

SPREMEMBE FIZIKALNIH LASTNOSTI HRASTOVEGA LESA IZ ZGODOVINSKIH KONSTRUKCIJ V ŽIVLJENJSKI DOBI

CHANGES IN PHYSICAL PROPERTIES OF OAK WOOD FROM HISTORICAL CONSTRUCTIONS DURING SERVICE LIFE

Aleš Straže^{1*}, Matjaž Dremelj¹, Ervin Žveplan¹, Katarina Čufar¹

UDK 630*814.7:630*812

Izvilleček / Abstract

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Izvilleček: Raziskali smo fizikalne lastnosti hrastovega lesa (*Quercus* sp.), pri katerem je od poseka minilo od 4 do 512 let in smo ga razdelili v stoletne starostne skupine 100-600. Mlajši les smo pridobili ob poseku dreves, starejši les pa iz zgodovinskih konstrukcij v Sloveniji. Izbrani les smo najprej dendrokronološko datirali, izdelali normirane vzorce za analize ter določili gostoto, barvo, dimenzijsko stabilnost in sorpcijske lastnosti. Vizualno in v CIELab barvnem prostoru smo ugotovili, da je barva jedrovine s starostjo postala temnejša. Pri starem hrastovem lesu smo ugotovili tudi manjšo higroskopskost in izboljšano dimenzijsko stabilnost, zlasti v tangencialni smeri, ter manjšo prečno krčitveno anizotropijo. Gostota hrastovega lesa se s staranjem ni spremenila, odvisna pa je bila od širine branik (naraščala je z večanjem deleža kasnega lesa). Rezultati nakazujejo, da na dimenzijsko stabilnost in higroskopskost poleg procesov staranja verjetno vpliva tudi mesto vgradnje in klimatska nihanja tekom uporabe lesa.

Ključne besede: les, hrast (*Quercus* sp.), staranje, barva, higroskopskost, dimenzijska stabilnost, sorpcija

Abstract: We examined the physical properties of oak wood (*Quercus* sp.) felled four to 512 years ago, grouped in age groups of 100-600 years. The wood originated from recently felled trees and from historical constructions in Slovenia. The selected wood was dendrochronologically dated. We made standardized samples and determined wood density, colour, dimensional stability and sorption properties. Visual and CIELab analyses showed that the colour of the heartwood became darker with age. Historical oak wood was characterised by lower hygroscopicity and higher dimensional stability, especially in the tangential direction, as well as reduced transverse shrinkage anisotropy compared to recently felled wood. The density of oak wood did not change with age, it was dependent on tree-ring widths and the proportion of latewood, and increased along with the proportion of latewood. Besides ageing, the location of wood during its service life and exposure to climate fluctuations also seemed to influence the dimensional stability and hygroscopicity of historical oak.

Keywords: wood, oak (*Quercus* sp.), ageing, colour, hygroscopicity, dimensional stability, sorption

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Les je naravni polimerni kompozit, ki je v času nastajanja v drevesu in v uporabi izpostavljen biodegradaciji, površinskim strukturnim spremembam in tudi staranju. V nekaterih pogojih uporabe lesa, zlasti ko gre za rabo lesa v notranjih prostorih, imata prva dva dejavnika lahko zanemarljiv učinek, glavna sprememb v materialu pa je posledica naravnega staranja. Potek naravnega staranja lesa v našem geografskem območju še ni povsem raziskan

in je le delno pojasnjen. Večinoma ga razumemo kot počasno degradacijo materiala, ki je posledica blagih kemijskih sprememb in nihanj notranjih napetosti zaradi higroskopske narave lesa in viskoelastičnosti materiala (Kranitz, 2014; Matsuo et al., 2011).

Proces naravnega staranja lesa večinoma velja za počasen in blag oksidativen proces zaradi kisika v zraku ali raztopljenega v vodi, in hidrolize zaradi vsebnosti kislin in vezane vode v lesu (Matsuo et al., 2011). Posledice staranja lesa se odražajo v njegovih lastnostih, kot npr. spremembi barve, spremenjeni higroskopsnosti in dimenzijski stabilnosti ter tudi spremembi nekaterih mehanskih lastnosti, kot je npr. zmanjšanje udarne žilavosti (Hudson McAulay, 2016; Kranitz, 2014). Na spremembo barve v lesu

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

* e-pošta: ales.straze@bf.uni-lj.si

imajo pomemben vpliv ekstraktivne snovi v celični steni, ker njihovi deleži s staranjem pri večini lesnih vrst naraščajo (Fengel & Wegener, 1989). Ugotovitve različnih študij se nekoliko razlikujejo - pri stari hrastovini so nekateri avtorji ugotovili povečan delež ekstraktivov (Kranitz, 2014), nekateri pa neznačilne razlike med recentno in staro hrastovino (Gawron et al., 2012). Ob staranju lesa so pri večini lesnih vrst zaznali upadanje svetlosti barve, hkrati pa so zabeležili tudi povečanje njene kromatičnosti. To so ugotovili tudi pri 210 let stari hrastovini (Kranitz, 2014).

