

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Rok KEŠE

**PRIMERJAVA IZBRANIH LASTNOSTI LESA BELJAVE IN
JEDROVINE PRI HRASTU**

DIPLOMSKO DELO
Visokošolski strokovni študij

**COMPARISON OF SELECTED PROPERTIES OF OAK SAPWOOD
AND HEARTWOOD**

GRADUATION THESIS
Higher professional studies

Ljubljana, 2016

Diplomsko delo je zaključek Visokošolskega študija lesarstva, opravljeno je bilo na Katedri za tehnologijo lesa, Oddelek za lesarstvo, Biotehniške fakultete, Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval doc. dr. Maksa Merele, za recenzenta pa doc. dr. Aleša Stražeta.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Diplomsko delo je rezultat lastnega raziskovalnega dela. Podpisani se strinjam z objavo svoje naloge v polnem tekstu na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je naloga, ki sem jo oddal v elektronski obliki, identična tiskani verziji.

Rok KEŠE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD Vs
DK UDK 630*811.5
KG beljava/jedrovina/mehanske lastnosti/hrastovina
AV KEŠE, Rok
SA MERELA, Maks (mentor) / STRAŽE, Aleš (recenzent)
KZ SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c.VIII/34
ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI 2016
IN PRIMERJAVA IZBRANIH LASTNOSTI LESA BELJAVE IN JEDROVINE PRI HRASTU
TD Diplomsko delo (visokošolski strokovni študij)
OP XI, 54 str., 14 pregl., 35 sl., 7 pril., 44 vir.
IJ sl
JI sl/en
AI V Sloveniji se dobavitelji masivne hrastovine pogosto soočajo s prepričanjem uporabnikov, da je les beljave manj trden oz. ima slabše mehanske lastnosti kot les jedrovine. Cilj raziskovalne naloge je bil preučiti osnovne mehanske lastnosti lesa beljave in jedrovine vrste hrastov, ki se največ pojavljajo na slovenskem tržišču. Vzorce smo odvzeli iz 26 hrastovih hlodov, pripravljenih za izdelavo železniških pragov, od katerih je bilo 16 hlodov (62 %) iz skupine belih hrastov (*Quercus robur* ali *Quercus petraea*) in 10 hlodov (38 %) iz skupine rdečih hrastov (*Quercus cerris*). Na vzorcih beljave in jedrovine smo izmerili upogibno trdnost in modul elastičnosti (MOE), tlačno trdnost, trdoto po Brinellu in gostoto. Primerjave merjenih lastnosti med posameznimi kategorijami lesa so razkrile, da ni tipičnih razlik med lastnostmi lesa beljave in jedrovine, pokazale pa so se statistično značilne razlike med lastnostmi lesa belega in rdečega hrasta. Rezultati tako zavračajo laično mnenje uporabnikov, da so mehanske lastnosti lesa beljave slabše kot lastnosti lesa jedrovine. Raziskave so tudi pokazale, da ima zaradi variabilnosti lesa črna lahko celo boljše mehanske lastnosti kot les doba ali gradna. Tudi to je v nasprotju s splošnim mnenjem, da so lastnosti lesa rdečih hrastov slabše kot lastnosti lesa belih hrastov. Rezultati raziskave bodo prispevali k boljšemu razumevanju variabilnosti lastnosti lesa in optimalnejši izbiri in uporabi hrastovine.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Vs
DC UDC 630*811.5
CX sapwood/heartwood/mechanical properties/oak
AU KEŠE, Rok
AA MERELA, Maks (supervisor) / STRAŽE, Aleš (reviewer)
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c.VIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY 2016
TI COMPARISON OF SELECTED PROPERTIES OF OAK SAPWOOD AND HEARTWOOD
DT Graduation Thesis (Higher Professional Studies)
NO XI, 54 p., 14 tab., 35 fig., 7 ann., 44 ref.
LA sl
AL sl/en
AB Oak wood suppliers in Slovenia are often confronted with belief of consumers, that sapwood is less solid therefore has weaker mechanical properties than heartwood. The aim of this research was to investigate basic mechanical properties of sapwood and heartwood of oaks that appear most frequently on Slovenian market. We take samples of 26 oak logs prepared to be treated into railway sleepers, from which 16 logs (62 %) were from white oak (either *Quercus robur* and *Quercus petraea*) and 10 logs (38 %) were from red oak (*Quercus cerris*). On samples of sapwood and heartwood bending strength, module of elasticity (MOE), compression strength, Brinell hardness and density were measured. Comparison of measured properties discovered that there are no typical differences between individual categories of oak wood, but showed the statistically significant difference between qualities of white and red oak wood. The results declined the laic opinions of consumers, that mechanical properties of sapwood are worse than mechanical properties of heartwood. The research also showed, that due to variability, the Turkey oak (*Quercus cerris*) wood could possibly have even better mechanical properties than pedunculate oak (*Quercus robur*) or sessile oak (*Quercus petraea*), which is also in contrast with general opinion that characteristics of red oak wood are worse than white oak wood. Results of the research will contribute to better understanding of wood properties variability and more optimal selection and usage of solid oak wood.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....	III
KEY WORDS DOCUMENTATION.....	IV
KAZALO VSEBINE.....	V
KAZALO PREGLEDNIC.....	VII
KAZALO SLIK.....	VIII
KAZALO PRILOG.....	X
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI.....	XI

1	UVOD	1
2	PREGLED OBJAV	3
2.1	HRAST	3
2.1.1	Biologija hrasta doba	3
2.1.2	Biologija hrasta gradna	4
2.1.3	Biologija hrasta cera	5
2.1.4	Anatomija hrasta	6
2.1.5	Anatomske razlike med hrasti	7
2.1.5.1	Anatomske posebnosti belih hrastov (dob in graden)	7
2.1.5.2	Anatomske posebnosti rdečih hrastov (cer)	7
2.2	MAKROSKOPSKI OPIS HRASTOVINE	9
2.3	BELJAVA IN JEDROVINA	9
2.3.1	Beljava	10
2.3.2	Jedrovina	10
2.3.3	Proces ojedritve	10
2.3.3.1	Biologija ojedritve	11
2.3.3.2	Lastnosti prave jedrovine	12
2.4	IZBRANE LASTNOSTI LESA	13
2.4.1	Upogibna trdnost	13
2.4.2	Tlačna trdnost	16
2.4.3	Trdota	17
2.4.4	Gostota	19
2.4.5	Branike v lesu	21
2.4.6	Zveza med širino branik in lastnostmi lesa hrasta	21
2.5	LASTNOSTI HRASTOVINE	23
2.6	UPORABA HRASTOVINE	25
3	MATERIALI IN METODE	27
3.1	IZBIRA LESA ZA ANALIZO	27
3.2	OBDELAVA IN PRIPRAVA VZORCEV	27
3.2.1	Označevanje vzorcev	27
3.2.2	Sušenje vzorcev	28
3.2.3	Izvedba posameznih testov	28
3.2.3.1	Merjenje upogibne trdnosti	28
3.2.3.2	Merjenje tlačne trdnosti	30
3.2.3.3	Merjenje trdote	30
3.2.3.4	Merjenje gostote	31
3.2.3.5	Merjenje širine branik	31

3.2.4	Anatomska analiza za identifikacijo	32
3.2.5	Analiza podatkov	32
4	REZULTATI	32
4.1	IDENTIFIKACIJA VRSTE HRASTA	32
4.2	IZMERJENE VREDNOSTI DOLOČENIH LASTNOSTI HRASTA	34
4.3	UPOGIBNA TRDNOST in modul elastičnosti	35
4.4	TLAČNA TRDNOST	37
4.5	TRDOTA	38
4.6	GOSTOTA	40
4.7	KORELACIJE MED GOSTOTO IN DOLOČENIMI MEHANSKIMI LASTNOSTMI HRASTA	42
4.8	KORELACIJA MED ŠIRINAMI BRANIK IN IZBRANIMI LASTNOSTMI HRASTA	43
5	RAZPRAVA IN SKLEPI	46
6	POVZETEK.....	48
7	VIRI.....	50

str.

ZAHVALA
PRILOGE

KAZALO PREGLEDNIC

str.

Preglednica 1: Najpogostejše metode določanja trdote, okrajšave in značilnosti:.....	17
Preglednica 2: Lastnosti hrastovine po podatkih iz literature (1*- Wagenfuhr, 1996; 2*- Giordano, 1976; 3*- Horvat, 1959; 4*-Anonymus, 2012; 5*-Grosser and Teetz, 1987):	24
Preglednica 4: Primerjava naših rezultatov s podatki iz literature	34
Preglednica 5: Analiza variance upogibne trdnosti beljave in jedrovine belih (B) in rdečih (R) hrastov.....	36
Preglednica 6: Analiza variance modula elastičnosti beljave in jedrovine belih (B) in rdečih (R) hrastov	36
Preglednica 7: Rezultati metode najmanjših značilnih razlik (95 % LSD-test) upogibne trdnosti beljave in jedrovine pri belih (B) in rdečih (R) hrastih	36
Preglednica 8: Rezultati metode najmanjših značilnih razlik (95 % LSD-test) modula elastičnosti beljave in jedrovine pri belih (B) in rdečih (R) hrastih	37
Preglednica 9: Analiza variance tlačne trdnosti beljave in jedrovine belih (B) in rdečih (R) hrastov.....	38
Preglednica 10: Rezultati metode najmanjših značilnih razlik (95 % LSD-test) tlačne trdnosti beljave in jedrovine pri belih (B) in rdečih (R) hrastih.....	38
Preglednica 11: Analiza variance trdote beljave in jedrovine belih hrastov po Brinellu	39
Preglednica 12: Rezultati metode najmanjših značilnih razlik (95 % LSD-test) meritev trdote (HB) beljave in jedrovine pri belih hrastih po Brinellu:	39
Preglednica 13: Analiza variance gostote v popolnoma suhem stanju beljave in jedrovine belih (B) in rdečih (R) hrastov	41
Preglednica 14: Rezultati metode najmanjših značilnih razlik (95 % LSD-test) gostote v popolnoma suhem stanju beljave in jedrovine pri belih (B) in rdečih (R) hrastih	41

KAZALO SLIK

str.

Slika 1: Anatomska zgradba lesa hrasta doba (<i>Quercus robur</i> L.): a) prečni, b) radialni in c) tangencialni prerez.....	7
Slika 2: Prečni prerez jedrovine hrasta: A) beli hrast (<i>Quercus robur</i> ali <i>Q. petraea</i>), B) rdeči hrast (<i>Quercus cerris</i>). Oba sta venčasto porozna z jasno ločenim ranim lesom z velikimi trahejami (porami) in kasnim lesom z majhnimi radialno orientiranimi trahejami. V kasnem lesu rdečega hrasta so majhne traheje med seboj bolj oddaljene in imajo debelejše in svetlejše stene (B) kot beli hrast (A).	8
Slika 3: Prečni, radialni in tangencialni prerez hrastovine (<i>Quercus robur</i>); daljica je dolga 1mm (Zupančič in Krže, 2008).....	9
Slika 4: Shema upogiba (Kraut, 1981).	13
Slika 5: Upogibni preizkus s tritočkovno obremenitvijo (Gorišek, 2009).....	14
Slika 6: Napetostno deformacijska krivulja (σ prop - meja proporcionalnosti, σ zr- zrušilna napetost, W – delo do meje proporcionalnosti) (Gorišek, 2009).....	15
Slika 7: Delovanje sil pravokotno in vzporedno glede na vlakna (Leban, 2016).	16
Slika 8: Princip določanja trdote po Brinellu (Gorišek, 2009).....	18
Slika 9: Razpon trdote po Brinellu za pomembnejše listavce (Gorišek, 2009).	19
Slika 10: Odvisnost gostote lesa pri vlažnosti 12 % od širine branik pri iglavcih (jelka, duglazija), pri listavcih z venčasto porozno strukturo (hrast, jesen) in pri »raztreseno poroznem« topolu (po Kollmann in Cote, 1968).....	20
Slika 11: Variabilnost gostote nekaterih lesnih vrst po višini debla (Kollmann in Cote, 1968K).....	21
Slika 12: Gostota lesa v odvisnosti od širine branik pri hrastu in jesenu (Čufar 2006).	22
Slika 13: Prečni prerez lesa hrasta z ozkimi (a) in širokimi branikami (b) (Čufar 2006).	22
Slika 14: Hrastovi železniški pragovi (domzalec.si, 2013).	25
Slika 15: Hrastovi sodi (Bačvarna Srnec Hrvaška).	25
Slika 16: Lesen most v Centralnem parku v New Yorku.....	26
Slika 17: Rebra za obnovo skiperja (Skippered Yacht Charter, 2015).	26
Slika 18: Stavbno pohištvo – vhodna vrata (Stolarija Verdi, 2016).	26
Slika 19: Pripravljeni in označeni vzorec D4B.	28
Slika 20: Sušenje vzorcev na ravnovesno vlažnost 12 %.	28
Slika 21: Označeni in uravnovešeni vzorci, pripravljeni za merjenje upogibne trdnosti.....	29
Slika 22: Merjenje upogibne trdnosti na napravi za testiranje mehanskih lastnosti (ZWICK Z100).....	29
Slika 23: a) Elektronska lupa 52-FT OLYMPUS s stereo okularjem, kamero in merilno mizico LINTAB-5 b) Označeni vzorci lesa, pripravljeni za merjenje širin branik.	31
Slika 24: <i>Quercus</i> spp., prečni prerez: a) Vzorec D1J – primer belega hrasta z večjim številom trahej kasnega lesa z oglatimi oblikami in tanjšimi celičnimi stenami in b) Vzorec Y1J – primer rdečega hrasta z manjšim številom trahej kasnega lesa, ovalnih oz. elipsastih oblik in z debelejšimi celičnimi stenami; oba vzorca sta iz območja jedrovine.	33
Slika 25: Upogibna trdnost beljave in jedrovine belega in rdečega hrasta (B_beljava – beljava belega hrasta, B_jedrovina – jedrovina belega hrasta, R_beljava – beljava rdečega hrasta, R_jedrovina – jedrovina rdečega hrasta, n – število vzorcev)	35
Slika 26: Modul elastičnosti (MOE) beljave in jedrovine belega in rdečega hrasta (B_beljava – beljava belega hrasta, B_jedrovina – jedrovina belega hrasta, R_beljava – beljava rdečega hrasta, R_jedrovina – jedrovina rdečega hrasta, n – število vzorcev).....	36

Slika 27: Tlačna trdnost beljave in jedrovine belega in rdečega hrasta (B_beljava – beljava belega hrasta, B_jedrovina – jedrovina belega hrasta, R_beljava – beljava rdečega hrasta, R_jedrovina – jedrovina rdečega hrasta, n – število vzorcev)	37
Slika 28: Trdota beljave in jedrovine belih hrastov, določena po Brinellu: (a) vzporedno s potekom lesnih vlaken (II) in (b) pravokotno na potek lesnih vlaken ($\perp$).	39
Slika 29: Gostota v popolnoma suhem stanju (B_beljava – beljave belega hrasta, B_jedrovine belega hrasta, R_beljava – beljave rdečega hrasta in R_jedrovine rdečega hrasta, n – število vzorcev).....	40
Slika 30: Korelacija med gostoto v popolnoma suhem stanju in upogibno trdnostjo hrasta ...	42
Slika 31: Korelacija med gostoto v popolnoma suhem stanju in modulom elastičnosti (MOE) hrasta.....	43
Slika 32: Korelacija med gostoto v popolnoma suhem stanju in tlačno trdnostjo hrasta.....	43
Slika 33: Korelacija med povprečno širino branik in gostoto v popolnoma suhem stanju hrasta.	44
Slika 34: Korelacija med povprečno širino branik in upogibno trdnostjo in modulom elastičnosti hrasta.....	44
Slika 35: Korelacija med povprečno širino branik in tlačno trdnostjo.....	45

KAZALO PRILOG

str.

Priloga 1: Skupni statistični kazalci meritev upogibne trdnosti beljave in jedrovine pri belih hrastih (B) in rdečih hrastih (R) (upogibna trdnost je podana v N/mm ² , n je število vzorcev)	55
Priloga 2: Skupni statistični kazalci meritev modula elastičnosti (MOE) beljave in jedrovine pri belih hrastih (B) in rdečih hrastih (R) (modul elastičnosti je podan v GPa, n je število vzorcev)	55
Priloga 3: Skupni statistični kazalci meritev tlačne trdnosti beljave in jedrovine pri belih hrastih (B) in rdečih hrastih (R) (tlačna trdnost je podana v N/mm ² , n je število vzorcev)	55
Priloga 4: Skupni statistični kazalci meritev trdote po Brinellu (HB) beljave in jedrovine pri belih hrastih: II – trdota merjena vzporedno s potekom vlaken, $\perp$ - trdota merjena pravokotno na potek vlaken (trdota je podana v N/mm ² , n je število vzorcev)	55
Priloga 5: Skupni statistični kazalci meritev gostote v popolnoma suhem stanju beljave in jedrovine pri belih hrastih (gostota je podana v kg/m ³ , n je število vzorcev)	56
Priloga 6: Tabela trdote beljave in jedrovine pri belem hrastu	56
Priloga 7: Skupna tabela meritev in preračunov:	57

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

E	modul elastičnosti	[Pa]
G	strižni modul	[Pa]
$HB_{\parallel}$	trdota, merjena vzporedno z vlakni	[Pa]
$HB_{\perp}$	trdota na radialni površini; merjena pravokotno na vlakna	[Pa]
m_0	masa absolutno suhega lesa	[kg]
m_U	masa vlažnega lesa z vlažnostjo U	[kg]
m_{vl}	masa vlažnega lesa	[kg]
m_{vode}	masa vode v lesu	[kg]
V_0	volumen lesa v absolutno suhem stanju	[m ³]
V_U	volumen lesa z vlažnostjo U	[m ³]
ε	relativna deformacija	[-]
ρ	gostota	[kg / m ³]
ρ_0	gostota v absolutno suhem stanju	[kg / m ³]
ρ_U	gostota pri vlažnosti U	[kg / m ³]
σ	napetost	[Pa]
$\sigma_{b\parallel}$	upogibna trdnost	[Pa]
$\sigma_{c\parallel}$	tlačna trdnost vzporedno z vlakni	[Pa]
$\sigma_{c\perp}$	tlačna trdnost prečno na vlakna	[Pa]

1 UVOD

Hrastovina je že od nekdaj poznana kot trajna, z visokimi trdnostnimi lastnostmi in zato pogosto uporabljena v različnih konstrukcijah. Ker se je v preteklosti v primerih zahtev po trajnosti in trdnosti konstrukcij beljavo odstranjevalo, se tako še sedaj v takšnih situacijah običajno razmišlja le o hrastovi jedrovini. Za hrastovino je bilo res tudi z raziskavami potrjeno, da je zaradi modifikacije celične stene v procesu ojedritve trajnost jedrovine bistveno boljša od trajnosti beljave, vendar se k sreči da beljavo hrasta enostavno zaščititi (razred impregnabilnosti 1) (EN 350-2, 1994). V konstrukcijah, kjer prisotnost impregnirane beljave ni moteča zaradi drugih razlogov, npr. estetskih, tako tudi ne bi več smelo biti razlogov za dvome o uporabnosti beljave in za njeno nepotrebno odstranjevanje.

Mehanske lastnosti lesa spadajo v skupino tehnoloških lastnosti lesa, ki se odražajo kot odpor lesa proti delovanju zunanjih sil.

Osnovne značilnosti, ki določajo trdnost lesa, so gostota, potek lesnih vlaken, vlažnost, temperatura ter način, tj. hitrost, smer in trajanje obremenitve.

Vrednosti, podane v literaturi, so navadno vrednosti, ki jih lahko pripišemo le tako imenovanim čistim in usmerjenim vzorcem iz jedrovinskega dela lesa. Vsi odkloni v zgradbi, kot so grče, odkloni vlaken, reakcijski les, smolni in lateksni kanali, rastne anomalije in razpoke, pa večinoma zmanjšujejo maksimalne trdnosti lesa.

Ker je beljava zaradi izbiranja čistih in usmerjenih vzorcev za ugotavljanje mehanskih lastnosti izločena že v prvi fazi priprav za meritve, so njene mehanske lastnosti dokaj slabo poznane, prav tako pa tudi njena uporabnost. V literaturi pravzaprav ni zaslediti podatkov o mehanskih lastnostih beljave hrasta.

S sodobnimi postopki zaščite je možno trajnostne lastnosti beljave hrastovine približati trajnostnim lastnostim jedrovine. Če so mehanske lastnosti beljave primerljive z mehanskimi lastnostmi jedrovine, bi bilo z uporabo beljave tudi na področjih, kjer se sedaj zaradi dvomov ne uporablja, tako možno povečati vrednostni izkoristek lesa kot materiala. Seveda pa je in bo eden glavnih dejavnikov za uporabnost beljave hrasta prepričanje uporabnikov.

Z namenom upravičiti ali zavreči dvome o trdnostnih lastnostih beljave hrastovine ter ovrednotiti njeno primernost in uporabnost smo se odločili testirati sledeče mehanske lastnosti beljave in jedrovine:

- upogibno trdnost,
- tlačno trdnost ter
- trdoto.

Ker so mehanske lastnosti lesa na splošno močno odvisne od njegove gostote, pri hrastu pa je gostota lesa zaradi venčaste poroznosti odvisna tudi od širine branik, smo se odločili na pripravljenih vzorcih spremljati še:

- gostoto uravnovešenih vzorcev,
- gostoto popolnoma suhih vzorcev in
- širino branik.

Primernost in uporabnost beljave hrastovine smo ocenili s primerjavo rezultatov meritev med vzorci beljave in jedrovine in jih primerjali z vrednostmi za jedrovino, poznanimi iz literature.

2 PREGLED OBJAV

2.1 HRAST

Hrasti spadajo v družino bukovk (*fagaceae*). Naši najpomembnejši komercialni vrsti hrasta sta **dob** (*Quercus robur*) in **graden** (*Quercus petraea*). Po zgradbi lesa ju prištevamo v skupino t. i. »belih hrastov«. Po lesu ju ni mogoče zanesljivo razlikovati, razlikovati pa ju je mogoče od **cera** (*Quercus cerris*) in ameriškega **rdečega hrasta** (*Quercus rubra*), ki spadata v skupino t. i. »rdečih hrastov«. Torelli (1983) je raziskoval dva **mehiška hrasta** (*Quercus Skinneri* Benth. in *Quercus anglohondurensis* Miller), ki nista venčasto porozna in imata gostejši les kot naši hrasti (Čufar, 2006).

