



SPREMLJANJE KAKOVOSTI IN VREDNOSTI HRASTOVE HLODOVINE S KONVENCIONALNIMI, DENDROKRONOLOŠKIMI IN NEDESTRUKTIVNIMI METODAMI

MONITORING THE QUALITY AND VALUE OF EUROPEAN OAK LOGS USING CONVENTIONAL, DENDROCHRONOLOGICAL AND NON-DESTRUCTIVE METHODS

Aleš Straže^{1*}, Klemen Novak¹, Jure Žigon¹

UDK članka: 630*85+630*812:176.1 (*Quercus* L.)
Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Prispelo / Received: 31.5.2023
Sprejeto / Accepted: 23.6.2023

Izvleček / Abstract

Izvleček: V raziskavo smo vključili hrastovo hlodovino (*Quercus robur*, *Quercus petraea*) s 15. dražbe vrednejših sortimentov okroglega lesa v Slovenj Gradcu v letu 2021. Naključno smo izbrali 78 od 1318 licitiranih hlodov in jih skladno z veljavnim Pravilnikom o merjenju (2017) vizualno razvrstili po kakovosti (A, B, C). Vzporedno smo dendrokronološko analizirali priraščanje lesa ter z metodo frekvenčnega odziva pri vzdolžnem vzbujanju še akustične lastnosti hlodovine. Najkvalitetnejša hlodovina je bila večjih premerov, z več in povprečno širšimi letniki. Potrdili smo povezavo med vizualno določeno kakovostjo in doseženo ceno hlodovine. Hitrost vzdolžnega nihanja (v) in relativna učinkovitost akustične pretvorbe (RACE) sta bili s kakovostjo in ceno hlodovine pozitivno povezani. Frekvenčni spektri pri hlodovini nižje kakovosti odstopajo od teoretičnih. Raziskava je potrdila možnost uporabe nedestruktivnih akustičnih metod za oceno kakovosti hrastove hlodovine.

Ključne besede: les, hrast, razvrščanje hlodovine, kakovost, cena, nedestruktivno testiranje

Abstract: European oak logs (*Quercus robur*, *Quercus petraea*) from the 15th auction of valuable logs in Slovenj Gradec in 2021 were included in the study. Of the 1,318 auctioned logs, 78 were randomly selected and visually graded into quality classes (A, B, C) according to the National Grading Rules (2017). In parallel, we analysed the wood growth dendrochronologically and the acoustic properties of the logs using the longitudinal vibration resonance method. The logs with the best quality had a larger diameter and, on average, wider annual rings. We confirmed the correlation between the visually determined quality and the obtained price of the logs. Longitudinal vibration velocity (v) and relative acoustic conversion efficiency (RACE) were positively correlated with log quality and price. The frequency spectra of the low-quality logs differed from the theoretical spectra. This study confirms the feasibility of non-destructive acoustic methods for evaluating oak log quality.

Keywords: wood, European oak, logs grading, quality, price, non-destructive evaluation.

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Hrasta dob (*Quercus robur*) in graden (*Quercus petraea*) sta pomembni evropski drevesni vrsti in široko uporabna lesova za različne izdelke, kot so furnir, pohištvo, notranje in zunanje konstrukcije ter številne druge (Straže et al., 2018, 2023). Kakovost hrastove hlodovine, ki se tradicionalno določa vizualno na osnovi značilnosti in dimenzij sortimentov,

je odvisna zlasti od prisotnosti nekaterih anomalij, kot so velikost in število grč, ekscentričnost in ovalnost prereza, koničnost, čelne razpoke in kolesivost ter druge (SIST EN 1316-1:2010; Pravilnik ..., 2017). Nekatero napake, kot denimo velikost in delež grč na prečnem prerezu sortimenta, pomembno vplivajo tudi na mehanske in akustične lastnosti lesa. Prepoznavanje strukturnih anomalij je osnova za ocenjevanje kakovosti hlodovine in njeno razvršča-

¹ Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, Slovenija

* e-mail: ales.straze@bf.uni-lj.si

nje, običajno pa se izvaja na osnovi njenih vidnih zunanjih značilnosti (Marenče et al., 2020; Torkaman et al., 2018). Ena glavnih napak pri razvrščanju okroglega lesa so grče, ki jih delimo na zdrave in mrtve grče, pri čemer so zdrave grče v nasprotju z nezdravimi zraščene z okoliškim lesnim tkivom (Karaszewski et al., 2013; SIST EN 1316-1, 2010).

Strukturne anomalije je v hlodih in debelejših žagarskih sortimentih mogoče odkrivati ter določati s porušnimi in tudi z neporušnimi metodami, za prakso pa so aktualne le slednje. Vizualno ocenjevanje, kot ena tradicionalnih nedestruktivnih metod, je poceni, vendar pa zaradi časovne zahtevnosti dejansko na voljo le v manjših proizvodnih zmogljivostih. Tovrstno ocenjevanje je lahko navkljub definiranim pravilom in standardom tudi subjektivno in odvisno od človeškega faktorja (Račko, 2013). Sodobne rentgenske tehnologije omogočajo natančne meritve hlodovine in imajo visoko zmogljivost odkrivanja notranjih strukturnih anomalij, vendar so drage in zato manj primerne za majhne in srednje proizvodne obrate (Longuetaud et al., 2012). Zlasti pri žaganem lesu je aktualno razvrščanje lesa na osnovi značilnosti, določenih s strojnim vidom (Sioma, 2015). Akustične metode se uporabljajo predvsem pri rabi lesa v gradbene namene, večinoma pri iglavcih. Študije potrjujejo pozitivno povezanost hitrosti zvoka in dolžine ter usmerjenosti lesnih vlaken kot tudi gostote (R. Ross, 2015; Wang et al., 2007). Prisotnost anomalij upočasnjuje hitrost zvoka oz. mehanskih nihanj v lesu (Carter et al., 2013; Krajnc et al., 2019).

Da bi optimizirali uporabo hrastove hlodovine in jo ustrezno kakovostno uporabili za ustrezen namen, smo v tej študiji proučili možnost spremljanja kakovosti hlodovine z akustičnimi nedestruktivnimi metodami. Preverjali smo, ali je konvencionalno vizualno razvrščanje hlodovine povezano z njenimi akustičnimi lastnostmi, kot tudi z doseženo vrednostjo sortimentov na trgu.