Poleg spremembe deleža ekstraktivov se pri naravnem staranju lesa najpogosteje omenja tudi razgradnja hemiceluloz, ki so najmanj stabilne komponente lesa (Fengel & Wegener, 1989). Z IR-spektroskopskimi kemometričnimi kot tudi z analitskimi kemijskimi raziskavami so ugotovili zmanjšanje deleža prostih hidroksilnih skupin predvsem pri hemicelulozah, kar posledično privede do zmanjšanja hidrofilnosti in s tem do manjše ravnovesne vlažnosti lesa in večje dimenzijske stabilnosti (Nilsson & Rowell, 2012). Prav tako so zaznali spremembe v stopnji kristaliničnosti celuloze, ki se s staranjem hrastovega lesa povečuje (Gawron et al., 2012; Kohara & Okamoto, 1955). To pojasnjujejo z ustvarjanjem novih intermolekulskih vezi med celuloznimi verigami v amorfni področjih. Povečanje stopnje kristaliničnosti celuloze ima za posledico manjše nabrekanje lesa, manjšo higroskopnost ter višjo gostoto, trdoto in trdnost lesa.

V zgodovinskih stavbah so pohištvo, leseni izdelki in konstrukcije izpostavljeni spremenljivim klimatskim pogojem, ki imajo za posledico tudi dimenzijske spremembe lesa. Zaradi prečne krčitvene anizotropije lesa ter hkratnem pojavu vlažnostnih gradientov, ki jih povzroča nihanje klime, se nenehno spreminjajo notranje napetosti (Kranitz, 2014) posledično pa tudi spremembe geometrije, kar lahko privede do ireverzibilnih strukturnih deformacij lesa (Gorišek, 2009). Počasnejše spremembe fizikalnih lastnosti lesa tekom življenjske dobe izdelkov lahko pričakujemo pri predmetih večjih dimenzij in pri gostejših lesnih vrstah z manjšo difuzivnostjo za vodno paro.

Cilji te raziskave so bili, da na vzorcih dobro ohranjenega hrastovega lesa, posekanega v različnih obdobjih zadnjih 600 let, preverimo njegove fizikalne in sorpcijske lastnosti, ki so povezane s procesom staranja materiala. V ta namen smo podrobneje raz-

iskali barvo, higroskopnost na širšem vlažnostnem območju, dimenzijsko stabilnost in gostoto lesa.

2 MATERIAL IN METODE

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 VZORČENJE LESA

2.1 SAMPLING OF WOOD

Iz arhiva vzorcev lesa Oddelka za lesarstvo smo izbrali 32 prečnih odrezkov v zadnjih letih posekanih dreves ter hrastovih tramov iz ostrešij, nadstropnih konstrukcij, sten brunaric in drugih delov različnih objektov po Sloveniji, ki so bili predhodno raziskani v različnih dendrokronoloških študijah (Preglednica 1).

2.1.1 Dendrokronološka analiza in priprava preizkušancev

2.1.1 Dendrochronological analysis and sample preparation

Odrezke lesa za dendrokronološko raziskavo smo zbrusili na tračnem brusilnem stroju z brusnimi papirji granulacij št. 80, 120, 180, 240, 280, 320 in 400 in jih skenirali pri ločljivosti 1200 dpi ter od periferije proti strženu določili smer merjenja širin branik. Za merjenje širin branik ter širin ranega in kasnega lesa smo uporabili računalniški program Coorecorder 8.1.1, datiranje pa smo izvedli s programom TSAPWin. Zaporedje širin branik posameznega odrezka smo datirali z izboljšano standardno regionalno slovensko referenčno kronologijo hrasta (Čufar et al., 2008). S tem smo za vsako braniko na odrezku določili leto nastanka.

Za vsak odrezek smo na osnovi datuma zadnje branike pod skorjo ugotovili tudi leto poseka drevesa. Če skorja ni bila ohranjena, smo leto poseka drevesa ocenili, v pomoč nam je bil podatek o ohranjenosti beljave (Čufar et al., 2013). Leto poseka lesa smo šteli kot začetek staranja lesa. Na obodu odrezkov smo določili mesto kvadratov dimenzij 40 mm × 40 mm in nato izžagali preizkušance za nadaljnje raziskave (slika 1).

2.1.2 Določanje barve in gostote lesa

2.1.2 Determination of colour and density of wood

Barvo lesa smo določali na izžaganih kockah lesa iz prečnih odrezkov (slika 2), nominalnih dimenzij 40 mm × 40 mm × 40 mm, po standardizirani CIE-

Lab metodologiji. Na vsaki kocki smo na radialni površini s kolorimetrom X-Rite (OptotronicTM) opravili po dve meritvi, ter določili L^* koordinato svetlosti barve, ter barvni koordinati a^* in b^* . Določili smo še zasičenost oz. barvno kromatičnost C^* (En. 1). Celotno razliko barve lesa (ΔE^*), kot posledice staranja, glede na referenčno vrednost pri recentnem lesu smo določili po enačbi 2.

