

# FIZIKALNE IN MEHANSKE LASTNOSTI SVEŽEGA IN OSUŠENEGA LESA V BUKOVIH DEBLIH, IZRUVANIH MED ŽLEDOLOMOM

## PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF GREEN AND DRY WOOD IN BEECH STEMS BLOWN DOWN IN ICE STORM

Željko GORIŠEK<sup>1</sup>, Denis PLAVČAK<sup>2</sup>, Dominika GORNIK BUČAR<sup>3</sup>, Maks MERELA<sup>4</sup>, Katarina ČUFAR<sup>5</sup>, Aleš STRAŽE<sup>6</sup>

(1) Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo; zeljko.gorisek@bf.uni-lj.si

(2) Stari Grad 91, 2321 Makole; denis.plavcak1@gmail.com

(3) Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana; dominika.gornik@bf.uni-lj.si

(4) Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana; maks.merela@bf.uni-lj.si

(5) Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana; katarina.cufar@bf.uni-lj.si

(6) Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana; ales.straze@bf.uni-lj.si

### IZVLEČEK

V raziskavi smo preučevali fizikalne in mehanske lastnosti lesa v deblih navadnih bukev (*Fagus sylvatica* L.), izravnih med žledolomom. Lastnosti smo preučevali na vzporednih preizkušancih sveže in osušene bukovine, ki smo jih sistematično vzorčili po radialni in vertikalni smeri dreves. Določili smo gostoto, togost, upogibno trdnost, strižno trdnost v smeri lesnih vlaken ter tlačno trdnost lesa v vseh anatomskih smereh. Togost smo primerjalno vrednotili med statično 4-točkovnim upogibom in nedestruktivno z merjenjem hitrosti ultrazvoka ter z določanjem frekvenčnega odziva. V drevesih, ki so izravnana obležala v gozdu od februarja do konca vegetacijske dobe 2014 in so imela delno ohranjen koreninski sistem, aktivno krošnjo in zadosten kapilarni tok, nismo zaznali sprememb gostote in mehanskih lastnosti, ki bi bile posledica razkroja lesa. Tako v svežem kot osušenem stanju smo ugotovili značilni vzorec porazdelitve gostote in trdnosti. Gostota lesa je po višini dreves naraščala, v radialni smeri od stržena proti periferiji debla pa smo zaznali rahel trend zmanjševanja. Mehanske lastnosti z izjemo prečne tlačne trdnosti se povečujejo tako po višini debla kot tudi od stržena proti kambiju in so bile vedno boljše pri osušenem kot pri svežem lesu. Zanesljivost nedestruktivnih metod za določanje togosti je večja pri ocenjevanju osušenega lesa. Za oceno upogibne trdnosti z nedestruktivnimi metodami še vedno priporočamo vzporedno vizualno opredelitev značilnosti lesa.

**Ključne besede:** bukev=*Fagus sylvatica*, gostota, mehanske lastnosti, nedestruktivno testiranje, žledolom

### ABSTRACT

Physical and mechanical properties of beech wood (*Fagus sylvatica* L.) from trees fallen in ice storm were determined. The properties were studied in parallel green and dried beech-wood samples, systematically collected along the radius and at different height levels of the stem. The stiffness of the timber was comparatively tested with static 4-point bending and non-destructively by measuring the speed of ultrasound, and by determining the frequency response. The bending and shear strengths were additionally determined along the grain, as well as compression strength in all anatomical directions of wood. In blown down trees with still partly preserved root system, active crown and sufficient capillary water flow, we could not detect any reduction of mechanical properties due to deterioration. The density and mechanical properties, except transverse compression strength, increased with increasing height in the tree and radially from the pith to the cambium. They were always better in dried than in green wood. The reliability of non-destructive methods was greater in the evaluation of dried wood. We recommend visual wood characterisation in addition to the use of non-destructive methods for strength assessment of wood.

**Key words:** beech wood=*Fagus sylvatica*, density, mechanical properties, non-destructive testing, ice storm

GDK 812+423.3:176.1Fagus sylvatica L.(045)=163.6  
DOI 10.20315/ASetL.112.2

Prispelo / Received: 5. 1. 2017  
Sprejeto / Accepted: 18. 2. 2017

### 1 UVOD

#### 1 INTRODUCTION

Zaradi globalnih podnebnih sprememb v zadnjem času beležimo vedno pogostejše ekstremne vremenske dogodke, pogosto v obliki obsežnih ujm. Ujme prizadevajo celotne pokrajine in gozdovi pri tem niso izjema. Pustošenje ujm po gozdovih se najbolj kaže na poškod-

bah dreves, saj prihaja do zlomov in odlomov večjih vej ter delov ali celotne krošnje, nagnjenosti in uklonitve debel ali izravnja oz. podrtja celotnih dreves. Ujme, kot so vetrolomi, snegolomi in žledolomi, povzročijo veliko gospodarsko škodo, saj močno razvrednotijo ali pa celo uničijo les. Od obsega poškodb dreves je odvisno naslednje: njihovo preživetje, vitalnost, kakovost

lesa in nazadnje tudi varnost za okolico (Merela in sod., 2016). Februarja leta 2014 je Slovenijo prizadel doslej dokumentirano najobsežnejši žledolom. Žled je tedaj poškodoval več kot polovico gozdnih površin v Sloveniji oz. ocenjeno 9,3 milijona kubičnih metrov gozdnega drevja (ZGS, 2015).

Navadna bukev (*Fagus sylvatica* L.) spada kljub zapostavljenosti v preteklosti med najpomembnejše drevesne vrste v gozdovih zmerno celinskega pasu v Evropi. V Sloveniji bukev zaseda največji delež v lesni zalogi (ZGS, 2015). Bukovina je kakovosten les, ki ga je mogoče široko uporabljati in iz njega napraviti pester nabor izdelkov (Čufar in sod., 2012b). Bukovina je praktično uporabna za vse vrste izdelkov ob omejitvi, da les bukve sam ni naravno trajen. Kljub dobrim lastnostim, veliki razpoložljivi količini in ugodnim razmerjem med kvaliteto in ceno v Evropi in Sloveniji v zadnjih letih poraba bukovine za žagan les in furnirje upada, narašča pa poraba bukovine za energetske namene, ki zavzema vse večji delež porabe (Piškur in Krajnc, 2012; Piškur in sod., 2014; Prislan in sod., 2015). Glede na to so nujna prizadevanja za večjo porabo bukovega lesa za izdelke z visoko dodano vrednostjo (Kropivšek in Čufar, 2015), za kar pa tudi potrebujemo les višje kakovosti. Kakovost in posledično cena na trgu sta v veliki meri odvisna od fizikalnih in mehanskih lastnosti lesa. Omenjene naravne nesreče oz. ujme povzročijo poškodbe, ki neposredno vplivajo na nastajanje oz. zgradbo lesa in s tem na kakovost ter posledično na ceno lesne surovine.

Lastnosti lesa določajo anatomske posebnosti, ki so odvisne predvsem od genske zasnove, rastiščnih in klimatskih razmer, provenience in velikosti oz. starosti drevesa (Zobel in Buijtenen, 1998). Rastne razmere in klima značilno vplivajo na prirastek oz. nastanek lesa (Prislan in sod., 2009; Prislan in sod., 2013; Čufar in sod., 2012a), ki se razlikuje tudi v različnih delih drevesa (Gryc in sod., 2008). Gostota lesa, ki jo štejemo za ključni parameter pri določanju kakovosti lesa (Bouriaud in sod., 2004; Diaconu in sod., 2016), je v največji meri odvisna od anatomske zgradbe in je v tesni zvezi s fizikalnimi, mehanskimi in tehnološkimi lastnostmi, ki narekujejo tudi možnost predelave in končne uporabe lesa.

Les bukve ima srednjo gostoto absolutno suhega lesa ( $\rho_0$ )  $680 \text{ kg/m}^3$  (Čufar in sod., 2012b). Kljub razmeroma homogeni anatomski zgradbi pa gostota bukovine variira v razponu od  $490$  do  $880 \text{ kg/m}^3$  in je nenakomerna tako med sestoji, drevesi in tudi znotraj posameznega drevesa, kjer lahko skrajne vrednosti gostote zaznamo že na manjših razdaljah znotraj istega drevesa. Za bukovino v splošno ni potrjena zveza med

širinami branik in gostoto lesa (Hildebrandt, 1960). Z vidika variabilnosti gostote v drevesu je že Možina (1958) zasledil ponavljajoč se vzorec po višini drevesa, kjer je bila v spodnjem delu debla gostota največja, nato pa je v smeri proti krošnji upadala. Gostejši les so imele bukve z bolj razvitim koreninskim sistemom ali z močnejše razvito krošnjo. Gryc in sodelavci (2008) so zabeležili sistematične razlike v gostoti juvenilnega in zrelega lesa, pri čemer je imel juvenilni les nekoliko višjo gostoto ( $\rho_{12} = 726 \text{ kg/m}^3$ ) od adultnega ( $\rho_{12} = 701 \text{ kg/m}^3$ ). Še mnogo bolj kot gostota pa so variabilne vrednosti različnih mehanskih lastnosti (Verrill in Kretschmann, 2009).

Heterogenost in velika variabilnost zgradbe in lastnosti sta velik izziv tudi pri uporabi različnih metod karakterizacije lesa. Zato je posebej pomemben razvoj zanesljivih neporušnih (nedestruktivnih) metod ocenjevanja in razvrščanja, ki bi omogočale spremljanje kakovosti lesa v celotni predelovalni verigi oziroma vseh stopnjah predelave in na različnih asortimentih (Divos in sod., 1998; Boström, 1999; Evans in Ilic, 2001; Grabianowski in sod., 2006; Ross in Pellerin, 1991). Številne študije potrjujejo zanesljivo uporabo nedestruktivnih metod določanja togosti lesa v praksi (Sonderegger in sod., 2008; Yin in sod., 2010), vendar pa opozarjajo tudi na vpliv številnih dejavnikov, ki še niso v celoti pojasnjeni (Ilic, 2003; Hansen, 2006; Gorišek in sod., 2014).

