



# LES/WOOD

## VSEBINA / CONTENTS

Letnik 68, številka 1 / Volume 68, Number 1

- **Uvodnik** ..... **3**  
**Editorial**  
Katarina Čufar, Jože Kropivšek
- **Tree-rings in Mediterranean pines – can we ascribe them to calendar years?** ..... **5**  
**Prirastne plasti v mediteranskih borih – ali lahko ugotovimo, v katerem koledarskem letu so nastale?**  
Angela Balzano, Veronica De Micco, Maks Merela, Katarina Čufar
- **Vpliv termične modifikacije na obdelovalne lastnosti bukovine** ..... **15**  
**The influence of thermal modification on the machining properties of beech wood**  
Miran Merhar, Bogdan Šega, Dominika Gornik Bučar
- **The dynamics of thickness swelling and bond strength loss of different wood-based panels at exposure to humid climate and immersion into water** ..... **25**  
**Dinamika spreminjanja debelinskega nabreka in kakovosti zlepljenosti različnih lesnih ploščnih kompozitov pri vlažni klimi in potopitvi v vodo**  
Sergej Medved, Damjan Žgajner, Alan Antonovič
- **Odpornost kompozita na osnovi polimlečne kisline in nanofibrilirane celuloze proti razenju** ..... **37**  
**Resistance of polylactic acid/nanofibrillated cellulose composite to scratching**  
Ida Poljanšek, Vesna Žepič, Urša Osolnik, Viljem Vek, Matjaž Pavlič, Marko Petrič, Primož Oven
- **Raziskovalni potencial lesa sodov iz rimskih vodnjakov** ..... **47**  
**Research potential of wood of barrels from Roman water wells**  
Katarina Čufar, Jana Horvat, Tjaša Tolar, Tina Berden, Maks Merela
- **Ocena razkrojenosti lesa v Podzemni slemenski utrdbi Goli vrh** ..... **61**  
**Evaluation of the wood degradation in the underground fort Goli vrh**  
Miha Humar, Boštjan Lesar, Andreja Žagar, Angela Balzano, Davor Kržišnik
- Novice**
- **Jože Resnik, zaslužni profesor Univerze v Ljubljani** ..... **71**  
Milan Šernek
- **Udeleženci delavnice Zaščita, vgradnja in uporaba lesa na prostem napolnili predavalnico Janeza Hribarja** ..... **73**  
Tina Drolc

# Les/Wood

## **Izdajatelj/Publisher**

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo  
*University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology*  
Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, Slovenija

## **Glavna urednica/Editor-in-chief**

Katarina Čufar, Slovenija, e-pošta: katarina.cufar@bf.uni-lj.si

## **Odgovorni urednik/Managing editor**

Jože Kropivšek, Slovenija, e-pošta: joze.kropivsek@bf.uni-lj.si

## **Tehnični urednik/Technical editor**

Anton Zupančič, Slovenija, e-pošta: anton.zupancic@bf.uni-lj.si

## **Uredniški odbor/Editorial board**

Christian Brischke, Nemčija / *Germany*  
Dominika Gornik Bučar, Slovenija / *Slovenia*  
Miha Humar, Slovenija / *Slovenia*  
Leon Oblak, Slovenija / *Slovenia*  
Primož Oven, Slovenija / *Slovenia*  
Kevin T. Smith, ZDA / *USA*  
Milan Šernek, Slovenija / *Slovenia*  
Rupert Wimmer, Avstrija / *Austria*

## **Jezikovni pregled/Proofreading**

Darja Vranjek (slovensko besedilo/*Slovene text*)  
Paul Steed (angleško besedilo/*English text*)

## **Oblikovanje/Design**

Andrej Bajt

## **Tisk/Print**

Tiskarna Roboplast d. o. o., Ljubljana  
Natisnjeno v juniju 2019 v 100 izvodih./*Printed in June 2019 in 100 copies.*

**ISSN 0024-1067** (tiskana verzija/*printed version*)

**ISSN 2590-9932** (spletna verzija/*on-line version*)

<http://www.les-wood.si/>

## **Periodičnost/Frequency**

Dve številki letno/Two issues per year

**Les/Wood je referiran v mednarodnih bibliografskih zbirkah**

***Les/Wood is indexed in the international bibliographic databases***

AGRIS, CAB Abstract

Avtorske pravice objavljenih člankov si pridržuje založnik Les/Wood  
*Copyright of the published articles is owned by the publisher Les/Wood*

Izdajanje revije sofinancira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS)  
*The journal is co-financed by Slovenian Research Agency (ARRS)*



# LES/WOOD

## UVODNIK / EDITORIAL

Za uredništvo / For the editorial board  
Katarina Čufar, Jože Kropivšek

### Drage bralke in bralci revije Les / Wood!

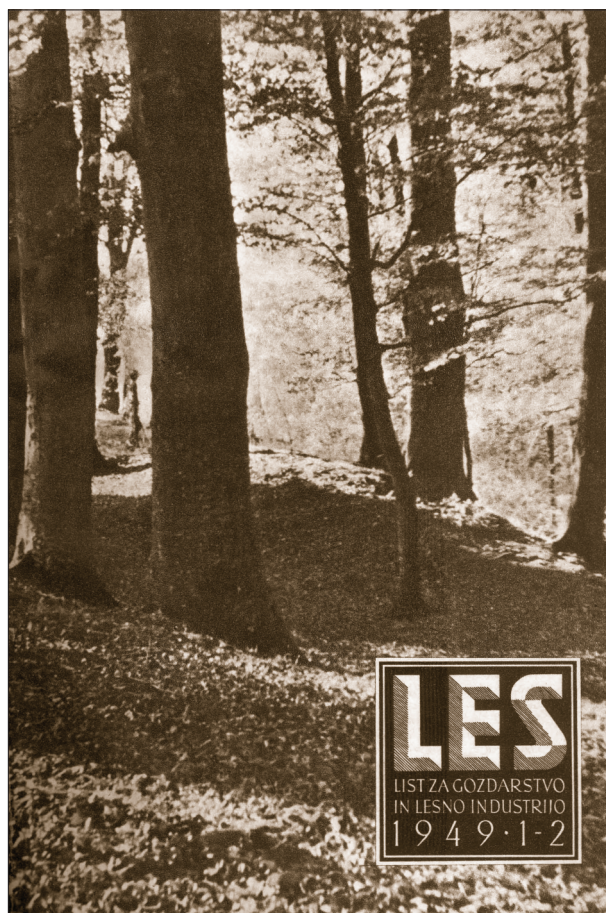
Revija Les/Wood letos praznuje 70. obletnico. Spomladi leta 1949 je izšla prva dvojna številka revije, ki se je takrat imenovala »Les – revija za gozdarstvo in lesno industrijo«. Za urednika revije je bil imenovan inženir Janez Jerman, prvo številko (1/2) pa je uredil inženir Stanko Sotošek.

Revija je bila ustanovljena z namenom »... obravnavanja vseh vprašanj iz gozdarske, žagarske in lesnopredelovalne stroke«. Izdalo jo je Ministrstvo za gozdarstvo in lesno industrijo LR Slovenije, natisnila pa jo je Triglavska tiskarna v Ljubljani. Revija je izhajala desetkrat v letu, prva dvojna številka pa je obsegala 64 strani. Od tega so večji del predstavljala poročila in strokovni članki, v zadnjem delu revije pa so predstavili sodobna vprašanja ter nanzali kratke vesti.

Namesto običajnega uvodnika v tokratni številki revije, 70 let kasneje, v celoti objavljamo uvodnik iz prve številke 1949, ki ga je napisal Matevž Hace.

### Dear readers of Les / Wood,

This year, the journal Les/Wood celebrates its 70th anniversary. The first double issue of the journal was published in spring of 1949, while the title of the journal was Les – revija za gozdarstvo in lesno industrijo (Wood – Journal for the forestry and woodworking industry). The editor of the journal was Janez Jerman, while the first issue was edited by Stanko Sotošek. The journal was set up with the aim "...of addressing all challenges related to forestry, sawmilling and the woodworking industry". It was published by the Ministry of Forestry and Wood Industry of the Republic of Slovenia and printed by the Triglav Printing Office in Ljubljana. The journal was



exclusively published in Slovene ten times a year, and the first (double) issue had 64 pages, most of which were reports and professional articles, while in the last part of the journal contemporary issues were addressed and short notes were published.