2 MATERIAL IN METODE

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 VZORČENJE IN VIZUALNO RAZVRŠČANJE HLODOVINE PO KAKOVOSTNIH RAZREDIH

2.1 SAMPLING AND VISUAL GRADING OF LOGS

V raziskavi smo proučili licitirano hrastovo hlodovino (*Q. robur* in *Q. petraea*) s 15. dražbe vrednej-

ših sortimentov okroglega lesa leta 2021. To dražbo vrednejših sortimentov okroglega lesa od leta 2007 vsako leto organizira Združenje lastnikov gozdov Slovenije ob podpori Zavoda za gozdove Slovenije in Društva lastnikov gozdov Mislinjske doline.

Vizualno razvrščanje je bilo izvedeno na 1318 licitiranih hrastovih hlodih, ki so jih organizatorji licitacije za interne namene razvrstili v tri kakovostne razrede. Vzorčeno hlodovino smo razvrstili skladno z veljavnim Pravilnikom o merjenju in razvrščanju gozdnih lesnih sortimentov iz gozdov v lasti Republike Slovenije (Pravilnik ..., 2017). V 1. kakovostni razred (A) smo uvrstili vso furnirsko hrastovo hlodovino, tako prve kakovosti (A_1) kot tudi druge furnirske kakovosti (A_2). Gre za hlodovino izjemne kakovosti, kjer so hlodi velikega premera (> 40 cm), sveži, polnolesni, pravilnega okroglega preseka in z minimalnimi napakami, kot so koničnost (< 3 %), krivost (< 3 % dolžine), ovalnost (< 20 %) in žlebatost (< 3 % premera) (slika 1 A). V 2. kakovostni razred (B) smo uvrstili žagarsko hlodovino najboljše kakovosti (slika 1 B), z dovoljenimi napakami, kot so npr. zdrave grče in slepice (< 20 mm, 1 na tekoči meter), koničnost (< 4 %), krivost (< 5 % dolžine), ovalnost (brez omejitev) in žlebatost (< 5 % premera). V 3. kakovostni razred (C) pa je bila uvrščena žagarska hlodovina srednje kakovosti (slika 1 C), kjer je dovoljen še večji obseg in količina napak (zdrave grče in slepice (< 40 mm, 1 na tekoči meter), dvojno srce do 25 % čela, koničnost (< 6 %), krivost (< 5 % dolžine), ovalnost (brez omejitev) in žlebatost (< 10 % premera)).

2.2 DOLOČANJE AKUSTIČNIH LASTNOSTI HLODOVINE

2.2 DETERMINATION OF ACOUSTIC PROPERTIES OF LOGS

Akustične lastnosti hlodovine smo na 78 ključno izbranih hlodih, enakomerno porazdeljenih v kakovostnih razredih, določali z metodo frekvenčnega odziva pri impulznem vzdolžnem vzbujanju. Meritve smo izvajali v svežem stanju ($u > u_{TNCs}$; u_{TNCs} – vlažnost nasičenja celičnih sten), pri čemer je bila hlodovina postavljena na lesene podpore. Posamezen hloj smo na čelu, na mestu z večjim premerom, impulzno vzbudili s kladivom z maso 500 g. Nihanje čela smo zabeležili z enoosnim pospeškometerom (PCB-086C01; PCB Piezotronics Inc., ZDA) (slika 2). Signal smo zajeli z merilnim



Slika 1. Vizualno razvrščanje hrastove hlodovine v kakovostne razrede (Pravilnik ..., 2017): A – furnirska hlodovina izjemne kakovosti, B – žagarska hlodovina 1. kakovosti, C – žagarska hlodovina 2. kakovosti.

Figure 1. Visually graded oak logs: A – veneer, extra log quality, B – 1st class sawnwood quality, C – 2nd class sawnwood quality.

modulom DAQ NI-9234 (National Instruments Inc., ZDA) v 24-bitni ločljivosti s frekvenco vzorčenja 51,2 kHz. V frekvenčnem odzivu smo v prvih treh nihajnih načinih ($n = 1, 2, 3$) določili vzdolžne frekvence nihanja (f_1, f_2, f_3), in jih uporabili za določitev hitrosti vzdolžnega valovanja v posameznem hlodu (v_n) (enačba 1; slika 2). Določanje hitrosti je temeljilo na osnovni valovni enačbi, ki se uporablja za idealne elastične materiale vitkih oblik ($L/d > 5$; L – dolžina, d – premer, prečna dimenzija) (Bucur, 2006; Gornik Bučar & Bučar, 2009; Gornik Bučar & Bučar, 2011; Meyers, 1994). Kvadrat hitrosti vzdolžnega nihanja je pri tem premo sorazmeren specifičnemu modulu elastičnosti (E/ρ ; E – modul elastičnosti, ρ – gostota) preizkušane snovi.