$$C^* = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2)$$

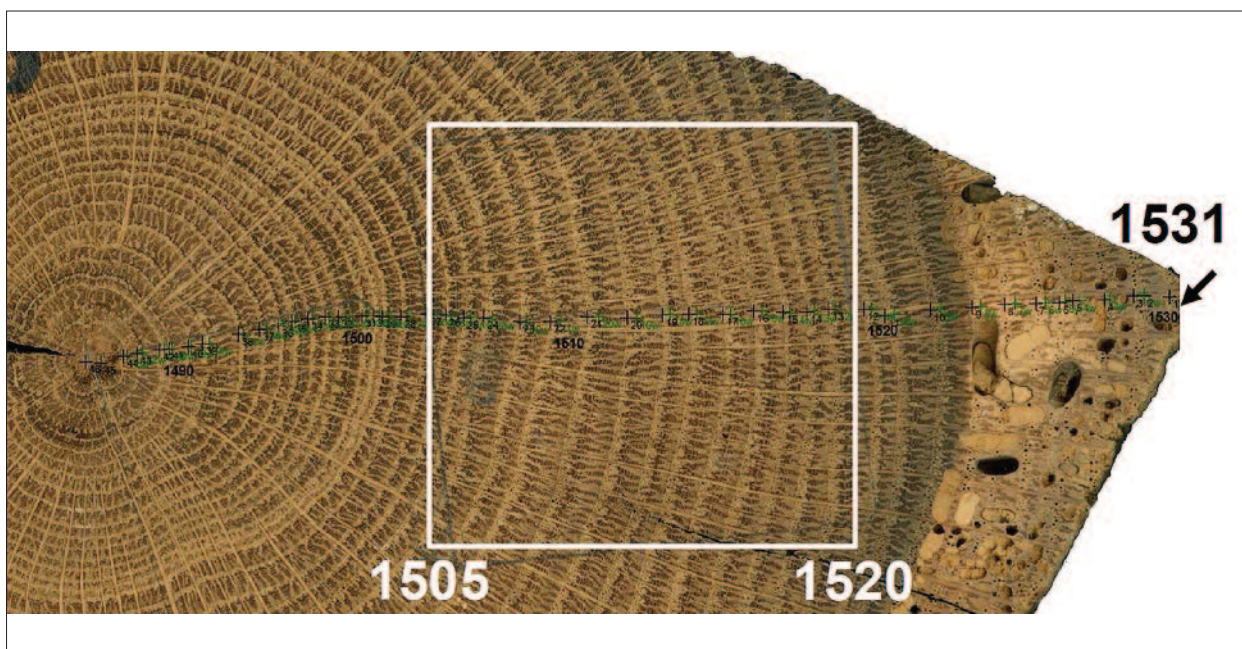
Kockam lesa, ki so bile uravnovešene v laboratorijskih pogojih pri 20 °C in 50 % relativni zračni vlažnosti, smo določili še maso ($\Delta m = \pm 0,001$ g) ter dimenzije ($\Delta x = \pm 0,01$ mm) za izračun volumna. Na podlagi teh meritev smo izračunali gostoto lesa, uravnovešenega pri navedenih pogojih (Gorišek, 2009).

2.1.3 Določanje higroskopnosti in dimenzijske stabilnosti lesa

2.1.3 Determination of hygroscopicity and dimensional stability of wood

Higroskopnost in dimenzijsko stabilnost lesa smo določali v sušilnem kanalu TLS-01 (Kambič d.o.o.), kjer smo tanke orientirane preizkušance (40 mm × 40 mm × 5 mm), izžagane iz kock, pri 20 °C izpostavili različni zračni vlažnosti (od 0 % do 90 % zračne vlažnosti; $\Delta \varphi = 10$ %) v adsorpcijskem in desorpcijskem procesu (slika 2). Po uravnovešenju ($\Delta t = 24$ h; $\Delta m \leq 0,1$ %) smo preizkušance stehali in jim določili ravnovesno vlažnost (u_r) ter izmerili prečne dimenzije (R, T). Na dobljenih sorpcijskih izotermah smo z razmerjem ravnovesne vlažnosti lesa v adsorpciji (u_{rAD}) in desorpciji (u_{rDES}) določili še velikost histeretne zanke.

Za določanje dimenzijske stabilnosti smo v procesu adsorpcije ($T = 20$ °C) izbrali dimenzije in maso preizkušancev pri spodnji ($\varphi = 20$ %) in zgornji meji ($\varphi = 80$ %) linearne higroskopskega območja lesa.



Slika 1. Odrezek z oznakami meritev po datiranju in določitve mesta odvzema preizkušanca za raziskave (bel kvadrat). Leto poseka drevesa in začetek naravnega staranja lesa smo določili na osnovi datacije zadnje branike pod skorjo (1531). Datirali smo vse branike. Preizkušanec (bel kvadrat) je vseboval branike, nastale med leti 1505 in 1520.

Figure 1. Oak wood with measurement marks after dating and location of the test sample (white square). The year of tree felling, i.e., the beginning of natural aging of wood was defined based on the date of the last formed tree-ring under the bark (1531). We dated all tree-rings. The sample within the white square contained tree-rings formed between 1505 and 1520.

Preglednica 1. Hrastovi preizkušanci različne starosti in podatki: število branik na odrezku, leto zadnje branike (dendrokronološka datacija zadnje branike blizu skorje), starost - leta po poseku (čas v letih od poseka do izvedbe eksperimenta). Vzorci v starostni skupini 100 so pridobljeni iz posekanih dreves, vzorci iz starostnih skupin 300-600 pa izvirajo iz zgodovinskih konstrukcij z oznakami: ABH – Banova hiša (Čufar et al., 2013), STI* - zvonik cerkve samostana Stična (Vovk, 2003), PIS* – grad Pišece (Čufar et al., 2014).*

Table 1. Oak samples of various ages with the following data: number of rings on the section, end date – year of the outermost tree-ring formation (dendrochronological dating of the last ring below the bark), age – years after tree felling (time between tree felling and execution of experiment), and age group. Samples in the age group 100 originate from recently felled trees, samples from the age groups of 300-600 originate from historical structures ABH – Ban's house (Čufar et al., 2013), STI* – bell tower of the church of the Stična Cistercian monastery (Vovk, 2003), PIS* – the castle of Pišece (Čufar et al., 2014).*