Instead of the regular editorial for this issue we publish the complete editorial from the first issue of 1949, written by Matevž Hace.

## Naše novo glasilo „LES“

Ministrstvo za gozdarstvo in lesno industrijo se je odločilo izdajati nov mesečni list »Les«, ki bo obravnaval vsa vprašanja iz gozdarske, žagarske in lesno predelovalne stroke. Dosedanji »Gozdarski vestnik« je bil usmerjen v glavnem k povzdigi gozdarstva, zaradi česar so ostajala vprašanja naše žagarske industrije, graditve naših kombinatov, predelovalne industrije večji del ob strani in niso bila do sedaj obdelana.

Novo glasilo »Les« bo pa obravnavalo gozdarsko, žagarsko in predelovalno industrijo ter racionalizatorska vprašanja v celoti.

Mnogo je vprašanj iz našega področja, ki jih bo potrebno obdelati na različne načine in v čim bolj poljudni obliki, dostopno ne samo gozdarskim in žagarsko industrijskim strokovnjakom, temveč tudi slehernemu gozdarskemu in lesno industrijskemu delavcu, ki dela sedaj pri graditvi socializma v naši domovini. Na poljuden način bo potrebno obdelovati vprašanje odkazovanja, sečnje in izdelave raznovrstnih gozdnih sortimentov. Pozornost bo treba posvetiti pravočasnemu spravilu lesa iz raznovrstnih področij naših gozdov. Podkrepani bo treba pažnjo našim drevesnicam, pogozdovanju, gojenju, čiščenju naših gozdov. V listu bo treba voditi borbo proti gozdnim škodljivcem. Posvečali bomo posebno pozornost in skrb gozdnim delavcem ter nižjim in srednjim strokovnim kadrom v gozdarstvu in lesni industriji.

Obravnavati bo potrebno raznovrstna vprašanja iz naše žagarske in predelovalne industrije, ki se niso v povojnem času skoraj nikjer obravnavala. Posebno pozornost bo potrebno posvetiti raznovrstnim strojem, ki jih ima naša žagarska in predelovalna industrija. Dvigniti bo potrebno delež izkoriščanja lesa in lesne mase v naših obratih. Dvigniti bo treba strokovni kader v naših žagarskih in predelovalnih obratih n. pr. gateristov, cirkularistov, lesostrugarjev in raznih strokovnjakov v lesno predelovalni industriji. Med najvažnejšimi nalogami, ki jih postavlja naša socialistična domovina pred nas, pa je dviganje in razvijanje novatorstva ter racionalizatorstva na vseh poljih gospodarske dejavnosti. V tem pogledu je bilo ori nas v gozdarstvu in lesni industriji zelo malo narejenega.

Novo glasilo »Les« naj prinaša raznovrstne članke o naših iznajdbah in izumih, ki izboljšujejo delo in ki so v pomoč delavcu pri njegovem delu. Skratka, mesečnik »Les« naj bi bil pravi življenjski odraz gozdarstva in lesne industrije v sedanji dobi socialistične graditve, v dobi izvajanja petletke v naši domovini. Revija naj prinaša na poljuden način napisane strokovne članke in sestavke našemu strokovnemu kadru z visoko kvalifikacijo in tudi nižjemu strokovnemu kadru ter našemu delavcu v gozdarstvu in na lesno industrijskih obratih. Zato je dolžnost vseh naših gozdarskih in lesno industrijskih strokovnjakov, novatorjev, racionalizatorjev in vseh tistih, ki imajo voljo in sposobnost za pisanje raznih poljudnih strokovnih člankov, da dvigajo svoje glasilo s pestrimi in čim popolnejšimi članki in sestavki. Naj bo nova revija »Les« veren odraz vsega našega dela in ispolnjevanja v cilju, služiti z najboljšimi močmi in sposobnostmi naši socialistični domovini.

Matevž Hace

Uvodnik prve številke revije Les iz leta 1949, ki ga je napisal Matevž Hace.  
Editorial from the first issue of the journal Wood, 1949, written by Matevž Hace.



## TREE-RINGS IN MEDITERRANEAN PINES – CAN WE ASCRIBE THEM TO CALENDAR YEARS?

### PRIRASTNE PLASTI V MEDITERANSKIH BORIH – ALI LAHKO UGOTOVIMO, V KATEREM KOLEDARSKEM LETU SO NASTALE?

Angela Balzano<sup>1\*</sup>, Veronica De Micco<sup>2</sup>, Maks Merela<sup>1</sup>, Katarina Čufar<sup>1</sup>

UDK 630\*811.49:630\*174.7 *Pinus pinea*  
Original scientific article / Izvirni znanstveni članek

Received / Prispelo: 23. 4. 2019  
Accepted / Sprejeto: 17. 5. 2019

#### Abstract / Izvleček

**Abstract:** A tree ring is defined as a band of xylem-cell layers produced in one year. In Mediterranean trees cambium often produces several bands of alternating early- and latewood during one calendar year, resulting in Intra-Annual Density Fluctuations (IADFs). We present some characteristics of growth layers in *Pinus pinea* (stone pine) growing on Vesuvius Mountain (near Naples, Italy). The trees showed uninterrupted wood production from January 2015 till the end of January 2016. The ring formed in this period contained five different layers of wood types. Therefore, the wood formed between January and March 2015 would be falsely ascribed to latewood of the tree ring 2014, and the wood formed between March 2015 and the end of January 2016 would be classified as tree ring 2015. We also showed differences in cambium activity in late autumn between years: in November 2015 and 2018 the cambium was still active and not active anymore, respectively. Furthermore, we present the structure of the wood formed in the year 2017 affected by a wildfire in July. Such cases where the growth layer cannot be exactly ascribed to a calendar year should be considered in dendrochronological studies of *Pinus pinea* and other Mediterranean species.

**Keywords:** tree ring, tree ring boundary, stone pine=*Pinus pinea*, earlywood, latewood, Intra-Annual Density Fluctuation, xylogenesis, Italy

**Izvleček:** Branika v lesu je plast ksilemskih celic, nastalih v enem letu. V drevesih, rastočih v Sredozemlju, kambij pogosto proizvede več plasti ranega in kasnega lesa v enem koledarskem letu in prirastna plast posledično vsebuje gostotne variacije (IADF). Predstavljamo nekatere značilnosti prirastnih plasti lesa pinij (*Pinus pinea*), s pobočij Vezuva pri Neaplju v Italiji. Drevesa so od januarja 2015 do konca januarja 2016 izkazovala neprekinjeno nastajanje lesa. Les, ki je nastal v tem obdobju, je vseboval pet različnih slojev. Les, nastal med marcem 2015 in koncem januarja 2016 bi opredelili kot braniko 2015, les, ki je nastal med januarjem in marcem 2015, pa bi zmotno prišteli kasnemu lesu branike 2014. Prikazali smo tudi razlike v delovanju kambija v pozni jeseni; novembra 2015 je bil kambij še aktiven in je proizvajal les, novembra 2018 pa se je aktivnost že zaključila. Predstavljamo tudi zgradbo lesa, nastalega v letu 2017, ko je drevesa v juliju prizadel gozdni požar. Primere, ko rastne plasti ni mogoče natančno pripisati koledarskemu letu, je treba upoštevati v dendrokronoloških raziskavah pinije in drugih sredozemskih drevesnih vrst.

**Gljučne besede:** branika, letnica, pinija=*Pinus pinea*, rani les, kasni les, gostotna variacija v prirastni plasti, ksilogeneza, Italija

## 1 INTRODUCTION

### 1 UVOD

A tree ring, also called annual ring or annual growth ring, is defined as a layer of cells produced in one year in the xylem or phloem (Kaennel &

Schweingruber, 1995). In temperate wood species, it usually consists of early- and latewood and is demarcated by clear growth ring boundaries. The formation of temperate tree rings usually takes place between spring and autumn (Gričar & Čufar, 2008; Prislán et al., 2013; Useros et al., 2017; Martínez del Castillo et al., 2018). In Mediterranean-types ecosystems, warm winters, hot dry summers and frequent wildfires affect cambial activity, and thus lead to structural “anomalies” within tree rings. Therefore, it is often not clear what a tree ring is and what its boundaries are. This challenges the application

<sup>1</sup> University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, SLO

\* e-mail: [angela.balzano@bf.uni-lj.si](mailto:angela.balzano@bf.uni-lj.si)

<sup>2</sup> University of Naples Federico II, Department of Agricultural Sciences, Italy

of dendrochronology, which is the science of dating tree rings and needs to clarify in which calendar year a particular tree ring was formed.