Ker ima bukovina dokaj visoko gostoto in ugodne mehanske lastnosti, je veliko rab vezanih na te lastnosti. Glavni cilj te raziskave je bil določiti osnovne fizikalne in mehanske lastnosti lesa bukve in njihov prostorski razpored v deblu ter preveriti možnosti določanja modula elastičnosti z nedestruktivnimi metodami. Zaradi značilnega vpliva lesne vlažnosti na gostoto in mehanske lastnosti lesa smo slednje preverjali na svežem in v normalni klimi (20/65) uravnovešenem lesu. Eksperiment je bil napravljen na bukvah, izruvanih februarja 2014 med žledolomom, s čimer smo dodatno preverili, ali je do zaključka prve vegetacijske dobe že mogoče zaznati spremembe fizikalnih ali mehanskih lastnosti.

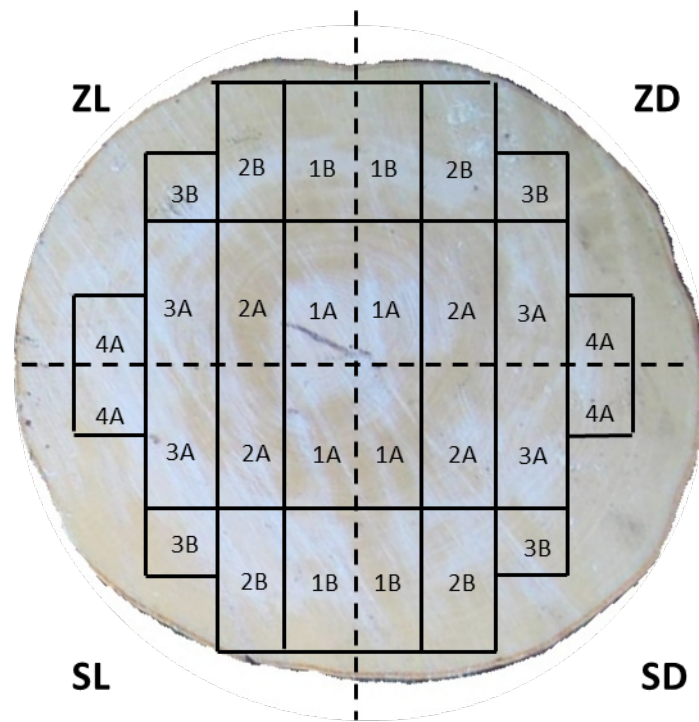
## 2 MATERIAL IN METODE

### 2 MATERIAL AND METHODS

#### 2.1 Material

#### 2.1 Material

Za preučevanje mehanskih lastnosti lesa bukve (*Fagus sylvatica* L.), odvzetega iz dreves, podrtih in izruvanih med žledolomom februarja 2014, smo les vzorčili v mešanem listnatem gozdu na južnem pobočju Rašice. Merila in kriteriji pri izbiri dreves in odvzemu materi-



**Slika 1:** Shema krojenja hlodičev na prečnem prerezu: ZL in SL – preizkušanci, testirani v svežem stanju, ZD in SD – preizkušanci, testirani v suhem stanju

ala so opisali Straže in sodelavci (2015) (preglednica 1). Na območju, ki je bilo v žledolomu februarja 2014 močno prizadeto, smo ob zaključku vegetacijske dobe 2014 sistematično izbrali tri različno prizadeta drevesa ( $D = 1..3$ ), ki so bila po starosti in velikosti med seboj primerljiva. Preizkušanje mehanskih lastnosti smo opravili na hlodičih, odvzetih na treh višinah vsakega drevesa; na prsni višini (D1), na polovici razdalje od prsne višine do krošnje (D2) in tik pod krošnjo (D3). Na prečnem prerezu vsakega hlodiča smo postavili koordinatno mrežo, tako da smo dobili optimalen razpored preizkušancev s prerezom 28 mm x 50 mm. Za boljši izkoristek testnega materiala je imelo nekaj preizkušancev tudi dimenzije 28 mm x 28 mm (slika 1).

**Preglednica 1:** Karakteristike vzorčnih dreves s premeri odvzetih hlodičev (zaradi eliptičnosti prereza sta navedena večji (1) in manjši (2) premer debla)

Drevo / hloidič Tree / log	Eliptičnost prereza / Elliptic cross section		Opis drevesa Tree description
	Premer 1 Diameter 1 [cm]	Premer 2 Diameter 2 [cm]	
1/1	34,1	32,5	20 % aktivnega koreninskega sistema; 5 % ozelenelosti listne površine; luščenje skorje po celotni dolžini debla; na deblu se pojavlja glivna okužba; krošnja osušena, brez zelenega listja
1/2	31,0	30,0	
1/3	28,5	26,0	
2/1	28,7	29,5	40 % aktivnega koreninskega sistema; krošnja s temno zelenimi listi; skorja, izpostavljena sončnemu obsevanju, je nekoliko razbrzdana, vendar se ne lušči; lokalno posušena kambijeva cona
2/2	27,7	28,5	
2/3	23,0	23,2	
3/1	26,5	26,4	30 % aktivnega koreninskega sistema; skorja zdrava; na deblu se pojavljajo adventivni poganjki; krošnja osenčena in povsem ozelenela
3/2	23,2	13,5	
3/3	21,5	12,2	

**Fig. 1:** Sawing pattern on the cross section of a log: ZL and SL – specimens for testing in green state, ZD and SD – specimens for testing in dry state

Dolžina vsakega preizkušanca je bila 550 mm.

Polovico preizkušancev iz vsakega hlodiča smo testirali v svežem stanju, drugo polovico pa sušili na prostem in jih nato uravnovesili v normalni klimi (20 °C, 65 %) ter testirali še v zračno suhem stanju.

## 2.2 Metode

### 2.2 Methods

#### 2.2.1 Določanje gostote in lesne vlažnosti

#### 2.2.1 Density and moisture content determination

Posameznemu preizkušancu smo v svežem in suhem stanju določili maso ( $\Delta m = \pm 0,01$  g) ter dimenzije ( $\Delta L = \pm 0,01$  mm). V posameznem vlažnostnem stanju smo nato določali gostoto preizkušancev pri izmerje-

**Table 1:** Diameters of logs taken from sampled trees, and their characteristics

ni vlažnosti  $u$  ( $\rho_u = m_u/V_u$ ). Lesno vlažnost smo preizkušancem določili gravimetrično (SIST EN 13183-1, 2002) po zaključku vseh mehanskih testov.

### 2.2.2 Določanje modula elastičnosti s hitrostjo ultrazvoka

#### 2.2.2 Modulus of elasticity determined by ultrasound velocity

Za merjenje hitrosti preleta ultrazvočnega valovanja vzdolž preizkušancev ( $L = 0,55$  m) smo uporabili merilni inštrument PunditLab. Uporabili smo oddajno in sprejemno ultrazvočno sondo, ki sta pulzno merili čas preleta ultrazvoka s frekvenco 150 kHz. Modul elastičnosti preizkušancev smo v svežem in suhem stanju določali z znane zveze (enačba 1).

$$E_{uz} = v^2 \rho_u \quad (1)$$

kjer pomenijo:

$E_{uz}$  - modul elastičnosti, določen s hitrostjo ultrazvoka [GPa]

$v$  - hitrost valovanja [m/s] in

$\rho_u$  - gostota lesa pri vlažnosti  $u$  [kg/m<sup>3</sup>]

### 2.2.3 Določanje modula elastičnosti s frekvenčnim odzivom

#### 2.2.3 Modulus of elasticity determined by frequency response

Dinamični modul elastičnosti preizkušancev v svežem in suhem stanju smo določili iz frekvenčnega odziva prosto ležečih preizkušancev pri prečnem, upogibnem nihanju. Preizkušance smo elastično vzbudili in s kondenzatorskim mikrofonom (PCB-130D) ter merilno kartico (NI-9234) določili lastno frekvenco v 1. nihajnem načinu. V programskem okolju LabView 8.1 smo po Bernoullijevi teoriji določili modul elastičnosti iz frekvenčnega odziva (enačba 2) (Gorišek in sod., 2014).

$$E_f = \frac{4\pi^2 L^4 \rho_u f^2 A}{k^4} \quad (2)$$

Oznake:

$E_f$  - modul elastičnosti iz frekvenčnega odziva [GPa]

$L$  - dolžina preizkušanca [m]

$\rho_u$  - gostota preizkušanca [kg/m<sup>3</sup>]

$f$  - lastna frekvenca (1. nihajni način) [s<sup>-1</sup>]

$A$  - prečni prerez [m<sup>2</sup>]

$I$  - vztrajnostni moment prereza [m<sup>4</sup>]

$k$  - Bernoullijeva konstanta (1. nihajni način:  $k = 4,73$ )

### 2.2.4 Statični upogibni test

#### 2.2.4 Static bending test

Štiritočkovni upogibni test preizkušancev smo napravili na univerzalnem testirnem stroju Zwick/Roel Z100. Razdalja med spodnjima podporama preizkušanca je znašala 480 mm, med zgornjima podporama pa 160 mm. Preizkušance smo v svežem in suhem stanju testirali v skladu s standardom SIST EN 408. Statični modul elastičnosti smo določili iz naklona napetostno deformacijske krivulje v območju med 10 % in 40 % maksimalne sile (enačba 3). Upogibno trdnost preizkušancev smo določili po enačbi 4.