2.1.1 Biologija hrasta doba

Areal doba (*Quercus robur*) je v vsej Evropi razen v severnem delu Skandinavije in južnem delu Španije. Na vzhodu sega do Urala in Kavkaza. Najznačilnejša so rastišča na poplavnih območjih Rena, Donave in drugih evropskih rek. Največji ohranjeni evropski dobov gozd (dobrava) je Bialowieza na Poljskem, znane so tudi dobrave v Slavoniji na ravninah ob Savi in njenih pritokih. Dob v Sloveniji raste samoniklo, vendar dobrav v Sloveniji ni več veliko, ker je na njihovih rastiščih največ kmetijskih površin. Največje dobrave so ohranjene v Krakovskem gozdu pri Kostanjevici na Krki in v okolici Brežic. Dob raste tudi ob Muri v Lendavi v panonskem svetu, ob Dravi in po Dravskem polju vse do Slovenske Bistrice, v Celjski kotlini, ob Paki in na Koroškem ob Meži, Mislinji in Dravi, ponekod med Ljubljano in Kranjem ter na Ljubljanskem barju. V dinarskem svetu raste na apnenčastih tleh na robovih kraških polj, med jelovo-bukovimi gozdovi in v Postojnski kotlini, v sredozemskem svetu pa v Vipavski dolini. Čeprav je nižinska vrsta, ga v Alpah najdemo še na 1200 m n. v. (Brus, 2004; Mlakar, 1985).

Dob najbolje raste na globokih, peščenih, mineralno bogatih humoznih tleh z visoko podtalnico in na občasno poplavljenih tleh, kjer dobro ukoreninjen prenese tudi zmerno sušo. Čiste sestoje tvori na rečnih naplavinah z nihajočo podtalnico. Dob je občutljiv na pozno spomladansko slano, vendar manj kot graden, zato raste tudi na dnu kotlin in v nižinah. Je svetloljubna drevesna vrsta, včasih prenese tudi polseno. Mestno okolje prenaša dobro (Brus, 2004; Mlakar, 1985).

Dob je do 40 m visoko in do 2,5 m debelo listopadno drevo z nepravilno, močno razvejano krošnjo ter močnimi vejami. Sprva raste tako hitro kot bukev, potem pa počasneje. Doseže starost od 500 do 1000 let in s tiso spada med drevesa z najvišjo starostjo v Evropi. V sestoji rodno doseže po 80. letu, na samem po 50. letu in kot drevo iz panja po 20. letu. Dobov koreninski sistem je dobro razvit in oblikuje močno glavno (srčno) korenino, ki se razvije do globine 2 m. Skorja na deblu je v mladosti (20–30 let) gladka in siva, pozneje pa je predvsem v vzdolžni smeri globoko razpokana. Prečne razpoke so plitveje. Dob je enodomna in vetrocvetna vrsta, ki cveti konec aprila in maja hkrati z olistanjem. Mladi poganjki so zelenorjavi in goli, brsti so do 8 mm dolgi, jajčasti in topo zašiljeni. Listi so

premenjalno nameščeni, pernato krpati, narobe jajčasti in najširši v zgornji tretjini, 8–15 cm dolgi in 3–10 cm široki, goli, le v mladosti rahlo dlakavi. List ima 4–8 parov različno velikih listnih krp, na dnu listne ploskve je nesimetričen in uhljat, pecelj je kratek. Na mnogih listih najdemo t. i. interkalarne žile, ki potekajo od glavne žile do dna zarez med krpami in po katerih dob tudi razlikujemo od gradna. Moški cvetovi so sedeči in združeni v 2–5 cm dolge rumene mačice. Ženski cvetovi so posamezni ali v manjših skupinah združeni v redke klase na dolgih pecljih. Plod je podolgovat ali elipsast, zašiljen, do 5 cm dolg in do 2,7 cm debel enosemnski orešček (želod), skupaj s polkrožno do krožnikasto skledico. Plodovi so v skupinah do 5 združeni na pecljih, dolgih 3–6 cm. Eden najpogostejših razlikovalnih znakov med dobom in gradnom so prav pecljati plodovi. Dozorijo oktobra v prvem letu (Brus, 2004).

Dob se razmnožuje s semeni s pomladansko setvijo, vendar se kalivost shranjenega semena hitro zmanjšuje. Možno je tudi vegetativno razmnoževanje s potaknjenci, cepljenjem in grebenicami.

2.1.2 Biologija hrasta gradna

Areal gradna (*Quercus petraea*) je v velikem delu Evrope, kjer na severu doseže skrajni južni konec Skandinavije, vendar na vzhodu ne raste tako daleč kot dob. Vzhodna meja gradnovega naravnega areala teče približno po črti od južne Švedske čez Poljsko do Črnega morja, najdemo ga tudi na Kavkazu, ne raste pa v južni Španiji. Na obrobju Alp raste na Južnem Tirolskem še na 1360 m n. v.

Graden je v Sloveniji najpogostejša hrastova vrsta, čeprav je njegova današnja razširjenost manjša od potencialne. Njegova lesna zaloga je po podatkih iz leta 2001 predstavljala 6,2 % skupne lesne zaloge, s čimer je za smreko, bukviyo in jelko naša četrta najpogostejša drevesna vrsta. Samoniklo raste v velikem delu Slovenije v gričevnatem svetu in v toplih legah v hribovju, najpogostejši je v alpskem in dinarskem svetu, redkejši v panonskem in sredozemskem svetu, kjer ga najdemo na Krasu (Brus, 2004).

Graden najraje raste na rahlih, dobro prezračenih in rahlo kislih tleh. Njegove potrebe po mineralnih hranilih so manjše kot pri dobu, na apnencu je redkejši. Rad ima sveža rastišča, uspešneje kot vlažna tla z zastajajočo vodo prenaša zmerno sušo. Potrebuje veliko toplote, celo nekaj več kot dob, nizko temperaturo in slano pa prenaša slabše kot dob, zato je pogostejši na nekoliko dvignjenih legah v gričevju, kjer se ne zadržuje hladen zrak. Je svetloljubna drevesna vrsta, vendar manj kot dob (Brus, 2004).

Hrast graden je do 40 m visoko in do 3 m debelo listopadno drevo z ravnim in pogosto visoko v krošnjo razvitim deblom, kar je redkost med listavci. Skorja na starejših drevesih je do 2 cm debela, sivkasta in plitvo razpokana. Krošnja je nekoliko ožja kot pri dobu, koreninski sistem ima dobro razvito in močno glavno korenino. Mladi poganjki so sivorjavi, tanki in večinoma goli, brsti 6–8 mm dolgi, rjavkasti, podolgovati in bolj zašiljeni kot pri dobu. Gradnovi listi so premenjalno nameščeni, variabilni, pernato krpati, narobe jajčasti, 8–12 cm dolgi, do 7 cm široki in imajo 5–7 parov približno enako velikih krp. Zgoraj so temnozeleni, bleščeči in goli, spodaj poraščeni z značilnimi, samo s povečevalom vidnimi

zvezdastimi dlačicami, kakršnih dob nima. Stranske žile izražajo samo v listne krpe, ne pa tudi v zareze med njimi kot pri dobu. Dno ploskve je klinasto, pecelj je dolg 1,5–4 cm. Moške mačice so rumene, viseče in 4–6 cm dolge, ženski cvetovi tvorijo sedeče klase v skupinah po 2–5. Plod sestavljata podolgovat in okroglast, do 4 cm dolg in do 2,5 cm debel enosemnski orešek (želod), ki je nekoliko krajši kot pri dobu, in polkrožna skledica z gladkim robom. Oreški so brez vzdolžnih prog, so značilno sedeči in dozorijo oktobra v prvem letu. Večinoma se razmnožuje s semenom, ker pa dolgotrajnejše hranjenje semen ni možno, ga včasih razmnožujejo tudi vegetativno s potaknjenci ali cepljenjem (Brus, 2004). Gradnov les je zelo podoben dobovemu, od katerega ga je težko zanesljivo razlikovati. Na splošno je nekoliko manj cenjen, a podobno uporaben. Ker raste na slabših rastiščih, so njegove branike ožje in je delež ranega lesa večji, zaradi česar je še zlasti primeren za furnirje in obdelavo, zelo kakovostni so iz njega izdelani parketi (Brus, 2004).

2.1.3 Biologija hrasta cera

Hrast cer (*Quercus cerris*) je naravno razširjen v južni in jugovzhodni Evropi ter v Mali Aziji in Siriji. V zahodnem Sredozemlju samoniklo ne raste, v toplih legah se pojavlja tudi ponekod v srednji Evropi, na primer na Slovaškem.

V Sloveniji cer samoniklo raste samo v toplejših predelih. V pasu med 400 in 600 m n. v. je pogost na območju Brkinov in nekaj manj na Krasu, precej ga je ponekod v dinarskem svetu, predvsem v Suhi in v Beli krajini in ponekod v panonskem svetu. Večkrat raste v redkih sestojih ali posamezno po sušnih južnih pobočjih, pogosto skupaj s kostanjem, navadnim črnim gabrom in puhastim hrastom, redkeje z bukvijo.

Najraje raste na globokih in večinoma suhih tleh na silikatu ali redkeje na apnencu, majhno prednost daje rahlo kislim tlom. Je svetloljubna vrsta, dobro prenaša sušo in onesnažen zrak in je odporen proti vetru. Nekoliko slabše prenaša nizko zimsko temperaturo, ki povzroča vzdolžne razpoke v lesu. Ker listje še dolgo v zimo ostane na vejah, ga večkrat prizadene sneg, ki lomi veje. Uveljavlja se na siromašnih in suhih rastiščih, kjer so se zaradi dolgotrajnega steljarjenja in paše življenjske razmere za uspevanje drugih vrst listavcev, skupaj s hrasti, preveč poslabšale. S tem opravlja varovalno in meliorativno vlogo. V gojitvenem in ekološkem pogledu je med puhastim hrastom in gradnom; raste na rastiščih, ki so za puhasti hrast prehladna, za graden pa presuha.

Hrast cer je do 35 m visoko in več kot 1 m debelo listopadno drevo z razmeroma ravnim deblom, široko in redko krošnjo ter dobro razvitim, globokim koreninskim sistemom z močno glavno korenino. Poganjki so tanki rjavkasti in dlakavi, brsti do 2 cm dolgi, dlakavi in obdani s številnimi dolgimi jezičastimi prilisti, po katerih je cer dobro prepoznaven. Skorja na deblu je siva, zelo debela in vzdolžno globoko razbrazdana. Razen v spodnjem delu je med razpokami značilno oranžne barve. Listi so variabilni in premenjalno nameščeni, pernato krpasti in imajo na vsaki strani 4–9 neenakih priostrenih krp, so 5–15 cm dolgi in do 9 cm široki, zgoraj temnozeleni, bleščeči in hrapavi, spodaj svetlejši in včasih dlakavi. Moški cvetovi so združeni v rumene viseče mačice, dolgi do 8 cm, ženski cvetovi največkrat rastejo v parih na kratkih pecljih. Cerova posebnost je dvoletno zorenje plodov. V prvem letu zraste želod do velikosti graha, dozori pa šele septembra ali oktobra naslednje leto. Dolg je 2–4 cm

in debel do 2 cm, najbolje pa je prepoznaven po nitastih, do 1 cm dolgih kaveljčasto zavutih in zašiljenih izrastkih na skledicah. Zrel je temnorjave barve.

Cerovina je trd, težek in težko cepljiv les. Težko ga je obdelovati, zato ga manj uporabljajo za predelavo. V zadnjem času izdelujejo iz cerovine zelo lepe parkete. Uporaben je za proizvodnjo celuloze in za kurjavo. V ta namen so z njim nekoč panjevisko gospodarili. Čeprav ga na splošno ne cenijo preveč, ostaja cer v gozdu pomemben predvsem na sušnih in revnih območjih, kjer gojenje drugih vrst hrasta ni mogoče (Brus, 2004).

2.1.4 Anatomija hrasta

Traheje

Hrast je venčasto porozna vrsta. Venec velikih trahej ranega lesa, radialno orientirane skupinice majhnih trahej v kasnem lesu. Traheje so izključno posamezne in imajo enostavne perforacije. Intervaskularne piknje so izmenične (alternirajoče). Traheje v jedrovini so zatiljene. Tangencialni premer trahej ranega lesa je nad 200 μm , tangencialni premer trahej v kasnem lesu pa okoli 50 μm (Čufar, 2006).

Osnovno tkivo

Osnovno tkivo sestoji iz kompleksov traheid z obokanimi piknjami in kompleksi libriformskih vlaken z močno reduciranimi obokanimi piknjami, vidnimi v radialnem prerezu. Traheide, ki obdajajo traheje, sodelujejo tudi pri prevajanju vode. Povezava prevodnega sistema preko letnic poteka po traheidah. Libriformska vlakna niso v stiku s trahejami (Čufar, 2006).

Trakovi

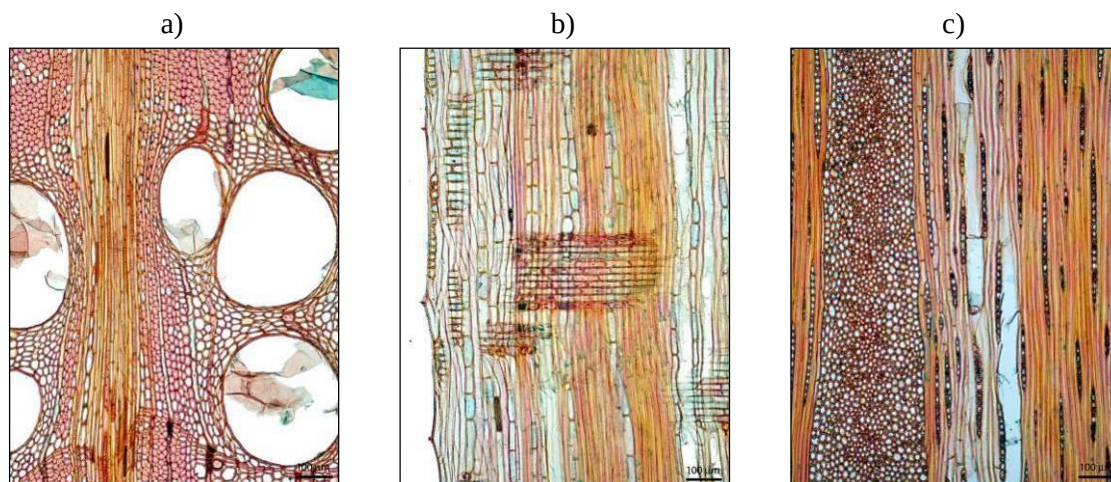
Hrast ima dve vrsti trakov: manjši trakovi so 1–redni in nizki, veliki trakovi pa so nad 10 –redni in nad 1 mm visoki. Trakovno tkivo je homogeno (izključno iz ležečih celic) (Čufar, 2006).

Aksialni parenhim

Aksialni parenhim ni v stiku s trahejami (je apotrahealen), razporejen difuzno in difuzno v agregatih. V parenhimskih celicah in v kamrastih celicah se pogosto pojavljajo anorganski vključki v obliki romboidnih in prizmatičnih kristalov (oksalati) (Čufar, 2006).

Ostale anatomske posebnosti

Hrasti so evolucijsko srednje razvita vrsta: trahejni členi so krajši kot pri bukvi, vendar niso sodčaste oblike, kot pri jesenu. Perforacije so enostavne. Osnovno tkivo je iz traheid, ki skupaj s trahejami opravljajo prevajanje vode. Kompleksi iz libriformskih vlaken opravljajo samo mehansko funkcijo (Čufar, 2006). Vsi trije anatomske prerezi lesa hrasta doba so na sliki 1.



Slika 1: Anatomska zgradba lesa hrasta doba (*Quercus robur* L.): a) prečni, b) radialni in c) tangencialni prerez

2.1.5 Anatomske razlike med hrasti

2.1.5.1 Anatomske posebnosti belih hrastov (dob in graden)

Dob in graden imata kot predstavnika belih hrastov:

- večinoma ozko, rumenobelo beljavo;
- svetlorjavo do sivkastorjavo jedrovino, ki kasneje potemni, sveža pa je pogosto z rdečkastim nadihom;
- zelo velike traheje ranega lesa (tangencialni premer nad 200 µm, lepo vidne pore s prostim očesom);
- traheje ranega lesa v jedrovini vselej s tilami;
- bistveno manjše traheje kasnega lesa, ki tvorijo radialne nize, na prečnih ploskvah plamenasto strukturo; plamene tvorijo kompleksi traheid s trahejami, pri čemer posameznih trahej s prostim očesom ni mogoče razločiti;
- traheje kasnega lesa bolj oglate kot pri rdečem hrastu;
- večinoma oster prehod med ranim in kasnim lesom;
- poleg tudi z lupo komaj vidnih trakov se v neenakomernih razdaljah pojavljajo zelo široki (pogosto nad 1 mm) in do več mm visoki trakovi, vidni na tangencialnih ploskvah kot temna dolga vretena in na radialnih ploskvah kot očitna zrcala;
- aksialen parenhim viden na prečnih ploskvah le z lupo kot fini tangencialni niz;
- zelo trd, gost in težak les, zelo variabilno gostoto (gostota $\rho_0 = 390 \dots 650 \dots 930 \text{ kg/m}^3$) (Čufar, 2006).

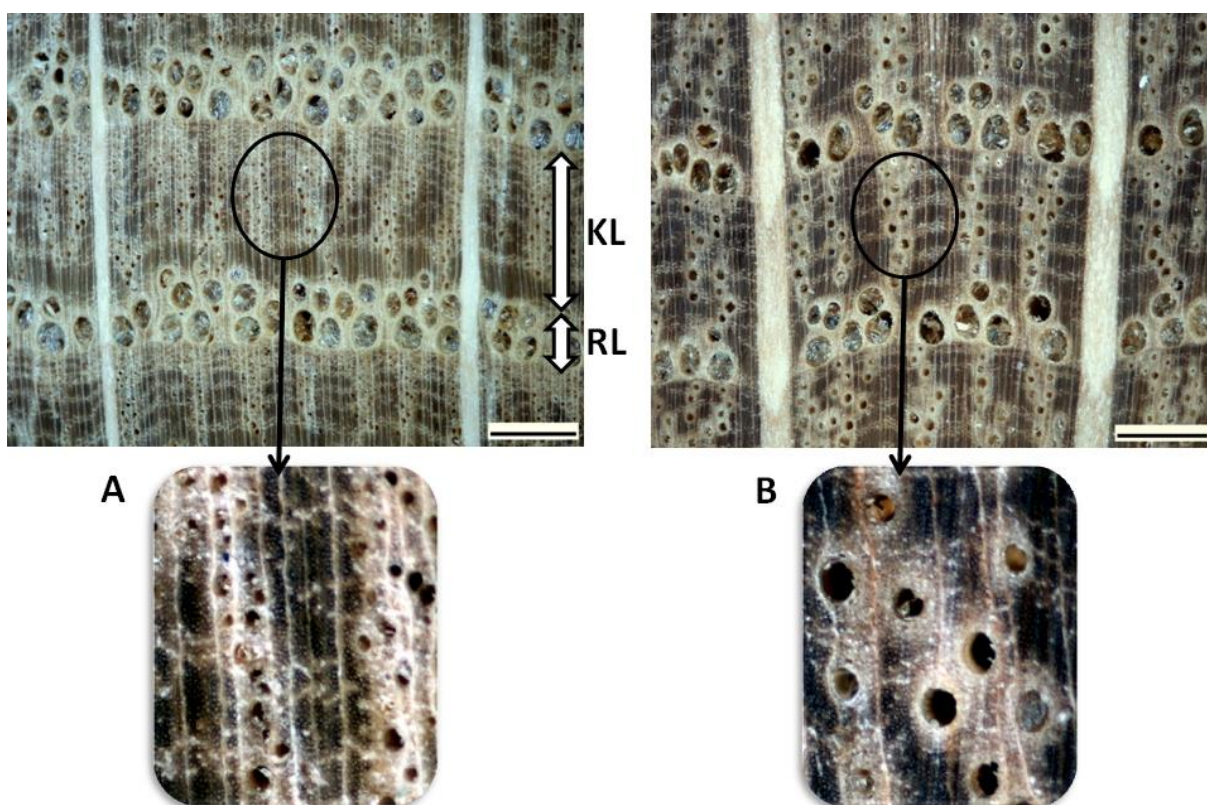
2.1.5.2 Anatomske posebnosti rdečih hrastov (cer)

Cer kot predstavnik rdečih hrastov ima:

- prehod med ranim in kasnim lesom bolj postopen,

- traheje ranega lesa v jedrovini pretežno brez til,
- traheje kasnega lesa ovalne, dobro vidne, z debelimi stenami,
- svetlo- do temnorjavo obarvano jedrovino (na splošno bolj rdečkasta kot pri dobu in gradnu,
- rumenkasto beljavo (Čufar, 2006).

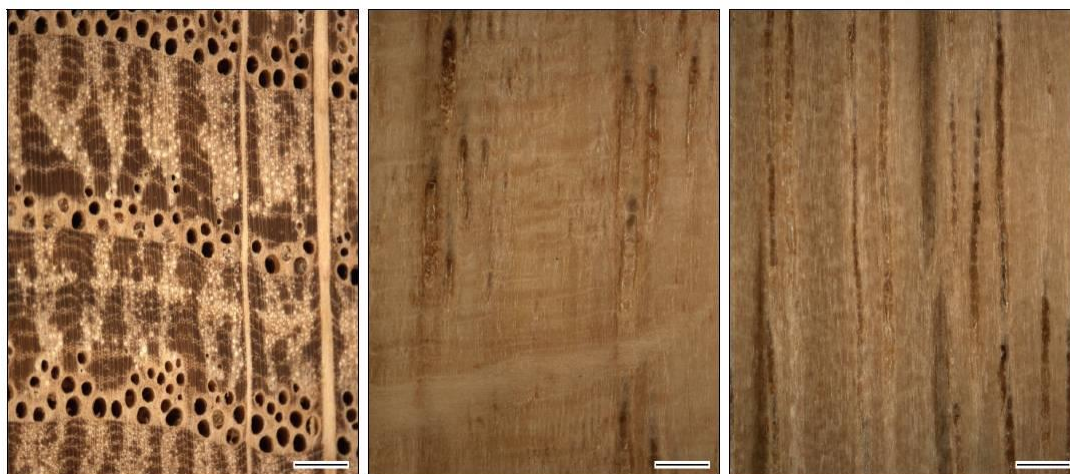
Iz opisanih značilnosti posameznih skupin hrastov lahko sklepamo, da je hraste iz skupine belih in rdečih hrastov mogoče ločiti med seboj, saj imajo kar nekaj zgradbenih razlik. Najbolj očitna razlika je v kasnem lesu, kjer imajo rdeči hrasti manj številne traheje s debelejšimi celičnimi stenami in ovalno (elipsasto) obliko v prečnem prerezu (slika 2).