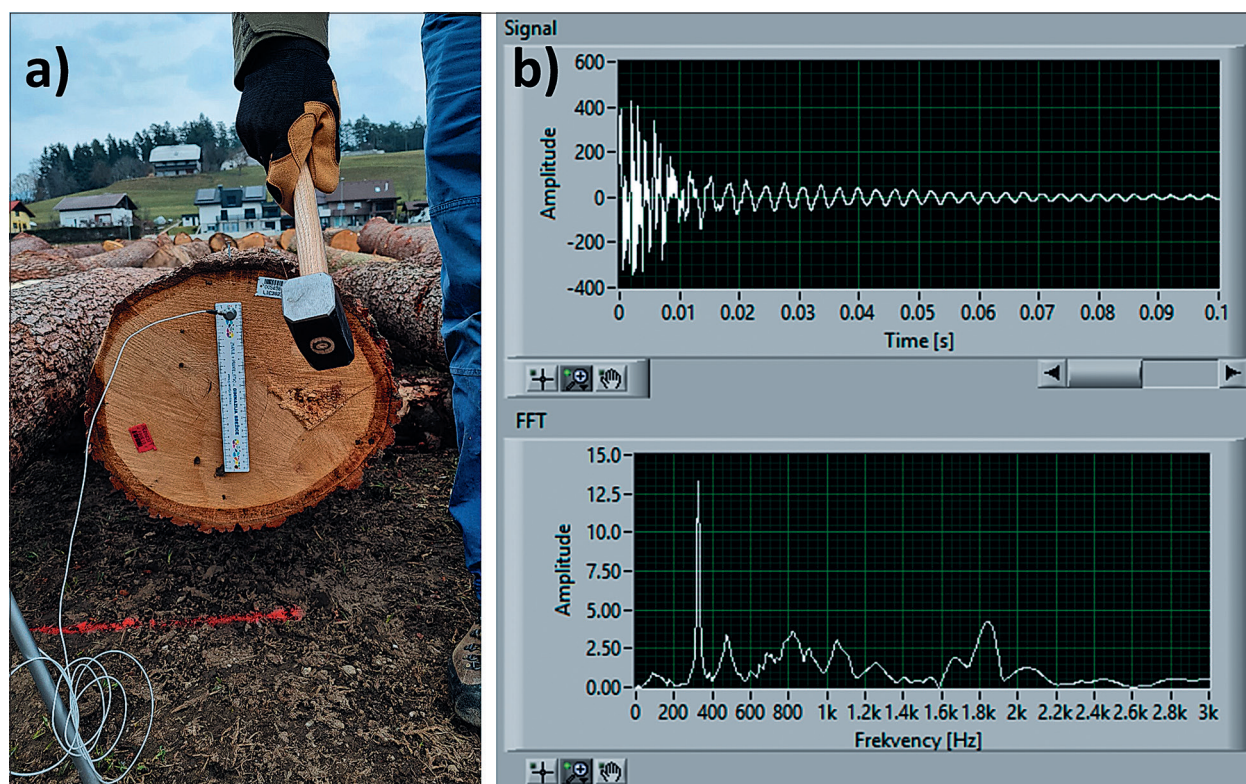
$$v_n = \frac{2f_n L}{n} \cong \sqrt{\frac{E_n}{\rho}} \quad (n = 1, 2, 3) \quad (1)$$

V eksponentno pojemajočem časovnem signalu vzdolžnega nihanja smo s pomočjo 'bandpass' filtriranja v bližini lastnih frekvenc (f_1, f_2, f_3) določili časovni pojemek (α), od tod pa koeficient dušenja

signala v posameznem nihajnem načinu ($\tan \delta_n$; $n = 1, 2, 3$; enačba 2). Z razmerjem hitrosti in dušenja nihanja smo v posameznem nihajnem načinu določili relativno učinkovitost akustične pretvorbe (RACE) (enačba 3). Kazalnik RACE ponazarja količino pretvorjene mehanske energije v zvočno, oz. v nihanje. Ta veličina predstavlja sposobnost nihanja toge snovi, neodvisno od njene gostote, in ponazarja strukturno akustičnost testiranega materiala (Obataya et al., 2000; Straže et al., 2015) (enačba 3). Najvišje vrednosti kazalnika RACE dosegajo resonančni lesovi, ki se prvenstveno uporabljajo za izdelavo lesenih glasbenih instrumentov.

$$\tan \delta_n = \frac{\alpha}{\pi \cdot f_L} \quad (2)$$

$$RACE_n = \frac{v_n}{\tan \delta_n} = \frac{\sqrt{\frac{E_n}{\rho}}}{\tan \delta_n} \quad (3)$$



Slika 2. Določanje hitrosti in dušenja mehanskega nihanja z metodo frekvenčnega odziva pri vzdolžnem vzburjanju hrastove hlodovine: a) vzdolžno impulzno vzburjanje, b) zajem časovnega signala nihanja (zgoraj) in hitra Fourierjeva transformacija (FFT) (spodaj).

Figure 2. Determination of velocity and damping of vibrations in oak logs using the longitudinal vibration resonance method: a) longitudinal impulse excitation, b) vibration detection in the time domain (top) and Fast Fourier Transformation (FFT) (bottom).

2.3 DENDROKRONOLOŠKE MERITVE IN ANALIZA 2.3 DENDROCHRONOLOGICAL MEASUREMENTS AND ANALYSIS

Dendrokronološke meritve smo opravili pri polovici akustično izmerjenih hlodov ($n = 36$) na prereзу hloda, ki je ustrezal višini stoječega drevesa od 4 do 4,5 m nad tlemi. Ker običajno destruktivno vzorčenje z vrtnjem ni bilo mogoče, smo na čelu hlodov v smeri polmera z ročnim akumulatorskim rezkarjem (Makita DRT 50ZX2, Japonska) pripravili gladko površino in jo nato fotografirali (Canon EOS70D, Japonska) (slika 3). Fotografije smo nato obdelali v programu Adobe Photoshop Elements 2020 in jih pripravili za dendrokronološko analizo.

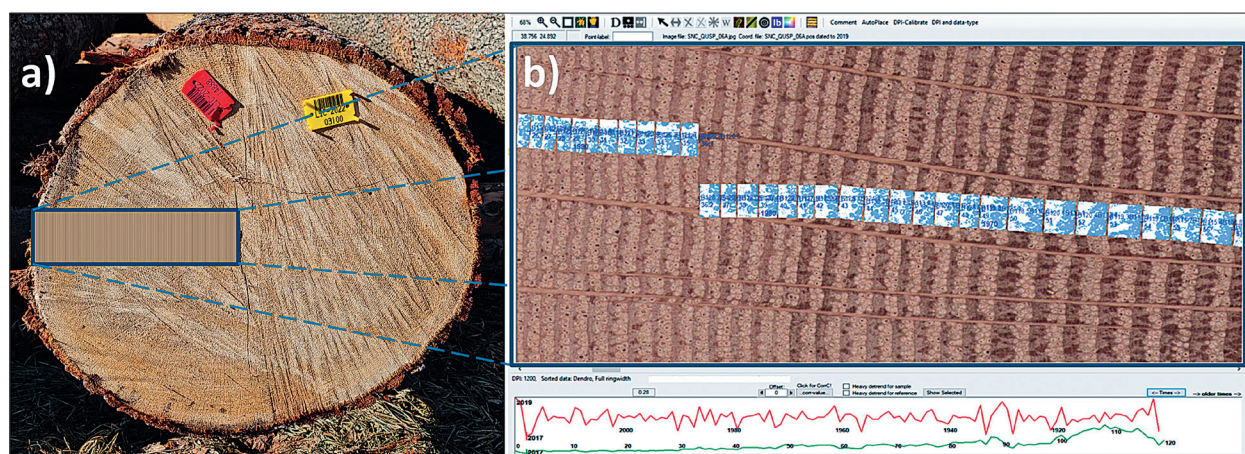
Za merjenje širine branik ter ranega in kasnega lesa smo uporabili program Coorecorder 9.6 (Cybis Elektronik & Data AB, Nemčija) (slika 3). V programu CDendro smo izmerjene serije branik preverili in pretvorili v format *fh ali *rwl. Sinhroniziranje in