Šifra / Code	Število branik / Number of rings	Leto zadnje branike / End Date	Starost - leta po poseku / Years after tree felling	Starostna skupina / Age group
ROZ01B	123	2013	4	100
ROZ02B	116	2013	4	
ROZ05B	97	2013	4	
ROZ20B	156	2013	4	
ROZ10B	97	2012	5	
SRE13A	138	2002	15	
TIV02A	156	1995	22	
MOST-A	102	1994	23	
SOČ09B	78	1994	23	
TIV01CA	261	1994	23	
VRH02A	100	1994	23	
VEL07B	162	1993	24	
ABH08A	80	1735	282	300
ABH33A	55	1703	314	400
STI51A	118	1666	351	
STI16A	170	1661	356	
STI27A	127	1648	369	
STI01A	89	1645	372	
STI50A	84	1643	374	
STI15A	71	1640	377	
ABH05A	79	1630	387	
STI21A	91	1613	404	500
ABH24A	103	1611	406	
STI22A	62	1609	408	
ABH17A	48	1587	430	
STI24A	65	1578	439	
ABH06A	110	1567	450	
ABH01A	42	1532	485	
PIS07A	33	1514	503	600
PIS14A	46	1512	505	
PIS04A	22	1509	508	
PIS15A	33	1505	512	

Z izmerjenimi dimenzijami in masami preizkušancev smo izračunali kazalnike dimenzijske stabilnosti (Gorišek, 2009) in sicer: diferencialni nabrek (q) in koeficient nabrekanja (h) v radialni in tangencialni smeri ter kazalnike anizotropije krčenja kot so: razlika med tangencialnim in radialnim diferencialnim nabrekom ($q_T - q_R$), razmerje diferencialnih nabrekov v tangencialni in radialni smeri (q_T/q_R) in razlika med koeficientoma nabrekanja v radialni in tangencialni smeri ($h_T - h_R$). V istih mejah higroskopskega območja lesa smo določili še sorpcijski kvocient (s).



Slika 2. Kocke za določanje barve in gostote hrastovine (zgoraj) ter preizkušanci za določanje higroskopsnosti in dimenzijske stabilnosti (spodaj).
Figure 2. Cubes for determining the colour and density of oak (top) and specimens for determining hygroscopicity and dimensional stability (bottom).

Preglednica 2. Hrastovi preizkušanci: starostne skupine, število preizkušancev in leta po poseku za posamezno skupino.

Table 2. Oak samples: age groups, number of samples per group and years of tree felling for each group.

Starostna skupina / Age group	Število preizkušancev / Number of samples	Starost - leta po poseku / Years after tree felling
100	12	4 - 24
300	1	282
400	8	314 - 387
500	7	404 - 485
600	4	503 - 512

ficient nabrekanja (h) v radialni in tangencialni smeri ter kazalnike anizotropije krčenja kot so: razlika med tangencialnim in radialnim diferencialnim nabrekom ($q_T - q_R$), razmerje diferencialnih nabrekov v tangencialni in radialni smeri (q_T/q_R) in razlika med koeficientoma nabrekanja v radialni in tangencialni smeri ($h_T - h_R$). V istih mejah higroskopskega območja lesa smo določili še sorpcijski kvocient (s).

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 STAROST LESA

3.1 AGE OF WOOD

Z dendrokronološkim datiranjem smo za posamični odrezek iz kolotov in tramov določili leto nastanka vseh branik in ugotovili leto poseka drevesa, ki smo ga šteli za začetek naravnega staranja lesa (preglednica 1, slika 1).

Preizkušance smo razdelili v pet starostnih skupin z rangom 100 let (preglednici 1 in 2). Ker na razpoložljivost materiala iz preteklih obdobij ne moremo vplivati, je bilo število vzorcev po starostnih skupinah različno. Starostne skupine 100, 400, 500 in 600 so dobro zastopane, v starostnih skupinah 200 in 300 pa ni bilo nobenega vzorca oz. smo imeli en sam preizkušanec.

3.2 BARVA LESA

3.2 WOOD COLOUR

Preizkušanci so se razlikovali po barvi, ki je bila pri starejšem lesu temnejša (slika 3), s čemer potrjujemo, kar so pri hrastu in drugih lesnih vrstah pokazale tudi druge študije (Kranitz, 2014; Matsuo et al., 2011).



Slika 3. Videz tipičnih hrastovih preizkušancev od najmlajše do najstarejše starostne skupine 100 – 600 let.
Figure 3. Appearance of typical oak specimens sorted from the youngest to the oldest (age groups 100 – 600)

Vizualno zaznane spremembe barve smo potrdili tudi barvnometrično. Svetlost barve (L^*) hrastovega lesa je bila najvišja pri nedavno posekani hrastovini (starostna skupina 100; $L^* = 67,1$), s starostjo pa se je svetlost barve zmanjševala (preglednica 3). Najnižjo vrednost L^* smo določili pri hrastovini iz najstarejše skupine 600, v povprečju 56,6. Spremembo barvne kromatičnosti s starostjo hrastovine smo potrdili še pri a^* parametru, kjer je bilo več rdečega barvnega odtenka pri starejši hrastovini (vse skupine 300-600). Barvna kromatičnost na rumeno – modri osi (b^*) pa se s staranjem hrastovine ni bistveno spreminjala.

Z analizo razlik posameznih barvnih parametrov (ΔE^* ; En. 2), kjer smo za osnovo vzeli hrastovino iz skupine 100, smo potrdili značilno barvno razliko med starostnima skupinama 100 in 300 ($\Delta E^* = 6,5$) kar se ujema tudi z vizualno zaznavo (slika 3). Od skupine 300 do 600 se je celotna barvna sprememba pri hrastovini polagoma večala. Najvišja je bila v skupini 600.