$$E_s = \frac{2l^3 - 3ll'^2 + l'^3}{8bh^3} \frac{\Delta F}{w} \quad E_s = \frac{2l^3 - 3ll'^2 + l'^3}{8bh^3} \frac{\Delta F}{w} \quad (3)$$

$$\sigma_{maks} = \frac{3F(l-l')}{2bh^2} \quad \sigma_{maks} = \frac{3F(l-l')}{2bh^2} \quad (4)$$

Oznake:

$E_s$  - modul elastičnosti iz statičnega preizkusa [GPa]

$\sigma_{maks}$  - upogibna trdnost [MPa]

$l$  - razdalja med podporami [mm]

$l'$  - razdalja med prijemališčema delovanja sile [mm]

$b$  - širina preizkušanca [mm]

$h$  - višina preizkušanca [mm]

$w$  - povprečna debelina preizkušanca [mm]

$F$  - sila delovanja [N]

### 2.2.5 Tlačna in strižna trdnost

#### 2.2.5 Compression and shear strength

Za določitev tlačne in strižne trdnosti smo iz posameznega preizkušanca v svežem in suhem stanju izžagali orientirane vzporedne kocke velikosti (20 × 20 × 20 mm). Na univerzalnem testirnem stroju ZwickRoell Z100 smo tlačno trdnost lesa določili skladno s standardom DIN 52185 v vzdolžni (L), radialni (R) in tangencialni smeri (T) (enačba 5).

$$\sigma_c = \frac{F_{maks}}{b \cdot t} \quad \sigma_c = \frac{F_{maks}}{b \cdot t} \quad (5)$$

Oznake:

$\sigma_c$  - tlačna trdnost [MPa]

$F$  - sila delovanja [N]

$b, t$  - dimenzije prečnega prereza [mm]

Strižno trdnost smo določili v vzdolžno radialni (LR) in vzdolžno tangencialni ravnini (LT) po standardu ASTM D143-14 (ASTM, 2000). Preizkušance smo pri tem vstavili v orodje za strižno obremenjevanje in

določili največjo napetost pri sili vzporedno s strižno ravnino (enačba 6).

$$\tau = \frac{F_{maks}}{b \cdot t} \quad \tau = \frac{F_{maks}}{b \cdot t} \quad (6)$$

Oznake:

$\tau$  – strižna trdnost [MPa]

$F$  – sila delovanja [N]

$b, t$  – dimenzije strižnega prereza [mm]

### 3 REZULTATI IN RAZPRAVA

### 3 RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1 Gostota in njena porazdelitev

#### 3.1 Density and its distribution

Pri vseh preučevanih drevesih smo zaznali značilni trend gostote vzdolž debel; na bazi drevesa je bila gostota lesa najvišja in se je postopoma zmanjševala proti krošnji (slika 2). Značilnih razlik v gostoti juvenilnega in adultnega lesa pri tem nismo ugotovili.

#### 3.2 Porazdelitev vlažnosti v sveži bukovini

#### 3.2 Moisture content distribution in green beech wood

Na preučevanih drevesih smo potrdili tudi značilne razlike v vertikalni porazdelitvi vlažnosti, ki je zelo pomembna zaradi odpornosti lesa poškodovanih dreves proti biološkimi škodljivcem (slika 3). V spodnjih delih debel (D11, D12, D31, D32) tako v splošnem zasledimo nižjo vlažnost, tudi pod 60 %, kar pripisujemo izpostavljenosti sušenju pod vplivom okoljskih dejavnikov. Tik pod krošnjo je bila vlažnost lesa nad 70 % (slika 3), kar

pripisujemo visoki vlažnosti perifernega beljavnega dela debela, ki je bila nad 90 % pri vseh preučevanih drevesih. Vlažnost v notranjosti debel je bila značilno nižja, v prevodnem delu beljave pa višja (Straže in sod., 2015).

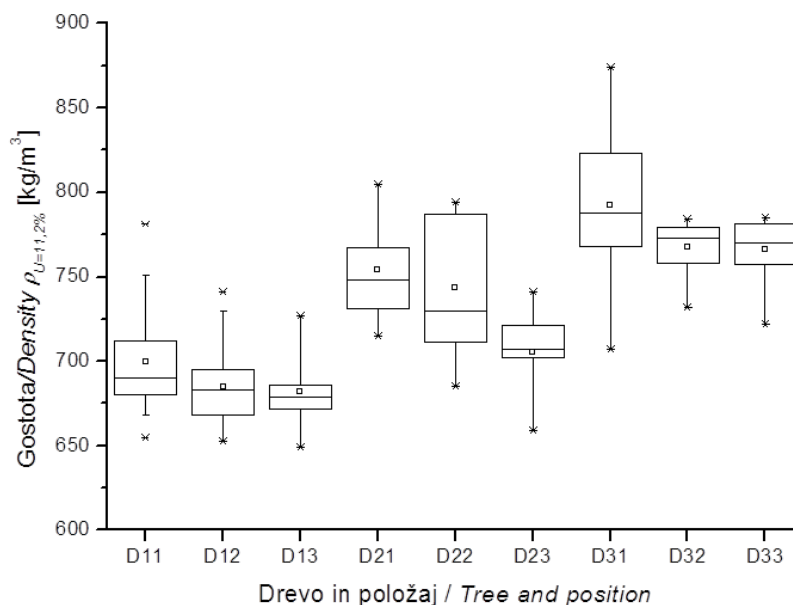
#### 3.3 Mehanske lastnosti raziskane bukovine

#### 3.3 Mechanical properties of the studied beech wood

Togost, vrednotena z modulom elastičnosti, je osnovni kriterij za kakovostno razvrščanje gradbenega lesa in za dimenzioniranje konstrukcijskih elementov. Natančnost je odvisna tudi od uporabljenih metod določanja. V našem primeru smo z obema dinamičnimi metodama (ultrazvočno ( $E_{UZZ}$ ) in vzdolžnim frekvenčnim odzivom preizkušancev ( $E_{\rho}$ )) dobili višje vrednosti modulov elastičnosti (povprečna razlika 43 %) od modulov, ugotovljenih s standardno metodo ( $E_s$ ) (preglednica 2).

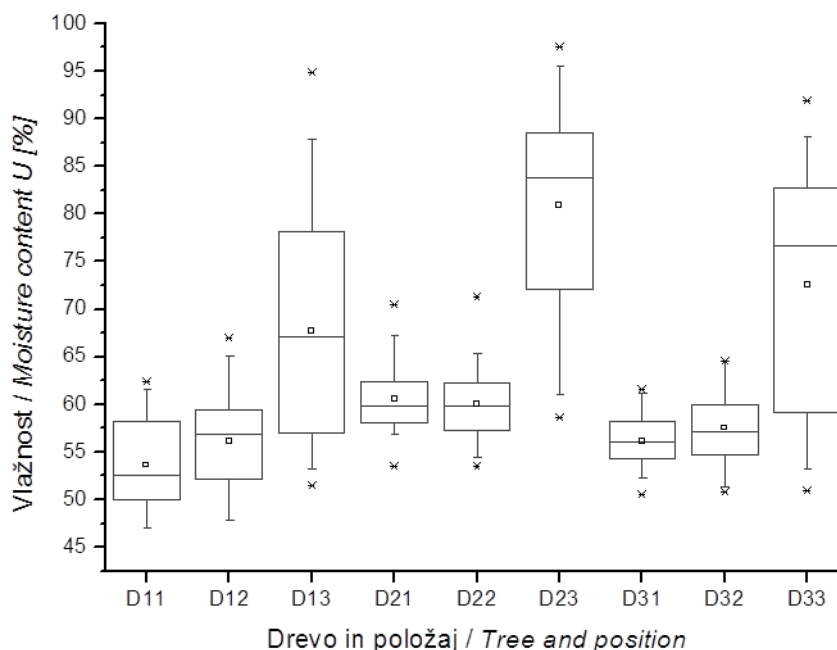
Najvišje absolutne vrednosti smo določili z ultrazvočno metodo ( $E_{UZZ}$ ), ki so na svežem lesu skoraj do 2-krat večje od vrednosti ( $E_s$ ). Zato so v tem primeru rezultati  $E_{UZZ}$  uporabni le za primerjavo med preizkušanci. Tudi pri dinamičnem modulu elastičnosti, izmerjenem pri vzdolžnem frekvenčnem odzivu preizkušancev ( $E_{\rho}$ ), smo ugotovili za 25 % do 36 % večje vrednosti glede na modul elastičnosti, določen s statičnim upogibnim preizkusom.

Povprečna vlažnost preizkušancev po uravnotežanju v normalni klimi je bila 11,2 %, z majhnim standardnim odklonom ( $\sigma = 0,15$ ). S tem je bil nevtraliziran vpliv vlažnosti na modul elastičnosti preizkušancev,



**Slika 2:** Primerjava razporeditve gostot lesa ( $\rho_u$ ) po višinah (D11, D21, D31 – na prsni višini, D12, D22, D32 – na sredini debela in D13, D23, D33 – tik pod krošnjo preučevanih dreves

**Fig. 2:** Wood density ( $\rho_u$ ) distribution in examined three trees: at breast height (D11, D21, D31), in the middle of the stem (D12, D22, D32), and just below the crown (D13, D23, D33)



**Slika 3:** Povprečna vlažnost lesa in razpon na različnih nivojih v deblih treh preučevanih dreves. Mesta v deblu: D11, D21, D31 – na prsni višini, D12, D22, D32 - na sredini debla in D13, D23, D33 - tik pod krošnjo.B

**Fig. 3:** Mean values and variation range of moisture content ( $U$ ): at breast high (D11, D21, D31), in the middle of the stem (D12, D22, D32), and just below the crown (D13, D23, D33)

kar je omogočilo večjo primerljivost uporabljenih metod (preglednica 2). Razlike med vrednostmi po posa-

meznih metodah so bile sicer še vedno značilne:  $E_{Uz}$  je povprečno za 46 %,  $E_f$  pa za 18 % večji od  $E_s$ , medtem

Preglednica 2: Povprečne vrednosti modulov elastičnosti, določenih na sveži in osušeni bukovini z metodo merjenja hitrosti ultrazvoka ( $E_{Uz}$ ), frekvenčnega odziva ( $E_f$ ) in s statičnim testom ( $E_s$ ) na treh višinah posameznih dreves. V vrstici pod vrednostmi  $E$  so standardni odkloni.