datiranje smo izvedli s programsko opremo TSAP Win[®] (Rinntech, Heidelberg, Nemčija).

2.4 PRIDOBIVANJE IN ANALIZA PODATKOV O CENI HLODOVINE

2.4 OBTAINING AND ANALYSING LOG PRICE DATA

Hlodovina je bila med dražbo na ogled potencialnim kupcem, s podatki o dolžini (L), srednjem premeru (D) in prostornini (V). Na dražbi so si potencialni kupci ogledali sortimente in izvajalcu dražbe lesa predložili zaprte ponudbe. Po koncu dražbe je bilo odpiranje ponudb, hlodovino pa so prodali najboljšemu ponudniku. Dosežene cene za posamične hlode, podane na sortiment (EUR/kos) ter na enoto prostornine (EUR/m³), so bile na koncu objavljene v katalogu licitacije.



Slika 3. Princip rezkanja čelne površine hloda (a) in zajem ter obdelava slike z letnimi prirastki v programu CooRecorder 9.6 (Cybis Elektronik & Data AB, Nemčija) (b).

Figure 3. The principle of creating a groove in the cross-section of the log (a), and the image acquisition and analysis of tree rings in CooRecorder 9.6 software (Cybis Elektronik & Data AB, Germany) (b).

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 GEOMETRIJSKE IN PRIRASTNE ZNAČILNOSTI HLODOVINE

3.1 GEOMETRIC AND GROWTH CHARACTERISTICS OF LOGS

Dobra tretjina sortimentov na dražbi ($n_A = 481$, $n_{A1} = 460$, $n_{A2} = 21$) je spadala med furnirsko hlodovino (A), dobro polovico je predstavljala najboljša žagarska hlodovina (B, $n_B = 705$), desetina hlodovine ($n_C = 132$) pa je bila srednje žagarske kakovosti (C). Pri premeru in starosti hlodovine je glede na kakovostni razred prihajalo do značilnih razlik (t-test, $p <$

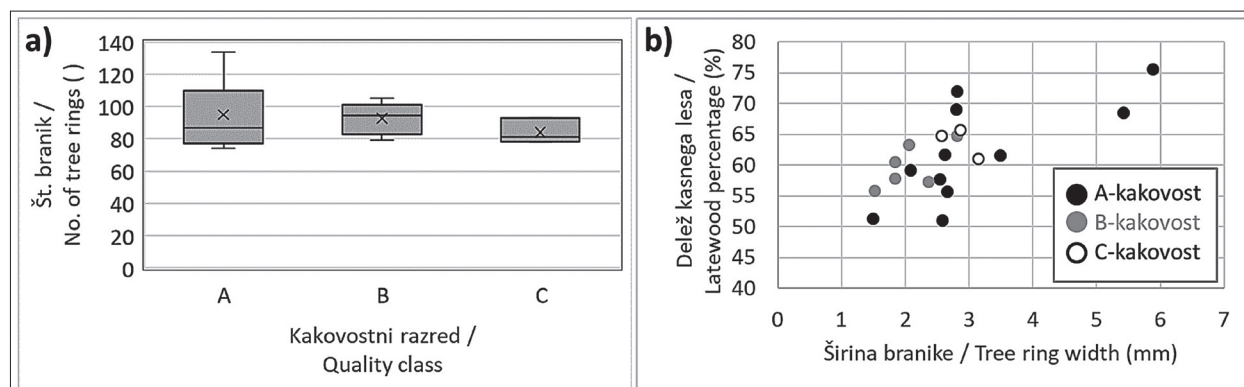
0,05). V 1. kakovostnem razredu (A) je bil povprečni premer (D) hlodovine 63 cm (St.dev. = 7,0; St.dev. – Standardni odklon), v 2. kakovostnem razredu (B) je znašal 53 cm (St.dev. = 13,1), najmanjši pa je bil v 3. kakovostnem razredu (C; D = 42 cm; St.dev. = 14,4) (preglednica 1). Povprečna kambijeva starost hlodovine (število branik na nivoju 4–4,5 m nad tlemi) je bila v 1. in 2. kakovostnem razredu nad 90 let, v 3. pa nekoliko nižja (84 let) (slika 4).

Največje letne prirastke, povprečno nad 3 mm, smo zasledili pri furnirski hlodovini (A), pod to mejo pa je bila povprečna širina branik pri žagarski hlodovini (B, C). Izkazalo se je, da je variabilnost širine

Preglednica 1. Povprečne geometrijske značilnosti hrastove hlodovine po kakovostnih razredih (L – dolžina, D – premer; $n = 1318$ hlodov) ter prirastne značilnosti izbranih hlodov (n = 36); standardni odklon je naveden v oklepajih.

Table 1. Mean properties of auctioned oak logs by quality classes (L – length, D – diameter; $n = 1318$ logs) and tree ring characteristics for 36 logs; standard deviation is given in parentheses.

Kakovostni razred / Quality class	L (m)	D (cm)	Število branik / No. of tree rings	Širina branike / Tree ring width (mm)	Delež kasnega lesa / Latewood proportion (%)
A	424 (92)	63 (7,0)	95 (19)	3,12 (1,34)	62,1 (8,24)
B	406 (70)	53 (13,1)	93 (10)	2,67 (0,46)	59,9 (3,57)
C	470 (77)	42 (14,4)	84 (8)	2,86 (0,29)	63,9 (2,47)



Slika 4. Starost hrastove hlodovine v posameznem kakovostnem razredu (a) in povezava deleža kasnega lesa s širino branik (b).