Slika 2: Prečni prerezi jedrovine hrasta: A) Beli hrast (*Quercus robur* ali *Q. petraea*), B) Rdeči hrast (*Quercus cerris*). Oba sta venčasto porozna z jasno ločenim ranim lesom z velikimi trahejami (porami) in kasnim lesom z majhnimi radialno orientiranimi trahejami. V kasnem lesu rdečega hrasta so majhne traheje med seboj bolj oddaljene in imajo debelejša in svetlejša stena (B) kot beli hrast (A).

2.2 MAKROSKOPSKI OPIS HRASTOVINE

Hrast je venčasto porozna drevesna vrsta z obarvano jedrovino (črnjavo), ki se ostro loči od beljave. Beljava je navadno ozka (2,5 – 5 cm) in rumenkasto bela. Jedrovina je svetlorjava in na svetlobi potemni. Posebno iskani so primerki s svetlorumenim do medenorumenim tonom jedrovine. Sveže prerezane površine imajo lahko rdečkast odtenek. Letnice so izrazite. Kot pri vseh venčasto poroznih listavcih se traheje na prečnem prerezu pojavljajo kot grobe, s prostim očesom vidne pore, na vzdolžnih prerezih pa kot žlebiči. Zaradi venčaste razporeditve trahej tangencialna površina izkazuje karakteristično plamenast videz, radialno pa progastega. Traheje kasnega lesa so bistveno manjše in posamezne komajda razločne. Razporejene so radialno, skupaj s traheidami osnovnega tkiva na prečnem prerezu pa tvorijo s prostim očesom vidna svetlejša polja. Traheje jedrovine so navadno otiljene. Poleg zelo finih (enorednih) se v neenakomernih presledkih pojavljajo tudi zelo široki (pogosto nad 1 mm) in do 1 cm visoki trakovi, ki se na tangencialni površini vidijo kot dolge svetle proge, na radialnih pa kot izrazita zrcala. Aksialni parenhim, ki pogosto tvori zelo fine tangencialne nize, je viden na prečnem prerezu samo z lupo. Svež les ima nekoliko kiselkast vonj (Čufar, 2006). Teksture in barve hrastovine so prikazane na sliki 3.



Slika 3: Prečni, radialni in tangencialni prerez hrastovine (*Quercus robur*); daljica je dolga 1mm (Zupančič in Krže, 2008)

2.3 BELJAVA IN JEDROVINA

Beljava je les, ki je nastal v kambijevi coni in jo imajo vsa drevesa. Ojedritev, pojav diskoloriranega lesa in mokrin so posledica sekundarnih sprememb v lesu, ki so predvsem povezana s programiranim odmiranjem parenhimskih celic. Ojedritev ali vsaj zametki ojedritve sčasoma nastopijo pri večini lesnih vrst.

Glavno merilo za razlikovanje med beljavo in jedrovino je stanje parenhimskih celic. Te so v beljavi žive, v jedrovini pa mrtve.

2.3.1 Beljava

Po definiciji Komiteja za nomenklaturu mednarodne zveze lesnih anatomov (Committee on Nomenclature, International Association of Wood Anatomists-IAWA 1964) je beljava (ang. sapwood) periferni del živega debla ali veje, ki ima žive parenhimske celice, ki vsebujejo rezervne snovi, npr. škrob.

Pri vrstah, ki ne tvorijo prave jedrovine, lahko parenhimske celice živijo tudi preko sto let, sicer pa le toliko časa, dokler so del beljave, pri čemer njihova vitalnost v centripetalni smeri bolj ali manj hitro usiha. Trahealni elementi, vlakna in trahejni elementi odmrejo v nekaj tednih po svojem nastanku. V odmrlih trahealnih elementih beljave poteka translokacija vode in mineralov, v živih parenhimskih celicah trakov in aksialnega parenhima pa potekajo presnovni metabolični procesi in skladiščenje hranilnih snovi (Torelli, 1989).

Pri mnogih iglavcih in listavcih vlažnost beljave in z njo intenzivnost transporta vode v smeri proti strženu pada, pri čemer se permeabilnost beljave ne zmanjša.

Drugače je pri venčasto poroznih vrstah, kjer lahko tile, ki so mehurjasti vrastki parenhimskih celic, skozi piknje trahejnih sten v trahejne lumne, neodvisno od ojedritve ali diskoloracije blokirajo traheje beljave že v drugem (*Robinia*, *Quercus phellos*) ali v tretjem letu (*Fraxinus excelsior*). Tedaj ločimo zunanjo ali prevodno beljavo (angl. conducting sapwood) in notranjo ali skladiščno beljavo (angl. storage sapwood). Vsekakor so to značilnosti, ki močno vplivajo tudi na lastnosti lesa (vir).

2.3.2 Jedrovina

Po definiciji IAWA (1964) je jedrovina (angl. heartwood) notranja plast lesa v rastočem drevesu, z odmrliimi parenhimskimi celicami, kjer so se rezervne snovi, ki so jih le te vsebovale, bodisi odstranile bodi si pretvorile v jedrovinske snovi.

Takšna definicija ni zadosti jasna za razlikovanje prave jedrovine od včasih zelo podobnega diskoloriranega lesa. Po Bachu (1980) so značilnosti jedrovine naslednje:

- razmerje med beljavo in jedrovino je dedno,
- ojedritev je sezonski pojav,
- jedrovinske snovi so praviloma toksične in nizkomolekularne, zato penetrirajo v celične stene in dajo lesu večjo trajnost in večjo dimenzijsko stabilnost v primerjavi z beljavo,
- barva ni indikator ojedritve,
- jedrovina se barvno odzove na ranitev (diskolorirana jedrovina),
- vlažnost prehodne cone je nižja od vlažnosti beljave in
- vsebnost mineralnih snovi v jedrovini je nižja kot v beljavi.

2.3.3 Proces ojedritve

Obdobju maturacije tkiv z razmeroma hitrimi in napovedljivimi spremembami, značilnimi za prehod od juvenilnosti k zrelosti, sledi v ontogoniji drevesa dolgo obdobje staranja, ki se med drugim manifestira v upadanju metabolizma, v pešanju rasti vegetativnih in reproduktivnih tkiv, v odmiranju vej in v transformiranju beljave v jedrovino. Ojedritev je normalen fiziološki starostni proces (Bosshard 1965); cit. po (Torelli, 1972). Pri rodu *Pinus*

se jedrovina lahko pojavi od starosti 15 let (Koch, 1972); cit. po (Cutter in sod., 1998) pa do starosti celo 200 let (Brown s sod., 1994); cit. po (Fink, 1999), pri vrsti *Cryptomeria japonica* od 6–8 let, pri rodu *Robinia* 3–4 leta, pri vrsti *Fraxinus excelsior* 60–70 let, pri rodu *Eucalyptus* v naravnem habitatu se jedrovina pojavi, ko je beljava široka od 1,5 do 3,5 cm (5–7 prirastnih plasti).

2.3.3.1 Biologija ojedritve

Glavno merilo za razlikovanje med jedrovino in beljavo je stanje parenhimskih celic, ki so v beljavi žive, v jedrovini pa mrtve. Za jedrovino je značilna nekrobioza prečnega in aksialnega parenhima. Spremlja jo odlaganje jedrovinskih snovi in aspiracija obokanih pikenj pri iglavcih ter tvorba til pri listavcih. Histološko sta beljava in jedrovina enaki.

Z vidika "staranja" posebej obravnavamo elemente mehanskega in prevodnega tkiva ter parenhimske celice. Elementi mehanskega in prevodnega tkiva praviloma že kmalu po diferenciaciji (v nekaj tednih) izgubijo protoplast in kot prazne celice opravljajo le mehansko in prevodno funkcijo. Končne dimenzije celic so odvisne od dolžine kambijeve inicialke, kot se je formirala v fazi intrakambijskih sprememb, in od naknadne ekstrakambijske rasti. V tem procesu traheide in vlakna rastejo v dolžino, tako da je lahko dolžina zrele celice nekajkrat večja od kambijeve inicialke (zlasti pri evolucijsko naprednih vrstah). Trahejni členi ekstrakambialno ne rastejo v dolžino, pač pa v širino, pri čemer lahko svoj premer povečajo tudi nekaj desetkrat glede na premer kambijeve inicialke (venčasto porozne vrste). Dolžina pramenov aksialnega parenhima ostaja praktično enaka dolžini kambijevih inicialk in trahejnih členov. Bosshard (1965; cit. po Torelli, 2004) je intra- in ekstrakambijske spremembe poimenoval "kvantitativno staranje". Torelli (2004) meni, da gre za razvojne spremembe, ki jih ni mogoče interpretirati niti kot staranje niti kot senescenco, pač pa lahko kot tipično senescenco označimo izgubo protoplastov v trahearnih elementih po končani diferenciaciji. Pojavljajo se še kasnejše pasivne spremembe, kot so aspiracija obokanih pikenj v traheidah, pojav til v trahejah in odlaganje jedrovinskih snovi v steno ali lumne celic (Torelli, 1974).

Vitalnost parenhimskih celic upada postopno v centripetalni smeri. Hugentobler (1965; cit. po Torelli, 2003) je opazoval spreminjanje oblike jeder v centripetalni smeri. V bližini kambija so jedra velika in elipsoidna, globje postajajo vse bolj okrogla in na meji z jedrovino postanejo piknotična ter izginejo. Beležili so tudi progresivno izginevanje škroba, Nečesany (1966; cit. po Torelli 2003) pa je z določitvijo osmotske vrednosti po metodi mejne plazmolize ugotavljal značilno centripetalno zmanjševanje vitalnosti trakovnega parenhima. V centripetalni smeri se progresivno zmanjšuje tudi respiracija celic. Z naraščajočo razdaljo od kambija se količina nestrukturanih založnih ogljikovih hidratov (glukoza, fruktoza, saharoza in škrob) zmanjšuje in v prehodni coni ti praktično izginejo (Megel, 1997; cit. po Torelli 2003).

S stališča bioloških sprememb parenhimskega tkiva postane razumljivo, da se pri vsaki drevesni vrsti beljava slej ko prej mora transformirati v jedrovino. Smrt parenhima je lahko patološka, ki nastopi zaradi zunanjih vzrokov, ali pa fiziološka, kot posledica notranjih

dejavnikov (Nečasany, 1965; cit. po Torelli 1974). V prvem primeru pride do smrti slučajno, v drugem pa je smrt neizogibna posledica normalnega razvoja, pogojena s svojo specifično diferenciacijo (smrt zaradi starosti). Pojavlja se vprašanje, ali je smrt parenhimskih celic posledica starosti oz. ali so parenhimske celice z naraščajočo oddaljenostjo od kambija fiziološko vse starejše, s čimer se njihova možnost za preživetje zmanjšuje. Vedeti je potrebno, da sama smrt parenhimske celice še ne povzroči ojedritve, pač pa o njej odločajo razmere oz. procesi, ki privedejo do njihove smrti.

Ojedritev je očitno povezana z dejavnostjo živih, počasi odmirajočih parenhimskih celic v razmerah, kot normalno vladajo v t. i. prehodni coni med beljavo in jedrovino, izjemoma pa tudi lokalno v perifernem delu beljave po poškodbah biotičnega in abiotičnega izvora. Vzrok za pričetek ojedritve je že vrsto let predmet polemik in raziskav na tem področju. Prvotna hipoteza je pripisovala sprožitev transformacije glivni okužbi. Bolj podprti sta mnenji o posrednem učinku okolja, ki se odraža v razmerju voda/plini ter translokatorna ekskrecija toksičnih snovi. Jedrovina ima običajno manj vlage od beljave, kar je raziskovalce privedlo do zaključka, da manjša vlažnost v centralnem delu sproži ojedritev. Hipotezo so potrjevali na primeru rdečega srca bukve (Jaroschenko, 1935; cit. po Torelli 1972), ki pa ne predstavlja tipične prave jedrovine. Zagovorniki te hipoteze so menili, da velika vlažnost (dobra preskrba z vodo) zavlačuje nastanek jedrovine. Dehidracija favorizira pentozafosfatno pot na račun glikolitske razgradnje. V skladu s to teorijo se ni dalo pojasniti nastanka rjavega srca pri jesenu (Bosshard, 1953, 1955; cit. po Torelli, 2003), kjer se obarvana jedrovina pojavi le, če ima tkivo vlažnost nad 55 % ob prisotnosti kisika.

Naslednja je teorija o odmiranju mitohondrijev kot posledici centripetalne translokatorne ekskrecije toksičnih polifenolov iz presnovno aktivnih delov drevesa (kambijeva cona) (Stewart, 1966; cit. po Torelli, 2003). Koncentracija toksičnih snovi naj bi se povečevala, na ta način naj bi se zmanjševala vitalnost, kar bi na koncu povzročilo odmrtnje parenhimskih celic z vsemi posledicami, ki vodijo v ojedritev. Pojavila se je tudi Rudmanova hipoteza (1966; cit. po Torelli, 2003), ki pravi, da nastanek jedrovine sproži redukcija vlažnosti zaradi večjih potreb krošnje po hranilih. V tem primeru se rezervne snovi v parenhimskih celicah beljave hidrolizirajo v topne ogljikove hidrate, ki se končno v ireverzibilni reakciji transformirajo v jedrovinske snovi.

2.3.3.2 Lastnosti prave jedrovine

Kemijski proces ojedritve povzroči, da so celične stene in včasih tudi lumni odmrlih parenhimskih celic zapolnjeni s toksičnimi kemičnimi substancami, ki preprečujejo razkroj. Ker se te snovi lahko preoblikujejo v druge kemične substance, jih imenujemo ekstraktivi. To so olja, voski, čreslovine, smole itd. Obstaja preko 10 000 sekundarnih metabolitov iz rastlin, vključujoč enostavne terpene, diterpene, triterpene/steroidne, tetraterpene, poliketide, poliacetilene, flavonoide, fenilpropanoide, amine, alkaloidne in številne druge manjše skupine (Wink, 1988 in Rowe, 1987; cit. po Blanchette, 1992). Delež mineralnih snovi in vode je v jedrovini praviloma manjši kot v beljavi. Zaradi svoje sestave ima prava jedrovina večjo trajnost in kurilno vrednost, manjšo ravnovesno vlažnost, manjše krčenje in nabrekanje

ter boljše mehanske lastnosti. Pri nekaterih drevesnih vrstah ob ojedritvi pride do kemičnih sprememb, ki se odražajo tudi v spremembi barve. Tako temneje obarvano jedrovino imenujemo tudi črnjava. Glede obarvanosti tako razvrščamo drevesne vrste v tiste z obarvano jedrovino in drevesne vrste z neobarvano jedrovino.

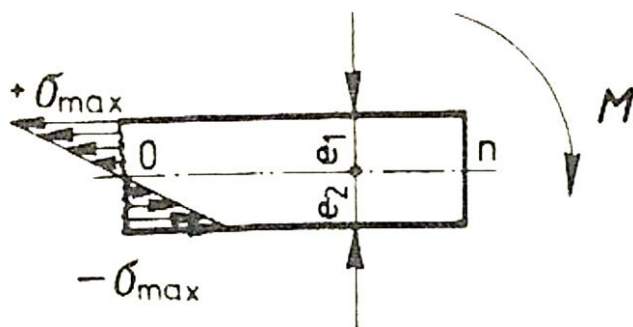
Po navedbah Magelove je mogoče ločiti dva tipa ojedritev (Magel, 2001). Prvi je tip *Robinia*, kjer se jedrovinske snovi kopičijo v prehodni coni, drugi pa tip *Juglans*, kjer se predhodniki jedrovinskih snovi postopoma kopičijo v beljavi in se nato transformirajo v jedrovinske snovi v prehodni coni.

Obstaja tesna zveza med starostjo beljavnega tkiva in formiranjem jedrovine. Ko jedrovina začne nastajati, njen volumen konstantno raste z drevesom. V nekaj primerih volumen jedrovine raste sorazmerno z volumnom drevesa. Schober (1953; cit. po Hillis, 1987) je na primeru macesna pokazal, da se nad starostjo 60 let delež jedrovine večja sorazmerno z deležem novonastalega ksilema. Delež jedrovine znotraj iste vrste pa je odvisen tudi od rastišča. Drevesa, ki so rasla na boljših rastiščih, so imela večji delež jedrovine (Harsch, 1912; cit. po Hillis, 1987). Prehodna starost nastanka jedrovine ni enaka po celem deblu. Transformacija beljave v jedrovino se pri mlajših drevesih prične v zgornjem delu debla. Medtem ko je delež jedrovine na bazi debla okoli 25 % vseh prirastnih plasti, je delež na enem metru višine okoli 33 % in maksimum doseže na višini 6 m.

2.4 IZBRANE LASTNOSTI LESA

2.4.1 Upogibna trdnost

Upogibna trdnost je odpornost materiala proti upogibnim napetostim. Napetosti povzroča upogibni moment M , ki nastane zaradi delovanja obremenitve F na oddaljenosti l od podpore. Napetosti si zamišljamo porazdeljene po prerezu sorazmerno z oddaljenostjo od nevtralne osi n . Največje upogibne napetosti se pojavljajo v vlaknih, ki so najbolj oddaljena od nevtralne osi (slika 4).

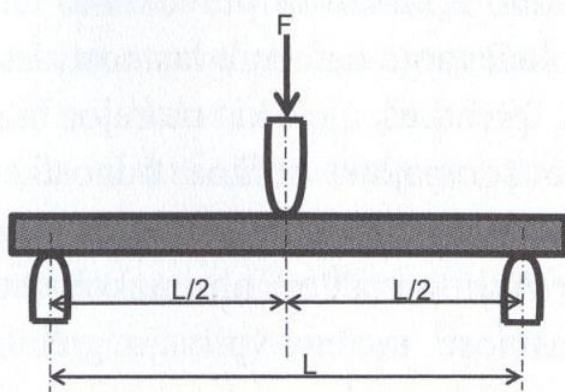


Slika 4: Shema upogiba (Kraut, 1981)

Na upogibnem poizkusu temelji tudi strojno razvrščanje lesa, zato je ta metoda najpogostejše uporabljena za določanje trdnostnih karakteristik lesa in za ugotavljanje modula elastičnosti. Upogibna trdnost in modul elastičnosti sta osnovni vrednosti za poenostavljeno

izračunavanje in dimenzioniranje konstrukcij. Na njuni osnovi so možna tudi predvidevanja ostalih mehanskih lastnosti.

Pri preizkušanjih iz masivnega lesa se upogibna trdnost najpogosteje določa po standardu ISO 3133 (1975c). Dimenzije standardnih vzorcev imajo prečni prerez velikosti 20 mm x 20 mm, njihova dolžina pa je 300 mm oziroma je vsaj 19 x večja od višine. Vzorce testiramo na valjčnih podporah z razmikom 280 mm in z obremenjevanjem na sredini podpor (tritočkovni test – slika 5) ali na dveh simetričnih točkah (štiritočkovni preizkus) (Gorišek, 2009).



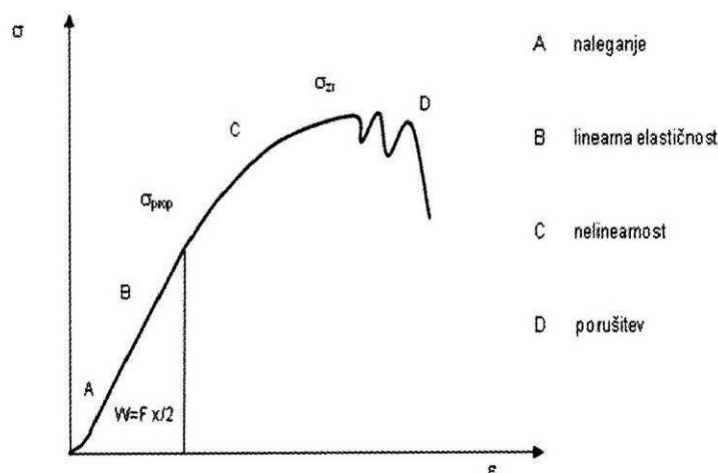
Slika 5: Upogibni preizkus s tritočkovno obremenitvijo (Gorišek, 2009)

Obremenjevanje poteka vzporedno z letnicami in s konstantno hitrostjo 0,11 mm/s. Med izvajanjem eksperimenta se poleg spremljanja povečevanja sile beleži še upogib. Iz začetnega linearnega dela obremenitveno-deformacijske krivulje (do 50 % maks. napetosti) izračunamo modul elastičnosti (MOE – modul of elasticity):

$$MOE_L = \frac{L^3 \Delta F}{4eh^3 \Delta u} \quad (1)$$

MOE _L	modul elastičnosti [N/mm ²]
L	razdalja med podporama [mm]
ΔF	povečanje sile [N]
E	širina preizkušanca [mm]
H	debelina preizkušanca [mm]
Δu	sprememba povesa [mm]

Pri največji sili je dosežena upogibna trdnost oziroma največja napetost, ki jo element še zdrži (t.i. zrušilna napetost).