In Mediterranean trees, the process of tree ring formation is not necessarily synchronised with the calendar year. Vascular cambium can show similar seasonality as in temperate trees, can stop more than once per year, reactivate or remain active throughout one or more years. Such patterns of cambial rhythm affect the wood structure, leading to irregular alternations of earlywood and latewood bands in the xylem. Successive layers of earlywood and latewood forming tree rings which are not synchronised with the calendar year are referred as false rings, or Intra-Annual Density Fluctuations (IADFs) (Bräuning 1999; Rigling et al., 2001; Cherubini et al., 2003; De Micco et al., 2016a). Recently, numerous studies have been published on the occurrence of IADFs in Mediterranean woods, especially in conifers (Campelo et al., 2007; De Luis et al., 2007, 2011; De Micco et al., 2016b; Novak et al., 2016) and a complete description and classification of IADFs is reviewed in De Micco et al. (2016a).

IADFs occurring in Mediterranean conifers are mainly classified into four types (De Micco et al., 2016a) according to their relative position within the early- and latewood: 1) *E-IADF* as a band of latewood-like cells in the earlywood occurring in the first half of the ring; 2) *E+-IADF*, as cells with features intermediate between true earlywood and true latewood cells, called transition cells, occurring at the end of the earlywood; 3) *L-IADF* as earlywood-like cells in the latewood occurring in the second half of the ring; 4) *L+-IADF* as a band of earlywood-like cells with narrower lumen and thicker walls than true earlywood, occurring between the latewood of one ring and the earlywood of the next ring.

IADFs, if not recognised, can cause problems in tree ring dating and consequent errors in dendroecological investigations. In some species, the occurrence of specific anatomical features, such as the increased incidence of thin-walled parenchyma cells, narrow marginal parenchyma bands, and resin canals, can help distinguishing IADFs from true tree ring boundaries (Campelo et al., 2007; Schweingruber 2007); however, only monitoring of wood formation (xylogenesis) can assure the identification of IADFs in relation to the time of their formation (De Micco et al., 2019).

The latest studies report that the application of microcoring to follow xylogenesis helps to define the timing of IADF formation (De Micco et al 2016b; Balzano et al., 2018 a, b), and to detect the environmental conditions triggering their formation.

Here we present three examples where different rhythms of cambial activity and different wood anatomical traits within growth layers, either due to climatic constraints or extreme events such as fire, affect the structure of tree rings in *Pinus pinea* and their dating.

## 2 MATERIALS AND METHODS

### 2 MATERIAL IN METODE

In 2014 we selected six dominant trees of *Pinus pinea* (stone pine, Pinaceae) on Vesuvius Mountain, Naples (Southern Italy) (Figure 1), at a site characterised by a Mediterranean climate. They grew in a stone pine forest with a stand density of 2,500 trees per hectare. The climate at the site is Mediterranean, with hot and dry summers followed by mild and wet winters (for details refer to Balzano et al., 2018a). The trees were used for a wood formation study based on microcores taken at regular intervals from January 2015 until January 2016 (Balzano et al., 2018a).

In addition, we collected cores and microcores from the same trees in November 2018. The cores were collected at the breast height of the trees with an increment borer, polished and observed under a stereo microscope (OLYMPUS SZ-STUZ) to identify the tree rings and observe their features. Additionally, we scanned them at 1200 dpi using an HP Scanjet 4890 in accordance with the procedures used in dendrochronology (e.g., Čufar et al., 2017).

The microcores containing phloem, cambium and new formed xylem increment, were taken at the breast height. After sampling, the microcores were stored in FAA (mixture of formalin, acetic acid and ethanol) and then dehydrated in a graded ethanol series (70, 90, 95 and 100 %), cleaned with D-limonene and embedded in paraffin blocks (tissue processor Leica TP1020-1, Nussloch, Germany). We cut cross-sections (9 µm thick), using a semi-automatic rotary microtome RM 2245 (Leica, Nussloch), subsequently stained with a safranin and astra blue water solution (Prislan et al., 2013) and mounted in Euparal (Bioquip Rancho Dominguez, CA, USA).

Under a Nikon Eclipse 800 light microscope we observed the slides and microphotographs were taken by a digital camera (DS-Fi1) connected with the NIS-Elements BR 3 image Analysis System (Melville, NY, USA). We analysed wood cells in different phases of xylogenesis: cambium cells (CC), post-cambial cells (PC), and cells with a developing cell wall (SW) (Gričar, 2007). IADFs were characterised in accordance with De Micco et al. (2016a).

Intra-annual variability of anatomical traits was examined with specific attention to the tree rings corresponding to 2014/2015, 2017 and 2018.

### 3 RESULTS AND DISCUSSION

#### 3 REZULTATI IN RAZPRAVA

##### 3.1 DURATION OF WOOD FORMATION IS NOT ALWAYS SYNCHRONISED WITH THE CALENDAR YEAR

##### 3.1 NASTAJANJE LESA NI VEDNO USKLAJENO S KOLEDARSKIM LETOM

The monitoring of xylogenesis showed that cambium was active from January 2015 until January 2016 in all investigated trees of *P. pinea*. The highest peaks of cambial activity occurred in spring and autumn, while the production was lower during

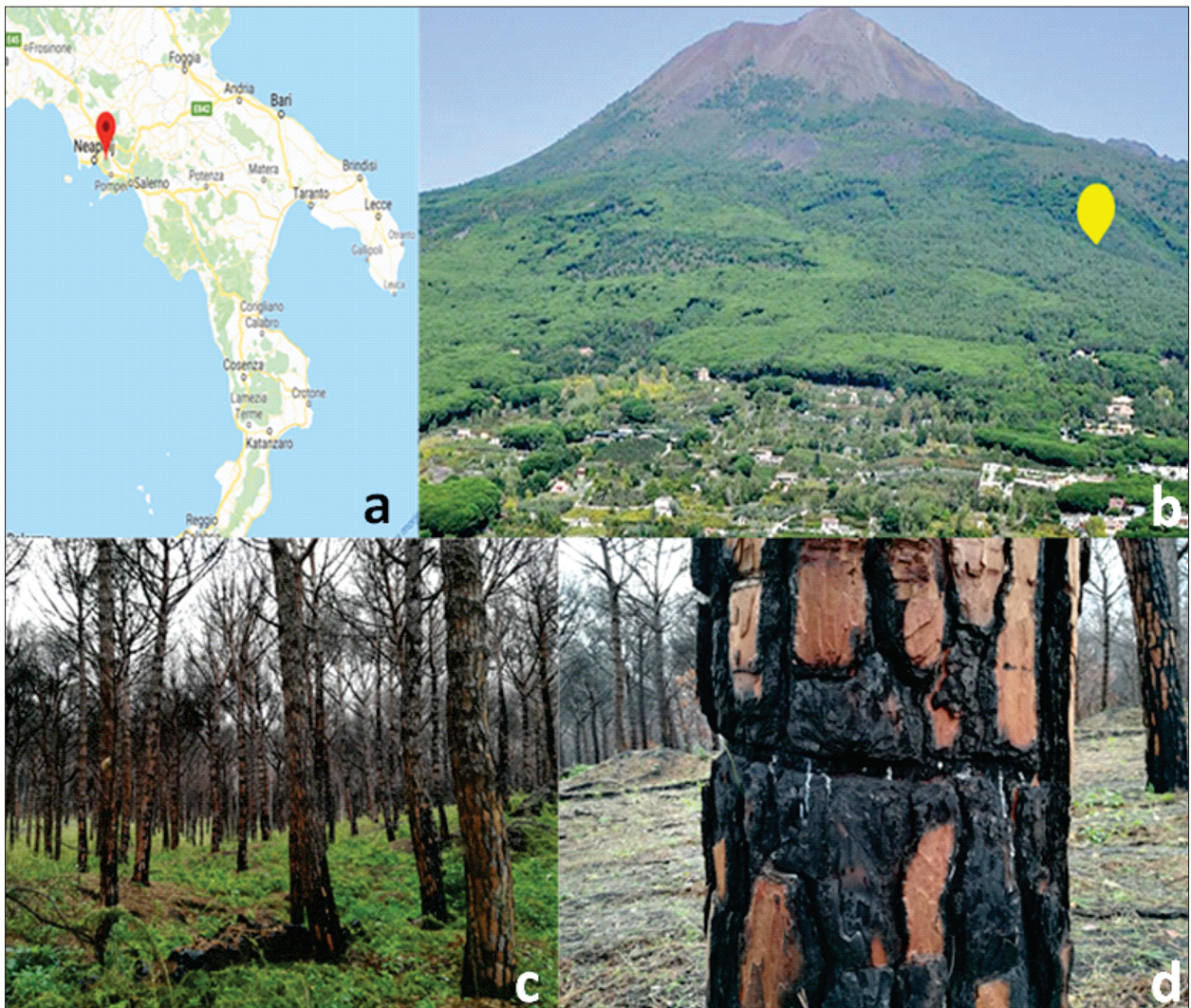


Figure 1. Sampling site located near Naples, Italy: (a) sampling site on the map, (b) sampling location in Vesuvius National Park, (c) Pinus pinea stand, and (d) one of sampling trees injured by the fire that occurred in July 2017.