Figure 4. Cambial age of oak logs in each grade (a), and correlation of the proportion of latewood with the tree ring width (b).

branik pri furnirski hlodovini največja, kjer smo zasledili povprečne prirastke od 1,5 pa vse do 5,9 mm. Potrdili smo značilnost venčasto porozne hrastovine, da se s širino branik povečuje tudi delež kasnega lesa (slika 4) (Zhang et al., 1993). Pri najširših povprečnih letnih prirastkih je delež kasnega lesa znašal vse do 76 %, povprečno 62 %, pri najožjih pa le 51 %.

Številni avtorji ugotavljajo pozitivno povezavo širine branik z gostoto hrastovega lesa (Čufar, 2006; Gorišek, 2009; Zhang et al., 1993). Nekatere raziskave navajajo tudi večje prirastke hrastovine pri nižji starosti kambija (< 30 let), kot posledica juve-

nilnosti. Za hrastovino je tudi značilno, da je širina ranega lesa pogosto bolj ali manj konstantna, neodvisna od kambijeve starosti, in odvisna od količine padavin v rasti sezoni (Zhang et al., 1993).

3.2 POVEZAVA KAKOVOSTI, VREDNOSTI IN AKUSTIČNIH LASTNOSTI HLODOVINE

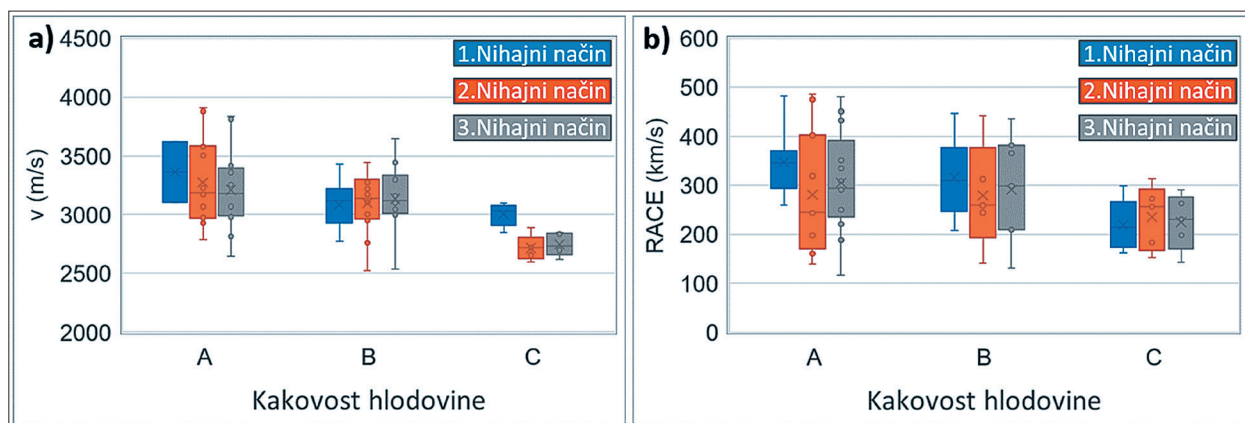
3.2 LINKING THE QUALITY, VALUE AND ACOUSTIC PROPERTIES OF LOGS

Vizualno ocenjena kakovost hrastove hlodovine je bila tesno povezana z njeno vrednostjo, merjeno z doseženo ceno na prostorninsko enoto. Najvišjo vrednost na prostorninsko enoto je dose-

Preglednica 2. Povprečna cena hrastove hlodovine s 15. dražbe vrednejših sortimentov v letu 2021 glede na kakovostni razred (n = 1318 hlodov) ter izmerjene akustične lastnosti (v – povprečna hitrost vzdolžnega nihanja, $\tan\delta$ – povprečni koeficient dušenja, RACE – povprečna relativna učinkovitost akustične pretvorbe za 78 izbranih hlodov); standardni odklon je naveden v oklepaju.

Table 2. Mean price gained of auctioned oak logs by quality classes (n = 1,318 logs, 15th auction of valuable logs in Slovenj Gradec in 2021) and measured acoustic properties (v – mean stress wave velocity, $\tan\delta$ – mean vibration damping coefficient, RACE – mean relative acoustic conversion efficiency for 78 selected logs); standard deviation is given in parentheses.

Kakovostni razred / Quality class	Cena / Price (EUR/m ³)	v (m/s)	$\tan\delta \cdot 10^3$ ()	RACE [km/s]
A	506 (104)	3115 (228)	26,8 (11,8)	343 (85)
B	421 (110)	3106 (271)	27,3 (18,2)	316 (78)
C	131 (121)	3065 (298)	72,5 (20,1)	214 (86)



Slika 5. Hitrost vzdolžnega nihanja (a) in relativna učinkovitost akustične pretvorbe RACE (b) v odvisnosti od kakovosti hrastove hlodovine v prvem, drugem in tretjem nihajnem načinu (A – izjemna furnirska hlodovina, B – odlična žagarska hlodovina, C – žagarska hlodovina srednje kakovosti).

Figure 5. Stress wave velocity (a) and relative acoustic conversion efficiency (RACE) of oak logs (b) in 1st, 2nd and 3rd vibration modes (blue, orange, gray); log quality: A–exceptional, veneer quality, B–excellent, C–medium).