Razlogi za večje spremembe v barvi so poleg starosti lahko tudi specifične razmere izpostavitve lesa v času rabe (Dremelj, 2018; Kranitz, 2014). Pri proučevanih preizkušancih so namreč poleg razlik v starosti verjetne tudi razlike v pogojih izpostavitve med staranjem, glede na različne lokacije v lesenih konstrukcijah. Kaj se je z lesom dogajalo po poseku dreves, ne vemo natančno, v pomoč je samo nekaj osnovnih informacij. Kolute smo nato počasi posušili, zbrusili in dendrokronološko analizirali, nato pa smo jih hranili v zabojih v temnem prostoru s sobno klimo. Les vzorcev ABH iz zunanjih sten Banove hiše na Bizeljskem (Čufar et al., 2013) je verjetno doživel več ponovnih uporab (v različnih objektih), odvzem iz stavbe pa smo opravili leta 2004. Vzorce STI iz notranje lesene konstrukcije zvonika cerkve samostana Stična smo pridobili neposredno ob podiranju konstrukcije leta 1999 (Vovk, 2003). PIS* so bili tramovi iz talne konstrukcije v eni od sob na gradu Pišcece. Odvzeli smo jih v letu 2005, ko so bili razkriti po od-

Preglednica 3. Povprečne vrednosti barvnih parametrov hrastovega lesa (svetlosti L^* , barvne koordinate a^* , barvne koordinate b^* , kromatičnosti C^* in celotna razlika barve ΔE^*) v odvisnosti od starosti (KV% - Koef. variacije).

Table 3. Mean values of oak wood colour parameters (L^* , a^* , b^* , C^* , ΔE^*) depending on the duration of service life (KV% - Coef. of variation).

Starostna skupina / Age group	L^*	a^*	b^*	C^*	ΔE^*
100	67,1	7,4	22,6	23,8	
KV%	2,9	6,2	5,0	4,4	
300	61,2	8,2	22,2	24,2	6,5
KV%	4,8	6,4	4,9	4,4	17,1
400	60,6	9,3	23,9	25,7	7,4
KV%	4,6	6,7	4,0	3,3	37,0
500	58,9	9,3	23,1	24,9	8,9
KV%	2,4	6,8	3,6	3,4	14,9
600	56,6	8,3	21,5	23,1	11,0
KV%	9,2	5,9	7,0	6,3	47,8

stranitvi parketa med prenovo gradu (Čufar et al., 2014). Nihanje klime, t.j. temperature in zračne vlažnosti, je pričakovano večje v bolj izpostavljenih delih konstrukcij, npr. v zunanjih stenah brunarice in deloma v zvoniku cerkve, manj pa v lesu talne konstrukcije.

3.3 DIMENZIJSKA STABILNOST LESA

3.3 DIMENSIONAL STABILITY OF WOOD

Pri hrastovini starostne skupine 100 smo določili povprečne vrednosti radialnega ($q_R = 0,208 \text{ \%/}\%$) in tangencialnega diferencialnega nabreka ($q_T = 0,372 \text{ \%/}\%$), kot tudi koeficienta nabrekanja v istih smereh (h_R, h_T ; preglednica 4). Vrednosti kazalnikov dimenzijske stabilnosti lesa iz skupine 100 so bile primerljive z rezultati drugih raziskav recentne hrastovine (Badel et al., 2006; Gorišek, 1992; Kollmann & Cote, 1968; Rijsdijk & Laming, 1994). Večina kazalnikov dimenzijske stabilnosti (q_T, h_R, h_T) se je s staranjem hrastovine zmanjševala vse do skupine 400. Izjema je bil le radialni diferencialni nabrek (q_R). Pri višjih starostih hrastovine (skupina 500 in 600) izboljšanje dimenzijske stabilnosti glede na normalno hrastovino ni bilo več statistično značilno. Homogeno in boljše dimenzijsko stabilnost stare hrastovine (> 200 let) v tangencialni smeri so potrdili tudi v sorodni študiji, a brez značilnega trenda spreminjanja pri višji starosti (Kranitz, 2014). Nasprotno pa je bila objavljena tudi študija, ki zaradi visoke variabilnosti ni potrdila statističnih razlik v dimenzijski

stabilnosti normalne in 200 let stare hrastovine (Hudson McAulay, 2016).

S staranjem hrastovega lesa smo zabeležili tudi zmanjševanje anizotropije krčenja ($h_T - h_R, q_T - q_R, q_T/q_R$), najnižje vrednosti pa smo zabeležili pri skupini 400. Pri starejši hrastovini (skupini 500 in 600) se krčitvena anizotropija zopet poveča, a ostane pod nivojem vrednosti za nedavno posekan les (skupina 100).

Večja odstopanja od trendov dimenzijske stabilnosti in anizotropije krčenja starostne skupine 400 bi, podobno kot pri barvi lesa, lahko med drugim pripisali tudi razmeram, ki jim je bil les izpostavljen v času rabe. Nizke vrednosti v tej skupini je imela večina vzorcev iz konstrukcije zvonika v Stični, lahko bi bile posledica večjih klimatskih nihanj, ki so povzročila higromehanske napetosti in utrujanje materiala. To bi lahko vplivalo tudi na dimenzijsko stabilnost, kot ugotavljajo nekateri raziskovalci (Dovč, 2013). Odgovor na vprašanje, ali gre pri tem lesu morda res za večje kemijske spremembe in degradacijo lažje razgradljivih osnovnih lesnih komponent (Fengel & Wegener, 1989; Hudson McAulay, 2016; Matsuo et al., 2011), bi lahko potrdili le z natančnejšo kemijsko analizo. Nastale razlike v dimenzijski stabilnosti so v določeni meri tudi posledica anatomskih in prirastnih posebnosti ter morebitnega variiranja gostote, kar dokazujejo tudi raziskave krčenja lesa drugih lesnih vrst (Badel et al., 2006; Bengtsson, 2001; Zobel & van Buijtenen, 1989).