Slika 1. Rastišče pri Neaplju v Italiji: (a) lega na zemljevidu, (b) mesto vzorčenja v nacionalnem parku na pobočju Vezuva, (c) sestoj pinij in (d) eno od raziskanih dreves, ki je bilo poškodovano v požaru julija 2017.

summer and winter (Balzano et. al, 2018a). Wood anatomical inspection showed that between January and March 2015, earlywood-like cells were produced; they had narrower lumina and thicker cell walls than regular earlywood, but wider lumina than latewood (Figures 2, 3). Formation of earlywood-like wood between January and March 2015 was presumably triggered by abundant rain in December 2014. The above described tissue corresponds to so-called transition wood or L+-IADFs (De Micco et al., 2016a; Balzano et al., 2018a). True earlywood production started at the end of March and continued till the onset of latewood formation in June (Figure 2), probably triggered by the onset of summer drought events. Earlywood-like cell production, forming L-IADF, restarted in October (Figure 2), concurrently with a rainy period, and lasted till the new production of latewood at the end of Decem-

ber (Figure 2). The sampling in January 2016 showed that the cambium production did not stop at the end of the calendar year 2015, but continued with the production of latewood cells in January 2016. In this case, wood formation lasted longer than one calendar year (more than 13 months). The ring formed in this period contained five different layers which could be described as: earlywood-like, earlywood, latewood, earlywood-like and latewood (Figure 2).

All five layers could not be clearly detected by observing the wood of the polished cores under magnification, which is usual in dendrochronological investigations (Figure 3), therefore the wood increment formed between March 2015 and the end of January 2016 would be defined as one annual ring, i.e. tree ring 2015 (Figure 2). Without knowing the duration of xylogenesis, the earlywood-like wood

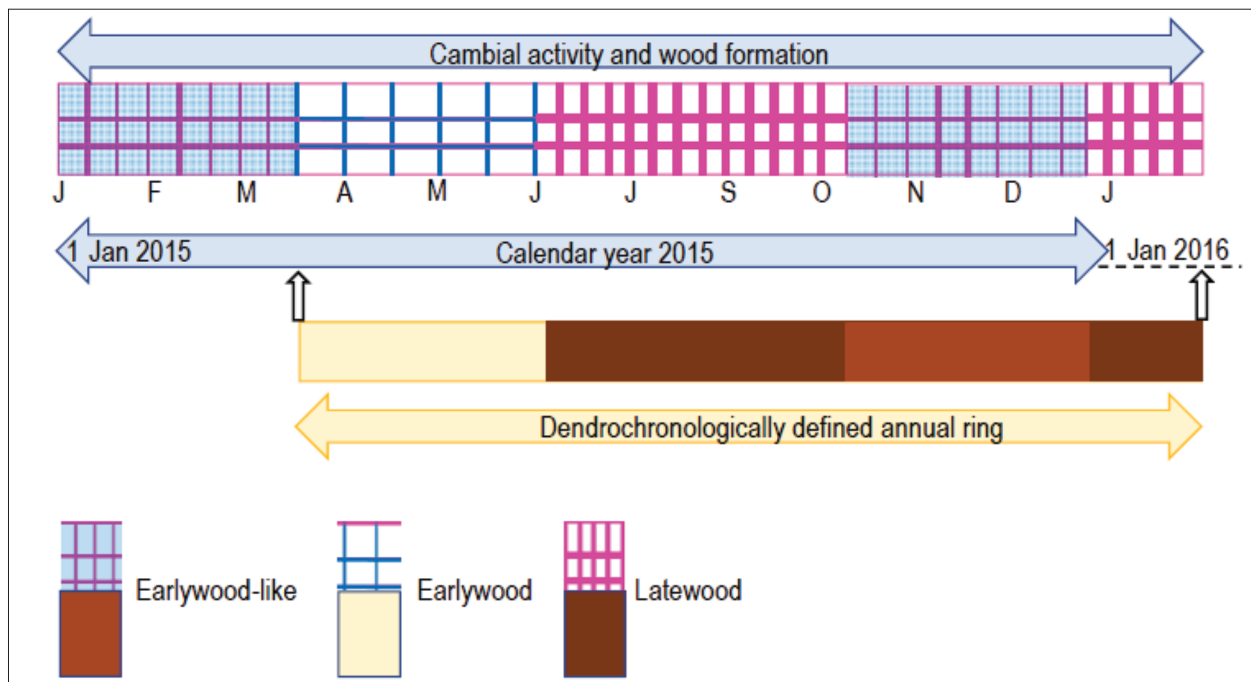


Figure 2. Time perspective of wood production between January 2015 and the end of January 2016 in *Pinus pinea*: (a) cambial production was uninterrupted during the entire period; (b) cambium produced five bands with different wood types (earlywood-like, earlywood, latewood, earlywood-like, latewood); (c) wood formed between March 2015 and end of January 2016 would be defined as tree ring 2015 if observed with the methods and magnifications normally used in dendrochronology.

Slika 2. Časovni prikaz produkcije lesa med januarjem 2015 in koncem januarja 2016 v piniji: (a) kambijeva produkcija je bila v celotnem obdobju neprekinjena; (b) kambij je proizvedel pet pasov oz. plasti lesa z različno anatomijo (podoben ranemu lesu, rani les, kasni les, podoben ranemu lesu, kasni les); (c) les, ki je nastal med marcem 2015 in koncem januarja 2016, bi bil opredeljen kot branika 2015, če bi ga opazovali pri povečavah, ki jih običajno uporabljajo v dendrokronologiji.



formed from January until March 2015, would be falsely ascribed to tree ring 2014. This observation contradicts the definition of a tree ring – which is considered to be the amount of wood produced in one year in temperate environments.

The alternation of different types of wood can be observed in thin cross-sections obtained from the microcores or on smoothly polished wood observed under the stereo microscope at high magnifications (Figure 3).

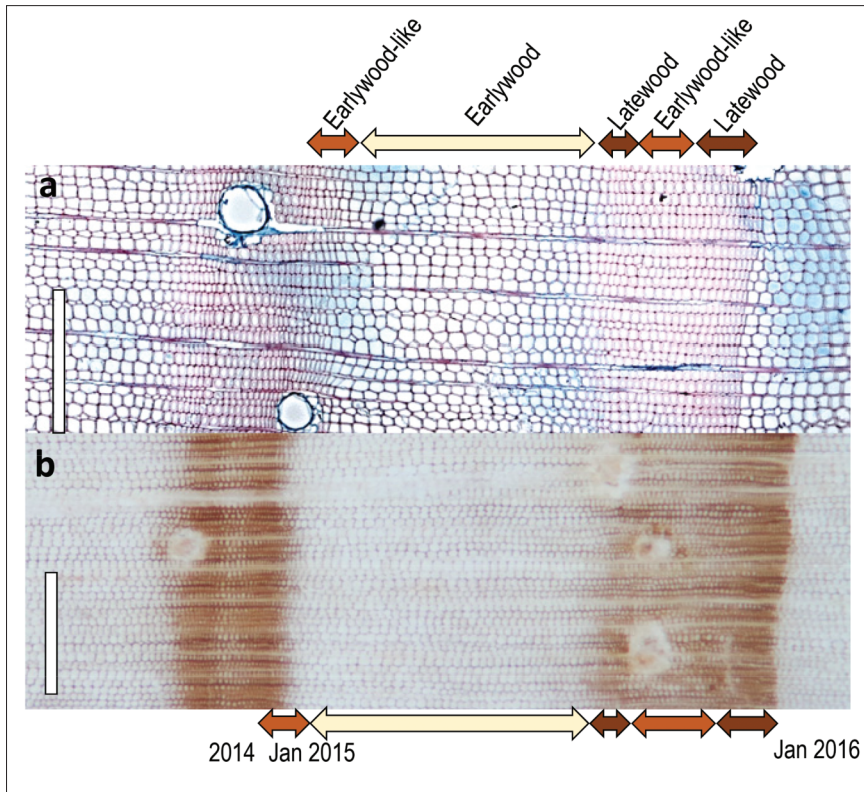


Figure 3. Anatomy of wood produced between January 2015 and the end of January 2016 in *Pinus pinea*: (a) cross-section under a light microscope and (b) polished surface under a stereo microscope. There is no sharp boundary between the increments of 2014 and 2015. Scale bars = (a) 500  $\mu\text{m}$ , (b) 800  $\mu\text{m}$ .