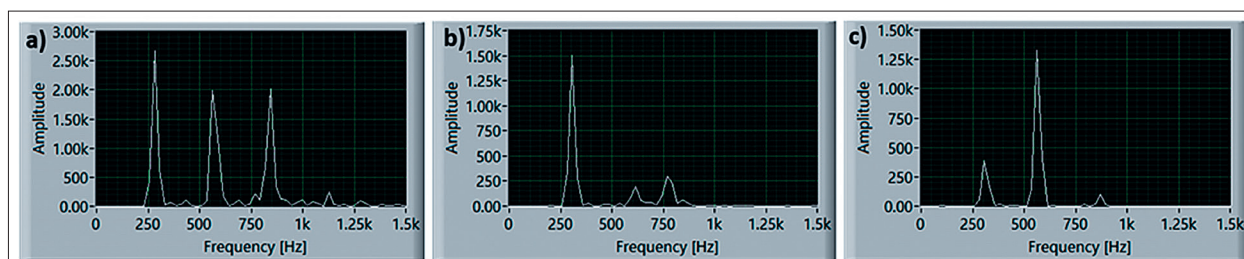
la furnirska hlodovina (A, 506 EUR/m³). Povprečna cena najboljše žagarske hlodovine (B) je bila nekoliko nižja (421 EUR/m³). Dosežena cena žagarske hlodovine srednje kakovosti (C) pa je bila bistveno nižja, in je znašala 131 EUR/m³ (preglednica 2). Zdi se, da je poleg kakovosti eden od kriterijev za doseganje cene tudi premer hlodovine (preglednica 1), in z njim povezan večji materialni izkoristek. Slednji je boljši pri hlodovini večjega premera tako pri predelavi v furnir, bodisi rezan, plemenit ali luščen, kot tudi pri predelavi hlodovine v žagan les (Dumitrascu et al., 2013). Znano je, da dodatno negativno na izkoristek žagarske hlodovine pri predelavi v žagarske sortimente vplivajo prisotne strukturne anomalije (Marenče et al., 2016).

Izmerjena hitrost vzdolžnega valovanja je bila največja pri furnirski hlodovini (A) in najmanjša pri žagarski hlodovini srednje kakovosti (C). Padanje hitrosti preleta zvoka s kakovostjo hlodovine ugotavljajo že nekatere predhodne študije na hrastovi, smrekovi in bukovi hlodovini (Kurowska et al., 2016; Straže et al., 2015, 2020). Pri tem izpostavljajo delež grč na prečnem prerezu skupaj z usmerjenostjo in dolžino vlaken, odklonom od aksialnega poteka in prisotnost reakcijskega lesa kot najvplivnejše dejavnike na nižanje hitrosti mehanskega valovanja v stoječih drevesih in hlodovini (Legg & Bradley, 2016; Rais et al., 2014; Tsehaye et al., 2000). Študije poročajo tudi o negativnem vplivu nepravilne

geometrijske oblike hlodov, kot so nepravilni prečni prerezi, ovalnost, zavrtost, koničnost in druge rastne napake. Sicer je dobro znan negativni vpliv lesne vlažnosti na hitrost mehanskega nihanja v lesu, ki pa v tej raziskavi ni relevanten, saj je bila hlodovina proučevana v svežem stanju, nad vlažnostjo nasičenja celičnih sten, kjer je hitrost konstantna (Barrett & Hong, 2009).

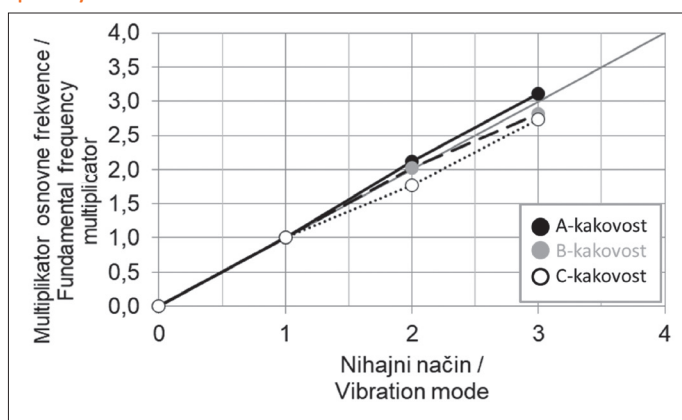
Pri analizi frekvenčnega odziva smo potrdili padanje hitrosti vzdolžnega mehanskega nihanja z zmanjševanjem kakovosti hrastove hlodovine (A → C) tudi v višjih nihajnih načinih. Najnižje vrednosti smo dobili pri hlodih najnižjega kakovostnega razreda (C) (slika 5). Enak trend smo potrdili tudi pri relativni učinkovitosti akustične pretvorbe RACE, saj se je tudi dušenje vibracij znatno povečalo pri hlodovini nižje kakovosti (C) (preglednica 2; slika 5). Rezultati kažejo, da lahko s podrobnejšo akustično analizo, t. j. z določanjem kazalnika RACE, uspešno ločimo hlodovino najslabše kakovosti (C) od najboljše furnirske (A) in žagarske hlodovine (B).

Pri vzdolžnem nihanju popolnih izotropnih elastičnih vitkih preizkušancev so frekvence višjih nihajnih načinov vselej večkratniki osnovne frekvence (Bucur, 2006). Takšen teoretični frekvenčni odziv je bil potrjen le pri furnirski hrastovi hlodovini (A). To nakazuje, da v tej hlodovini ni prisotnih strukturnih anomalij v obsegu, ki bi vplivale na čas preleta in način iznihanja vzbujenih vibracij, kot posledici



Slika 6. Frekvenčni spektri z resonančnimi frekvencami v 1., 2. in 3. vzdolžnem nihajnem načinu: a) A – furnirska hlodovina, b) B – odlična žagarska hlodovina, c) C – žagarska hlodovina srednje kakovosti.

Figure 6. Frequency spectra with resonance frequencies of oak logs in 1st, 2nd and 3rd longitudinal vibration modes: a) A–exceptional, veneer quality, b) B–excellent sawn timber quality, c) C–medium sawn timber quality.



Slika 7. Frekvenčno razmerje (f_1/f_1 , f_2/f_1 , f_3/f_1) pri hrastovi hlodovini različne kakovosti (A – furnirska hlodovina, B – odlična žagarska hlodovina in C – žagarska hlodovina srednje kakovosti).

Figure 7. Frequency ratio (f_1/f_1 , f_2/f_1 , f_3/f_1) of oak logs of different quality (A–exceptional, veneer quality, B–excellent sawn timber quality and C–medium sawn timber quality).

ce dušenja (slika 6a). Pri hrastovi hlodovini žagarske kakovosti (B in C) so frekvenčni spektri močno odstopali od teoretično pričakovanih (sliki 6b, 6c). V tej hlodovini višje frekvence niso več večkratniki osnovne frekvence. Amplitude v višjih nihajnih načinih so bile v nekaterih primerih celo močnejše kot v osnovnem načinu. Menimo, da je takšen odziv posledica notranjih strukturnih nepravilnosti v hlo-dih nižje kakovosti (B, C) (slika 1).