Slika 6: Napetostno deformacijska krivulja: σ_{prop} - meja proporcionalnosti, σ_{zr} - zrušilna napetost, W – delo do meje proporcionalnosti (Gorišek, 2009)

Površina pod krivuljo med izhodiščno točko in upogibno trdnostjo je enaka vložnemu maksimalnemu delu, ki je mera sproščene energije pri porušitvi.

$$\sigma_{maks} = \frac{3F_{maks}L}{2bh^2} \quad (2)$$

σ_{maks}	zrušilna napetost [N/mm ²]
F_{maks}	največja sila [N]
L	razdalja med podporama [mm]
B	širina preizkušanca [mm]
H	debelina preizkušanca [mm]

Na natančnost pri tritočkovnem obremenjevanju vplivajo vtiskanje merilnega valja na površino lesa, težave pri merjenju povesa in pojav strižnih napetosti, ki so največje na mestu merjenja povesa. Strižne napetosti lahko zanemarimo le pri velikih razmerjih med dolžino in višino preizkušancev ($L/h > 20$) ali s korekcijo enačbe MOE, kjer ima znaten vpliv tudi razmerje med elastičnim in strižnim modulom ($E/G \approx 17$).

Zmanjšanje učinka strižnih napetosti se tako izraža z enačbo:

$$MOE_L = \frac{L^3 \Delta F}{4eh^3 \Delta u} \left(1 + 1.2 \frac{E}{G} \frac{h^2}{L^2} \right) \quad (3)$$

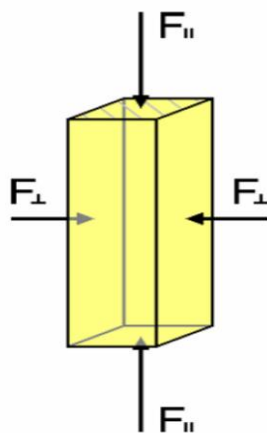
MOE _L	modul elastičnosti [N/mm ²]
L	razdalja med podporama [mm]
ΔF	povečanje sile [N]
E	širina preizkušanca [mm]
H	debelina preizkušanca [mm]
Δu	sprememba povesa [mm]
E	modul elastičnosti [N/mm ²]
G	strižni modul [N/mm ²]

Do meje proporcionalnosti sta elastična modula natezne in tlačne obremenitve enaka, pri višjih obremenitvah se v tlačni coni pojavi lezenje oziroma plastične deformacije prej kot v natezni, nevtralna os pa se premakne proti konveksni natezni strani. Upogibna trdnost lesa predstavlja prve porušitve bodisi na tlačni ali na natezni strani.

Porušitve se realizirajo kot pretrganje vlaken na konveksni natezni strani, kot uklon na konkavni tlačni strani ali kot zdrs vlaken v sredini preizkušanca zaradi strižnih napetosti.

2.4.2 Tlačna trdnost

Po definiciji je tlačna trdnost odpornost materiala proti tlačnim obremenitvam. Pri lesu je zaradi anizotropije pomembno razlikovati trdnost v smeri vzporedno z vlakni in trdnost pravokotno na vlakna. Dejstvo je, da je tlačna trdnost v smeri vlaken bistveno večja kot v smeri pravokotno na vlakna (Pipa, 1997).



Slika 7: Delovanje sil pravokotno in vzporedno glede na vlakna (Leban, 2016)

Določanje tlačnih trdnosti masivnega lesa je standardizirano po ISO 3132 (1975b) in ima pomembno vlogo pri uporabi lesa kot konstrukcijskega materiala. Preizkušanece mora imeti enakomeren prerez po celotni dolžini, končni obremenjevalni plošči pa morata biti čim bolj vzporedni. Obremenjevanje poteka z rahlo zaokroženo površino, tako da je onemogočeno upogibanje.

Tlačne napetosti pri vzdolžni obremenitvi zaradi menjavajočih se pasov ranega in kasnega lesa niso enakomerno razporejene po prerezu. Pri večjih obremenitvah se poveča plastično obnašanje lesa, lom pa nastopi pri precej veliki relativni deformaciji ($\varepsilon \sim 7\%$). Pri dolgotrajnih obremenitvah se trdnost zmanjša od 55 % do 60 % trenutne, medtem ko je pri dinamičnih obremenitvah zmanjšanje trdnosti manj občutno.

Tlačna trdnost pravokotno na vlakna je nizka. Do meje proporcionalnosti se les obnaša elastično, sledi območje gnetenja oziroma zruševanja celičnih sten v lumne (slika 6). V prečni smeri se večinoma pojavijo zgnečenine in ne prihaja do pravih porušitev.

$$\sigma = \frac{F_{maks}}{A_0} \quad (4)$$

σ_c	tlačna trdnost [N/mm ²]
F_{maks}	največja dosežena sila stiskanja [N]
A_0	površina prereza nedeformiranega vzorca [mm ²]

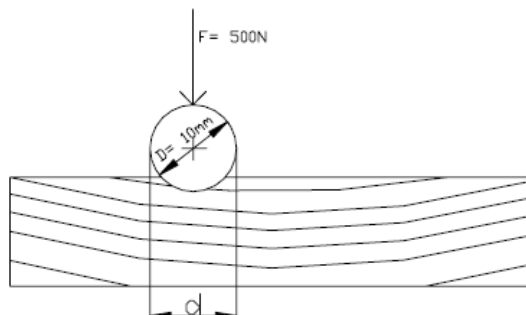
2.4.3 Trdota

Trdota predstavlja odpor materiala proti vrinjenju tršega materiala. Tako je trdota močno povezana z odpornostjo materiala proti razenju, praskanju in drugim poškodbam površine. Zaradi velike raznolikosti materialov se v znanosti o materialih (strojništvo, metalurgija, gradbeništvo, geologija, lesarstvo ...) uporabljajo različne trdotne lestvice ter merilne in preizkusne metode (preglednica 1).

Preglednica 1: Najpogostejše metode določanja trdote, okrajšave in značilnosti:

METODA	OKRAJŠAVA	ZNAČILNOST
trdota po Vickersu	HV	vtiskanje diamantne piramide
trdota po Rockwellu	HRC ali HRB	vtiskanje diamantnega stožca ali kroglice
trdota po Shoru	HS	merilo za trdoto je višina odboja kladivca z diamantno konico, ki z določene višine pade na merjenec
trdota po Brinellu	HB	vtiskanje kroglice iz kaljenega jekla ali s karbidno trdino v merjenec z določeno silo in merjenje velikosti odtisa

Zaradi anatomskih posebnosti in variabilnih lastnosti lesa je natančno določanje trdote lesa nekoliko vprašljivo, zato se velikokrat podajajo le relativne vrednosti. Za ugotavljanje trdote lesa se najpogosteje uporablja standardizirana Brinellova metoda EN 1534 (2000) (slika 8) ali podobna, imenovana po avtorju Janka.



Slika 8: Princip določanja trdote po Brinellu (Gorišek, 2009)

Trdota je definirana s silo, ki je potrebna, da se v les popolnoma vtisne kroglica s površino 1 cm^2 . Pri prirejeni Brinellovi metodi se uporablja jeklena kroglica s premerom $D = 10 \text{ mm}$, ki se jo vtiska v les s silo 100 N pri mehkih lesovih, 500 N pri srednje trdih in 1000 N pri trdih lesovih. Obremenitev povečujemo približno 15 s , pustimo pri maksimalni obremenitvi 30 s in razbremenimo v 15 sekundah . Iz velikosti odtisa oziroma premera odtisa (d) izračunamo trdoto po enačbi:

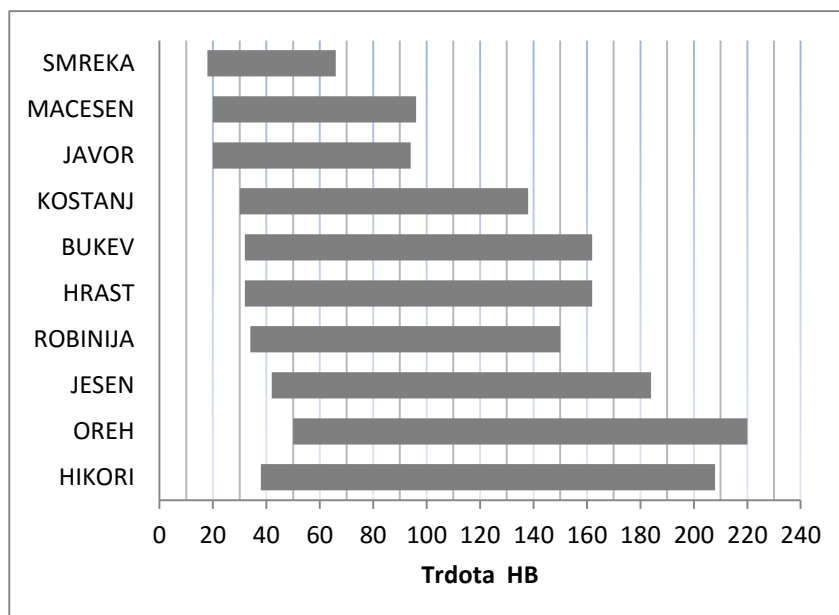
$$H_B = \frac{2F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (5)$$

H_B	trdota po Brinellu (N/mm^2)
F	sila vtiskanja kroglice (N)
D	premer jeklene kroglice (mm)
d	povprečni premer odtisa kroglice (mm)

Pri lesu moramo nujno upoštevati in pri objavi rezultatov tudi navesti smer obremenjevanja, gostoto in vlažnost lesa. Na trdoto vplivajo še potek vlaken, hitrost, način trajanja obremenitve, temperatura in zgradbene anomalije (grče, odkloni vlaken – spiralni ali diagonalni potek, reakcijski les, smolni in lateksni kanali, rastne anomalije ter razpoke). Zaradi korektne primerjave izvajamo meritve na čistih in orientiranih vzorcih brez rastnih posebnosti.

Zaradi anizotropnosti zgradbe lesa se pri lesu določa trdoto v vseh osnovnih anatomskih smereh. Trdota, merjena vzporedno z vlakni ($H_B \parallel$), v praksi pogosto ni relevantna. Posebno pri iglavcih in venčasto poroznih listavcih moramo trdoto določiti na radialni površini ($H_B \perp$), saj velike razlike v gostoti ranega in kasnega lesa na tangencialni površini močno

povečajo variabilnost izmerjenih vrednosti. Pri korektnem navajanju trdote moramo navesti tudi hitrost obremenjevanja. Zaradi viskoelastičnosti lesa se pojavljajo velika odstopanja predvsem pri preskušanju vlažnega lesa, kjer so bolj izražene njegove viskozne lastnosti (slika 9).



Slika 9: Razpon trdote po Brinellu za pomembnejše listavce (Gorišek, 2009)

2.4.4 Gostota

Od vseh fizikalnih lastnosti lesa je najpogostejše proučevana njegova gostota, ki je hkrati v najtesnejši zvezi z mnogimi mehanskimi lastnostmi in je pomembna tudi za napoved uporabnosti lesa.

Meritev gostote lesa je standardizirana po ISO 3131 (1975a). Temelji na volumnu in masi v popolnoma suhem stanju.

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \quad (6)$$

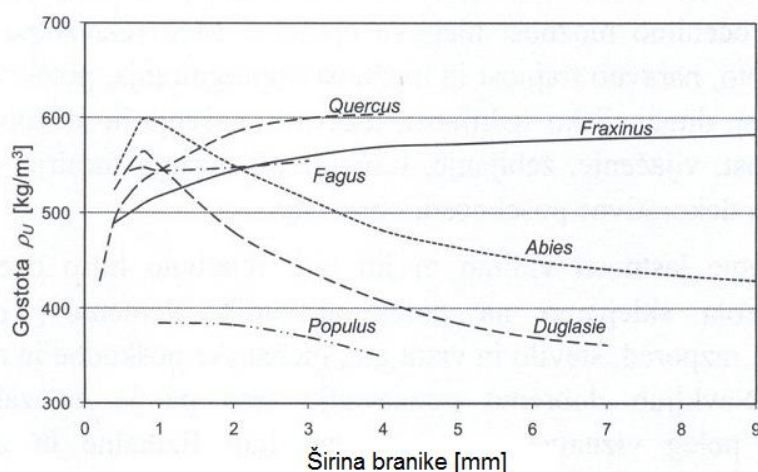
ρ_0	gostota lesa [kg/m ³]
m_0	masa vzorca [kg]
V_0	volumen vzorca [m ³]

Gostota in tudi nekatere druge fizikalne lastnosti so za določeno lesno vrsto specifične, vendar zaradi biološkega izvora zelo variabilne celo znotraj iste vrste, na kar vplivajo rastiščne razmere, tla, socialni in enotski status drevja ter drugo. Srečujemo se torej z zelo veliko variabilnostjo gostote tako med vrstami kot tudi v okviru iste vrste.

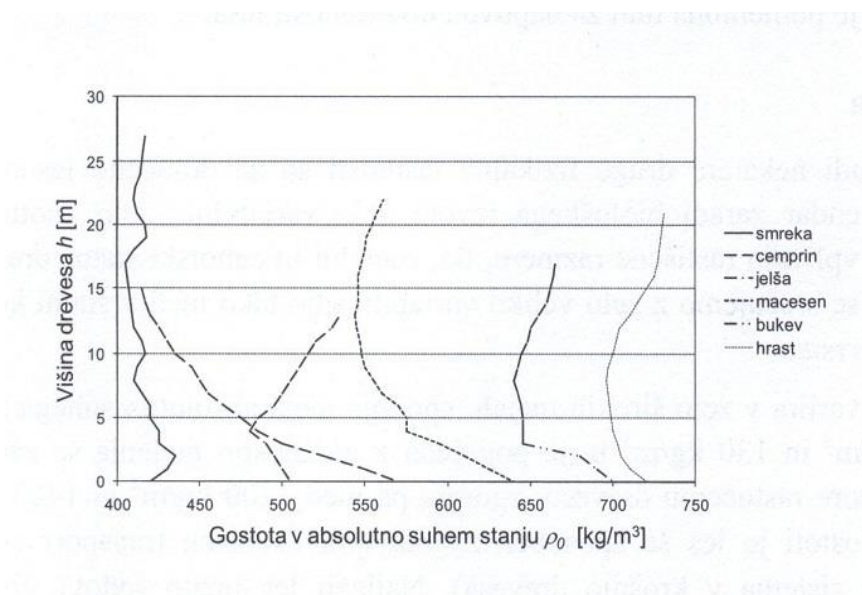
Gostota lesa variira v zelo širokih mejah: spodnja meja absolutno suhega lesa je med 100 kg/m^3 in 130 kg/m^3 in je odvisna od možnosti nujenja mehanske opore rastočemu drevesu, zgornja pa med 1200 kg/m^3 in 1400 kg/m^3 (pri takšni gostoti je les še sposoben zagotavljati vodo iz koreninskega sistema v krošnjo drevesa) (Gorišek, 2009).

Gostota je v fiziki definirana kot masa na enoto volumna $\rho = dm / dV [\text{kg/m}^3]$. Zaradi odvisnosti tako mase kot volumna od lesne vlažnosti ločimo v lesni tehnologiji več načinov izražanja gostote.

Gostota se spreminja tudi v nihajočih klimatskih razmerah, ko se zaradi higroskopnosti lesa spreminja tudi njegova vlažnost. Poleg vlažnosti na gostoto lesa vpliva še zgradba lesa (npr. širina branik (slika 10), delež kasnega lesa, delež različnih anatomskih tkiv), vrsta in količina ekstraktivov ter kemijska zgradba. Zaradi variabilnosti zgradbe lesa se spreminja gostota tudi prečno in po višini drevesa (slika 11).



Slika 10: Odvisnost gostote lesa pri vlažnosti 12 % od širine branik pri iglavcih (jelka, duglazija), pri listavcih z venčasto porozno strukturo (hrast, jesen) in pri »raztreseno poroznem« topolu (po Kollmann in Cote, 1968)



Slika 11: Variabilnost gostote nekaterih lesnih vrst po višini debla (Kollmann in Cote, 1968)

2.4.5 Branike v lesu

O branikah lahko govorimo pri rastlinah iz zmernih klimatskih pasov, kjer se prirastne plasti odlagajo v obliki plaščev, ki jih v prečnem prerezu vidimo kot kolobarje ali branike.

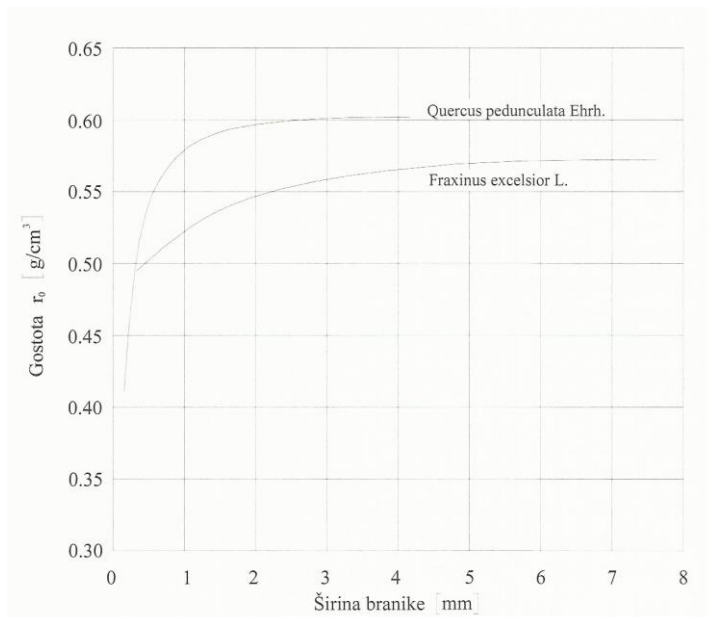
Širine branik oziroma debelinski prirastki drevesa so odvisni od drevesne vrste, položaja v drevesu, klime, rodovitnosti rastišča, socialnega položaja drevesa v sestoju itd. Prirastek je večji, če drevo raste na dobrem rastišču in ima glede na druga drevesa v sestoju ugoden - vladajoči položaj (Čufar, 2006).

Širina branike, nastale v enem letu, je lahko zelo različna na različnih mestih v deblu. Na bazi drevesa je kambij zaradi velike oddaljenosti od krošnje najslabše oskrbljen s hormoni in hrano. Tam so branike praviloma najozkeje, najširše pa so navadno tik pod krošnjo. Zlasti velike razlike v širini branike na različnih nivojih (višinah) v drevesu so opazne pri visokih drevesih, ki rastejo v strnjenem sestoju in imajo kratko krošnjo. V taki situaciji nastanejo želena, t. i. polnolesna valjasta debela brez grč. Drevesa z globokimi krošnjami imajo stožčasta, t. i. malolesna debela (Čufar, 2006).

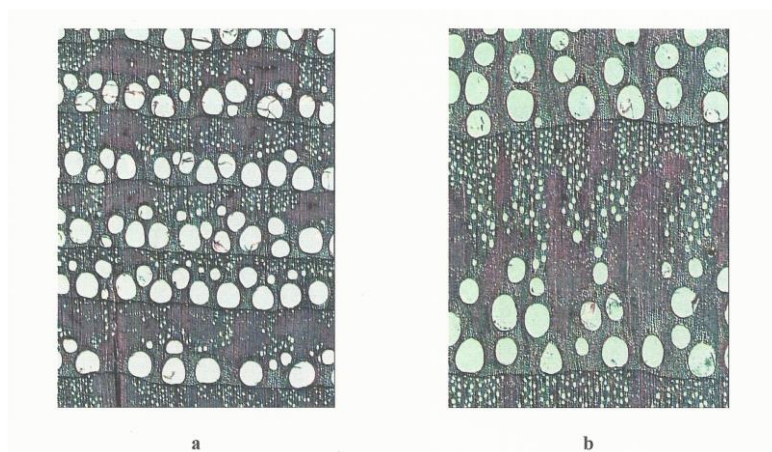
2.4.6 Zveza med širino branik in lastnostmi lesa hrasta

Pri venčasto poroznih listavcih na splošno velja, da je širina ranega lesa bolj ali manj enaka ne glede na to, kako široka je branika. V ozki braniki je tako odstotni delež ranega lesa velik, v široki braniki pa majhen (slika 13). Les z ozkimi branikami tako vsebuje pretežno rani les. Takšna zgradba se odraža predvsem v nižji gostoti in preko nje v nižji trdnosti lesa (slika 12). Široke branike vsebujejo več kasnega lesa, posledica pa je višja gostota in višja trdnost.

Tako tudi za hrast velja, da ima les boljše mehanske lastnosti, če so branike širše (Čufar, 2006).



Slika 12: Gostota lesa v odvisnosti od širine branik pri hrastu in jesenu (Čufar 2006)



Slika 13: Prečni prerez lesa hrasta z ozkimi (a) in širokimi branikami (b) (Čufar 2006)

2.5 LASTNOSTI HRASTOVINE

Gostota hrastovine zelo niha v odvisnosti od rastišča, rastnih posebnosti in starosti. Širše kot so branike, gostejši, trdnější in trši je les, nasprotno pa je les z ožjimi branikami redkejši in mehkejši. V širokih branikah naraste delež kasnega lesa s pretežno debelostenimi vlakni, kar se pokaže v višji gostoti in trdnosti. Širina branik oz. delež ranega (ali kasnega) lesa bistveno vpliva na gostoto in s tem na lastnosti ter na njegovo primernost za različne vrste končne uporabe. V splošnem velja, da ima graden z 1 mm širokimi branikami nekaj gostejši les kot dob.

Glede na kvaliteto lesa v praksi pogosto govorimo o »mehkem« in »trdem« hrastu. »Mehak les« imajo navadno starejša, počasneje rastoča drevesa z branikami, širokimi 1–2 mm. »Trd les« imajo mlajša do srednje stara drevesa s širinami branik nad 3 mm. Zanj je značilna tudi nekoliko temnejša barva (Čufar, 2006).

Hrastovina se znatno krči, njene trdnostne lastnosti so odlične, vključno z upogibno trdnostjo. Les je zelo elastičen. Ugodna je izjemna naravna trajnost jedrovine. Hrast velja za skoraj neomejeno trajen les za podvodne konstrukcije. Beljava, ki se sicer glede bistvenih fizikalnih in tehnoloških lastnosti le malo loči od jedrovine, je netrajna in jo pogosto odstranijo ali pa jo ustrezno zaščitijo. Beljava se v splošnem dobro impregnira.

Svež in vlažen les se ob stiku z železom zaradi reakcije s čreslovinami iz lesa bolj ali manj modročrno obarva (Čufar, 2006).