*Slika 3. Anatomija lesa, nastalega med januarjem 2015 in koncem januarja 2016 v piniji: (a) prečni prerez pod svetlobnim mikroskopom in (b) polirana površina lesa pod stereo mikroskopom. Med prirastki 2014 in 2015 ni ostre meje (letnice). Merilne daljice = (a) 500  $\mu\text{m}$ , (b) 800  $\mu\text{m}$ .*



Figure 4. Increment cores of *Pinus pinea* polished and scanned at the resolution of 1200 dpi. Black dots indicate the tree rings dated 2010 (left) and 2015 (right). Intra-annual density fluctuations (IADFs) in tree ring 2015 cannot be clearly seen, the wood formed between March 2015 and the end of January 2016 would be considered as the annual ring for 2015. Wood produced between January and March 2015 would be ascribed to the 2014 increment (c.f. Figures 2 and 3).

*Slika 4. Izvrтки pinije zglajeni in skenirani pri ločljivosti 1200 dpi. Črne pike označujejo prirastne plasti 2010 (levo) in 2015 (desno). Gostotne variacije (IADF) v prirastni plasti 2015 ni mogoče jasno videti, les, ki je nastal med marcem 2015 in koncem januarja 2016, bi zmotno opredelili kot braniko 2015. Les nastal med januarjem in marcem 2015, bi pripisali prirastni plasti 2014 (prim. sliki 2 in 3).*

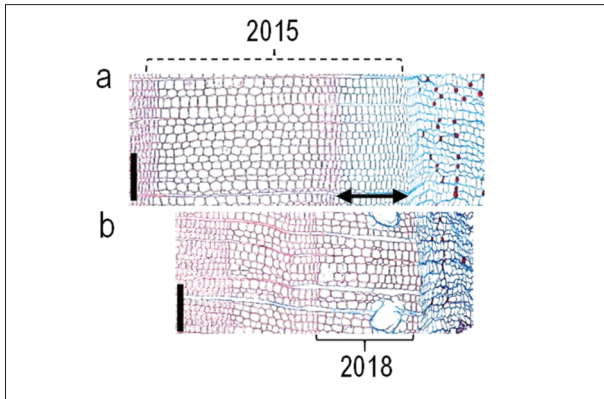


Figure 5. Cross-sections of cores of the same *Pinus pinea* tree: (a) in November 2015 the cambium was productive and part of the xylem ring was not yet differentiated (arrow), and (b) in November 2018 the cambium was not productive and the last formed wood was fully differentiated. Scale bars = 250  $\mu\text{m}$ .

Slika 5. Prečni prerezi tkiv istega drevesa *Pinus pinea*: (a) novembra 2015 je bil kambij produktiven in del ksilemske prirastne plasti še ni bil diferenciran (puščica) in (b) novembra 2018 kambij ni bil produktiven, zadnji nastali les pa je bil popolnoma diferenciran. Merilni daljci = 250  $\mu\text{m}$ .

### 3.2 CAMBIAL ACTIVITY IN THE SAME TREE AND MONTH IN DIFFERENT YEARS

#### 3.2 AKTIVNOST KAMBIJA V ISTEM DREVESU IN MESECU V RAZLIČNIH LETIH

In 2015, the cambial activity did not end at the end of the calendar year. Indeed, the cross-sections from the microcores taken in November 2015 showed active cambium producing earlywood-like cells forming an L-IADF (Figures 4, 5, 6).

However, the same tree showed no cambial activity in November 2018. At that time, a narrow 2018 tree ring, consisting of earlywood and very narrow latewood, was already complete and contained no IADFs (Figures 5, 6).

Consequently, a comparison of the wood formed in 2015 and 2018 indicates a completely different anatomical structure (Figures 5, 6) and highlights high variability among years in tree rings of *P. pinea* growing on a typical Mediterranean site.

### 3.3 EFFECT OF FIRE ON TREE RING STRUCTURE

#### 3.3 UČINEK POŽARA NA ZGRADBO PRIRASTNE PLASTI

During the sampling in November 2018 we noticed that the trees were severely damaged by fire

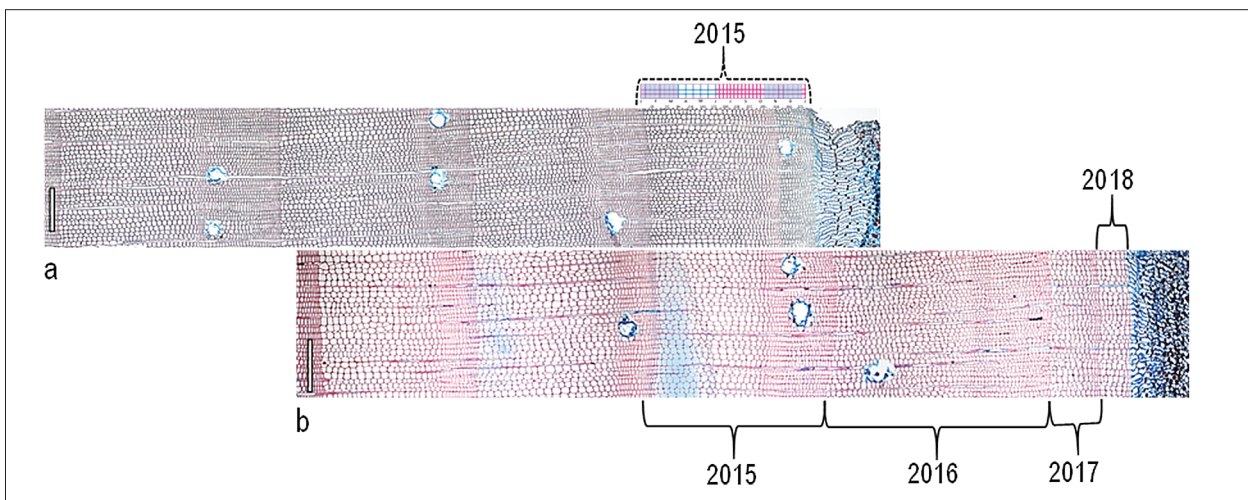


Figure 6. Cross-sections of *Pinus pinea* from microcores collected from the same tree in November 2015 and 2018: (a) the incomplete ring for 2015 and previous rings, and (b) the ring for 2018 and previous rings including the 2017 one (when the tree was injured by fire) and the fully differentiated 2015 ring. Scale bars = 500  $\mu\text{m}$ .

Slika 6. Prečni prerezi *Pinus pinea* iz mikroizvrtkov, odvzetih iz istega drevesa novembra 2015 in 2018: (a) nediferencirana prirastna plast 2015 in predhodne prirastne plasti, in (b) diferencirana prirastna plast 2018, plast 2017, ko je julija drevo poškodoval požar in predhodne prirastne plasti, vključno z diferencirano plastjo 2015. Merilne daljice = 500  $\mu\text{m}$ .

(Figure 1), which occurred in July 2017. This offered us the opportunity to inspect the anatomy of 2017 and the following 2018 ring at the location where the cambium was not injured, but was probably affected by high temperature.

By the analysis of cores (Figures 4 and 7) and microcores (Figure 6) we found that the ring for 2017 was narrower than the previous ones, with very narrow latewood and no IADFs. Such a structure is a consequence of an abrupt cessation of wood formation in July, due to fire. The cambium seemed to stop its production due to heat; although it did not seem to be injured as it formed no wound wood. Latewood consisting of only a few cells indicates that the cambium probably stopped wood production and did not reactivate after the abrupt stop due to fire. Our finding is in accordance with the observations of De Micco et al. (2013), who reported that the tree rings of *P. halepensis* formed after summer fire mainly contained earlywood cells.

