske enciklopedije http://www.sumfak.unizg.hr/download.aspx?file=/Upload/sec_002/ins_007/Anatomija%20drva/Makroskopska%20gra%C4%91a%20drva.pdf (28.01.2018.)
- [7] Rede, V.: Drvo, Tehnički Materijal, https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1496408466-0-drvo-skripta.pdf (28.01.2018.)
- [8] Rede, V.: Autorizirane vježbe iz kolegija „keramika, beton, drvo“, Fakultet Strojarsstva i Brodogradnje, Zagreb 2016/2017.
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Janka_hardness_test (01.02.2018.)
- [10] <http://www.urbanfloor.com/blog/janka-hardness-test-matter> (01.02.2018.)
- [11] http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/stiffness-density/NS6Chart.html (10.02.2018.)
- [12] Autorizirana predavanja „Drvo i materijal na bazi drveta“, Građevinski fakultet, Beograd, 2014/2015.
- [13] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1402046311-0-drvo_vjeza_14.pdf (10.02.2018.)
- [14] Dr. Ivo Horvat, Dr. Juraj Krpan: Drvno industrijski priručnik.
- [15] HRN EN 350-2.- Trajnost drva i proizvoda na osnovi drva - Prirodna trajnost masivnog drva
- [16] <https://zupanjac.net/abonos-zlato-iz-save> (13.02.2018.)

[17] Sinković T., Govorčin S., Dubravac T., Roth V., Sedlar T.: “Usporedba tehničkih svojstava abonosa i recentnog drva hrasta lužnjaka”, Šumarski list br. 11–12, CXXXIII (2009), 605-611.

(<https://hrcak.srce.hr/file/69793>) (13.02.2018.)

[18] Izvještaj o rezultatima mjerenja radiokarbonske starosti abonosa s Odjela za fiziku Instituta Ruđera Boškovića (14.4.2016.)

[19] <http://www.wood-database.com/english-oak/> (14.02.2018.)

[20] <https://en.wikipedia.org/wiki/Sandpaper> (14.02.2018.)

7 Prilozi

I. CD-R disc