Table 2: Average values of moduli of elasticity of fresh and dried beech wood, determined by measuring ultrasound velocity ( $E_{Uz}$ ), frequency response ( $E_f$ ) and standard static test ( $E_s$ ) at three heights of individual trees. In the rows below  $E$  values, standard deviations are given (\*comma is used for decimal point).

	Modul elastičnosti svežega lesa / Modulus of elasticity of green wood											
	$E_{Uz}$ [GPa]				$E_f$ [GPa]				$E_s$ [GPa]			
	Prsna v./ Breast h.	Sredina/ Middle	Krošnja/ Crown	SKUPAJ/ TOTAL	Prsna v./ Breast h.	Sredina/ Middle	Krošnja/ Crown	SKUPAJ/ TOTAL	Prsna v./ Breast h.	Sredina/ Middle	Krošnja/ Crown	SKUPAJ/ TOTAL
Drevo/ Tree 1	16,2	16,9	16,7	<b>16,5</b>	11,1	12,1	11,5	<b>11,5</b>	8,6	9,8	9,4	<b>9,2</b>
	0,93	1,06	1,37	1,12	1,22	0,93	0,91	1,13	1,45	0,94	0,80	1,24
Drevo/ Tree 2	19,4	20,2	20,5	<b>20,0</b>	13,5	13,9	13,6	<b>13,7</b>	10,3	9,7	10,3	<b>10,1</b>
	1,57	1,92	2,06	1,82	1,10	1,55	1,44	1,32	1,53	1,46	1,67	1,52
Drevo/ Tree 3	19,2	20,3	19,3	<b>19,6</b>	12,9	13,3	12,3	<b>12,8</b>	8,9	11,1	9,8	<b>9,9</b>
	1,99	2,33	1,86	2,06	1,94	1,72	1,41	1,72	1,73	2,41	0,94	1,99

	Modul elastičnosti zračno suhega lesa / Modulus of elasticity of dry wood											
	$E_{Uz}$ [GPa]				$E_f$ [GPa]				$E_s$ [GPa]			
	Prsna v./ Breast h.	Sredina/ Middle	Krošnja/ Crown	SKUPAJ/ TOTAL	Prsna v./ Breast h.	Sredina/ Middle	Krošnja/ Crown	SKUPAJ/ TOTAL	Prsna v./ Breast h.	Sredina/ Middle	Krošnja/ Crown	SKUPAJ/ TOTAL
Drevo/ Tree 1	18,6	18,7	18,5	<b>18,6</b>	14,5	14,4	14,6	<b>14,5</b>	11,8	12,2	12,2	<b>12,0</b>
	1,23	0,80	0,65	0,96	1,08	1,39	0,85	1,14	1,32	1,94	1,15	1,52
Drevo/ Tree 2	20,5	21,1	20,9	<b>20,8</b>	16,6	17,5	16,2	<b>16,8</b>	13,8	14,6	14,2	<b>14,2</b>
	2,44	2,29	1,86	2,21	1,88	1,99	1,67	1,90	1,58	1,98	1,78	1,77
Drevo/ Tree 3	21,4	21,1	19,6	<b>20,8</b>	17,6	16,7	16,6	<b>17,0</b>	15,0	14,1	14,1	<b>14,5</b>
	1,71	1,09	1,29	1,58	1,28	2,01	1,46	1,59	1,96	1,45	1,69	1,75

Preglednica 3: Upogibna trdnost sveže in osušene bukovine, določena na treh višinah izbranih dreves. V vrstici pod vrednostmi  $s_{maks}$  so podani standardni odkloni.

	Upogibna trdnost svežega lesa/ Bending strength of green wood $\sigma_{maks}$ [MPa]				Upogibna trdnost zračno suhega lesa/ Bending strength of dry wood $\sigma_{maks}$ [MPa]			
	Prsna v./ Breast h.	Sredina/ Middle	Krošnja/ Crown	SKUPAJ/ TOTAL	Prsna v./ Breast h.	Sredina/ Middle	Krošnja/ Crown	SKUPAJ/ TOTAL
Drevo / Tree 1	62,8	66,6	66,7	<b>65,0</b>	109,1	110,1	112,4	<b>110,3</b>
	11,19	4,92	7,11	8,73	13,06	18,33	10,03	14,33
Drevo / Tree 2	75,2	77,5	77,2	<b>76,6</b>	137,4	136,2	118,7	<b>132,3</b>
	18,93	16,99	13,54	17,05	14,61	11,74	18,79	16,54
Drevo / Tree 3	64,9	79,4	68,3	<b>70,6</b>	134,0	124,2	126,1	<b>128,9</b>
	9,35	10,65	11,17	11,73	19,72	15,61	10,45	16,56

Table 3: Bending strength of green and dry beech wood at three heights in the tree. In the rows below  $s_{maks}$  values, standard deviations are given (\*comma is used for decimal point).

ko se oba dinamično določena modula elastičnosti med seboj razlikujeta za 24 %.

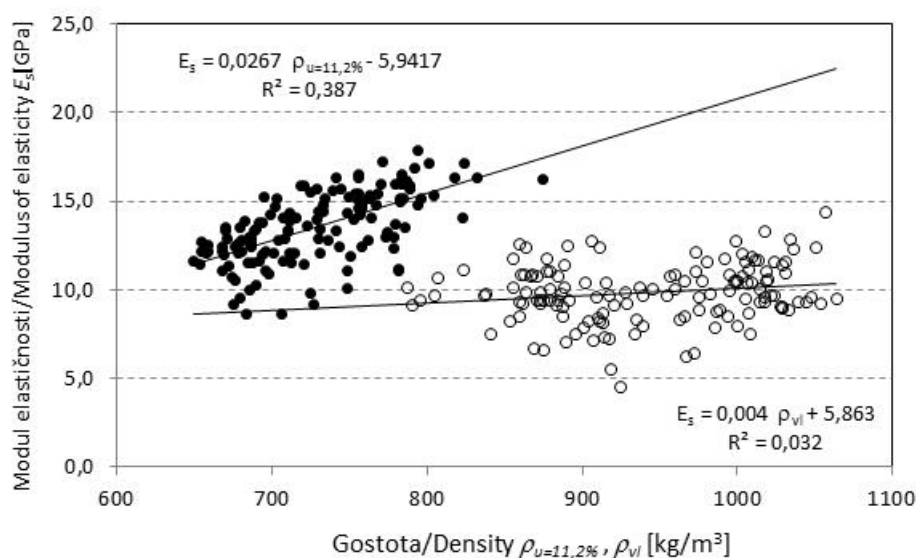
Višji moduli elastičnosti suhega lesa pri vseh metodah so pričakovani. Primerjava vrednosti modula elastičnosti v svežem in suhem stanju pa kaže, da je statična metoda upogiba najbolj občutljiva za spremembo vlažnosti lesa.

Razlike med upogibno trdnostjo sveže in osušene bukovine so bile še višje kot v primeru modula elastičnosti (preglednica 3). Upogibna trdnost bukovine v svežem stanju je predstavljala povprečno le 60 % dosežene vrednosti v suhem stanju, pri posamičnih drevesih tudi manj. Značilnega trenda padanja upogibne trdnosti z višino dreves, tako kot v primeru gostote lesa, ne moremo potrditi.

Pri preizkušanju svežega lesa je bila nekoliko presenetljiva nizka povezava med gostoto lesa in modu-

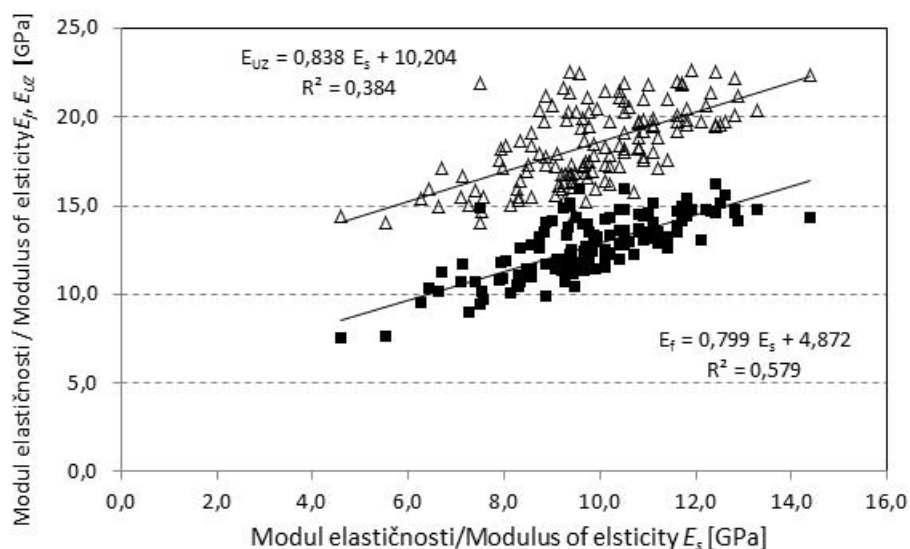
lom elastičnosti, določenim s statičnim upogibom (slika 4). Neznačilna korelacija je posledica visoke začetne vlažnosti lesa, kjer večji delež proste vode bistveno prispeva k večji gostoti, medtem ko imajo mehanske lastnosti nad točko nasičenja celičnih sten konstantno vrednost. Slaba odvisnost modula in gostote pomeni za prakso tudi manjšo zanesljivost metode za razvrščanje sveže bukovine v trdnostne razrede. Vsekakor je pri razvrščanju svežega žaganega lesa še vedno zelo pomembna tudi vizualna ocena vpliva rastnih posebnosti na trdnostne karakteristike lesa. Na osušenem lesu je bil determinacijski koeficient večji in s tveganjem 0,01 lahko sklepamo, da med gostoto in modulom elastičnosti obstaja korelacijska povezava.