#### 4 CONCLUSIONS

##### 4 ZAKLJUČKI

In this study we present details of the high variability in tree ring structure of *Pinus pinea* (stone pine) growing at a typical Mediterranean site in Southern Italy.

Cross-sections of tissues taken by microcoring and observed under a light microscope showed that cambium can remain productive over the entire calendar year.

When cambium was active for more than 13 months, it produced an increment consisting of five different layers with different wood structures (including an IADF).

If we observed the same increment on polished surfaces of wood under a stereo microscope, IADFs could not be clearly distinguished. Therefore, the wood formed between March 2015 and the end of January 2016 would be defined as the tree ring for 2015, and the wood formed between January and March 2015, would be falsely ascribed to the latewood of the 2014 tree ring.

Furthermore, sampling in November 2015 and 2018 showed that cambium can be still productive, with the latest formed wood in the differentiation phase, or the cambial activity can be ended, with the latest formed xylem fully differentiated.

Finally, we found that cambium in trees affected (but not injured) by wildfire in July 2017 may have abruptly stopped producing xylem cells, which resulted in narrower increment consisting mainly of earlywood cells with no reactivation of cambial activity to produce an IADF within latewood.

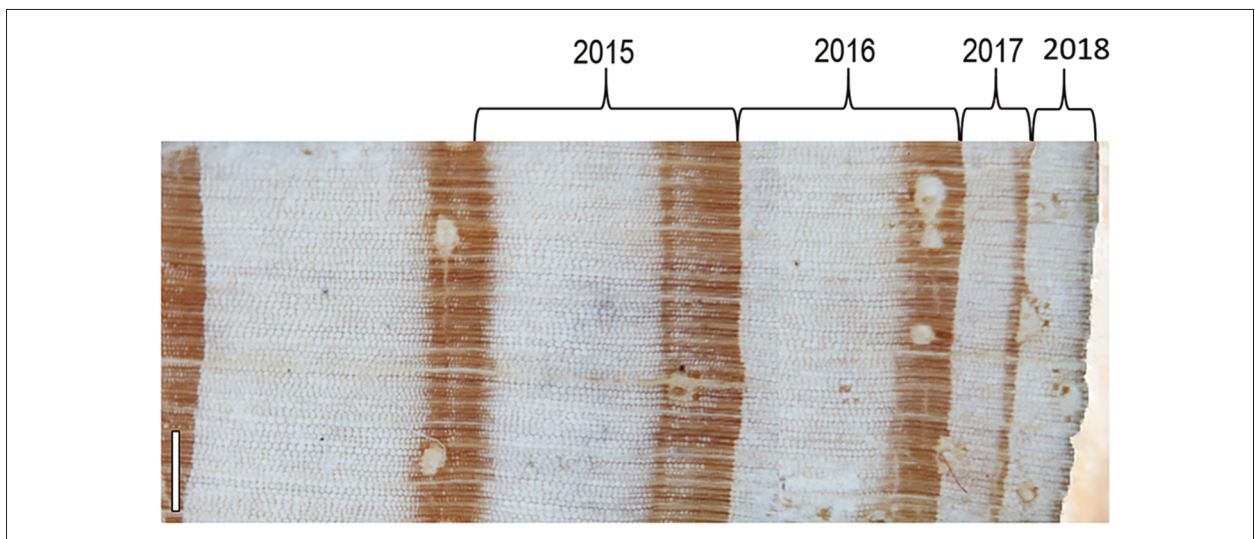


Figure 7. *P. pinea* wood of a core sampled in November 2018. Note the rings for 2018, 2017 (formed in the year when the fire occurred, in July 2017) and the 2015 tree ring.

Slika 7. Les izvrтка pinije, odvzetega v novembru 2018 z zadnjo prirastno plastjo, plastjo 2017 (nastalo v letu, ko je julija požar prizadel sestoju) in predhodnimi plastmi.

We showed that monitoring of wood formation can help us to exactly define when a particular growth layer has formed. The importance of monitoring wood formation should thus be taken into account in dendrochronological studies of Mediterranean wood species.

## 5 SUMMARY

### 5 POVZETEK

Branika v lesu je prirastna plast lesa, nastalega v enem letu. V drevesih, rastočih v Sredozemlju, kambij pogosto proizvede več plasti bolj ali manj tipičnega ranega in kasnega lesa v enem koledarskem letu in zato prirastna plast vsebuje gostotne variacije, imenovane tudi IADF (Intra-Annual Density Fluctuation). IADF, ki se pojavljajo v sredozemskih iglavcih, večinoma razvrščamo v štiri tipe (De Micco et al., 2016a) glede na njihov relativni položaj v ranem in kasnem lesu: 1) E -IADF, kot pas kasnemu lesu podobnih celic, ki se pojavlja v prvi polovici prirastne pasti t.j. v ranem lesu; 2) E+ -IADF, kot celice z značilnostmi med ranim in kasnim lesom (prehodni les) ob koncu ranega lesa; 3) L -IADF kot ranemu lesu podobne celice v kasnem lesu, ki se pojavljajo v drugi polovici prirastne plasti; 4) L+ -IADF kot pas ranemu lesu podobnih celic z ožjimi lumni in debelejšimi stenami kot jih ima pravi rani les, ki se pojavlja med kasnim lesom in ranim lesom naslednje prirastne plasti. V slednjem primeru meja med prirastnimi plastmi (letnica) ni ostra.

IADF, če jih ne prepoznamo, lahko povzročijo težave pri datiranju prirastnih plasti in napake v dendroekoloških raziskavah. Najnovejše študije poročajo, da uporaba metode odvzema mikro izvrtkov za spremljanje ksilogeneze (nastajanja lesa) omogoča natančno opredeliti čas nastanka IADF (De Micco et al., 2016b; Balzano et al., 2018 a, b) in s tem pojasniti okoljske razmere, ki sprožijo njihovo nastajanje.

Cilji te raziskave so predstaviti tri delne študije, ki prikazujejo, kako različni ritmi kambijeve produkcije vplivajo na anatomsko zgradbo lesa, ta pa na prepoznavnost prirastnih plasti in njihovo datiranje. Raziskave so bile opravljene na odraslih pinjah (*Pinus pinea*), s pobočij Vezuva pri Neaplju v Italiji, s tipično sredozemsko klimo.

Na izbranem rastišču (slika 1) smo od januarja 2015 do januarja 2016 v rednih časovnih razmakih odvezemali mikro izvrtke za spremljanje nastajanja

lesa (Balzano et al., 2018a). Vzorčenje smo ponovili v novembru 2018. Izvrtke smo vklopili v parafin in izdelali anatomske preparate, obarvane s safranim in astra modrim po uveljavljenem postopku (Prislan et al., 2013). Prečne prereze tkiv smo opazovali s svetlobnim mikroskopom Nikon Eclipse 800 in jih posneli z digitalno kamero (DS-Fi1), povezano s sistemom za analizo slike NIS Elements BR 3 (Melville, NY, ZDA). Analizirali smo nastajajoče celice lesa (ksilema) v različnih fazah ksilogeneze: kambijeve celice (CC), postkambijske celice (PC) in celice z razvijajočo se celično steno (SW) (Gričar, 2007). IADF-e smo opredelili v skladu z De Micco et al. (2016a).

Na istih drevesih smo v novembru 2018 s prirastoslovnim svedrom odvzeli izvrtke. Te smo gladko zbrusili in nato pregledali s stereo mikroskopom (OLYMPUS SZ-STUZ). Izvrtke smo tudi skenirali pri ločljivosti 1200 dpi s pomočjo skenerja HP Scanjet 4890 v skladu s postopki, ki so v uporabi v dendrokronologiji (npr., Čufar et al., 2017).

V prvem primeru smo prikazali nastanek prirastne plasti, ko je na toplem in suhem sredozemskem rastišču kambij neprekinjeno deloval vse leto oz. več kot 13 mesecev. V tem primeru je kambij proizvedel pet plasti lesa z različno anatomijo (podoben ranemu lesu, rani les, kasni les, podoben ranemu lesu, kasni les (slika 2). Če bi les opazovali na zgledni površini izvrtka, pri povečavah, ki jih običajno uporabljajo v dendrokronologiji, bi les, ki je nastal med marcem 2015 in koncem januarja 2016, napačno opredelili kot braniko 2015.