Sušenje lesa je treba v začetni fazi voditi previdno, ker je hrastovina nagnjena k zvijanju in pokanju. Pri nepravilnem sušenju lahko pride tudi do nezaželenih obarvanj. V splošnem se hrastovina ročno in strojno z lahkoto obdeluje z vsemi orodji. Izjema je izredno trd hrast (zmotno imenovan »kamniti hrast«) z zelo širokimi branikami, ki se le s težavo obdeluje. Hrastovina se lepo struži in rezlja ter brez težav predeluje v luščen ali rezan furnir. Z lahkoto se cepi, dobro se žeblija in vijači, pri čemer so pri tanjših sortimentih potrebne uvajalne luknje. Tudi lepi se dobro. Pri uporabi alkalnih lepil se občasno pojavljajo madeži. Površinska obdelava poteka brez težav. Pred nanosom krovnih premazov priporočajo predhodno brušenje. Priljubljeni postopki površinske obdelave pri hrastu so tudi dimljenje, apnenje in dvojno luženje (Čufar, 2006).

Preglednica 2: Lastnosti hrastovine po podatkih iz literature (1*- Wagenfuhr, 1996; 2*-Giordano, 1976; 3*- Horvat, 1959; 4*-Anonymus, 2012; 5*-Grosser and Teetz, 1987):

	UPOGIBNA TRDNOST (N/mm²)				
	1*	2*	3*	4*	5*
<i>Q. robur</i>	74...88...10	53...108...1	58,8...92,1...98	60 - 110	88
<i>Q. petraea</i>	78...110...1	53...108...1	58,8...92,1...98	60 - 110	110
<i>Q. cerris</i>	X	65...110...1	X	75 - 120	X
	MODUL ELASTIČNOSTI (GPa)				
	beljava	jedrovina	1*	2*	3*
<i>Q. robur</i>	8,9	9,0	10...11,7...13,2	10,6...12,5...14,6	11,5
<i>Q. petraea</i>			9,2...13...13,5	10,6...12,5...14,6	12,7
<i>Q. cerris</i>	12,4	11,7	X	X	X
	TLAČNA TRDNOST (N/mm²)				
	1*	2*	3*	4*	5*
<i>Q. robur</i>	54...61...67	29,4...60,8	51	42 - 64	61
<i>Q. petraea</i>	48...65...70	29,4...60,8	23,5...37,2...43,	42 - 64	55 - 65
<i>Q. cerris</i>	X	36,3...57,4	57	42 - 60	X
	TRDOTA BRINELL - HB II (N/mm²)				
	1*	2*	3*	4*	5*
<i>Q. robur</i>	66	X	65,7	X	X
<i>Q. petraea</i>	66	X	41,1...67,7...97	X	X
<i>Q. cerris</i>	X	X	64,7...77,9...96,	X	X
	TRDOTA BRINELL - HB I (N/mm²)				
	1*	2*	3*	4*	5*
<i>Q. robur</i>	34	X	X	23 - 42	X
<i>Q. petraea</i>	34	X	X	23 - 42	X
<i>Q. cerris</i>	X	X	X	22 - 35	X
	GOSTOTA V POPOLNOMA SUHEM STANJU (kg/m³)				
	1*	2*	3*	4*	5*
<i>Q. robur</i>	390...650...	670	388...625...795	X	390 - 650 - 930
<i>Q. petraea</i>	390...650...	670	465...662...837	X	390 - 650 - 930
<i>Q. cerris</i>	X	690	781	X	X

2.6 UPORABA HRASTOVINE

Hrastovina se prodaja predvsem kot hlodovina, žagan les in furnir. Njena uporabnost je zelo raznovrstna, pri čemer je potrebno ločiti t. i. mehko in trdo hrastovino.

Mehko se uporablja za dekorativne namene, kot masiven les ali furnir za notranjo opremo. Tudi za rezbarske in za stružene izdelke uporabljajo predvsem mehkejši les. Visoko kvalitetna furnirska hlodovina se odlikuje po ozkih in enakomernih branikah in po svetleje rumeni do medenorumeni barvi. Rezani furnirji iz mehkega lesa se uporabljajo za luksuzno pohištvo. Masivna hrastovina se uporablja za najrazličnejše pohištvene stile in pode.

Trdo hrastovino se uporablja tam, kjer je zaželena predvsem njena visoka trdnost, trdota in trajnost, npr. za gradbeni in konstrukcijski les pri visokih in nizkih gradnjah, za mostove, vodne in jamske konstrukcije ter v strojni industriji za izdelavo kontejnerjev. Primerna je za okvirne konstrukcije, vrata, stopnice, parket in pode iz kock, ročaje orodij in za poljedelsko orodje. Zaželena je za izdelavo sodov in korit. Zaradi enakomernega otiljenja so traheje nepropustne za tekočine (za razliko od ameriškega rdečega hrasta, ki ni zatiljen in je zato neprimeren za izdelavo sodov). Omembe vredna je tudi uporabnost za železniške pragove (Čufar, 2006). Nekaj tipičnih primerov uporabe je na slikah od 14 do 18.



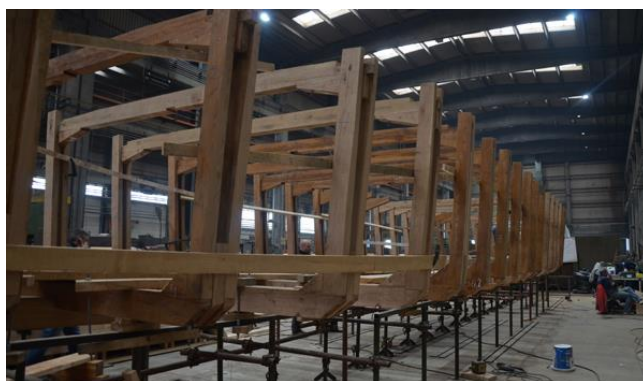
Slika 14: Hrastovi železniški pragovi (domzalec.si, 2013)



Slika 15: Hrastovi sodi (Bačvarija Srnec, 2016)



Slika 16: Lesen most v Centralnem parku v New Yorku
(Forgoten New York, 2016)



Slika 17: Gradnja 25 m rečne ladje iz slavonskega hrasta (projekt Žitni put: Kupa-Sava, 2008) (VG Danas, 2016)



Slika 18: Stavbno pohištvo – vhodna vrata (Stolarija Verdi, 2016)

3 MATERIALI IN METODE

3.1 IZBIRA LESA ZA ANALIZO

Na skladišču hrastovine sveže posekanih dreves z različnih slovenskih rastišč, namenjene za izdelavo železniških pragov, smo izločili hlode s tanjšo beljavo, iz katerih ne bi bilo možno pridobiti čistih, primerno orientiranih vzorcev zahtevanih dimenzij. Med preostalimi smo naključno izbrali 26 hlodov.

Iz izbranih hlodov so se izžagale osnovne ploskve železniških pragov.

Večina vzorcev je bilo izžaganih iz tangencialnih desk, ki so ostale pri obžagovanju hloda v železniške pragove. Vzorci jedrovine so bili tako izžagani iz zunanjih plasti jedrovine in so vsebovali samo adultni les.

Več težav smo imeli s pridobitvijo vzorcev beljave. Zaradi zahtev po orientiranosti vzorcev in zahtev po primerni debelini vzorcev je bilo glede na že izžagane osnovne ploskve železniških pragov zelo težko pridobiti primerne vzorce beljave. Pojavila se je priložnost, ker se zaradi zahtev naročnika, da železniški pragovi ne smejo vsebovati beljave, takšni postanejo ostanek in smo vzorce beljave izžagali iz njihovih vogalov.

Vsi testni vzorci hrastove beljave in jedrovine so bili v celoti izdelani v mizarski delavnici Oddelka za lesarstvo na Biotehniški fakulteti.

3.2 OBDELAVA IN PRIPRAVA VZORCEV

3.2.1 Označevanje vzorcev

Vzorci smo označili s tremi znaki. Že pred izžagovanjem vzorcev iz surovcev smo surovce poimenovali s črkami. Tako je imel vsak vzorec na prvem mestu črko surovca, iz katerega je bil izžagan. Na drugem mestu je bila zaporedna številka vzorca, izžaganega iz posameznega surovca. Na tretjem mestu smo vzorcem, ki so bili izžagani iz beljave, dodali še črko B, in vzorcem, ki so bili izžagani iz jedrovine, črko J.

Tako je npr. D4B pomenilo, da je bil to četrti vzorec, izžagan iz surovca D, in sicer iz beljave (slika 19).



Slika 19: Pripravljeni in označeni vzorec D4B

3.2.2 Sušenje vzorcev

Pred izžagovanjem vzorcev iz surovcev so bili ti zračno suhi. Vzorce smo najprej naredili z nadmero, nakar smo jih v laboratorijski komori, v kateri je bila sol natrijevega nitrita (NaNO_2) in stalno prisilno kroženje zraka, osušili na 12% vlažnost in jih klimatizirali pri relativni zračni vlagi (ϕ) 65 % ; (T) 20 °C. Tako osušene vzorce smo naknadno obdelali na 1/10 mm natančno in jih do meritev ponovno shranili v že omenjeni laboratorijski sušilni komori (slika 20).



Slika 20: Sušenje vzorcev na ravnovesno vlažnost 12 %

3.2.3 Izvedba posameznih testov

3.2.3.1 Merjenje upogibne trdnosti

V osnovi so bili vzorci obdelani na dimenzijo 20 mm x 20 mm x 300 mm. Vendar smo se z namenom, da bi bili rezultati meritve čim bolj natančni, odločili, da širino in debelino vzorcev tik pred meritvijo upogibne trdnosti ponovno izmerimo na 1/100 mm natančno in rezultate ročno vnašamo med parametre posamezne meritve.



Slika 21: Označeni in uravnovešeni vzorci, pripravljeni za merjenje upogibne trdnosti

Meritve upogibne trdnosti smo opravili v skladu s standardom ISO 3133 (1975c) v laboratoriju Katedre za tehnologijo lesa (Oddelek za lesarstvo Biotehniške fakultete) na napravi za testiranje mehanskih lastnosti ZWICK Z100 (slika 22).

Posamezno meritev smo izpeljali tako, da smo vzorec z eno od radialnih ploskev položili na podporišča, ki so bila na razdalji 280 mm, in vključili prednastavljen proces merjenja. Da bi bile meritve čim bolj natančne, smo tik pred postavljanjem vzorca na podporišče izmerili širino in višino preseka vzorca na 1/100 mm natančno in podatke vnesli v tabelo. Stroj je približal merilno glavo vzorcu in nadalje s konstantno hitrostjo obremenjeval vzorec do porušitve. Med obremenjevanjem je meril reakcijo vzorca, jo zarisoval v diagram, izmeril maksimalno silo in po vnesenem algoritmu izračunal upogibno trdnost in modul elastičnosti (MOE).

Hitrost obremenjevanja smo nastavili tako, da je do porušitve prišlo v s standardom zahtevanem časovnem intervalu 90 ± 30 s.



Slika 22: Merjenje upogibne trdnosti na napravi za testiranje mehanskih lastnosti (ZWICK Z100)

3.2.3.2 Merjenje tlačne trdnosti

Vzorci so bili obdelani na širino 20 mm, debelino 20 mm in dolžino 20 mm. Ker presek vzorca vpliva na rezultat meritve, smo se tudi pri meritvah tlačne trdnosti odločili, da tik pred meritvijo širino in debelino vzorcev ponovno izmerimo na 1/100 mm natančno.

Meritve tlačne trdnosti smo opravili v skladu s standardom ISO 3132 (1975b) v laboratoriju Katedre za tehnologijo lesa (Oddelek za lesarstvo Biotehniške fakultete) na napravi za testiranje mehanskih lastnosti ZWICK Z100.

Posamezno meritev smo izpeljali tako, da smo vzorec z eno od prečnih ploskev položili na merilno podlogo in vključili prednastavljen proces merjenja. Da bi bile meritve čim bolj natančne, smo pred postavljanjem vzorca na merilno mesto izmerili širino in debelino vzorca na 1/100 mm natančno. Stroj je približal merilno glavo vzorcu in nadalje s konstantno hitrostjo obremenjeval vzorec do porušitve. Med obremenjevanjem je meril reakcijo vzorca, jo zarisoval v diagram, izmeril maksimalno silo in iz dobljene krivulje izračunal tudi modul elastičnosti.

Na vseh vzorcih je prišlo do porušitve v zahtevanem časovnem intervalu 90 ± 30 s.

3.2.3.3 Merjenje trdote

Pri merjenju trdote lahko vpliva na rezultat meritve bližina roba vzorca, zato je pomembno, da je vzorec dovolj velikega preseka, da je mesto preizkusa dovolj oddaljeno od roba vzorca. Odločili smo se za dimenzijo vzorcev 40 mm x 40 mm x 40 mm, kar je bila glede na debelino beljave na surovcih njihova največja možna širina.

Meritve trdote smo opravili v skladu s standardom EN 1534 (2000) v laboratoriju Katedre za tehnologijo lesa (Oddelek za lesarstvo Biotehniške fakultete) na napravi za testiranje mehanskih lastnosti ZWICK Z100.

Trdoto smo merili vzporedno na vlakna in pravokotno na vlakna, zato sta bili na vsakem vzorcu izvedeni po dve meritvi. Posamezno meritev smo izvedli tako, da smo vzorec položili na vodoravno merilno podlogo in vključili prednastavljen proces merjenja. Stroj je približal merilno glavo s krogelno konico premera 10 mm vzorcu, v sledečih 15 sekundah povečal silo na 1000 N, jo držal 30 sekund in razbremenil. Med obremenjevanjem je za vsako posamezno meritev izmeril največjo deformacijo oziroma globino odtisa kroglice. Ker je za izračun trdote po Brinellu potreben podatek premer odtiska kroglice, smo slednjega izračunali po formuli za izračun premera krogelnega vzporednika.

$$d = 2 \sqrt{r^2 - (r - h)^2} \quad (7)$$

d	povprečen premer vtiska [mm]
h	globina vtiska [mm]
r	polmer jeklene kroglice [mm]

3.2.3.4 Merjenje gostote

Gostoto smo merili na vzorcih dimenzije 20 mm x 20 mm x 20 mm. Odrezali smo jih iz istih kosov kot vzorce za upogibno trdnost in tlačno trdnost.

Gostoto vzorcev v popolnoma suhem stanju smo izračunali po standardu ISO 3131 (1975a), ki temelji na razmerju med maso in volumnom popolnoma suhega vzorca.

V vzorce, ki so bili v osnovi obdelani na 20 mm x 20 mm x 20 mm, smo pred tehtanjem izmerili na 1/100 mm natančno in jih tehtali na 1/10000 g natančno.

Da bi pridobili tudi podatke o skrčku in preverili vlažnost vzorcev, smo meritev izvršili dvakrat – na 12 % vlažnih vzorcih in na absolutno suhih vzorcih. Slednje smo pripravili tako, da smo vzorce po prvi meritvi (pri 12 % vlažnosti) ponovno sušili v sušilniku pri $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ do konstantne mase in jih ohladili na 20°C v prisotnosti silikagela. Med tehtanjem smo imeli vzorce pokrile s folijo, da se ne bi navlažili.

3.2.3.5 Merjenje širine branik

Širine branik smo merili na vzorcih dimenzije 20 mm x 20 mm x 20 mm. Odrezani so bili iz istih kosov kot vzorci za upogibno trdnost in tlačno trdnost.

Meritve širin branik so bile opravljene v laboratoriju Katedre za tehnologijo lesa na posebni napravi, ki je sestavljena iz elektronske lupe 52-FT OLYMPUS, kamere, merilne mize LINTAB-5, računalniškega programa TCAP-Win in monitorja (slika 23 a).

a)



b)



Slika 23: a) Elektronska lupa 52-FT OLYMPUS s stereo okularjem, kamero in merilno mizico LINTAB-5 ;
b) Označeni vzorci lesa, pripravljeni za merjenje širin branik

Meritev je potekala tako, da smo vsak posamezni vzorec namestili na merilno mizico. Prečna ploskev vzorca je morala biti zgoraj, radialna ploskev pa v smeri pomikanja mizice. Mizico smo pomikali z vijčnim vretenom, pomik pa se je preko merilne letve beležil v programu TSAP-Win. Pri vsakem prehodu koordinatne mreže v okularju lupe preko letnice smo zabeležili trenutno koordinato, iz dobljenih rezultatov pa izračunali povprečno širino branike za vsak posamezni vzorec.

3.2.4 Anatomska analiza za identifikacijo

Vzorci smo ločili na vzorce belega hrasta (dob - *Quercus robur* in graden - *Quercus petraea*) ter rdečega hrasta (cer - *Quercus cerris*).

Prečne površine vseh vzorcev smo spolirali. S pregledom z elektronsko lupo 52-FT OLYMPUS in merilno mizo LINTAB-5 smo izmerili dimenzije in videz trahej kasnega lesa. Prisotnost velikih osamljenih trahej v kasnem lesu z debelimi stenami je kazale na skupino rdečega hrasta oz. cera (*Quercus cerris*), zelo majhne traheje s tankimi stenami pa so tipične za dob (*Quercus robur*) in graden (*Quercus petraea*) s predpostavko, da teh dveh hrastov ni možno natančno razlikovati na osnovi anatomije (Richter in Dellwitz, 2000).

3.2.5 Analiza podatkov

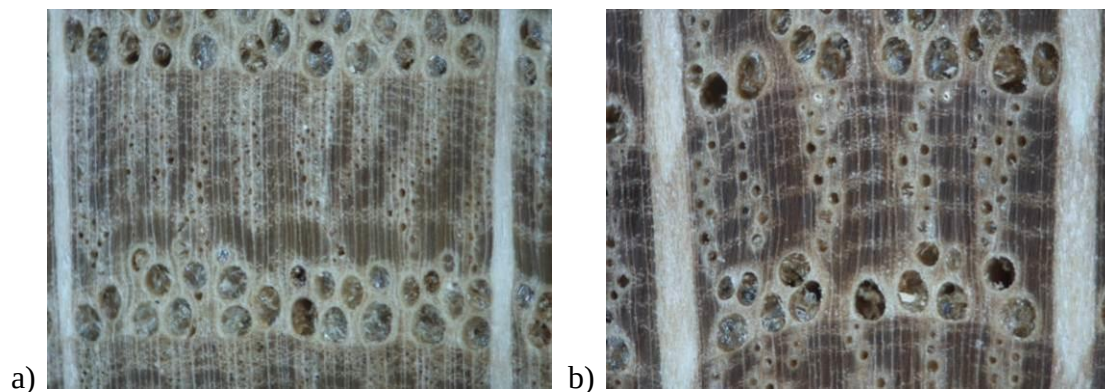
Statistično analizo podatkovnih nizov smo obdelali z računalniškimi programi Microsoft Excel in Statgraphics Plus (version 5.1). Izmerjene vrednosti oz. njihove razlike smo analizirali z analizo variance (ANOVA), najdene značilne razlike med analiziranimi skupinami smo preverili z metodo najmanjših značilnih razlik (LSD – least significant difference).

4 REZULTATI

4.1 IDENTIFIKACIJA VRSTE HRASTA

Makroskopski pregled spoliranih površin prečnih prerezov vzorcev je pokazal, da smo vzorce izrezali iz 16 surovcev belega hrasta (*Q. robur* or *Q. petraea*) in 10 surovcev rdečega hrasta (*Q. cerris*).

Identifikacija je bila opravljena v skladu z ugotovitvami, opisanimi v poglavju 2.1.5., primer je na sliki 24.



Slika 24: *Quercus* spp., prečni prerez: a) Vzorec D1J – primer belega hrasta z večjim številom trahej kasnega lesa z oglatimi oblikami in tanjšimi celičnimi stenami in b) Vzorec Y1J – primer rdečega hrasta z manjšim številom trahej kasnega lesa, ovalnih oz. elipsastih oblik in z debelejšimi celičnimi stenami; oba vzorca sta iz območja jedrovine

4.2 IZMERJENE VREDNOSTI DOLOČENIH LASTNOSTI HRASTA

Vse izmerjene vrednosti določenih mehanskih lastnosti smo primerjali tudi s podatki iz literature. Rezultati so prikazani v preglednici 4 in kažejo, da se vse izmerjene vrednosti gibljejo v razponu že objavljenih podatkov.