Razvrščanje lesa v definirane trdnostne razrede pri uvajanje nedestruktivnih metod zahteva njihovo primerno zanesljivost. Oba modula elastičnosti, določena



Slika 4: Odvisnost modula elastičnosti, določenega s statičnim upogibom v odvisnosti od gostote lesa pri vlažnosti 11,2% ( $\rho_{u=11,2\%}$ ) (o) in od gostote v svežem stanju ( $\rho_{vl}$ ) (•)

Fig. 4: Dependence of modulus of elasticity determined by static bending test ( $E_s$ ) on density of dry wood ( $\rho_{u=11,2\%}$ ) and on density of green wood ( $\rho_{vl}$ ) (•)



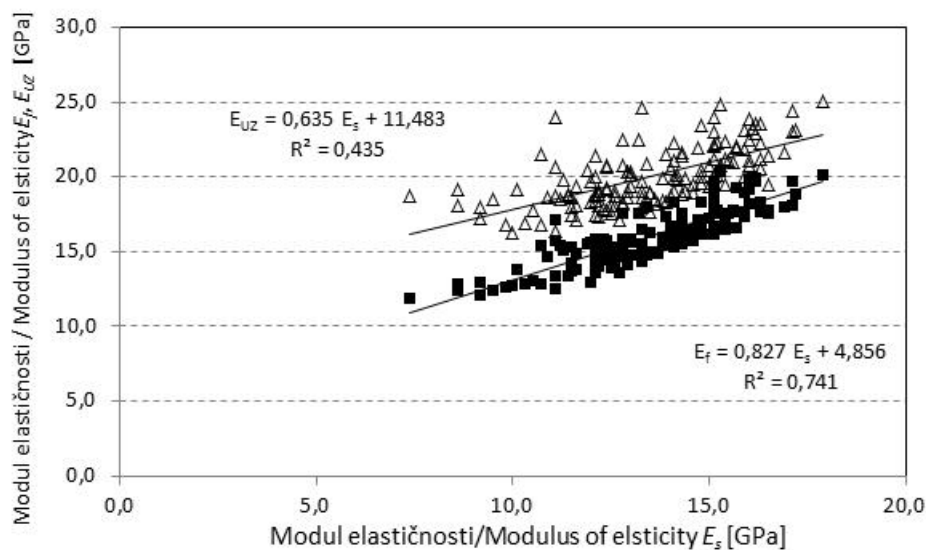
**Slika 5:** Korelacija elastičnih modulov, določenih z dinamičnim testom ( $E_{UZ}$  in  $E_f$ ) z modulom elastičnosti, določenim s statičnim upogibom ( $E_s$ ) v svežem lesu

**Fig. 5:** Correlations of the modulus of elasticity determined by ultrasound velocity ( $E_{UZ}$ ) and by frequency response ( $E_f$ ) with modulus of elasticity determined by standard static test ( $E_s$ ) in green wood

z dinamičnimi testi, kažeta na korelacijsko odvisnost od elastičnega modula, določenega s statičnim preizkusom (slika 5), vendar pa v obeh primerih z znatnim premikom, ki je večji pri modulu elastičnosti določenim z ultrazvočno metodo. Višje vrednosti modulov elastičnosti, izmerjenih z dinamičnimi testi, pripisujemo neenakomernosti zgradbe lesa, saj pri standardnem preizkusu praviloma določimo modul na »šibkejšem« mestu preizkušanca, medtem ko z drugima metodama določimo povprečno vrednost (Ross in Pellerin, 1991, Hansen, 2006, Ross, 2015). Napovedi so zanesljivejše

pri preizkušanju suhega lesa (slika 6), med metodama pa je primernejša metoda frekvenčnega odziva.

Zaradi znane korelacije med gostoto in modulom elastičnosti (Gorišek, 2009; Niemz, 2006) se v praksi togost lesa pogosto izrazi s specifičnim modulom elastičnosti ( $E/\rho$ ). S specifičnim modulom elastičnosti lahko vrednotimo vpliv strukturnih lastnosti materiala na njegovo togost. Rezultati kažejo, da je bila variabilnost specifičnega modula elastičnosti znatno manjša kot variabilnost običajnega modula elastičnosti (preglednica 4). Rezultati so potrdili bistveno večjo speci-



**Slika 6:** Korelacija elastičnih modulov, določenih z dinamičnim testom ( $E_{UZ}$  in  $E_f$ ), z modulom elastičnosti, določenim s statičnim upogibom ( $E_s$ ) v osušenem lesu

**Fig. 6:** Correlations of the modulus of elasticity determined by ultrasound velocity ( $E_{UZ}$ ) and by frequency response ( $E_f$ ) with modulus of elasticity determined by standard static test ( $E_s$ ) in dry wood



Preglednica 4: Specifični modul elastičnosti, določen s hitrostjo ultrazvoka ( $E_{UZ}/\rho$ ), s frekvenčnim odzivom ( $E_f/\rho$ ) in s statičnim upogibnim testom ( $E_s/\rho$ ), pri sveži in osušeni bukovini ter osnovna statistika

Table 4: Specific modulus of elasticity determined by ultrasound velocity ( $E_{UZ}/\rho$ ), by frequency response ( $E_f/\rho$ ) and at static bending test ( $E_s/\rho$ ) for green and dry beech wood and elementary statistics (\*comma is used for decimal point)

	Specifični modul elastičnosti svežega lesa / Specific modulus of elasticity of green wood			Specifični modul elastičnosti osušenega lesa / Specific modulus of elasticity of dry wood		
	$E_{UZ}/\rho_{green}$	$E_f/\rho_{green}$	$E_s/\rho_{green}$	$E_{UZ}/\rho_{11,2\%}$	$E_f/\rho_{11,2\%}$	$E_s/\rho_{11,2\%}$
Povprečje / Average	19,3	13,3	10,3	27,3	21,7	18,3
St. odklon / St. dev.	1,55	1,28	1,50	1,89	1,92	2,30
K. var. / C.V.	8,0	9,6	14,6	6,9	8,8	12,5
Min. / Min.	15,3	9,8	6,5	23,0	16,4	10,2
Maks. / Max.	22,5	15,7	13,6	34,7	25,5	22,6

fično togost lesa v suhem stanju.

Poleg variabilnosti na različnih višinah v deblu smo zabeležili tudi variabilnost lastnosti v radialni smeri preučevanih dreves (od stržena proti kambiju). Gostota je v večini primerov upadala od stržena proti kambiju. Obraten trend smo opazili za modul elastičnosti lesa v suhem stanju, in to na vseh preučevanih višinah dreves (slike 7 a, b, c), kar je pomembno z vidika izkoriščanja bukovine v konstrukcijske namene.

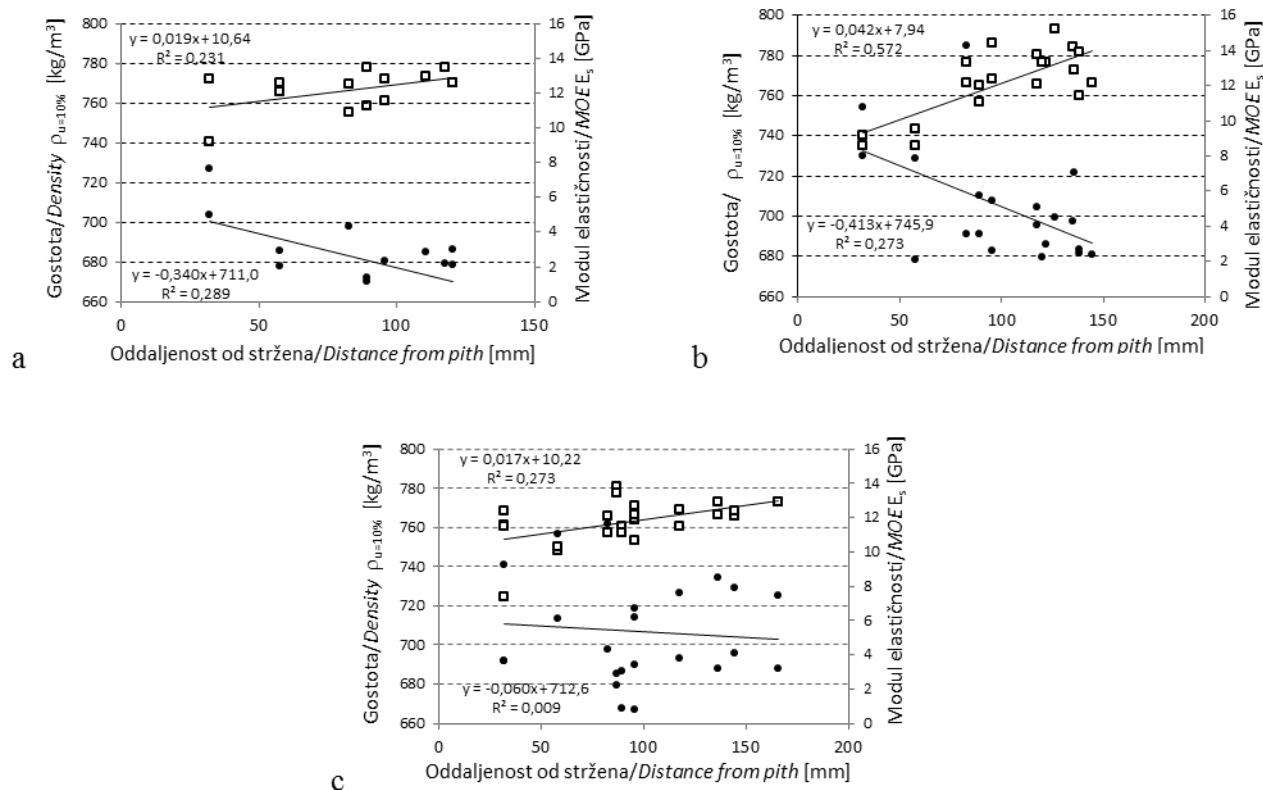
V inženirstvu se tudi tlačne in strižne trdnosti v določenih primerih uporabljajo kot dopustne kriterijske vrednosti za oceno mehanskih lastnosti lesa (pre-

glednica 5). V nasprotju s togostjo za strižno in tlačno trdnost ne moremo potrditi, da so vrednosti tik pod krošnjo višje kot na bazi dreves. To dokazuje tudi šibka korelacija teh veličin z gostoto lesa ( $R^2=0,236$ ) (slika 8). Nasprotno pa smo zaznali značilno zmanjševanje prečne tlačne trdnosti v smeri od stržena proti skorji dreves (slika 9).