Med prirastki 2014 in 2015 ni bilo ostre meje (letnice), zato bi les, nastal med januarjem in marcem 2015 zmotno pripisali prirastni plasti 2014 (slike 2, 3, 4).

V istem drevesu smo prikazali aktivnost kambija v različnih letih, 2015 in 2018. Novembra 2015 je bil kambij še aktiven, les zadnje prirastne plasti pa je bil še v fazi diferenciacije, novembra 2018 pa se je aktivnost kambija že zaključila, zadnji nastali les je bil popolnoma diferenciran, prirastna plast pa je vsebovala rani in kasni les brez IADF.

Med vzorčenjem v letu 2018 smo ugotovili, da so bila drevesa prizadeta zaradi požara v juliju 2017. To nam je omogočilo študij zgradbe lesa, nastalega v letu 2017, ko je drevesa v juliju prizadel požar, in v letu 2018 po požaru. Pri tem naj poudarimo, da kambij ni bil vidno poškodovan, zelo verjetno pa je bil izpostavljen visokim temperaturam.

Balzano, A., De Micco, V., Merela, M., & Čufar, K.: Tree-rings in Mediterranean pines – can we ascribe them to calendar years?

Z analizo izvrtkov (sliki 4 in 7) in prečnih prerezov iz mikro izvrtkov (slika 6) smo ugotovili, da je bila prirastna plast 2017 ožja od predhodnih, imela je zelo ozek kasni les in je bila brez IADF. Takšno zgradbo pripisujemo nenadni zaustavitvi kambijeve aktivnosti in nastajanja lesa v juliju 2017 zaradi požara, pri čemer se kambij ni ponovno aktiviral. Naše ugotovitve so v skladu z ugotovitvami De Micco et al. (2013), ki so poročali, da so v alepskem boru (*Pinus halepensis*), ki je doživel poletni ogenj, zasledili prirastne plasti, ki so večinoma vsebovale rani les.

Raziskave so pokazale, da v primerih, ko branike ne nastajajo strogo sezonsko, tako kot v zmerni klimi, le spremljanje nastajanja lesa in opazovanje zgradbe lesa pod mikroskopom omogoča natančno določitev, kdaj je nastala posamezna prirastna plast.

Primere, ko prirastne plasti ni mogoče natančno pripisati koledarskemu letu, je treba upoštevati v dendrokronoloških raziskavah pinije in tudi ostalih sredozemskih vrst.

## ACKNOWLEDGEMENTS

### ZAHVALE

The study was supported by the Slovenian Research Agency (ARRS), program P4-0015. We thank Jože Planinšič and Luka Krže, for their support with the work in the laboratory. We are grateful to Paul Steed for English language editing.

## REFERENCES

### VIRI

- Balzano, A., Battipaglia, G., & De Micco, V. (2018b). Wood-trait analysis to understand climatic factors triggering intra-annual density-fluctuations in co-occurring Mediterranean trees. *IAWA Journal*, 1(aop), 1-18.
- Balzano, A., Čufar, K., Battipaglia, G., Merela, M., Prislán, P., Aronne, G., & De Micco, V. (2018a). Xylogenesis reveals the genesis and ecological signal of IADFs in *Pinus pinea* L. and *Arbutus unedo* L. *Annals of Botany*, 121(6), 1231-1242.
- Bräuning, A. (1999). Dendroclimatological potential of drought-sensitive tree stands in southern Tibet for the reconstruction of monsoonal activity. *IAWA Journal*, 20(3), 325-338.
- Campelo, F., Nabais, C., Freitas, H., & Gutiérrez, E. (2007). Climatic significance of tree-ring width and intra-annual density fluctuations in *Pinus pinea* from a dry Mediterranean area in Portugal. *Annals of Forest Science*, 64(2), 229-238.
- Cherubini, P., Gartner, B. L., Tognetti, R., Braeker, O. U., Schoch, W., & Innes, J. L. (2003). Identification, measurement and interpretation of tree rings in woody species from Mediterranean climates. *Biological Reviews*, 78(1), 119-148.
- Čufar, K., Beuting, M., Demšar, B., & Merela, M. (2017). Dating of violins – the interpretation of dendrochronological reports. *Journal of Cultural Heritage* 27S, 44–54.
- De Luis, M., Gričar, J., Čufar, K., & Raventos, J. (2007). Seasonal dynamics of wood formation in *Pinus halepensis* from dry and semi-arid ecosystems in Spain. *IAWA Journal* 28, 389–404.
- De Luis, M., Novak, K., Raventós, J., Gričar, J., Prislán, P., & Čufar, K. (2011). Climate factors promoting intra-annual density fluctuations in Aleppo pine (*Pinus halepensis*) from semiarid sites. *Dendrochronologia*, 29(3), 163-169.
- De Micco, V., Balzano, A., Čufar, K., Aronne, G., Gričar, J., Merela, M., & Battipaglia, G. (2016). Timing of false ring formation in *Pinus halepensis* and *Arbutus unedo* in Southern Italy: outlook from an analysis of xylogenesis and tree-ring chronologies. *Frontiers in plant science*, 7, 705.
- De Micco, V., Campelo, F., De Luis, M., Bräuning, A., Grabner, M., Battipaglia, G., & Cherubini, P. (2016a). Intra-annual density fluctuations in tree rings: how, when, where, and why? *IAWA Journal*, 37(2), 232-259.
- De Micco, V., Carrer, M., Rathgeber, C. B. K., Camarero, J. J., Voltas, J., Cherubini, P., & Battipaglia, G. (2019). From xylogenesis to tree rings: wood traits to investigate tree-reponse to environmental changes. *IAWA Journal* 40(2): in press. DOI: 10.1163/22941932-40190246
- De Micco, V., Zalloni, E., Balzano, A., & Battipaglia, G. (2013). Fire influence on *Pinus halepensis*: wood responses close and far from the scars. *IAWA Journal*, 34(4), 446-458.
- Gričar, J., & Čufar, K. (2008). Seasonal dynamics of phloem and xylem formation in silver fir and Norway spruce as affected by drought. *Russian Journal of Plant Physiology*, 55 (4), 538-543.
- Gričar, J., Zupančič, M., Čufar, K., & Oven, P. (2007). Regular cambial activity and xylem and phloem formation in locally heated and cooled stem portions of Norway spruce. *Wood Science and Technology*, 41(6), 463-475.
- Kaennel, M., & Schweingruber, F. H. (1995). Multilingual glossary of dendrochronology: Terms and definitions in English, German, French, Spanish, Italian, Portuguese and Russian. Paul Haupt.
- Martinez del Castillo, E., Longares, L. A., Gričar, J., Prislán, P., Gil-Pelegrín, E., Čufar, K., & De Luis, M. (2016). Living on the edge: contrasted wood-formation dynamics in *Fagus sylvatica* and *Pinus sylvestris* under Mediterranean conditions. *Frontiers in Plant Science*, 7, 370.
- Moriondo, M., Good, P., Durao, R., Bindi, M., Giannakopoulos, C., & Corte-Real, J. (2006). Potential impact of climate change on fire risk in the Mediterranean area. *Climate Research*, 31(1), 85-95.
- Novak, K., De Luis, M., Gričar, J., Prislán, P., Merela, M., Smith, K. T., & Čufar, K. (2016). Missing and dark rings associated with drought in *Pinus halepensis*, *IAWA Journal*, 37 (2): 260-274.
- Prislán, P., Gričar, J., de Luis, M., Smith, K. T., & Čufar, K. (2013). Phenological variation in xylem and phloem formation in *Fagus syl-*

Balzano, A., De Micco, V., Merela, M., & Čufar, K.: Prirastne plasti v mediteranskih borih – ali lahko ugotovimo, v katerem koledarskem letu so nastale?

*vatica* from two contrasting sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 180, 142-151.

Rigling, A., Waldner, P. O., Forster, T., Bräker, O. U., & Pouttu, A. (2001). Ecological interpretation of tree-ring width and intra-annual density fluctuations in *Pinus sylvestris* on dry sites in the central Alps and Siberia. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(1), 18-31.

Schweingruber, F. H. (2007). *Wood structure and environment*. Springer Science & Business Media.

Useros, F., Balzano, A., Prislán, P., de Luis, M., Gričar, J., Merela, M., & Čufar, K. (2017). Wood formation in Norway spruce on a lowland site in Slovenia in 2015 and comparison with other conifers all over Europe. *Les/Wood*, 66(2), 15-27.