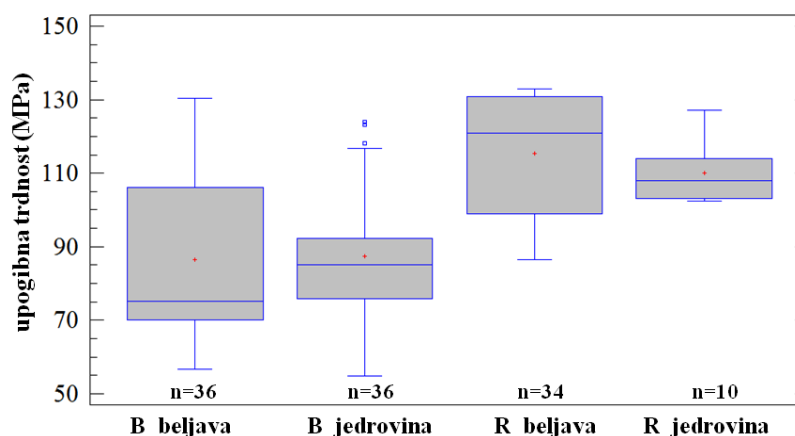
Preglednica 3: Primerjava naših rezultatov s podatki iz literature

UPOGIBNA TRDNOST (N/mm ²)							
REZULTATI		LITERATURA (jedrovina)					
	beljava	jedrovina	1*	2*	3*	4*	5*
<i>Q. robur</i>	86	87	74...88...105	53...108...153	58,8...92,1...98	60 - 110	88
<i>Q. petraea</i>			78...110...117	53...108...153	58,8...92,1...98	60 - 110	110
<i>Q. cerris</i>	115	110	X	65...110...152	X	75 - 120	X
MODUL ELASTIČNOSTI (GPa)							
REZULTATI		LITERATURA (jedrovina)					
	beljava	jedrovina	1*	2*	3*	4*	5*
<i>Q. robur</i>	8,9	9,0	10...11,7...13,2	10,6...12,5...14,6	11,5	10.5 - 14.5	11.7
<i>Q. petraea</i>			9,2...13...13,5	10,6...12,5...14,6	12,7	10.5 - 14.5	13
<i>Q. cerris</i>	12,4	11,7	X	X	X	10.2 - 15.7	X
TLAČNA TRDNOST (N/mm ²)							
REZULTATI		LITERATURA (jedrovina)					
	beljava	jedrovina	1*	2*	3*	4*	5*
<i>Q. robur</i>	41,6	45,4	54...61...67	29,4...60,8...84,3	51	42 - 64	61
<i>Q. petraea</i>			48...65...70	29,4...60,8...84,3	23,5...37,2...43,1	42 - 64	55 - 65
<i>Q. cerris</i>	54,8	51,6	X	36,3...57,4...83,3	57	42 - 60	X
TRDOTA BRINELL - HB II (N/mm ²)							
REZULTATI		LITERATURA (jedrovina)					
	beljava	jedrovina	1*	2*	3*	4*	5*
<i>Q. robur</i>	37,9	42,9	66	X	65,7	X	X
<i>Q. petraea</i>			66	X	41,1...67,7...97	X	X
<i>Q. cerris</i>	X	X	X	X	64,7...77,9...96,1	X	X
TRDOTA BRINELL - HB I (N/mm ²)							
REZULTATI		LITERATURA (jedrovina)					
	beljava	jedrovina	1*	2*	3*	4*	5*
<i>Q. robur</i>	17,7	20,5	34	X	X	23 - 42	X
<i>Q. petraea</i>			34	X	X	23 - 42	X
<i>Q. cerris</i>	X	X	X	X	X	22 - 35	X
GOSTOTA V POPOLNOMA SUHEM STANJU (kg/m ³)							
REZULTATI		LITERATURA (jedrovina)					
	beljava	jedrovina	1*	2*	3*	4*	5*
<i>Q. robur</i>	634	658	390...650...930	670	388...625...795	X	390 - 650 - 930
<i>Q. petraea</i>			390...650...930	670	465...662...837	X	390 - 650 - 930
<i>Q. cerris</i>	776	767	X	690	781	X	X

1*- (Wagenführ, 1996); 2*-(Giordano, 1976); 3*-(Horvat, 1959); 4*-(Anonymus, 2012); 5*-(Grosser and Teetz, 1987)

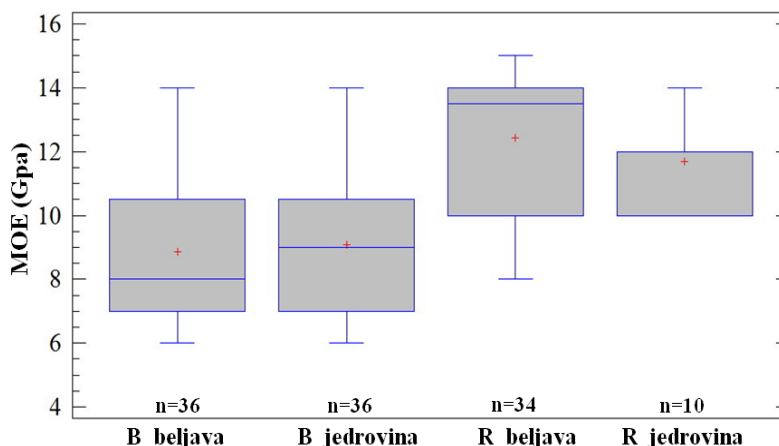
4.3 UPOGIBNA TRDNOST IN MODUL ELASTIČNOSTI

Meritve upogibne trdnosti in modula elastičnosti smo opravili na 70 vzorcih beljave, od tega 36 na vzorcih beljave belih hrastov in 34 na vzorcih beljave rdečih hrastov ter na 46 vzorcih jedrovine, od tega 36 na vzorcih jedrovine belih hrastov in 10 na vzorcih rdečih hrastov. Izmerjene vrednosti upogibne trdnosti na vzorcih beljave so bile pri belem hrastu med 56,1 in 103,37 N/mm² in pri rdečem hrastu med 86,54 in 132,95 N/mm², na vzorcih jedrovine pa pri belem hrastu med 54,89 in 123,97 N/mm² in pri rdečem med 102,40 in 127,07 N/mm². V literaturi najdemo vrednosti za upogibno trdnost lesa hrasta v razponu med 53 in 153 N/mm². Povprečna vrednost upogibne trdnosti pri beljavi je bila pri belem hrastu 86,5 N/mm² in mediana 75,1 N/mm², pri rdečem pa 115,3 N/mm² in mediana 122,89 N/mm². Pri jedrovini je bila povprečna vrednost pri belem hrastu 87,4 N/mm² in mediana 85,1 N/mm², pri rdečem pa 110,0 N/mm² in mediana 108,06 N/mm² (slika 25).



Slika 25: Upogibna trdnost beljave in jedrovine belega in rdečega hrasta (B_beljava – beljava belega hrasta, B_jedrovina – jedrovina belega hrasta, R_beljava – beljava rdečega hrasta, R_jedrovina – jedrovina rdečega hrasta, n – število vzorcev)

Izmerjene vrednosti modula elastičnosti (MOE) na vzorcih beljave so bile pri belem hrastu med 6 in 14 N/mm² in pri rdečem hrastu med 8 in 15 N/mm², na vzorcih jedrovine pa pri belem hrastu med 6 in 14 N/mm² in pri rdečem med 10 in 14 N/mm². V literaturi najdemo vrednosti za modul elastičnosti lesa hrasta v razponu med 9,2 in 15,7 N/mm². Povprečna vrednost modula elastičnosti pri beljavi je bila pri belem hrastu 8,9 N/mm² in mediana 8 N/mm², pri rdečem pa 12,4 N/mm² in mediana 13 N/mm². Pri jedrovini je bila povprečna vrednost pri belem hrastu 9,1 N/mm² in mediana 9 N/mm², pri rdečem pa 11,7 N/mm² in mediana 12 N/mm² (slika 26). Skupni statistični podatki meritev upogibne trdnosti in modula elastičnosti so v prilogi 1 in 2.



Slika 26: Modul elastičnosti (MOE) beljave in jedrovine belega in rdečega hrasta (B_beljava – beljava belega hrasta, B_jedrovina – jedrovina belega hrasta, R_beljava – beljava rdečega hrasta, R_jedrovina – jedrovina rdečega hrasta, n – število vzorcev)

Analiza variance (ANOVA) (preglednici 4 in 5) je pokazala statistično značilne razlike v upogibni trdnosti ($F = 19,40$, $P < 0,05$) in modulu elastičnosti ($F = 19,77$, $P < 0,05$) med preiskovanimi skupinami. Upogibna trdnost je v povprečju najmanjša pri beljavi belih hrastov in največja pri beljavi rdečih hrastov.

Preglednica 4: Analiza variance upogibne trdnosti beljave in jedrovine belih (B) in rdečih (R) hrastov

Vir variabilnosti	SS	DF	MS	F-razmerje	P-vrednost*
Med skupinami	20322,1	3	6774,04	19,40	0,0000
Znotraj skupin	39107,2	112	349,171		
Skupaj	59429,3	115			

* $P < 0,05$. SS: vsota kvadratov, DF: prostostne stopnje, MS: povprečni kvadrat

Preglednica 5: Analiza variance modula elastičnosti beljave in jedrovine belih (B) in rdečih (R) hrastov

Vir variabilnosti	SS	DF	MS	F-razmerje	P-vrednost*
Med skupinami	302,635	3	100,878	19,77	0,0000
Znotraj skupin	571,538	112	5,10302		
Skupaj	874,172	115			

* $P < 0,05$. SS: vsota kvadratov, DF: prostostne stopnje, MS: povprečni kvadrat

Metoda najmanjših značilnih razlik (LSD) (preglednici 6 in 7) kaže na to, da ni statistično značilnih razlik med povprečnimi vrednostmi upogibne trdnosti in modula elastičnosti med beljavo in jedrovino znotraj kategorij belih ali rdečih hrastov. To je v preglednicah 6 in 7 prikazano z oznako X za homogenost vrednosti po skupinah.

Preglednica 6: Rezultati metode najmanjših značilnih razlik (95 % LSD-test) upogibne trdnosti beljave in jedrovine pri belih (B) in rdečih (R) hrastih

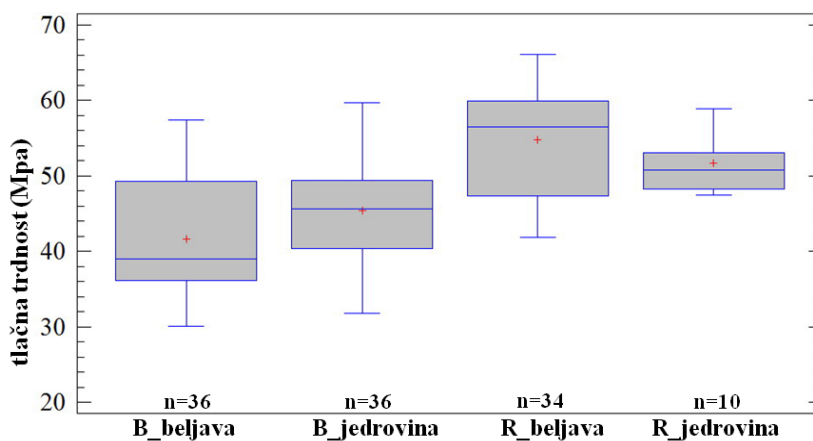
	št. vz.	arit. sred.	homog. sk.
B – beljava	36	86,5131	X
B – jedrovina	36	87,4325	X
R – beljava	34	115,296	X
R – jedrovina	10	110,017	X

Preglednica 7: Rezultati metode najmanjših značilnih razlik (95 % LSD-test) modula elastičnosti beljave in jedrovine pri belih (B) in rdečih (R) hrastih

	št. vz.	arit. sred.	homog. sk.
B – beljava	36	8,86111	X
B – jedrovina	36	9,08333	X
R – beljava	34	12,4412	X
R – jedrovina	10	11,7	X

4.4 TLAČNA TRDNOST

Meritve tlačne trdnosti smo opravili na 70 vzorcih beljave, od tega 36 na vzorcih beljave belih hrastov in 34 na vzorcih beljave rdečih hrastov ter na 46 vzorcih jedrovine, od tega 36 na vzorcih jedrovine belih hrastov in 10 na vzorcih rdečih hrastov. Izmerjene vrednosti tlačne trdnosti na vzorcih beljave so bile pri belem hrastu med 30,02 in 57,46 N/mm² in pri rdečem hrastu med 41,8 in 66,1 N/mm². Na vzorcih jedrovine pa so bile vrednosti tlačne trdnosti med 31,81 in 59,71 N/mm² pri belem hrastu in med 47,44 in 58,93 N/mm² pri rdečem hrastu. V literaturi najdemo vrednosti za tlačno trdnost lesa hrasta v razponu med 23,5 in 84,3 N/mm². Povprečna vrednost tlačne trdnosti beljave pri belem hrastu je bila 41,65 N/mm² in mediana 38,96 N/mm², pri rdečem hrastu pa 54,82 N/mm² in mediana 56,49 N/mm². Pri jedrovini pa je bila povprečna vrednost tlačne trdnosti pri belem hrastu 45,43 N/mm² in mediana 45,64 N/mm², pri rdečem hrastu pa 51,68 N/mm² in mediana 50,75 N/mm². Skupni statistični podatki meritev tlačne trdnosti so v Prilogi 3.



Slika 27: Tlačna trdnost beljave in jedrovine belega in rdečega hrasta (B_beljava – beljava belega hrasta, B_jedrovina – jedrovina belega hrasta, R_beljava – beljava rdečega hrasta, R_jedrovina – jedrovina rdečega hrasta, n – število vzorcev)

Analiza variance (preglednica 8) je pokazala statistično značilne razlike v tlačni trdnosti med preiskovanimi skupinami vzorcev ($F = 22,95$; $P < 0,05$).

Preglednica 8: Analiza variance tlačne trdnosti beljave in jedrovine belih (B) in rdečih (R) hrastov

Vir variabilnosti	SS	DF	MS	F-razmerje	P-vrednost*
Med skupinami	3382,61	3	1127,54	22,95	0,0000
Znotraj skupin	5502,02	112	49,1252		
Skupaj	8884,63	115			

*P<0,05. SS: vsota kvadratov, DF: prostostne stopnje, MS: povprečni kvadrat

Metoda najmanjših značilnih razlik (LSD) (preglednica 9) kaže na to, da ima najmanjšo tlačno trdnost beljava belega hrasta, največjo pa beljava rdečega hrasta. Iz preglednice 8 je prav tako mogoče razbrati, da obstajajo manjše značilne razlike v tlačni trdnosti beljave in jedrovine belega hrasta in da ni značilnih razlik v tlačni trdnosti med beljavo in jedrovino rdečega hrasta.

Preglednica 9: Rezultati metode najmanjših značilnih razlik (95 % LSD-test) tlačne trdnosti beljave in jedrovine pri belih (B) in rdečih (R) hrastih

	št. vz.	arit. sred.	homog. sk.
B – beljava	36	41,6539	X
B - jedrovina	36	45,4275	X
R - beljava	34	54,8232	X
R - jedrovina	10	51,677	X

4.5 TRDOTA

Test trdote po Brinellu vzporedno s potekom lesnih vlaken smo izvedli na 18 vzorcih beljave in na 18 vzorcih jedrovine, test trdote pravokotno (prečno) na potek lesnih vlaken pa na 16 vzorcih beljave in 18 vzorcih jedrovine. Zaradi pomanjkanja vzorcev je bila trdota merjena le na vzorcih belih hrastov.

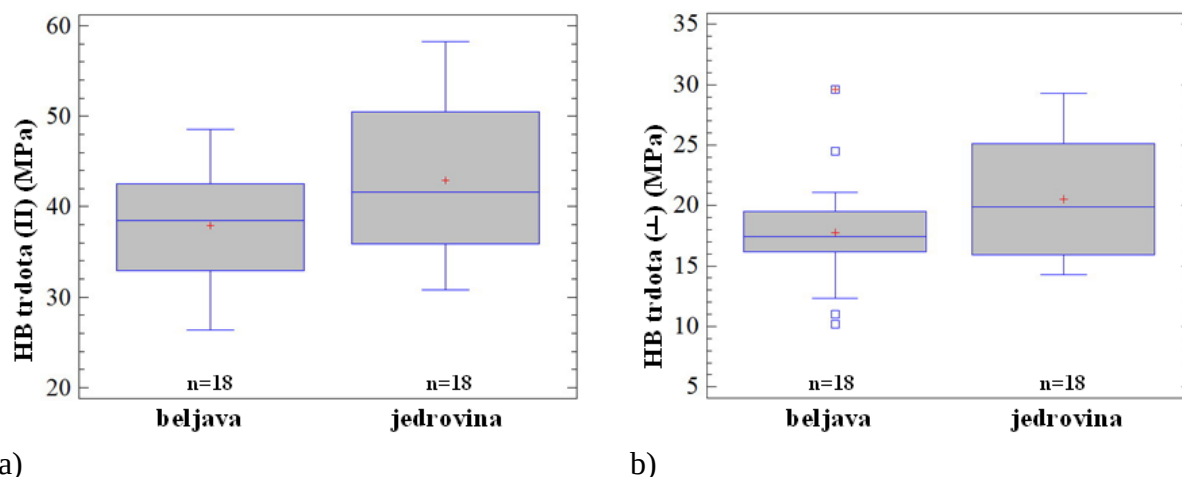
Izmerjene vrednosti trdote vzporedno z vlakni so bile pri vzorcih beljave med 26,39 in 48,52 N/mm², pri vzorcih jedrovine pa med 30,81 in 58,19 N/mm². V obstoječi literaturi smo za trdoto hrasta vzporedno z vlakni našli vrednosti med 41,1 in 97 N/mm².

Povprečna vrednost izmerjene trdote vzorcev beljave v vzdolžni smeri je bila tako 38,0 N/mm², njihova mediana pa 38,41 N/mm²; povprečna vrednost trdote vzorcev jedrovine vzporedno z vlakni je bila 42,9 N/mm² in njihova mediana 41,57 N/mm².

Izmerjene vrednosti trdote v smeri pravokotno na vlakna so bile pri vzorcih beljave med 10,21 in 29,56 N/mm², pri vzorcih jedrovine pa med 14,26 in 29,26 N/mm². V obstoječi literaturi smo za trdoto hrasta pravokotno na vlakna našli vrednosti 34 N/mm².

Povprečna vrednost izmerjene trdote vzorcev beljave v smeri pravokotno na vlakna je bila tako 17,8 N/mm², njihova mediana pa 17,54 N/mm²; povprečna vrednost trdote vzorcev jedrovine v je bila 20,5 N/mm² in njihova mediana 19,91 N/mm².

Naše meritve so pokazale, da je variabilnost vrednosti med posameznimi vzorci beljave in med posameznimi vzorci jedrovine veliko večja kot pa variabilnost med beljavo in jedrovino. Skupni statistični podatki meritev trdote po Brinellu so zbrani v Prilogi 4.



Slika 28: Trdota beljave in jedrovine belih hrastov, določena po Brinellu: (a) vzporedno s potekom lesnih vlaken (II) in (b) pravokotno na potek lesnih vlaken ($\perp$)

Rezultati analize variance (preglednica 10) so pokazali, da ni razlik v trdoti beljave in jedrovine ($P < 0,05$). To velja tako za trdoto, merjeno v smeri vzporedno s potekom lesnih vlaken, kot tudi za trdoto, merjeno pravokotno na potek lesnih vlaken.

Preglednica 10: Analiza variance trdote beljave in jedrovine belih hrastov po Brinellu

HB	Vir variabilnosti	SS	DF	MS	F-razmerje	P-vrednost*
II	Med skupinami	225,5	1	225,50	3,71	0,0623
	Znotraj skupin	2063,93	34	60,703		
$\perp$	Med skupinami	69,4444	1	69,444	3,08	0,0884
	Znotraj skupin	767,341	34	22,568		

* $P < 0,05$. SS: vsota kvadratov, DF: prostostne stopnje, MS: povprečni kvadrat

Zgoraj navedeno trditev je potrdil tudi LDS test (preglednica 11). Iz preglednice je razvidno le, da obstajajo značilne razlike v trdoti med smerjo poteka lesnih vlaken, saj je trdota veliko večja v smeri s potekom lesnih vlaken kot v smeri pravokotno na potek lesnih vlaken.

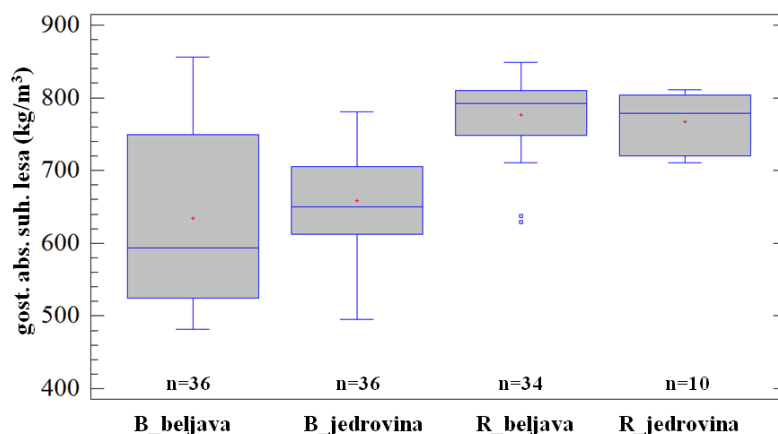
Preglednica 11: Rezultati metode najmanjših značilnih razlik (95 % LSD-test) meritev trdote (HB) beljave in jedrovine pri belih hrastih po Brinellu:

HB		št. vz.	arit. sred.	homog. sk.
II	Beljava	18	37,9389	X
	Jedrovina	18	42,9444	X
$\perp$	Beljava	18	17,75	X
	Jedrovina	18	20,5278	X

4.6 GOSTOTA

Gostoto vzorcev v popolnoma suhem stanju smo izmerili na 70 vzorcih beljave in na 46 vzorcih jedrovine. Pri beljavi so bile izmerjene vrednosti gostote v popolnoma suhem stanju med 481,61 in 855,95 kg/m³ pri belem hrastu in med 629,57 in 848,44 kg/m³ pri rdečem hrastu. Pri vzorcih jedrovine pa so bile izmerjene vrednosti med 495,58 in 781,25 kg/m³ pri belih hrastih ter med 710,79 in 810,58 kg/m³ pri rdečih hrastih. V obstoječi literaturi za hrast najdemo podatke, da se vrednosti gostote v popolnoma suhem stanju gibljejo med 388 in 930 kg/m³.

Povprečna vrednost izmerjene gostote beljave v popolnoma suhem stanju je bila tako pri belem hrastu 634,1 kg/m³ in median 593,67 kg/m³ ter pri rdečem hrastu 776,4 kg/m³ in median 792,14 kg/m³. Pri jedrovini pa je bilo povprečje izmerjenih vrednosti pri belem hrastu 658,3 kg/m³ in mediana 650,27 kg/m³, pri rdečem hrastu pa 767,3 kg/m³ in mediana 779,18 kg/m³ (slika 29). Skupni statistični podatki meritev gostote so prikazani v Prilogi 5.



Slika 29: Gostota v popolnoma suhem stanju (B_beljava – beljave belega hrasta, B_jedrovine belega hrasta, R_beljava – beljave rdečega hrasta in R_jedrovine rdečega hrasta, n – število vzorcev)

Analiza variance (ANOVA) (preglednica 12) je pokazala statistično značilne razlike v tlačni trdnosti med preiskovanimi skupinami vzorcev ($F = 20,88$; $P < 0,05$).

Preglednica 12: Analiza variance gostote v popolnoma suhem stanju beljave in jedrovine belih (B) in rdečih (R) hrastov

Vir variabilnosti	SS	DF	MS	F-razmerje	P-vrednost*
Med skupinami	459573	3	153191	20,88	0,0000
Znotraj skupin	821563	112	7335,39		
Skupaj	1,28114	115			

*P<0,05. SS: vsota kvadratov, DF: prostostne stopnje, MS: povprečni kvadrat

Metoda najmanjših značilnih razlik (LSD) (preglednica 13) kaže na to, da ima najmanjšo gostoto beljava belega hrasta, največjo pa beljava rdečega hrasta. Iz preglednice 12 lahko razberemo, da ni statistično značilnih razlik v gostoti beljave in jedrovine znotraj skupin belih in rdečih hrastov, obstajajo pa značilne razlike v gostoti med belimi in rdečimi hrasti.