Raziskava povprečnega razmerja med frekvencami višjih nihajnih načinov in osnovnim nihajnim načinom (f_1/f_1 , f_2/f_1 , f_3/f_1) je pri hrastovi hlodovini A in B kakovostnega razreda pokazala vrednosti nad idealno premico ($y = x$). Pri hrastovi hlodovini srednje žagarske kakovosti (B) smo dobili vrednosti pod idealno črto ($y = x$) (slika 7). Slednje je povezano s prisotnostjo nekaterih strukturnih značilnosti v hlo-dih (grčavost, koničnost, ekscentričnost, ovalnost prereza ...), od katerih so nekatere zunanje vidne (slika 1) in zmanjšujejo kakovost hlodovine (McConnell, 2016).

5 ZAKLJUČKI

5 CONCLUSIONS

Kakovost hrastove hlodovine, določena vizualno na osnovi značilnosti (Pravilnik ..., 2017), je bila pozitivno povezana in v sorazmerju s ceno gozdno-lesnih sortimentov, ki jo je dosegla na dražbi vrednejšega okroglega lesa v Slovenj Gradcu. Najkvalitetnejša hlodovina je imela večje pre-mere, več in povprečno širše prirastne plasti. Potrdili smo značilno pozitivno povezavo med vizualno oceno kakovosti hlodovine (A – izjemna, furnirska hlodovina, B – odlična žagarska hlodovina, C – žagarska hlodovina srednje kakovosti), hitrostjo vzdolžnega mehanskega nihanja (v) in relativno učinkovitostjo akustične pretvorbe (RACE). Pri hrastovi hlodovini nižje kakovosti (B in C) so frekvenčni spektri znatno odstopali od teoretičnih, kjer resonančne frekvence v višjih nihajnih načinih niso večkratniki osnovne frekvence. Raziskava je potrdila možnost in obetavnost uporabe nedestruktivnih akustičnih metod za oceno kakovosti hrastove hlodovine.

6 POVZETEK

6 SUMMARY

The quality of logs is traditionally determined visually by the characteristics and dimensions of the assortments, and depends in particular on the presence of certain anomalies, such as the size and number of knots, eccentricity and ovality of the cross-section, conicity, end cracks, etc. Some anomalies also have a significant influence on the mechanical and acoustic properties of the wood.

Structural anomalies in logs and sawnwood can be detected and determined by both destructive and non-destructive methods, but only the latter are relevant for use in practice. Visual appraisal is one of the traditional, low-cost, non-destructive methods, but because of the time involved, it is only really applicable in smaller productions. Despite defined rules and standards, even this type of assessment can be subjective and dependent on the human factor. In order to optimize the use, grading and evaluation of oak logs, the study investigated the possibility of assessing the quality of logs using acoustic, non-destructive methods.

In this study, we examined auctioned oak logs (*Quercus robur* and *Quercus petraea*) from the 15th auction of valuable logs in Slovenj Gradec in 2021. Of the total 1,318 auctioned logs, 78 were selected for analysis. The selected logs were visually sorted according to their quality in accordance with the current Rules for Measurement and Grading of Forest Timber Assortments from Forests Owned by the Republic of Slovenia (Rules..., 2017). According to national regulations, which, like a similar European standard (EN 1316-1: 2010), specify the required size and geometry of the logs, as well as the allowable size and number of visible anomalies (irregular shape in the cross section, sweeping, tapering, presence of knots, etc.). The dendrochronological analysis of the logs also included the analysis of annual growth rings and acoustic properties using the longitudinal vibration resonance method.

The highest quality logs had the largest diameters, the highest number of annual rings, and on average the widest annual rings with a larger proportion of latewood. We confirmed the characteristics of ring-porous oak that the proportion of latewood, and thus wood density, increases with the width of the growth rings. The visually evaluated quality of the oak logs was closely related to their

value, i.e. the price obtained per unit volume. The highest value per unit volume was obtained for veneer logs (A), while the price for sawn roundwood (B, C), especially for medium quality logs (C), was significantly lower.

The measured longitudinal stress wave velocity was highest for veneer logs (A) and lowest for medium quality sawlogs (C). Frequency response analysis confirmed that longitudinal stress wave velocity decreased with decreasing log quality, even in the higher vibration modes. The same trend was confirmed for relative acoustic conversion efficiency (RACE), as vibration damping ($\tan\delta$) also increased significantly for lower quality logs. The frequency spectra for lower quality logs deviated significantly from the theoretical spectra. The study confirms the feasibility and great potential of using non-destructive acoustic methods to evaluate the quality of oak logs.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGEMENTS

Zahvala podjetju Tiama d.o.o., gospe Klavdiji Jeromel in gospodu Jožetu Jeromlu, za možnost izvedbe meritev licitirane hlodovine. Delo je nastalo v okviru ciljnega raziskovalnega programa V4-2016 Možnosti rabe listavcev v slovenskem biogospodarstvu, ki ga financirata Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano ter Javna agencija za raziskovalno dejavnost republike Slovenije ARRS, v okviru dela na programih Javne agencije za raziskovalno dejavnost republike Slovenije ARRS, P4-0015 Les in lignocelulozni kompoziti ter P4-0430 Gozdno-lesna veriga in podnebne spremembe: prehod v krožno biogospodarstvo. Študija je tudi del raziskav v okviru projekta "Raziskovalci-2.1-UL-BF-952011" pogodba št. C3330-19-952011, ki ga sofinancirata Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport in Evropski sklad za regionalni razvoj.

VIRI

REFERENCES

- Barrett, J. D., & Hong, J. P. (2009). Moisture content adjustments for dynamic modulus of elasticity of wood members. *Wood Science and Technology*, 44(3), 485–495.
- Bucur, V. (2006). Acoustics of wood. In T. E. Timell & R. Wimmer (Eds.), *Springer Series in Wood Science*. Berlin: Springer-Verlag.