Preglednica 4. Kazalniki dimenzijske stabilnosti (q_T, q_R, h_T, h_R) in anizotropija krčenja ($q_T - q_R, q_T/q_R, h_T - h_R$) v odvisnosti od starosti konstrukcijskega hrastovega lesa (X_p – povprečje; KV% - Koef. variacije).

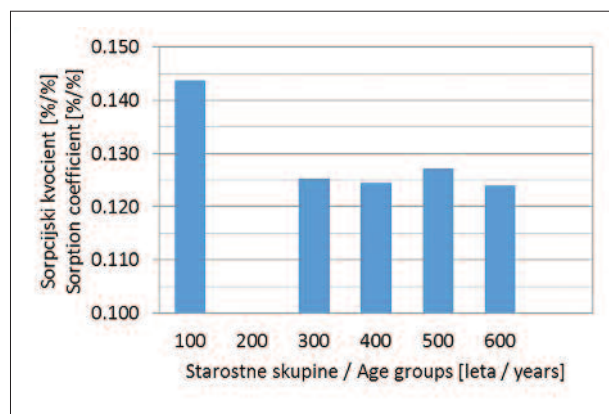
Table 4. Indicators of dimensional stability (q_T, q_R, h_T, h_R) and shrinkage anisotropy ($q_T - q_R, q_T/q_R, h_T - h_R$) depending on the age of structural oak wood (X_p – mean value, KV% - Coef. of variation).

Starostna skupina / Age group	q_R [%/%]	q_T [%/%]	h_R [%/%]	h_T [%/%]	$h_T - h_R$	q_T/q_R	$q_T - q_R$
Xp 100	0,208	0,372	0,030	0,053	0,022	1,806	0,164
KV%	15,5	17,2	18,5	18,1	21,7	16,2	34,5
Xp 300	0,186	0,327	0,023	0,041	0,018	1,760	0,141
KV%	-	-	-	-	-	-	-
Xp 400	0,189	0,301	0,023	0,038	0,012	1,540	0,098
KV%	12,6	19,2	12,9	22,7	51,0	20,8	49,4
Xp 500	0,198	0,328	0,025	0,041	0,016	1,662	0,130
KV%	12,2	10,5	15,5	14,3	19,1	6,7	16,0
Xp 600	0,215	0,367	0,030	0,050	0,018	1,715	0,152
KV%	13,0	12,1	20,2	20,7	18,1	10,4	21,5

3.4 HIGROSKOPNOST IN SORPCIJSKE LASTNOSTI

3.4 HIGROSCOPICITY AND SORPTION CHARACTERISTICS

Največji povprečni sorpcijski kvocient smo določili pri nedavno posekani hrastovini starostne skupine 100 ($s = 0,144 \text{ \%/\%}$; $KV\% = 7,0$), ki je primerljiv s podatki iz literature (Gorišek, 1992; Kollmann & Cote, 1968). Bistveno manjše povprečne vrednosti sorpcijskega kvocienta smo izmerili pri vseh starejših vzorcih hrastovine (skupine 300 - 600), in sicer med $0,124 \text{ \%/\%}$ in $0,127 \text{ \%/\%}$ (ANOVA, $p > 0,05$; $KV\% = 7,7$) (slika 4). Rezultati kažejo, da je stara hrastovina manj higroskopska, kar bi lahko pripisali kemijskim spremembam med staranjem lesa. Kemijske raziskave so pri stari hrastovini potrdile rahlo nižji delež hemiceluloz (Belec, 2017; Hudson McAulay, 2016) ter povečanje deleža kristaliničnosti celuloze (Gawron et al., 2012; Kohara & Okamoto, 1955).

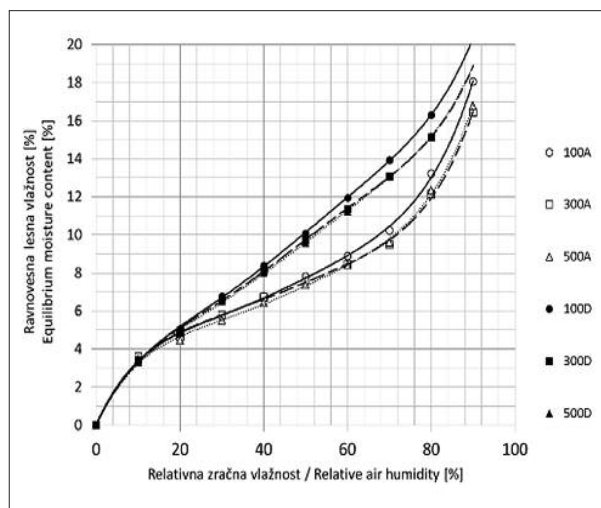


Slika 4. Sorpcijski kvocient konstrukcijskega hrastovega lesa v odvisnosti od starosti.

Figure 4. Sorption coefficients of oak wood depending on age.