Preglednica 13: Rezultati metode najmanjših značilnih razlik (95 % LSD-test) gostote v popolnoma suhem stanju beljave in jedrovine pri belih (B) in rdečih (R) hrastih

	št. vz.	arit. sred.	homog. sk.
B - beljava	36	634,093	X
B - jedrovina	36	658,334	X
R - beljava	34	776,426	X
R - jedrovina	10	767,253	X

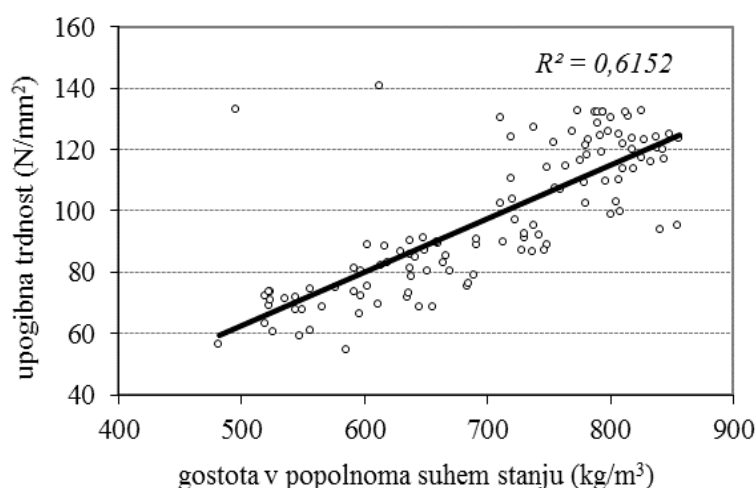
Rezultati potrjujejo, da je gostota venčasto poroznih lesov v največji meri odvisna od rasti drevesa (tj. širine branik, deleža ranega in kasnega lesa) in pa njene variabilnosti. Manj kot sama rast na gostoto vplivajo ostale strukturne in histokemične spremembe, ki so posledica ojedritvenih procesov (Tsoumis, 1991).

4.7 KORELACIJE MED GOSTOTO IN DOLOČENIMI MEHANSKIMI LASTNOSTMI HRASTA

Preverili smo korelacije med gostoto v popolnoma suhem stanju in merjenimi mehanskimi lastnostmi. V nadaljevanju je torej prikazana korelacija med gostoto in upogibno trdnostjo, modulom elastičnosti (MOE) in tlačno trdnostjo.

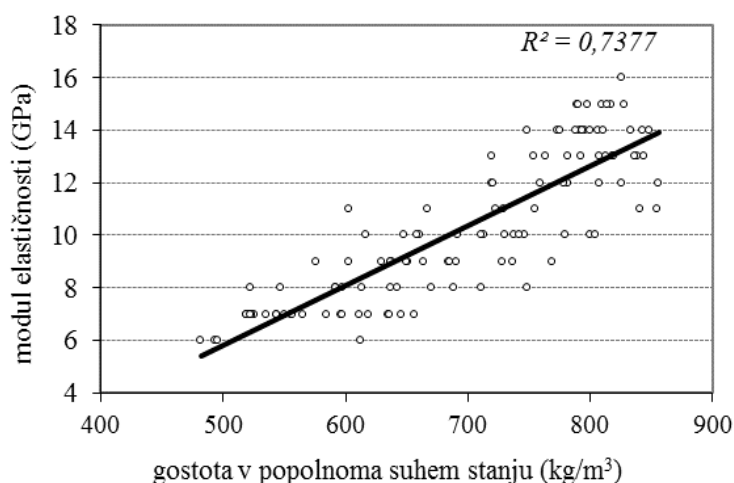
Za primerjavo korelacij smo lahko uporabili rezultate 114 vzorcev (70 vzorcev beljave in 44 vzorcev jedrovine). Meritve mehanskih lastnosti niso pokazale značilnih razlik med lastnostmi beljave in jedrovine, zato smo analizo korelacij mehanskih lastnosti z gostoto računali za vse vzorce združeno.

Na sliki 30 je prikazana korelacija (zveza) med gostoto v popolnoma suhem stanju in upogibno trdnostjo. Podatkom smo prilegali linearno premico in izračunali determinacijski koeficient (R^2), ki znaša 0,62, kar kaže na značilno in pozitivno korelacijo, da se s povečevanjem gostote lesa povečuje tudi njegova upogibna trdnost.



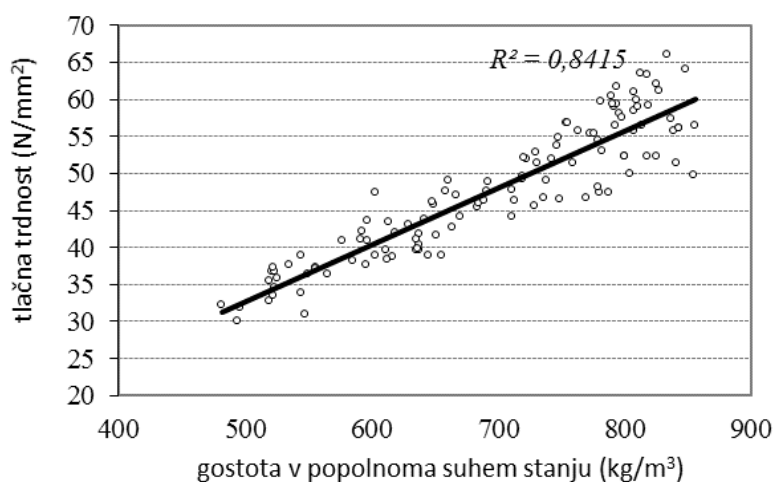
Slika 30: Korelacija med gostoto v popolnoma suhem stanju in upogibno trdnostjo hrasta

Podoben rezultat smo dobili tudi pri preverjanju korelacije med gostoto in modulom elastičnosti, kjer je determinacijski koeficient znašal 0,74 (slika 31), kar pomeni, da se s povečano gostoto lesa poveča tudi modul elastičnosti.



Slika 31: Korelacija med gostoto v popolnoma suhem stanju in modulom elastičnosti (MOE) hrasta

Največjo korelacijo smo zabeležili med gostoto in tlačno trdnostjo hrasta, kjer je determinacijski koeficient znašal 0,84 (slika 32).



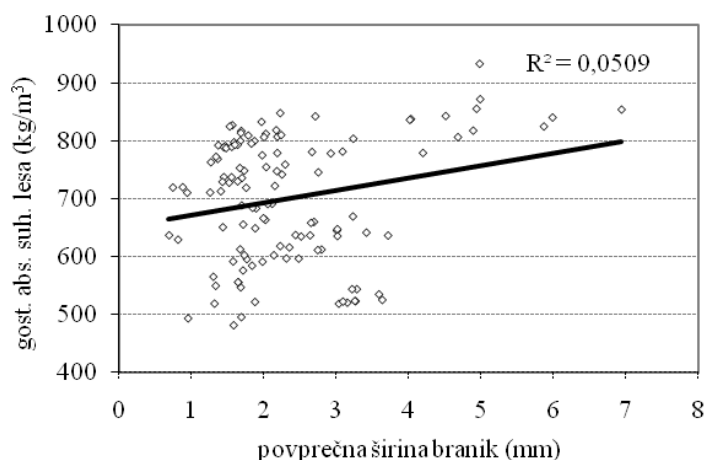
Slika 32: Korelacija med gostoto v popolnoma suhem stanju in tlačno trdnostjo hrasta

4.8 KORELACIJA MED ŠIRINAMI BRANIK IN IZBRANIMI LASTNOSTMI HRASTA

Na preiskovanih vzorcih (114 vzorcev, 70 vzorcev beljave in 44 vzorcev jedrovine) smo izmerili širine branik, ki so bile široke od 0,7 do 7 mm. V nadaljevanju smo preverili korelacijo med širinami branik in merjenimi mehanskimi lastnostmi.

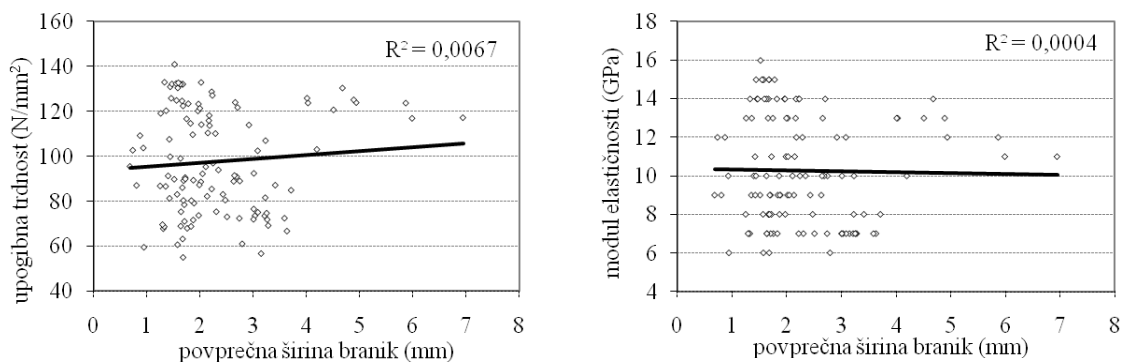
Na sliki 33 je prikazano razmerje med povprečno širino branik in gostoto v popolnoma suhem stanju. Vidimo, da je imela večina vzorcev povprečno širino branik med 1 in 3 mm. Kljub majhnemu determinacijskemu koeficientu (0,0509) je iz grafa mogoče razbrati, da se

gostota lesa povečuje z naraščajočo širino branike, kar je v skladu s podatki iz literature (Čufar, 2006). V proučevanem primeru pa povezava ni statistično značilna.

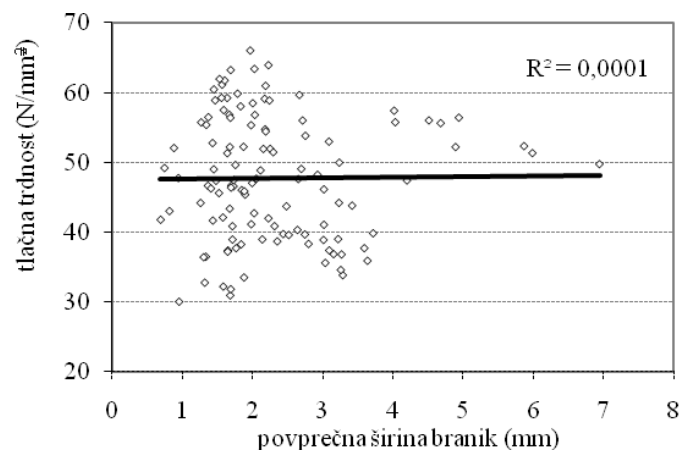


Slika 33: Korelacija med povprečno širino branik in gostoto v popolnoma suhem stanju hrasta

Na sliki 34 so prikazane korelacije med povprečno širino branik in upogibno trdnostjo ter modulom elastičnosti. Nekoliko presenetljivo so bili determinacijski koeficienti zelo majhni (0,0067 in 0,0004), zato na podlagi naših meritev in preračunov lahko sklepamo, da ni statistično značilne pozitivne korelacije med širino branik in upogibno trdnostjo ter modulom elastičnosti. Enako velja tudi za korelacijo med širino branik in tlačno trdnostjo z determinacijskim koeficientom 0,0001 (slika 35).



Slika 34: Korelacija med povprečno širino branik in upogibno trdnostjo in modulom elastičnosti hrasta



Slika 35: Korelacija med povprečno širino branik in tlačno trdnostjo

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

Na področju Slovenije se s komercialnim imenom hrast presenetljivo trži les, ki poleg pričakovanih belih hrastov doba (*Quercus robur*) in gradna (*Quercus petraea*) vsebuje tudi precejšnjo količino rdečega hrasta cera (*Quercus cerris*). Rezultati raziskave so pokazali, da je na osnovi anatomije možno razlikovati med belimi in rdečimi hrasti, kot je bilo predpostavljeno tudi v literaturi (Richter and Dallwitz, 2000).

Hipoteza, da ima les beljave slabše mehanske lastnosti kot les jedrovine, je bila na osnovi dotične raziskave na splošno zavrnjena. Bistvenih razlik med gostoto, upogibno trdnostjo, modulom elastičnosti, tlačno trdnostjo in trdoto beljave in jedrovine po Brinellu nismo zaznali. Razlike med beljavo in jedrovino so bile ugotovljene le med vzorci iz skupine belih hrastov, in še to le pri tlačni trdnosti.

Beljava rdečega hrasta je imela celo najvišje izmerjene vrednosti mehanskih lastnosti (gostoto, upogibno trdnost, modul elastičnosti in tlačno trdnost). To se sklada z ugotovitvami raziskav primerjave mehanskih lastnosti in količine ekstraktivov pri *Quercus castaneifolia* (Ayobi s sod., 2011) in deloma pri macesnu (*Larix sp.*) (Grabner s sod., 2005).

Naši rezultati potrjujejo, da na mehanske lastnosti lesa poglavitno vpliva struktura lesa oziroma da histokemične spremembe (povečanje vsebnosti jedrovinskih snovi), ki se pojavijo v procesu ojedritve, ne vplivajo bistveno na mehanske lastnosti lesa (Tsoumis, 1991). Slednje potrjuje npr. povprečna gostota vzorcev cera (skupina rdeči hrast), saj je bila gostota beljave celo nekoliko večja kot gostota jedrovine.

Prav tako zavračamo hipotezo, da so mehanske lastnosti skupine rdečih hrastov (v našem primeru cera - *Quercus cerris*) slabše kot pri belih hrastih (dob in graden). Statistični pregled rezultatov meritev je pokazal, da so imeli vzorci iz skupine rdečega hrasta višje vrednosti kot vzorci belega hrasta pri upogibni trdnosti, pri modulu elastičnosti (MOE) in pri tlačni trdnosti. Navkljub dobljenim rezultatom pa ne more biti izključeno, da bi nekatere lastnosti cera lahko bile slabše kot pri dobu ali gradnu.

Kljub relativno majhnemu vzorcu se je izkazalo, da je variabilnost lastnosti lesa znotraj preiskovanih skupin lesa (beli hrasti, rdeči hrasti, beljava, jedrovina) večja kot pa variabilnost med posameznimi skupinami.

V Sloveniji, Italiji in Avstriji se cer (*Quercus cerris*) uporablja pretežno za kurjavo. Eden od glavnih vzrokov, da se manj uporablja kot tehnični les, je nepravilna oblika debla, večji delež beljave in posledično večje količine beljave v izdelkih. Ta problem bi bil lahko manj izrazit, če bi se ga lahko uporabljalo npr. za železniške pragove. Po standardu za proizvodnjo lesenih železniških pragov (EN 13145, 2012) je pri hrastovih pragovih dovoljena prisotnost zdrave beljave, saj so pragovi dodatno globinsko impregnirani, s čimer se poveča naravna trajnost in odpornost lesa.

Po podatkih iz literature je ena od bistvenih razlik med belimi (dob in graden) in rdečimi hrasti (cer) naravna trajnost. Glede na standard EN 350-2 (1994) je jedrovina doba in gradna razporejena v trajnostni razred 2 (trajen), medtem ko je jedrovina cera določena v trajnostni razred 3 (zmerno trajen). Na tem mestu je treba poudariti, da so naravna trajnost in tudi ostale lastnosti pri hrastih zelo spremenljive. Humar in sodelavci (Humar s sod., 2008) na primer jasno poročajo, da se naravna trajnost jedrovine pri belih hrastih spreminja s strukturo lesa. Pokazali so, da je v izjemnih primerih lahko jedrovina belih hrastov celo tako slabo trajna kot les bukve (trajnostni razred 5 – netrajen) (Humar s sod., 2008). Kakorkoli, jedrovina razreda 2 mora biti zaščiten (impregniran), da doseže stopnjo trajnosti, ki omogoča njeno uporabo za železniške pragove – razred izpostavljenosti 4 po standardu EN 350-2, 1994.

Ob tem je potrebno upoštevati tudi, da je jedrovino vseh treh raziskovanih vrst hrasta zelo težko zaščititi (impregnirati), ker spada med les, ki se težko impregnira (razred impregnabilnosti 4). Beljava hrasta je neobstoja (trajnostni razred 5) in mora biti zaščiten (impregniran). K sreči se da beljavo hrasta enostavno zaščititi (razred impregnabilnosti 1) (EN 350-2, 1994). Ustrezno zaščiten beljava se lahko uporablja v razredu izpostavljenosti 4.

V nadaljnjih raziskavah bi bilo smiselno podrobneje proučiti vpliv anatomije hrasta na gostoto in mehanske lastnosti.

6 POVZETEK

V Sloveniji se dobavitelji masivne hrastovine pogosto soočajo s prepričanjem uporabnikov, da je les beljave manj trden oz. ima slabše mehanske lastnosti kot les jedrovine. Da bi povečali vrednostni izkoristek hrastovine z uporabo beljave pri izdelkih, kjer ta ni moteča, smo si za cilj diplomske naloge zastavili izvesti standardne teste mehanskih lastnosti in gostote na čistih orientiranih vzorcih beljave in jedrovine hrastovine in s primerjavo rezultatov odpraviti dvome uporabnikov masivne hrastovine.

Vzorci za teste smo z manjšo nadmero izrezali iz 26 naključno izbranih hlodov, ki so bili namenjeni za izdelavo železniških pragov. Po sušenju na 12 % vlažnost in aklimatiziranju pri relativni zračni vlagi (ϕ) 65 %, (T) 20 °C smo jih še naknadno obdelali na 1/10 mm natančno in jih označili.

Vse meritve mehanskih lastnosti smo izvedli v laboratoriju Katedre za tehnologijo lesa Biotehniške fakultete na napravi za testiranje mehanskih lastnosti ZWICK Z100.

V skladu s standardom ISO 3133 (1975c) smo meritve upogibne trdnosti izvedli na vzorcih dimenzije 20 mm x 20 mm x 300 mm kot tritočkovni upogib z razdaljo med podporama 280 mm. Hitrost obremenjevanja smo nastavili tako, da je do porušitve prišlo v zahtevanem časovnem intervalu 90 ± 30 s.

V skladu s standardom ISO 3132 (1975b) smo meritve tlačne trdnosti izvedli na vzorcih dimenzije 20 mm x 20 mm x 20 mm. Na vseh vzorcih je prišlo do porušitve v zahtevanem časovnem intervalu 90 ± 30 s.

Za meritev trdote po Brinellu smo izdelali vzorce dimenzije 40 mm x 40 mm x 40 mm, kar je bila glede na obseg beljave največja možna širina vzorcev. Na testirnem stroju smo uporabili merilno glavo s krogelno konico premera 10 mm in meritev opravili v skladu s standardom EN 1534 (2000).

Širine branik smo merili na vzorcih dimenzije 20 mm x 20 mm x 20 mm. Odrezali smo jih iz istih kosov kot vzorce za upogibno trdnost in tlačno trdnost ter jih kasneje uporabili še za izmero gostote. Širine branik smo izmerili na napravi, sestavljeni iz elektronske lupe OLYMPUS 52-FT, kamere, merilne mize LINTAB-5 in računalniškega programa TSAP-Win. Za izmero gostote smo vzorce naknadno posušili do popolnoma suhega stanja in jim za večjo natančnost rezultatov meritev tik pred tehtanjem izmerili volumen oz. dimenzije stranic na 1/100 mm natančno. Meritev smo opravili v skladu s standardom ISO 3131(1975a).

Primernost in uporabnost beljave hrastovine smo ocenili s primerjavo rezultatov meritev med vzorci beljave in jedrovine in jih primerjali s poznanimi vrednostmi za jedrovino iz literature.

Hipoteza, da ima les beljave slabše mehanske lastnosti kot les jedrovine, je bila na osnovi raziskave na splošno zavrnjena. Naši rezultati tako potrjujejo, da na mehanske lastnosti lesa poglobitno vpliva struktura lesa oziroma da histokemične spremembe, ki se pojavijo v procesu ojedritve, ne vplivajo bistveno na mehanske lastnosti lesa (Tsoumis, 1991). Slednje

potrjuje npr. povprečna gostota vzorcev cera (skupina rdeči hrast), saj je bila gostota beljave celo nekoliko večja kot gostota jedrovine.

Rezultati so pokazali, da so mehanske lastnosti skupine rdečih hrastov (v našem primeru cer - *Quercus cerris*) boljše kot pri belih hrastih (dob in graden). Statistični pregled meritev je pokazal, da so imeli vzorci iz skupine rdečega hrasta višje vrednosti kot vzorci belega hrasta pri upogibni trdnosti, modulu elastičnosti (MOE) in tlačni trdnosti. Kljub relativno majhnemu vzorcu se je izkazalo, da je variabilnost lastnosti lesa večja znotraj preiskovanih skupin lesa (beli hrasti, rdeči hrasti, beljava, jedrovina) kot med posameznimi skupinami. Rezultati raziskave bodo prispevali k boljšemu razumevanju variabilnosti lastnosti lesa in optimalnejši izbiri in uporabi hrastovine.