#### 4 RAZPRAVA

#### 4 DISCUSSION

V pričujočem članku predstavljamo variabilnost fizikalnih in mehanskih lastnosti lesa dreves, ki so bila



Slika 7: Odvisnost gostote ( $\rho$ ) in statičnega modula elastičnosti ( $E_s$ ) od oddaljenosti od stržena na treh višinah drevesa: a – tik pod krošnjo; b – na sredini debla in c – na prsni višini

Fig. 7: Dependence of wood density ( $\rho$ ) and static modulus of elasticity ( $E_s$ ) on distance from the pith [mm] at three height levels: a – just below the crown, b – in the middle of the stem, and c – at breast height

Preglednica 5: Strižna trdnost v vzdolžnih ravninah (LR, LT) in tlačna trdnost v treh anatomskih smereh (L, R, T) pri izbranih drevesih z osnovno statistiko

Table 5: Shear strength in longitudinal planes (LR, LT) and compression strength in three anatomical directions (L, R, T) with elementary statistics (\*comma is used for decimal point)

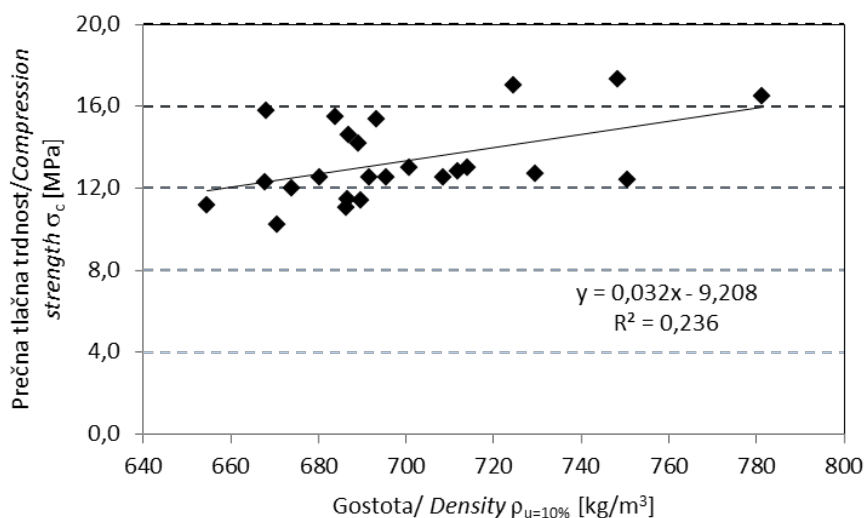
		Strižna trdnost/ Shear strength [MPa]		Tlačna trdnost / Compression strength [MPa]		
		LR ravnina LR plane	LT ravnina LT plane	Vzdolžno Longitudinal	Tangencialno Tangential	Radialno Radial
Drevo / Tree 1	Povprečje / Average	18,6	18,4	61,3	12,5	13,1
	St. od./ St. dev.	2,00	1,60	3,91	1,33	1,84
	K. v ar./ C.V.	10,7	8,7	6,4	10,7	14,1
	Min./Min.	10,2	14,9	51,7	9,5	10,3
	Maks./Max.	23,7	21,7	70,7	15,9	17,7
Drevo / Tree 2	Povprečje / Average	20,7	21,0	67,0	14,7	15,0
	St. od./ St. dev.	2,36	1,62	4,84	2,55	2,15
	K. var./ C.V.	11,4	7,7	7,2	17,4	14,3
	Min./Min.	15,5	18,1	55,0	10,4	10,6
	Maks./Max.	28,2	25,6	74,1	21,5	23,2
Drevo / Tree 3	Povprečje / Average	21,8	22,0	70,7	16,5	17,7
	St. od./ St. dev.	1,64	1,74	3,88	1,84	2,10
	K. var./ C.V.	7,5	7,9	5,5	11,1	11,9
	Min./Min.	18,2	18,5	63,3	12,8	14,2
	Maks./Max.	24,8	27,4	80,8	19,8	23,0

izruvana v žledolomu februarja 2014. Vzporedna študija na istih drevesih (Straže in sod., 2015) je pokazala, da se v prvi rastni sezoni po žledolomu ni zmanjšala gostota lesa zaradi delovanja destruktivnih gliv. Tako lahko variabilnost gostote lesa znotraj dreves obravnavamo kot variabilnost, značilno za običajno populacijo bukovine. V splošnem smo potrdili značilno in postopno upadanje gostote lesa od stržena proti skorji. Podobne šibke trende so zabeležili tudi v drugih študijah (Gryc in sod., 2008; Govorčin in sod., 1998; 2000; Možina, 1958). Gryc s sodelavci (2008) je v juvenilnem lesu zabeležil značilno višjo gostoto kot v adultnem lesu. Zaradi velikega deleža juvenilnega lesa v tanjših

sortimentih lahko to vpliva na povprečno gostoto hlovdovine.

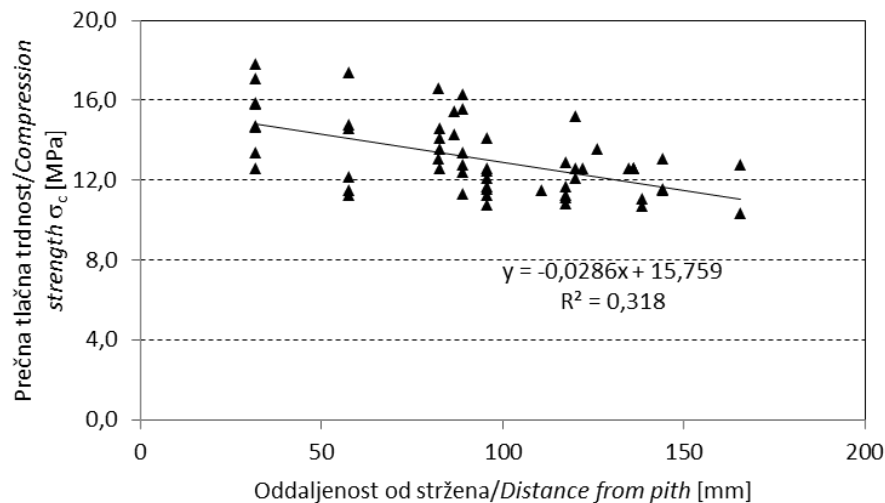
V naši študiji smo potrdili tudi značilne razlike v vertikalni porazdelitvi vlažnosti, ki je zelo pomembna zaradi odpornosti lesa poškodovanih dreves proti biološkemu škodljivcu (Straže in sod., 2015). Tik pod krošnjo je bila vlažnost perifernega beljavnega dela dokaj visoka in primerljiva z vlažnostjo v rastočih drevesih. V spodnjih delih debla pa smo zasledili padec vlažnosti pod 60 %, kar je manj kot v živih drevesih in povečuje verjetnost okužbe.

Bari in sodelavci (2015) navajajo, da bi pri znižani vlažnosti lahko pričakovali, kljub temu da ni padla



Slika 8: Odvisnost prečne tlačne trdnosti ( $\sigma_c$ ) od gostote suhega lesa ( $\rho_{11,2\%}$ )

Fig. 8: Compression strength perpendicular to the grain ( $\sigma_c$ ) versus dry wood density ( $\rho_{11,2\%}$ )



**Slika 9:** Odvisnost prečne tlačne trdnosti ( $\sigma_c$ ) od oddaljenosti od stržena pri suhem lesu ( $u = 11,2\%$ )

**Fig. 9:** Compression strength perpendicular to the grain ( $\sigma_c$ ) vs. distance from the pith [mm] for dry wood ( $MC = 11.2\%$ )

pod točko nasičenja celičnih sten, tudi spremembe mehanskih lastnosti lesa. Naša raziskava sprememb mehanskih lastnosti ni potrdila. Izmerjene trdnosti, t.j. upogibna, tlačna in strižna trdnost, so primerljive s podatki v literaturi v svežem kot tudi suhem stanju (Divos in sod., 1998; Fajdiga in sod., 2015; Govorčin in sod., 2000; Možina, 1958; Niemz, 1993; Skarvelis in Mantanis, 2013; Straže in sod., 2016).