Tudi raziskava adsorpcije in desorpcije vodne pare pri izotermnih pogojih ($T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$) je potrdila znižano higroskopsnost starejše hrastovine (starostne skupine 300 do 600), ki se pojavi v zgornjem higroskopskem območju ($\varphi > 50 \text{ \%}$). Pri sorodni študiji so prav tako potrdili manjšo sorptivnost stare hrastovine, vendar le v območju kemisorpcije, t.j. do nasičenja primarnih sorpcijskih mest (Kranitz, 2014). Podobno kot pri sorpcijskem kvocientu, nismo zaznali razlik med sorpcijskimi izotermami starejše hrastovine (skupine 300 do 600) (slika 5). Rezultati nakazujejo, da se največje spremembe v lesu zgodijo v prvih treh stoletjih življenjske dobe.

V celoti smo v procesu desorpcije znotraj posamezne starostne skupine vselej izmerili višje ravnovesne vlažnosti kot pri adsorpciji (slika 5). Pri preverjanju adsorpcijsko-desorpcijskega razmerja ravnovesne vlažnosti lesa, ki določa velikost histerezne zanke, nismo potrdili bistvenih razlik, glede na starost lesa. Velikost histereze je bila največja pri $80 \text{ \%}$ zračni vlažnosti ($u_{rAD}/u_{rDES} = 0,72$; $KV\% = 3,6$).



Slika 5. Povprečne sorpcijske izoterme hrastovine v procesu adsorpcije (A) in desorpcije (D) za starostne skupine 100 (—), 300 (---) in 500 (...)

Figure 5. Average sorption isotherms for oak wood in the adsorption (A) and desorption (D) process for age groups 100 (—), 300 (---) and 500 (...)

3.5 GOSTOTA LESA

3.5 WOOD DENSITY

V laboratorijskih pogojih ($T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 50 \text{ \%}$) je nedavno posekana hrastovina (starostna skupina 100) imela $7,8 \text{ \%}$ ravnovesno vlažnost in povprečno gostoto 694 kg/m^3 ($KV\% = 12,0$). Večjo gostoto smo pričakovano zaznali pri preizkušancih s povprečno širšimi branikami, maksimalno 840 kg/m^3 pri $6,5 \text{ mm}$ širokih branikah ter pri $81 \text{ \%}$ deležu kasnega lesa (KL). Nasprotno smo pri povprečno ozkih branikah potrdili nizko gostoto ob velikem deležu ranega lesa v prirastnih plasteh ($\rho_{min} = 539 \text{ kg/m}^3$; $KL = 39,9 \text{ \%}$). Rezultati sovpadajo z drugimi študijami strukturnih in fizikalnih lastnosti hrastovega lesa (Badel et al., 2006; Gorišek, 1992; Wagenführ, 2007). Razlik v gostoti hrastovine glede na starost nismo potrdili.

4 ZAKLJUČKI

4 CONCLUSIONS

Vizualno temnejšo barvo hrastovine smo zaznali že pri vzorcih starih malo pod 300 let (starostna skupina 300). Tudi barvnometrično smo potrdili padanje svetlosti L^* hrastovine z naravnim staranjem, ter spremembo kromatičnosti barve proti rdečemu barvnemu tonu. Potrjeno je značilno povečevanje celotne spremembe barve (ΔE^*) hrastovine s staranjem. Higroskopsnost hrastovine se je s starostjo (skupine 300 in več) značilno zmanjšala, posledično pa se je značilno izboljšala dimenzijska stabilnost lesa, zlasti v tangencialni smeri, kot tudi prečna krčitev anizotropija. Ugotovili smo tudi, da je gostota lesa neodvisna od procesa naravnega staranja lesa. Raziskava je še pokazala, da na lastnosti starega lesa verjetno vpliva tudi mesto vgradnje oz. izpostavitve in s tem povezano nihanje in specifičnost klimatskih razmer.

6 POVZETEK

6 SUMMARY

We examined physical properties of oak (*Quercus* sp.) wood after ageing. The wood originated from the collection of samples of the Department of Wood Science and Technology. It was obtained from recently felled trees and from historical constructions in Slovenia. The aim of the study was to evaluate changes in colour, dimensional stability, sorption properties and density associated with the aging process.

The selected sections of wood were dendrochronologically dated to define or assess the year of formation of individual tree-rings and to define or assess the year of tree felling, depending on preservation of sapwood and bark. The time after felling (between 4 and 512 years) was considered the period of wood ageing (Table 1, Figure 1). Based on year of tree felling the samples were arranged in age groups 100-600 (Tables 1, 2). The age group 100 contained wood from the recently felled trees, while the samples from the age groups of 300-600 originated from historical structures: ABH originated from the outer walls of Ban's farm house in Artiče, SE Slovenia, where several reconstructions and renovations were detected (Čufar et al., 2013); STI samples originated from the timber construction of the belfry of the Stična Cistercian monastery church

(Vovk, 2003); and PIS samples were taken from the floor construction of the castle of Pišece, which is a complex structure with numerous building phases (Čufar et al., 2014). The sections of ABH, STI and PIS were taken during the renovations in 2004, 1999, and 2005, respectively. After collection in the field they were used to study their building history. Afterwards they were stored in containers at room temperature and protected from the light.

The colour of the wood was determined visually and with help of the standardized CIELab methodology on cubes with dimensions of 40 mm × 40 mm × 40 mm (Figure 2). Both the visual and CIELab determined colour parameters (L^* , a^* , b^* , C^* , ΔE^*) of heartwood showed that the wood became increasingly darker (the parameter L^* decreased), with increasing duration of service life. Changes were also detected in the case of parameter a^* , which indicated an increasing portion of red tone in older oak heartwood (all groups 300-600) whereas the colour on the yellow – blue axis (b^*) did not show any significant changes (Table 3).