VIRI

- Ayobi E., Kiaei M., Bakhshi R. 2011. Heartwood and Sapwood Properties of *Quercus castaneafolia* in the Iranian Forest. Middle-East Journal of Scientific Research, 8 3: 669-673
- Bačvarija Srnc
<http://www.bacvarijasrnc.hr/galerija-bacve-slo.html> (16.jun. 2016)
- Bauch J. 1980. Variation of wood structure due to the secondary changes. V: Natural variations of wood properties. Proceedings of IUFRO 5. Conference in Oxford:69-95
- Blanchette R.A. 1992. Anatomical responses of xylem to injury and invasion by fungi. V: Defence mechanisms of wood plants against fungi. Blanchette R.A. in Biggs A.R. (ur.). Berlin, Springer-Verlag: 76-95
- Bosshard H.H. 1968. On the formation of facultatively coloured heartwood in *Beilschmiedia tawa*. Wood science and technology, 2:1-12
- Brus R. 2004. Drevesne vrste na Slovenskem. Ljubljana, Mladinska knjiga: 399 str.
- Čufar K. 2006. Anatomija lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Odd. za lesarstvo: 185 str.
- Cutter B. E., Hunt K., Haywood J.D. 1998. Tree/wood quality in slash pine following long-term cattle grazing. Agroforestry Systems, 44, 2–3: 305–312
- Dallwitz M. J., Paine T. A., Zucher E. J. 2002. Intkey for Windows. 5.12Tend. CSIRO Division of Entomology, Canberra.
- Domzalec.si
<http://www.domzalec.si/v-domzalah-poteka-obnova-drugega-zelezniskega-tira>
(16.jun.2016)
- EN 13145. 2012: Railway applications – Track - Wood sleepers and bearers. European Committee for Standardization, Brussels
- EN 1534. 2000: Wood flooring – Determination of resistance to indentation – Test method. European Committee for Standardization, Brussels
- EN 335-1. 2006: Durability of wood and wood-based products – Definition of use classes – Part 1: General. European Committee for Standardization, Brussels

EN 350-2. 1994: Durability of wood and wood-based products – Natural durability of solid wood – Part 2: Guide to natural durability and treatability of selected wood species of importance in Europe. European Committee for Standardization, Brussels

Fink S. 1999. Pathological and regenerative plant anatomy. Berlin, Stuttgart, Gebrüder Borntraeger: 1095 str.

Forgotten New York

<http://forgotten-ny.com/2001/07/bridges-of-central-park-part-1/> (16.jun. 2016)

Gorišek Ž. 2009. Les: zgradba in lastnosti: njegova variabilnost in heterogenost. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 178 str.

Grabner M., Müller U., Gierlinger N., Wimmer R. 2005. Effects of heartwood extractives on mechanical properties of larch. IAWA Bull, 26, 2: 211–220

Grosser D., Teetz W. 1987. Einheimische Nutzholzer: (Loseblattsammlung): Vorkommen, Baum und Stammform, Holzbeschreibung, Eigenschaften, Verwendung. Bonn, Central Marketinggesellschaft der Deutschen Agrarwirtschaft und Arbeitsgemeinschaft Holz e.V.

Hillis W.E. 1987. Heartwood and Tree Exudates. Berlin, Heidelberg, New York, Springer: 272 str.

IAWA Committee. 1964. IAWA Multilingual glossary of terms used in wood anatomy. Winterthur : Verlaganstalt Buchdruckerei Konkordia: 186 str.

ISO 3131. 1975a: Wood – Determination of density for physical and mechanical tests. International Organization for Standardisation, Geneva.

ISO 3131. 1975b: Wood – Testing in compression perpendicular to grain. International Organization for Standardisation, Geneva.

ISO 3131. 1975c: Wood – Determination of Ultimate strength in Static Bending First Edition. International Organization for Standardisation, Geneva.

Kollman F.P., Cote W.A. 1986. Principles of Wood Science and Technology. I, Solid Wood. Springer-Verlag New York Inc.: 592 str.

Kraut B. 1981. Strojniški priročnik. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: 687 str.

Leban I. 2016. Les in lastnosti

http://www.cpi.si/files/cpi/userfiles/Lesarstvo_tapetnistvo/4-LES_LASTNOSTI.pdf

- Magel E.A., Hillinger W., Holl W., Ziegler H. 1997. Biochemistry and physiology of heartwood formation: role of serve substance. *Trees – Contribution to modern Tree Physiology* izd. H. Rennenerg, W. Eschrich, H. Zigler: 477–506
- Magel E.A., Hillinger W., Wagner T., Holl W. 2001. Oxydative pentose phosphate pathway and pyridine nucleotides in relation to heartwood formation in *Robinia pseudoacacia* L. *Phytochemistry* 57: 1061–1068
- Mlakar J. 1985. Dendrologija – drevesa in grmi Slovenije. Ljubljana, Zavod RS za šolstvo: 164 str.
- Pipa R. 1997. Anatomija in tehnologija lesa. Ljubljana, Lesarska založba: 136 str.
- Richter H.G., Dallwitz M.J. 2000. Commercial timbers: description, ilustration, identification, and information retrieval. In English, French, German, Portuguese, and Spanish. DELTA database. <http://delta-intkey.com>. Accessed 26. 6. 2012
- Stolarija Verdi
<http://www.stolarija-verdi.hr/Vrata/Ulazna.aspx> (16.jun.2016)
- Torelli N. 1972. Jedrovina in ojedritev. *Gozdarski vestnik*, 30: 239–247
- Torelli N. 1974. Biološki vidiki ojedritve s poudarkom na fakultativno obarvani jedrovini (rdečem srcu) pri bukvi (*Fagus sylvatica* L.). *Gozdarski vestnik*, 32: 253–281
- Torelli N. 1983. Estudio promocional de 43 especies forestales mexicanas. Jugoslovansko mehiški projekt. Technical Report.
- Torelli N. 1989. Daljinski transport vode v drevesu – vodni potencial. *Les*, 50, 6: 169-173
- Torelli N. 1989. Zgradba in lastnosti lesa (gradivo za interno uporabo). Ljubljana. Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 97 str.
- Torelli N. 2003. Ojedritev – vloga in proces. *Les*, 55: 368–379
- Torelli N. 2004. Senescenca in staranje v drevesih. V: XXII. gozdarski študijski dnevi. Ljubljana. Brus R. (ur.). Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 1–18
- Tsoumis G. T. 1991. Science and technology of wood: scructure, propertiec, utilization. New York, Van Nostrand Reinold: 494 str.

Wagenführ R. 1996. Holzatlas. Leipzig, Fachbuchverlag: 688 str.

VG Danas

<http://www.vgdanas.hr/Info/Clanak/12089/lada-duga-25-metara-plovit-ce-kupom.aspx>
(16.jun.2016)

Zupančič M., Krže L. 2008. Makroskopska identifikacija lesa: gradivo za vaje. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 27 str.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Maksu Mereli za vso strokovno pomoč, konstruktivne pripombe, koristne nasvete in vodenje tekom izdelave celotne diplomske naloge. Hvala tudi za potrpežljivost in zaupanje, predvsem v poletnem času tik pred zaključkom naloge.

Zahvaljujem se recenzentu doc. dr. Alešu Stražetu za skrben pregled in strokovne predloge izboljšav diplomske naloge.

Zahvaljujem se strokovnemu sodelavcu Luku Kržetu, dipl. inž., za pripravo kvalitetnih vzorcev in pomoč pri izvedbi meritev.

Hvala tudi ženi Vesni za potrpežljivost in moralno podporo.

Vsem skupaj iskrena hvala.

PRILOGE

Priloga 1: Skupni statistični kazalci meritev upogibne trdnosti beljave in jedrovine pri belih hrastih (B) in rdečih hrastih (R) (upogibna trdnost je podana v N/mm², n je število vzorcev)

	<i>N</i>	povpr.	st. odkl..	koef. var.	min.	maks.
B - beljava	36	86,5131	23,1476	26,7562 %	56,61	130,37
B - jedrovina	36	87,4325	17,14	19,6037 %	54,89	123,97
R - beljava	34	115,296	16,9014	14,6591 %	86,54	132,95
R - jedrovina	10	110,017	8,46431	7,69364 %	102,4	127,07
Skupaj	116	97,2609	22,7327	23,3729 %	54,89	132,95

Priloga 2: Skupni statistični kazalci meritev modula elastičnosti (MOE) beljave in jedrovine pri belih hrastih (B) in rdečih hrastih (R) (modul elastičnosti je podan v GPa, n je število vzorcev)

	<i>n</i>	povpr.	st. odkl..	koef. var.	min.	maks.
B - beljava	36	8,86111	2,35618	26,5901 %	6,0	14,0
B - jedrovina	36	9,08333	2,18272	24,03 %	6,0	14,0
R - beljava	34	12,4412	2,42701	19,5079 %	8,0	15,0
R - jedrovina	10	11,7	1,33749	11,4316 %	10,0	14,0
Skupaj	116	10,2241	2,75708	26,9664 %	6,0	15,0

Priloga 3: Skupni statistični kazalci meritev tlačne trdnosti beljave in jedrovine pri belih hrastih (B) in rdečih hrastih (R) (tlačna trdnost je podana v N/mm², n je število vzorcev)

	<i>n</i>	povpr.	st. odkl..	koef. var.	min.	maks.
B - beljava	36	41,6539	8,21397	19,7196 %	30,02	57,46
B - jedrovina	36	45,4275	6,42042	14,1333 %	31,81	59,71
R - beljava	34	54,8232	6,83698	12,471 %	41,8	66,1
R - jedrovina	10	51,677	4,15358	8,03759 %	47,44	58,93
Skupaj	116	47,5491	8,78963	18,4854 %	30,02	66,1

Priloga 4: Skupni statistični kazalci meritev trdote po Brinellu (HB) beljave in jedrovine pri belih hrastih: II – trdota merjena vzporedno s potekom vlaken, ⊥ - trdota merjena pravokotno na potek vlaken (trdota je podana v N/mm², n je število vzorcev)

HB		<i>n</i>	povpr.	st. odkl..	koef. var.	min.	maks.
II	sapwood	18	37,9389	7,10353	18,7236 %	26,4	48,5
	heartwood	18	42,9444	8,42302	19,6138 %	30,8	58,2
⊥	sapwood	18	17,75	4,6409	26,1459 %	10,2	29,6
	heartwood	18	20,5278	4,85796	23,6653 %	14,3	29,3

Priloga 5: Skupni statistični kazalci meritev gostote v popolnoma suhem stanju beljave in jedrovine pri belih hrastih (gostota je podana v kg/m³, *n* je število vzorcev)

	<i>n</i>	povpr.	st. odkl..	koef. var.	min.	maks.
B - beljava	36	634,093	127,756	20,1478 %	481,61	855,95
B - jedrovina	36	658,334	65,8304	9,99956 %	495,58	781,25
R - beljava	34	776,426	50,9339	6,56005 %	629,57	848,44
R - jedrovina	10	767,253	38,0385	4,95775 %	710,79	810,58
Skupaj	116	694,814	105,548	15,1908 %	481,61	855,95

Priloga 6: Tabela trdote beljave in jedrovine pri belem hrastu

			trdota po Brinellu	
			vzporedno z vlakni	pravokotno na vlakna
		rod	HB	HB _⊥
VZOREC	B/J	vrsta	N/mm ²	N/mm ²
A1B	B	beli	41,72	18,34
B1B	B	beli	40,29	19,05
C1B	B	beli	32,88	
C2B	B	beli		16,17
D1B	B	beli	39,15	16,74
E1B	B	beli	42,10	18,67
E3B	B	beli	42,50	
F1B	B	beli	36,55	13,94
G1B	B	beli	44,15	20,67
H1B	B	beli	26,84	
I1B	B	beli	35,97	16,41
J1B	B	beli	37,19	
J2B	B	beli		16,52
K1B	B	beli	27,78	10,96
L1B	B	beli	26,39	10,21
M1B	B	beli	28,78	12,27
N1B	B	beli	37,67	21,08
O1B	B	beli	48,52	24,49
P1B	B	beli	46,20	19,50
T1B	B	beli	48,23	29,56

			trdota po Brinellu	
			vzporedno z vlakni	pravokotno na vlakna
		rod	HB	HB _⊥
VZOREC	B/J	vrsta	N/mm ²	N/mm ²
A1J	J	beli	46,07	21,76
B1J	J	beli	51,34	22,28
C1J	J	beli	30,81	15,41
D1J	J	beli	42,16	19,49
E1J	J	beli	55,45	26,26
F1J	J	beli	39,84	15,69
G1J	J	beli	53,59	26,20
H1J	J	beli	36,63	17,73
I1J	J	beli	39,94	17,34
J1J	J	beli	40,97	20,33
K1J	J	beli	35,17	15,92
L1J	J	beli	35,89	17,24
M1J	J	beli	33,86	14,26
M2J	J	beli	31,24	14,26
N1J	J	beli	43,37	23,77
O1J	J	beli	50,53	27,09
P1J	J	beli	47,87	25,08
T1J	J	beli	58,19	29,26

Priloga 7: Skupna tabela meritev in preračunov:

			UPOGIBNA TRDNOST		TLAČNA TRDNOST	GOSTOTA vlažnega	GOSTOTA abs. suhega	
		rod	σ_b	MOE	σ_c	ρ_u	ρ_0	pov.šir.br.
VZOREC	B/J	vrsta	N/mm ²	GPa	N/mm ²	kg/m ³	kg/m ³	(mm)
I3B	B	beli	56,61	7	36,85	553,24	520,63	3,15
H2B	B	beli	59,39	6	30,02	527,29	493,52	0,95
C2B	B	beli	60,55	6	32,19	513,73	481,61	1,58
B1B	B	beli	63,11	8	30,93	581,36	547,10	1,68
J2B	B	beli	66,60	7	35,90	562,45	525,33	3,64
H1B	B	beli	67,71	7	32,76	551,27	519,00	1,32
D2B	B	beli	67,87	7	37,71	631,94	595,84	1,76
F1B	B	beli	68,56	7	36,48	650,64	549,80	1,33
J3B	B	beli	69,09	7	33,83	575,69	543,99	3,29
D4B	B	beli	70,95	7	38,95	694,84	655,79	1,71
C1B	B	beli	71,56	8	33,50	552,86	521,87	1,88
A1B	B	beli	71,72	7	36,81	551,90	523,30	3,27
J4B	B	beli	72,37	7	37,71	566,57	535,11	3,59
A2B	B	beli	73,41	7	39,01	576,35	543,99	3,22
I1B	B	beli	73,42	7	35,59	551,53	518,81	3,04
D1B	B	beli	73,58	8	41,15	624,41	591,50	1,98
I2B	B	beli	74,61	7	34,58	553,91	523,58	3,26
J1B	B	beli	74,98	7	37,39	550,11	522,56	3,09
B2B	B	beli	75,23	7	37,38	586,36	555,52	1,65
D3B	B	beli	78,37	9	40,86	613,28	576,37	1,71
E3B	B	beli	82,14	9	38,97	550,08	602,63	2,14
E2B	B	beli	82,99	9	39,74	671,58	637,61	2,44
P2B	B	beli	85,97	8	43,38	647,01	612,88	1,67
G1B	B	beli	88,56	9	42,73	698,68	663,73	2,02
J5B	B	beli	88,79	9	40,33	669,42	637,03	2,64
E1B	B	beli	93,86	10	38,68	650,64	616,20	2,35
P1B	B	beli	95,26	10	48,89	723,18	691,68	2,11
O2B	B	beli	116,85	11	51,37	874,08	840,86	5,99
O3B	B	beli	117,15	11	49,78	885,72	854,61	6,95
Z1B	B	beli	120,64	13	56,07	873,59	843,42	4,51
Z3B	B	beli	123,65	12	52,37	863,11	825,35	5,87
Z2B	B	beli	123,71	13	55,80	871,49	838,27	4,03
O1B	B	beli	123,87	12	56,46	886,06	855,95	4,94
T2B	B	beli	125,12	13	52,24	846,44	818,22	4,89
Z4B	B	beli	125,85	13	57,46	870,20	836,81	4,02
T1B	B	beli	130,37	14	55,67	833,76	806,89	4,68
V1B	B	rdeči	86,54	9	46,68	809,69	769,15	1,36
Ž4B	B	rdeči	86,73	8	44,21	746,28	711,15	1,26

			UPOGIBNA TRDNOST		TLAČNA TRDNOST	GOSTOTA vlažnega	GOSTOTA abs. suhega	
		rod	σ_b	MOE	σ_c	ρ_u	ρ_o	pov.šir.br.
VZOREC	B/J	vrsta	N/mm ²	GPa	N/mm ²	kg/m ³	kg/m ³	(mm)
X2B	B	rdeči	86,96	9	43,03	661,05	629,57	0,81
Ž3B	B	rdeči	89,10	9	46,72	773,91	736,33	1,70
Ž1B	B	rdeči	89,71	9	45,62	767,12	728,17	1,52
Ž2B	B	rdeči	90,46	8	46,60	785,79	748,83	1,73
Y1B	B	rdeči	91,20	10	46,29	750,74	713,28	1,41
X1B	B	rdeči	95,42	9	41,80	669,00	637,25	0,69
Y3B	B	rdeči	98,99	10	51,35	770,48	730,39	1,64
Y2B	B	rdeči	99,74	10	49,04	774,49	737,80	1,45
V2B	B	rdeči	109,59	10	52,27	841,96	800,21	1,87
R4B	B	rdeči	113,62	12	61,03	839,33	807,63	2,19
XY2B	B	rdeči	114,61	14	58,08	831,84	795,89	1,83
R5B	B	rdeči	115,87	13	59,17	854,47	819,06	2,17
U1B	B	rdeči	119,07	13	55,78	793,26	763,48	1,27
R6B	B	rdeči	120,16	14	66,10	870,61	833,41	1,97
U3B	B	rdeči	120,26	13	56,53	830,35	792,69	1,37
Q1B	B	rdeči	121,68	14	56,05	879,89	842,96	2,71
S1B	B	rdeči	122,39	15	63,30	850,79	817,62	1,69
XY1B	B	rdeči	123,39	15	59,90	843,18	809,75	1,79
R1B	B	rdeči	124,62	13	56,88	786,39	753,50	1,67
S2B	B	rdeči	124,86	15	61,19	854,45	827,48	1,56
Š3B	B	rdeči	125,81	14	58,95	828,84	791,59	1,47
R3B	B	rdeči	128,70	14	64,00	884,63	848,44	2,23
XY5B	B	rdeči	130,41	15	57,54	827,90	798,04	1,59
Š2B	B	rdeči	130,91	15	60,52	822,23	789,39	1,45
XY3B	B	rdeči	131,98	14	52,24	836,84	800,37	1,67
XY4B	B	rdeči	132,11	15	56,44	851,81	814,13	1,68
Š4B	B	rdeči	132,13	14	59,29	829,59	793,62	1,64
XY6B	B	rdeči	132,17	14	47,40	819,76	787,91	1,48
Š5B	B	rdeči	132,36	15	59,31	825,15	790,18	1,56
Š1B	B	rdeči	132,70	14	61,80	826,77	793,66	1,60
R2B	B	rdeči	132,86	13	63,46	846,34	812,62	2,03
U2B	B	rdeči	132,95	14	55,42	811,42	772,93	1,34
C2J	J	beli	54,89	6	31,81	534,91	495,58	1,69
I2J	J	beli	60,94	6	38,32	660,03	612,54	2,80
M2J	J	beli	68,71	7	38,26	622,86	584,61	1,84
M1J	J	beli	68,84	7	37,20	595,94	556,04	1,64
F1J	J	beli	69,51	7	36,41	603,27	565,45	1,30
I1J	J	beli	71,87	7	38,89	696,64	645,14	3,01
A1J	J	beli	72,30	7	39,68	658,94	611,60	2,75
J1J	J	beli	72,97	7	39,61	682,28	635,01	2,51

			UPOGIBNA TRDNOST		TLAČNA TRDNOST	GOSTOTA vlažnega	GOSTOTA abs. suhega	
		rod	σ_b	MOE	σ_c	ρ_u	ρ_o	pov.šir.br.
VZOREC	B/J	vrsta	N/mm ²	GPa	N/mm ²	kg/m ³	kg/m ³	(mm)
A2J	J	beli	75,27	7	40,88	643,28	597,08	2,31
I3J	J	beli	76,45	7	41,07	685,94	635,67	3,02
D2J	J	beli	79,07	9	45,40	727,38	683,79	1,89
D5J	J	beli	80,21	9	46,05	732,32	684,81	1,84
D3J	J	beli	80,29	8	46,41	731,96	688,89	1,69
C1J	J	beli	80,44	8	43,73	626,99	596,88	2,48
B1J	J	beli	81,21	9	41,68	692,89	651,19	1,43
J4J	J	beli	81,50	8	44,22	722,03	669,69	3,23
B2J	J	beli	82,98	8	42,12	628,47	591,93	1,58
J2J	J	beli	84,82	8	39,85	685,53	636,81	3,72
J3J	J	beli	85,37	7	41,99	666,81	618,54	2,23
J5J	J	beli	87,08	8	43,82	686,19	641,88	3,42
H1J	J	beli	87,18	11	47,07	711,42	666,69	1,99
D4J	J	beli	88,92	10	53,85	784,36	746,14	2,75
H2J	J	beli	89,30	9	45,88	689,09	649,34	1,88
L1J	J	beli	89,87	11	47,48	637,83	602,80	1,73
F3J	J	beli	90,86	10	49,09	697,18	660,27	2,69
F2J	J	beli	91,37	10	47,64	698,55	658,65	2,65
D1J	J	beli	92,15	9	47,69	734,05	691,08	2,05
F4J	J	beli	92,35	10	46,16	686,74	647,78	3,02
D6J	J	beli	96,88	10	51,98	785,37	742,42	2,25
G3J	J	beli	107,54	11	52,81	775,79	729,68	1,43
G2J	J	beli	110,36	11	51,97	770,29	722,56	2,15
G1J	J	beli	114,08	11	56,85	802,55	755,19	2,03
E4J	J	beli	116,63	13	49,66	760,09	719,41	1,75
E2J	J	beli	118,13	14	54,78	789,41	748,05	2,18
E1J	J	beli	123,26	14	55,37	821,80	775,57	1,98
E3J	J	beli	123,97	13	59,71	819,48	781,25	2,67
Y3J	J	rdeči	102,40	12	53,02	820,87	781,90	3,09
X1J	J	rdeči	102,64	12	49,23	750,45	719,77	0,74
V2J	J	rdeči	103,02	10	47,44	818,59	779,55	4,20
X2J	J	rdeči	103,67	10	47,78	744,42	710,79	0,94
V1J	J	rdeči	106,93	10	50,00	847,32	804,27	3,24
X3J	J	rdeči	109,18	12	52,10	752,67	720,36	0,88
Y1J	J	rdeči	110,08	12	51,49	796,82	759,57	2,29
Y4J	J	rdeči	113,89	12	48,25	816,40	778,80	2,93
S2J	J	rdeči	121,29	13	58,53	840,66	806,94	2,00
S1J	J	rdeči	127,07	14	58,93	844,23	2,24	2,24

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Rok KEŠE

**PRIMERJAVA IZBRANIH LASTNOSTI LESA
BELJAVE IN JEDROVINE PRI HRASTU**

DIPLOMSKO DELO

Visokošolski strokovni študij

Ljubljana, 2016