- Carter, P., Wang, X., & Ross, R. J. (2013). Field application of processor head acoustic technology in forest harvest operations. In R. J. Ross & X. Wang (Eds.), 18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium (pp. 7–14). USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Čufar, K. (2006). Anatomija lesa. Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo.
- Dumitrascu, A. E., Ciobanu, V. D., & Lepadatescu, B. (2013). Valorization of wood resources for the cutting of decorative veneer in the context of sustainable development of Romanian forests. *BioResources*, 8(2), 4298–4311. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.8.3.4298-4311>
- Gorišek, Ž. (2009). Les: Zgradba in lastnosti–njegova variabilnost in heterogenost. Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo.
- Gornik Bučar, D., & Bučar, B. (2009). Uporaba metode frekvenčnega odziva za določanje modula elastičnosti žaganega lesa. *Les/Wood*, 61, 5, 240–245.
- Gornik Bučar, D., & Bučar, B. (2011). Strength grading of structural timber using the single mode transverse damped vibration method. *Wood research*, 56, 1, 67–75.
- Karaszewski, Z., Bembenek, M., Mederski, P. S., Szczepanska-Alvarez A., Byczkowski, R., Kozłowska, A., Mischnowicz, K., & Przytula, W. (2013). Identifying beech round wood quality–Distributions and the influence of defects on grading. *Drewno*, 56(189), 39–54. DOI: [https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.041.03\(22.5.2023\)](https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.041.03(22.5.2023))
- Krajnc, L., Kadunc, A., & Straže, A. (2019). The use of ultrasound velocity and damping for the detection of internal structural defects in standing trees of European beech and Norway spruce. *Holzforchung*, 73(9), 807–836. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2018-0245>
- Kurowska, A., Kozakiewicz, P., & Gladzikowski, T. (2016). Ultrasonic waves propagation velocity and dynamic modulus of elasticity of European oak, European aspen, American cherry and wenge wood. *Annals of Warsaw University of Life Sciences*, 93, 83–88.
- Legg, M., & Bradley, S. (2016). Repository, ResearchSpace. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.4940210>
- Longuetaud, F., Mothe, F., Kerautret, B., Krähenbühl, A., Hory, L., Leban, J. M., & Debled-Rennesson, I. (2012). Automatic knot detection and measurements from X-ray CT images of wood. A review and validation of an improved algorithm on softwood samples. *Computers and Electronics in Agriculture*, 85(7), 77–89.
- Marenče, J., Gornik Bučar, D., & Šega, B. (2016). Bukovina–povezave med kakovostjo dreves, hlodovine in žaganega lesa. *Acta Silvae et Ligni*, 111, 35–47. DOI: <https://doi.org/10.20315/asetl.111.4>
- Marenče, J., Šega, B., & Gornik Bučar, D. (2020). Monitoring the quality and quantity of beechwood from tree to sawmill product. *Drvena Industrija*, 41(1), 119–128. DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.613>
- McConnell, T. E. (2016). Quality indexes for oak sawlogs based on green lumber grade yields. *Forest Products Journal*, 67(3/4), 245–249.
- Meyers, M. A. (1994). *Dynamic Behaviour of Materials*. Wiley & Sons.
- Obataya, E., Ono, T., & Norimoto, M. (2000). Vibrational properties of wood along the grain. *Journal of Materials Science*, 35, 2993–3001.
- Pravilnik o merjenju in razvrščanju gozdnih lesnih sortimentov. 2017. Uradni list RS, št. 9/2016.
- Račko, V. (2013). Verify the accuracy of estimation the model between dimensional characteristics of branch scar and the location of the knot in the beech trunk. *Forestry and Wood Technology*, 84, 60–65.
- Rais, A., Pretzsch, H., & Kuilen, J. W. G. (2014). Roundwood pre-grading with longitudinal acoustic waves for production of structural boards. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72, 87–98. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0757-5>
- Ross, R. (2015). *Nondestructive Evaluation of wood*. Forest Producty Laboratory.
- Sioma, A. (2015). Assessment of wood surface defects based on 3D image analysis. *Wood Research*, 60(3), 339–350.
- SIST EN 1316-1:2010. *Hardwood round timber–Qualitative classification–Part 1: Oak and beech*. CEN, Brussels, 9 str.
- Straže, A., Dremelj, M., Žveplan, E., & Čufar, K. (2018). Spremembe fizikalnih lastnosti hrastovega lesa iz zgodovinskih konstrukcij v življenjski dobi. *Les/Wood*, 67(1), 5–14.
- Straže, A., Mitkovski, B., Tippner, J., Čufar, K., & Gorišek, Ž. (2015). Structural and acoustic properties of African padouk (*Pterocarpus soyauxii*) wood for xylophones. *European Journal of Wood and Wood Products*, 73(2), 235–243.
- Straže, A., Plavčak, D., Žveplan, E., & Gorišek, Ž. (2020). Linking visual and stress wave grading of beech wood from the log to the sawmill product. *Environmental Sciences Proceedings*, 1, 1–6.
- Straže, A., Žigon, J., Pervan, S., Mikšik, M., & Prekrat, S. (2023). The influence of processing conditions on the quality of bent solid wood from European oak. *Forests*, 14(5), 1–11. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14051047>
- Torkaman, J., Vaziri, M., Sandberg, D., & Limae, S. M. (2018). Relationship between branch-scar parameters and knot features of oriental beech (*Fagus orientalis Libsky*). *Wood Material Science and Engineering*, 13(2), 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1424731>
- Tsehaye, A., Buchanan, A. H., & Walker, J. C. F. (2000). Sorting of logs using acoustics. *Wood Science and Technology*, 34, 337–344.
- Wang, X., Carter, P., Ross, R. J., & Brashaw, B. K. (2007). Acoustic assessment of wood quality of raw materials–a path to increased profitability. *Forest Products Journal*, 57(5), 6–14.
- Zhang, S.-Y., Owoundi, R. E., Nepveu, G., Mothe, F., & Dhote, J. F. (1993). Modelling wood density in European oak (*Quercus petraea* and *Quercus robur*) and simulating the silvicultural influence. *Canadian Journal of Forest Research*, 23, 2587–2593.