The indicators of dimensional stability (q_T , q_R , h_T , h_R) and shrinkage anisotropy ($q_T - q_R$, q_T/q_R , $h_T - h_R$) of recently felled trees (age group 100) showed similar values as those reported for normal wood in the literature. Older samples, age groups 300-600, showed lower hygroscopicity and increased dimensional stability, especially in the tangential direction. Reduced transverse shrinkage anisotropy was also observed (Figure 3, Table 4).

The sorption coefficient was highest in the recently harvested oak of the age group 100 ($s = 0.144$ %/%) (Figure 4), and was comparable with the data from the literature. The sorption coefficients of aged wood (groups 300 - 600) were on average significantly lower (0.124 %/% and 0.127 %/%) (Figure 4). The results therefore showed that the aged oak is less hygroscopic than normal wood. This could be attributed to chemical changes during the ageing process, possibly leading to changes like a lower proportion of hemicelluloses and an increase in the proportion of cellulose crystallinity.

Average sorption isotherms for oak wood in the adsorption (A) and desorption (D) processes showed that the equilibrium moisture content (EMC) of desorption was in all cases higher than that seen with adsorption (Figure 5). The adsorption-desorption ratio of the EMC, which determines the size of

the hysteresis loop, did not show significant differences for wood from different age groups. The hysteresis size was the highest at 80% air humidity.

The density of oak wood did not change with age. It varied in agreement with tree-ring width and proportion of latewood, i.e. the density increased with increasing tree-ring width and proportion of latewood.

The results indicated that the location of wood during its service life and exposure to climate fluctuations seemed to influence the dimensional stability and hygroscopicity of historical oak.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGEMENTS

Prispevek smo pripravili v okviru raziskav programske skupine P4-0015, ki jo financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, ARRS.

VIRI

REFERENCES

- Badel, E., Bakour, R., & Perre, P. (2006). Investigation of the relationship between anatomical pattern, density and local swelling of oak wood. *Iawa Journal*, 27(1), 55-71.
- Belec, A. (2017). Vpliv staranja na strukturne lastnosti hrasta (Diplomsko delo). Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo.
- Bengtsson, C. (2001). Variation of moisture content induced movements in Norway spruce (*Picea abies*). *Annals of Forest Science*, 58(5), 569-581.
- Čufar, K., Bizjak, M., Kitek Kuzman, M., Merela, M., Grabner, M., & Brus, R. (2014). Castle Pišece, Slovenia - building history and wood economy revealed by dendrochronology, dendroprovenancing and historical sources. *Dendrochronologia*, 32, 357-363.
- Čufar, K., De Luis, M., Zupančič, M., & Eckstein, D. (2008). A 548-year long tree-ring chronology of oak (*Quercus spp.*) for SE Slovenia and its significance as dating tool and climate archive. *Tree-Ring Research*, 64(1), 3-15.
- Čufar, K., Strgar, D., Merela, M., & Brus, R. (2013). Les Banove hiše v Artičah kot zgodovinski arhiv: Wood in the Ban's house at Artiče, Slovenia, as a historical archive. *Acta Silvae et Ligni*, 101, 33-44.
- Dovč, A. (2013). Vpliv klimatskih pogojev na delovanje lesa (Diplomsko delo). Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo.
- Dremelj, M. (2018). Izbrane fizikalne lastnosti starega hrastovega konstrukcijskega lesa (Magistrsko delo). Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo.
- Fengel, D., & Wegener, G. (1989). *Wood Chemistry Ultrastructure Reactions*. Walter de Gruyter.
- Gawron, J., Szczesna, M., Zielenkiewicz, T., & Golofit, T. (2012). Cellulose crystallinity index examination in oak wood originated from antique woodwork. *Drewno*, 55(188), 109-114.
- Gorišek, Ž. (2009). Les: Zgradba in lastnosti - njegova variabilnost in heterogenost. Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo.
- Gorišek, Ž. (1992). Vpliv prečne krčitvene anizotropije lesa na dimenzijsko stabilnost in sušenje lesa. Dok. dis. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, 120 str.
- Hudson McAulay, K. J. (2016). The structural and mechanical integrity of historic wood. (PhD PhD), University of Glasgow, Glasgow.
- Kohara, J., & Okamoto, H. (1955). Studies on permanence of wood. XI: The crystallized region of cellulose in old timbers. *Journal of Applied Physics*, 19(11), 491-506.
- Kollmann, F., & Cote, W. A. (1968). *Principles of Wood Science and Technology: Solid Wood* (Vol. 1). Berlin: Springer-Verlag.
- Kranitz, K. (2014). Effect of natural aging on wood. (PhD PhD), ETH, Zurich. (DISS. ETH No. 21661)
- Matsuo, M., Yokoyama, M., Umemura, K., Sugiyama, J., Kawai, S., Gril, J., ... Imamura, M. (2011). Aging of wood: Analysis of color changes during natural aging and heat treatment. *Holzforschung*, 65(3), 361-368.
- Nilsson, T., & Rowell, R. M. (2012). Historical wood: Structure and properties. *Journal of Cultural Heritage*, 13(3), 5-9.
- Rijsdijk, J. F., & Laming, P. B. (1994). *Physical and Related Properties of 145 Timbers*. Dordrecht: Springer.
- Vovk, K. (2003). Dendrokronološke raziskave lesa iz samostana v Stični (Diplomsko delo). Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo.
- Wagenführ, R. (2007). *Holzatlas*. Berlin: Hanser.
- Zobel, B. J., & van Buijtenen, J. P. (1989). *Wood variation: Its Causes and Control*. Berlin: Springer.