Raziskava predstavlja tudi radialno variabilnost gostote in mehanskih lastnosti in prispeva k boljšemu poznavanju lastnosti bukovine. Kljub široki uporabi bukovine je radialna variabilnost lastnosti manj znana kot npr. pri bolj raziskanih iglavcih, kjer velja, da se mehanske lastnosti v splošnem izboljšujejo z oddaljenostjo od stržena proti periferiji debla (Kliger in sod., 1995; Straže in Gorišek, 2000; Zobel in Buijtenen, 1998). Pri bukovini trendi niso tako jasni, vendar naša študija kaže, da ima les bliže strženu višjo gostoto, a nižjo togost in upogibno trdnost vzdolž lesnih vlaken ter višjo prečno tlačno trdnost. Pri tem kaže, da kljub potrjenemu vplivu gostote na modul elastičnosti (sliki 4) k togosti lesa verjetno prispeva tudi značilna anatomska zgradba juvenilnega lesa. Predvidevamo, da imata pomembno vlogo še dolžina vlaken in njihov potek, zanemariti pa ne smemo niti cilindrične strukture preizkušancev na prečnem prerezu (Koltzenburg, 1967).

Primerjava modulov elastičnosti, določenih z merjenjem hitrosti ultrazvočnega preleta ( $E_{uz}$ ), z ugotavljanjem lastnih frekvenc ( $E_f$ ) in s standardiziranim statičnim testom ( $E_s$ ) kaže na značilne razlike med rezultati, dobljenimi z različnimi metodami (preglednica 2 in sliki 5 in 6). Dobljene vrednosti so sicer primerljive z literaturo (Hering in sod., 2012; Gornik-Bučar in Bučar, 2011; in Ilic, 2003; Ilic, 2001; Ozyhar in sod., 2012;

Skarvelis in Mantanis, 2013). Večje vrednosti modula elastičnosti, določenega iz frekvenčnega odziva, lahko pojasnimo z zajemanjem povprečnih značilnosti na celotnem preizkušancu (Hansen, 2006). Pri obeh dinamičnih metodah pa ima na višanje vrednosti modula elastičnosti značilen vpliv tudi krajšanje karakterističnega časa (Divos in Tanaka, 2005; Ouis, 2002). Po drugi strani pa pri statičnem testiranju lastnosti šibkih mest pomembno vplivajo na nižanje vrednosti modula elastičnosti (Niemz, 1993).

V tej raziskavi se še posebej izkaže izrazit vpliv lesne vlažnosti in gostote na vrednosti modula elastičnosti, določenega s pomočjo obeh nedestruktivnih dinamičnih metod. Posledično se vrednosti modula elastičnosti, določenega iz frekvenčnega odziva ter s hitrostjo ultrazvoka, bistveno razlikujeta od vrednosti, ki so bile določene pri statičnem testiranju. Ti metodi bi bili v razmerah visoke vlažnosti zato manj primerni za oceno togosti in razvrščanje konstrukcijskega lesa. Če bi ju želeli uporabiti, bi morali poznati še druge parametre. Ena izmed možnosti za izboljšanje ocene mehanskih lastnosti lesa je določanje specifičnega modula elastičnosti. Variabilnost specifičnega modula elastičnosti v tej študiji je bila znatno manjša kot pri običajnem modulu elastičnosti in kot jo tudi sicer poznamo iz literature o mehanskih lastnostih lesa (Panshin in de Zeeuw, 1980).

## 5 ZAKLJUČKI

### 5 CONCLUSIONS

Gostota lesa v bukovih deblih variira. Ugotovili smo značilni vzorec porazdelitev gostote, ki se po višini drevesa povečuje. Gostota variira tudi v radialni smeri in se od stržena proti periferiji rahlo zmanjšuje, vendar tu ne moremo potrditi tako značilnih porazdelitev.

V bukovih deblih smo zaznali tudi variiranje togosti in trdnosti lesa. Primerjava mehanskih trdnosti z gostoto je nepričakovano pokazala, da se mehanske lastnosti, z izjemo prečne tlačne trdnosti, povečujejo od stržena proti periferiji, medtem ko se gostota rahlo zmanjšuje. To nakazuje, da pri bukovini s pomočjo gostote ne moremo vedno zanesljivo napovedovati mehanskih lastnosti.

Uporaba nedestruktivnih metod za določanje togosti kaže spodbudne rezultate, ki so bolj zanesljivi, kadar ocenjujemo togost osušenega lesa. Zaradi pestre in raznolike strukture lesa bukve in drugih listavcev bo v prihodnje treba preučiti še več dejavnikov, ki vplivajo na togost kot tudi trdnost lesa. Za večjo zanesljivost napovedovanja trdnosti lesa z določanjem modula elastičnosti priporočamo hkratno določanje vizualnih značilnosti lesa.

Preučevana bukovina je imela v svežem stanju upogibno trdnost celo višjo, kot jo navaja literatura. Z osušitvijo lesa do povprečne 11,2-odstotne lesne vlažnosti se je upogibna trdnost v suhem stanju povečala celo do 98 %.

## 5 SUMMARY

In February 2014, Slovenia was affected by a severe ice storm which damaged forest trees in more than half of the forest area in Slovenia. Particularly extensive damage occurred on trees of beech (*Fagus sylvatica* L.) which represents more than 32 % in the Slovenian wood stock.

The effects of storms in the forests generally result in various injuries to trees, such as broken branches and parts or whole crowns; the whole trees can be blown down as well. The extent of damage to trees after a storm affects tree survival and quality of the wood. Quality and, consequently, the price of wood on the market largely depend on its physical and mechanical properties.

Beech wood can be used for a great variety of products if we respect its low natural durability. The wood of trees damaged in storms is partly protected against pests as long as its moisture content is high. As opposed to broken trees, the blown down trees can preserve high moisture content of the wood, if the roots preserve contact with the ground and provide uninterrupted supply of water. For maintaining adequate wood quality, it is also important that the blown down tree is protected from direct sunlight causing drought stress and that the stem is not in direct contact with the ground. Such conditions presumably enable preservation of wood properties, which depend on tree form, wood anatomy, genetics, site and climatic conditions, prove-

nance, size and age of a tree. Wood anatomy and particularly wood density are considered to be the most important wood properties. The density is closely related to physical, mechanical and technological properties, which affect processing and end use of the wood. Modern wood processing requires adequate and simple methods to characterize its technological properties, which depend on the heterogeneity and variability of wood structure. Therefore, the main objective of the present study was to determine basic physical and mechanical properties of beech wood and their spatial variability in the stems by using standard and nondestructive methods to determine the modulus of elasticity. The study was made on beech trees, which were blown down and eventually sampled at the end of the first growing season after the ice storm. We also checked possible changes in physical and mechanical properties due to damage in the storm.

We studied three beech trees from a mixed deciduous forest on the southern slopes of Rašica near Ljubljana, Slovenia, which were blown down during the February 2014 ice storm and developed their leaves in the following growth season. They were differently exposed and damaged. At the end of the 2014 growing season we collected wood samples in the form of cylinders at three different height levels of each tree: breast height (X1), half the distance from breast height to the crown (X2), and just below the crown (X3). Each of the cylinders was given a model coordinate grid on its cross-section. In this way we gained a systematic radial distribution of the specimens with dimensions of 28 mm x 50 mm and length of 550 mm. Half of the specimens were tested in green condition, while the other half were tested in air-dry condition obtained after drying and equilibrating in normal climate (temperature 20°C, relative air humidity 65%). The specimens were non-destructively tested by determining the velocity of ultrasound along the wood fibres ( $E_{uz}$ ) and analyzing the frequency response in flexural vibration ( $E_f$ ). In this way, we determined the dynamic modulus of elasticity in green and dry condition. On the same stratum of samples, we also performed a standard 4-point bending test, and determined static modulus of elasticity and bending strength ( $E_s$ ). These samples were then also used to determine the compressive strength in all three anatomical directions and shear strength on the longitudinal radial (LR) and tangential (LT) planes. Finally, we determined the density and moisture content of the wood.

As opposed to our expectations, we could not confirm any significant decrease in wood density at the end of the first growing season after the ice damage.

The moisture content of wood along the tree stems and in directions of the pith to the bark always exceeded 60 %, which is above the critical limit and prevented the spread of biological pests.

Mechanical tests have confirmed the correlation between the moduli of elasticity obtained with the non-destructive ultrasonic method ( $E_{uz}$ ) and the frequency response at the flexural vibration ( $E_p$ ) with the static modulus of elasticity ( $E_s$ ). However, the dynamic moduli have been up to 43% ( $E_{uz}$ ) and between 25% and 36% ( $E_p$ ) higher, compared to the static modulus of elasticity ( $E_s$ ). Comparison of green and dry wood has shown that the static bending is the most sensitive to changes in moisture content, whereas the two dynamic methods proved to be less reliable if the wood had high moisture content.

The study also showed that we need to take into account wood moisture content when using wood density to predict wood quality. The results showed significant correlation between stiffness and bending strength of air-dry wood, with an average moisture content of 11.2% (CV = 1.4%). This correlation was not significant when moisture content was high (above 60%). Otherwise, the bending strength of beech wood in the green condition represented, on average, only 60% or less of the bending strength in dry conditions. As we observed a trend of decreasing wood density with height level of the tree, we could not detect such trend in the case of bending strength.

In dry wood, increasing density significantly affected increase in the moduli of elasticity as determined by all three methods, when comparing the absolute values of the moduli. By applying specific modulus of elasticity ( $E/\rho$ ) we offset the impact of the density and thus obtained information on the impact of structural properties on wood stiffness. The variability of the specific modulus of elasticity showed significant reduction in comparison with a conventional modulus of elasticity. Dry wood had significantly higher specific modulus of elasticity than the green wood.

We confirmed the variability of the properties in the radial direction of the studied trees, where the density and the compressive strength perpendicularly to wood grain mainly decreased from the pith to the cambium. The opposite trend was observed in the shear strength and the modulus of elasticity of dry wood at all height levels of the studied trees. This is important when using beech wood for construction purposes. As opposed to stiffness, we could not confirm that the shear and compressive strengths had higher values below the crown than at the base of the trees.

## 6 ZAHVALA

### 6 ACNOWLEDGEMENTS

Delo je nastalo v okviru programske skupine P4-0015 in projekta V4-1419 »Racionalna raba lesa listavcev s poudarkom na bukovini« Ciljnega raziskovalnega programa (CRP) "Zagotovimo.si hrano za jutri", ki ga financirata Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (MKGP) in Javna agencija za raziskovalno dejavnost republike Slovenije (ARRS).

## 7 VIRI

### 7 REFERENCES

- ASTM. 2000. Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. In ASTM D143-94 (West Conshohocken: ASTM International).
- Bari E., Taghiyari H.R., Mohebbi B., Clausen C.A., Schmidt O., Ali M., Ghanbary T., J. V.M. 2015. Mechanical properties and chemical composition of beech wood exposed for 30 and 120 days to white-rot fungi. *Holzforschung*, 69, 5: 587-593
- Boström L. 1999. Determination of the modulus of elasticity in bending of structural timber – comparison of two methods. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 57, 2: 145-149
- Bouriaud O., Bréda N., Le Moguédec G., Nepveu G. 2004. Modelling variability of wood density in beech as affected by ring age, radial growth and climate. *Trees*, 18, 3: 264-276
- Čufar K., Gričar J., Prislán. P. 2012a. Zgradba in nastajanje lesa in skorje bukve ter dendrokonologija. V: *Bukovi gozdovi v Sloveniji: ekologija in gospodarjenje*. Bončina A. (ur.). Ljubljana, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, Biotehniška fakulteta: 115-124
- Čufar K., Gorišek Ž., Merela M., Pohleven F. 2012b. Lastnosti bukovega lesa, predelava, problematika in raba v arhitekturi. V: *Bukovi gozdovi v Sloveniji : ekologija in gospodarjenje*. Bončina A. (ur.). Ljubljana, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, Biotehniška fakulteta: 445-458
- Diaconu D., Wassenberg M., Spiecker H. 2016. Variability of European beech wood density as influenced by interactions between tree-ring growth and aspect. *Forest Ecosystems*, 3, 6:1-9
- Divos F., Tanaka T. 2005. Relation between static and dynamic modulus of elasticity of wood. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 1, 105-110
- Divos F., Tanaka T., Nagao H., Kato H. 1998. Determination of shear modulus on construction size timber. *Wood Science and Technology*, 32, 6: 393-402
- Evans R., Ilic J. 2001. Rapid prediction of wood stiffness from microfibril angle and density. *Forest Products Journal*, 51, 53-57
- Fajdiga G., Zafošnik B., Gospodarič B., Straže A. 2015. Compression test of thermally-treated beech wood: Experimental and numerical analysis. *Bioresources*, 11, 223-234
- Gorišek Ž. 2009. Les : zgradba in lastnosti : njegova variabilnost in heterogenost. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 178 str.
- Gorišek Ž., Pervan S., Trop M., Straže A. 2014. Interplay of density, moisture content and specimen size on static and dynamic determination of stiffness properties of beech wood. V: *IAWS & Hardwood Conference*. Sopron. 30-31
- Gornik Bučar D., Bučar B. 2011. Strength grading of structural timber using the single mode transverse damped vibration method. *Wood Research* 56 (1) 67-76
- Govorčin S., Sinkovič T., Trajkovič J. 1998. Distribution of properties in use for oak, beech and fir-wood in a radial direction. *Drvena Industrija*, 45, 199-204

- Govorčin S., Sinković T., Trajković J. 2000. Some physical and mechanical properties of beech wood grown in Croatia. *Wood Research*, 48, 39-52
- Grabianowski M., Manley B., Walker J.C.F. 2006. Acoustic measurements on standing trees, logs and green lumber. *Wood Science and Technology*, 40, 3: 205-216
- Gryc V., Vavrčík H., Rybníček M., Přemyslovská E. 2008. The relation between the microscopic structure and the wood density of European beech (*Fagus sylvatica* L.) *Journal of forest science*, 54, 4: 170-175
- Hansen H.J. 2006. Acoustic Studies on Wood. In *The New Zealand School of Forestry*. University of Canterbury, Canterbury, pp. 146.
- Hering S., Keunecke D., Niemz P. 2012. Moisture-dependent orthotropic elasticity of beech wood. *Wood Science and Technology*, 46, 5: 927-938
- Ilic J. 2001. Relationship among the dynamic and static elastic properties of air-dry *Eucalyptus delegatensis* R. Baker. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 59, 3: 169-175
- Ilic J. 2003. Dynamic MOE of 55 species using small wood beams. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61, 3: 167-172
- Kliger I.R., Perstorper M., Johansson G., Pellicane P.J. 1995. Quality of timber products from Norway spruce. *Wood Science and Technology*, 29, 6: 397-410
- Koltzenburg C. 1967. The effect of light intensity, crown class and site on the properties of beechwood (*Fagus sylvatica* L.). *Holz als Roh- und Werkstoff*, 25, 12: 465-473
- Kropivšek J., Čufar K. 2015. Potencialna raba bukovine in vrednotenje dodane vrednosti v izdelkih iz bukovine. 73, *Gozdarski vestnik*, 10: 470-478
- Merela M., Habjan P., Čufar K. 2016. Nastajanje ksilemske in floemske branike pri bukvah, poškodovanih v žledolomu. *Acta Silvae et Ligni*, 110, 3-13
- Možina I. 1958. Komparativna raziskovanja lesa domačih drevesnih vrst. Bukev. Ljubljana, 66 str.
- Niemz P. 2006. *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Zürich, Carl Hanser Verlag GmbH & Co.: str.
- Ouis D. 2002. On the frequency dependence of the modulus of elasticity of wood. *Wood Science and Technology*, 36, 4: 335-346
- Ozyhar T., Hering S., Niemz P. 2012. Moisture-dependent elastic and strength anisotropy of European beech wood in tension. *Journal of Materials Science*, 47, 16: 6141-6150
- Panshin A.J., de Zeeuw C.D. 1980. *Textbook of Wood Technology. Structure, Identification, Properties and Uses of a Commercial Woods of the United States and Canada*. Fourth Edition. New York, McGraw-Hill Book: 722 str.
- Prislan P., Piškur M., Gornik B.D. 2015. Stanje žagarske industrije v Sloveniji 2013/2014. *Gozdarski vestnik*, 73, 442-453
- Prislan P., Koch G., Čufar K., Gričar J., Schmitt U. 2009. Topochemical investigations of cell walls in developing xylem of beech (*Fagus sylvatica* L.). *Holzforschung*, 63, 4: 482-490
- Prislan P., Gričar J., de Luis M., Smith K.T., Čufar K. 2013. Phenological variation in xylem and phloem formation in *Fagus sylvatica* from two contrasting sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 180, 0: 142-151
- Piškur M., Krajnc N. 2012. Tokovi in rabe okroglega bukovega lesa. V: BONČINA, Andrej (ur.). *Bukovi gozdovi v Sloveniji : ekologija in gospodarjenje*. Ljubljana: Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, Biotehniška fakulteta, 459-469
- Piškur M., Rogelja T., Krajnc N. 2014. Tokovi okroglega lesa v Sloveniji za leto 2013. Ljubljana: Gozdarski inštitut Slovenije, Silva Slovenica, 6 str.
- Ross R.J., Pellerin R.F. 1991. *Nondestructive Evaluation of Wood—Past, Present, and Future*. V: *Nondestructive Characterization of Materials IV*. Ruud C.O., Bussière J.F., Green R.E. (ur.). Boston, MA, Springer US: 59-64
- Ross R.J. 2015. *Nondestructive Evaluation of Wood*. Second edition. Forest Products Laboratory. Medison, 169 str.
- Skarvelis M., Mantanis G.I. 2013. Physical and mechanical properties of beech wood harvested in the Greek public forests. *Wood research*, 58, 1: 1-7
- Sonderegger W., Mandallaz D., Niemz P. 2008. An investigation of the influence of selected factors on the properties of spruce wood. *Wood Science and Technology*, 42, 4: 281-298
- EN 13183-1. 2002. Moisture content of a piece of sawn timber - Part 1: Determination by oven dry method. Brussels, European Committee for Standardization
- Straže A., Gorišek Ž. 2000. Gostota in mehanske lastnosti smrekovine (*Picea abies* Karst.) in jelovine (*Abies alba* Mill.). *Les*, 52, 6: 185-190
- Straže A., Fajdiga G., Pervan S., Gorišek Ž. 2016. Hygro-mechanical behavior of thermally treated beech subjected to compression loads. *Construction and Building Materials*, 113, 28-33
- Straže A., Merela M., Krže L., Čufar K., Gorišek Ž. 2015. Fizikalne lastnosti bukovine po žledolomu. *Gozdarski vestnik*, 73, 10: 30-36
- Verrill S., Kretschmann D. 2009. Material Variability and Repetitive Member Factors for the Allowable Properties of Engineered Wood Products. *Journal of Testing and Evaluation*, 37, 6: 1-9
- Yin Y., Nagao H., Liu X., Nakai T. 2010. Mechanical properties assessment of *Cunninghamia lanceolata* plantation wood with three acoustic-based nondestructive methods. *Journal of Wood Science*, 56, 1: 33-40
- ZGS. 2015. Poročilo Zavoda za gozdove Slovenije o gozdovih za leto 2014 - Report of Slovenia Forest Service on forests for the year 2014, Zavod za gozdove, Ljubljana, 138 str.
- Zobel B.J., Buijtenen J.P.van. 1998. *Wood variation. Its causes and control*. Berlin, Springer-Verlag Berlin, 363 str.