DOI: 10.26614/les-wood.2017.v66n02a02



## VPLIV TERMIČNE MODIFIKACIJE NA OBDELOVALNE LASTNOSTI BUKOVINE

## THE INFLUENCE OF THERMAL MODIFICATION ON THE MACHINING PROPERTIES OF BEECH WOOD

Miran Merhar<sup>1\*</sup>, Bogdan Šega<sup>1</sup>, Dominika Gornik Bučar<sup>1</sup>

UDK 630\*823.7:630\*842

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Prispelo / Received: 15. 4. 2019

Sprejeto / Accepted: 17. 5. 2019

## Izvleček / Abstract

**Izvleček:** V delu smo analizirali vpliv termične modifikacije na obdelovalne lastnosti bukovine, kjer smo ocenjevali kakovost obdelane površine po operaciji skobljanja, rezkanja in struženja nemodificirane in modificirane bukovine. Po obdelavi smo površine vizualno ocenili z ocenami od 1 do 5, glede na napake zatrganih, lomljenih in dvignjenih vlaken ter podali povprečno oceno za vsako vrsto operacije kot tudi odstotek preizkušancev z različno vrednostjo podane ocene. Ugotovili smo, da je povprečna ocena termično modificirane bukovine pri skobljanju boljša v primerjavi z nemodificirano bukovino, vendar pa ANOVA analiza ni potrdila statistično značilnih razlik. Ravno tako ni statistične razlike pri rezkanju, medtem ko je pri struženju vpliv modifikacije statistično značilen, saj je kakovost površine termično modificirane bukovine bistveno boljša. Iz opravljene analize lahko sklepamo, da ima termična modifikacija pozitiven vpliv na kakovost obdelane površine bukovine.

**Ključne besede:** termična modifikacija, bukev, skobljanje, rezkanje, struženje, kakovost površine

**Abstract:** The work analyses the influence of thermal modification on the machining properties of beech wood, where the quality of the surface is evaluated after the operation of planing, routing and turning of unmodified and modified beech. After machining, the surface is visually assessed with grades from 1 to 5, with respect to defects of raised, fuzzy and torn grain. As a result an average grade for each type of operation is given, as well as the percentage of each grade. It has been found out that the average grades of thermally modified beech wood in planing were better compared to unmodified beech, but ANOVA analysis did not confirm differences between them. There was also no difference in routing, while in turning the influence of modification was significant, since the surface quality of the thermally modified beech was significantly better compared to that of unmodified beech. From the analysis it can be concluded that thermal modification has a positive effect on the quality of the machined surface.

**Keywords:** thermal modification, beech wood, planing, routing, turning, surface quality

## 1 UVOD

### 1 INTRODUCTION

Navadna bukev (*Fagus sylvatica* L.) kljub zapostavljenosti v preteklosti danes spada med najpomembnejše drevesne vrste v gozdovih zmerno celinskega pasu v Evropi, v Sloveniji pa predstavlja z 32,4 % deležem največji delež v lesni zalogi (Poročilo ..., 2018). Bukovina je kakovosten les, ki ga je mogoče široko uporabljati in iz njega napraviti pester nabor izdelkov (Čufar et al., 2012). Cenjena je zaradi njene homogene anatomske zgradbe, dobrih elasto-mehanskih in tehnoloških lastnosti ter značilne

barve in enakomerne teksture. Bukovina je praktično uporabna za vse vrste izdelkov, njeno slabšo odpornost v primeru izpostavitve vlagi pa lahko izboljšamo z zaščito, saj se dobro impregnira.

Kljub veliki razpoložljivi količini, dobrim lastnostim, veliki uporabnosti in ugodnim razmerjem med kakovostjo in ceno je v zadnjih letih v Sloveniji in Evropi opazen velik upad rabe bukovine v žagarski in furnirski industriji (Čufar et al., 2017), narašča pa njena poraba za energetske namene, ki zavzema vse večji delež (Piškur & Krajnc, 2012; Piškur et al., 2014; Prislan et al., 2015). Glede na to so nujna prizadevanja za večjo izkoriščanje bukovega lesa za izdelke z visoko dodano vrednostjo (Kropivšek & Čufar, 2015; Kropivšek & Gornik Bučar 2016), za kar se običajno uporablja les višje kakovosti. Določen poten-

<sup>1</sup> Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, SLO

\* e-pošta: [miran.merhar@bf.uni-lj.si](mailto:miran.merhar@bf.uni-lj.si); telefon: 01-320-3629

cial zagotovo predstavlja tudi manj kakovosten les, ki omogoča inovativno rabo v novih materialih (npr. nanofibrilirana in nanokristalinična celuloza, papir, tekstil ...), kemikalijah in naprednih gorivih kot sta bioetanol in biometanol (Zule et al., 2017), kot tudi na področju gradbeništva (Hapla & Militz, 2008).

Za nosilne konstrukcijske namene se bukovina uporablja v veliko manjšem obsegu, predvsem zaradi omejene odpornosti, z inovativnimi konstrukcijskimi rešitvami pa postaja to področje rabe bukovine tudi tržno vedno bolj zanimivo (Gornik Bučar et al., 2017). Odpornost bukovine kot tudi dimenzijsko stabilnost lahko bistveno izboljšamo s termično modifikacijo (TM) lesa (Militz, 2002; Boonstra et al., 2007; Esteves & Pereira, 2009).

Obstajajo različni postopki termične modifikacije, ki se izvajajo v temperaturnem območju med 160 °C in 240 °C in v klimi z zmanjšano vsebnostjo kisika (Sandberg et al., 2013). Termična modifikacija lesa vpliva na gradnike lesa (hemicelulozo, celulozo, lignin, ekstraktive ...) in posledično na fizikalne, mehanske, vizualne (barva) in obdelovalne lastnosti lesa (Johansson, 2005; Boroukva et al., 2016). Že nekoliko starejša literatura navaja, da termično modificiran les izkazuje večjo dimenzijsko stabilnost in odpornost, vendar tudi slabšo upogibno trdnost in udarno žilavost (Stamm et al., 1955). Zaradi spremenjenih gradnikov lesa se spremenijo tudi nekatere lastnosti, ki vplivajo na kakovost lepljenja modificiranega lesa. Površina lesa je hidrofobna, kar poslabša omočitev z lepilom, ravnovesna vlažnost je nižja, kar predstavlja problem pri lepljenju s poliuretanskimi lepili, toplotna prevodnost je slabša, kar otežuje segrevanje lepilnega spoja pri toplem stiskanju, zniža se tudi pH lesa (Fašalek, 2017).

Glede na značilne kemijske in strukturne spremembe termično modificiranega lesa, vedenje in informacije o obdelovalnih lastnostih nemodificiranega lesa ne moremo prezrcaliti na modificirano surovino, raziskave o mehanski obdelavi (skobljanje, vrtanje, rezkanje, struženje) modificiranega lesa pa so relativno redke (Sandak et al., 2017). Rezultati ene temeljitejših raziskav o vplivu parjenja na fizikalne in obdelovalne lastnosti bukovine kažejo, da ni statistično značilnih razlik v kakovosti obdelave parjene in neparjene bukovine (Gorišek, 1987), hkrati pa navajajo, da je pri mehanski obdelavi parjene bukovine opazno hitrejše krhanje orodja. Omenjena raziskava je potekala pri dveh različnih temperaturah parjenja

in sicer 100 °C in 130 °C in je trajala 2, 4 in 6 ur, kar se precej razlikuje od pogojev termične modifikacije naše raziskave.

Namen raziskave je tako preučiti vpliv termične modifikacije na kakovost obdelanih površin bukovine pri osnovnih mehanskih lesnoobdelovalnih operacijah skobljanja, rezkanja in struženja. Informacije o kakovosti obdelanih površin modificirane bukovine omogočajo večjo rabo termično modificirane bukovine in omogočajo lažjo izbiro ustreznega načina obdelave oz. izbiro ustreznega izdelka iz termično modificirane bukovine.

## 2 MATERIAL IN METODE

### 2 MATERIAL AND METHODS

Iz tehnično osušenega žaganega lesa bukve smo izbrali 40 desk, ki smo jih razdelili na dve skupini. Polovico desk smo termično obdelali po postopku Silvaprop Wood podjetja Silvaproduct. Les je bil med postopkom modifikacije 3 ure izpostavljen temperaturi 212 °C. Po končani modifikaciji smo ga en mesec kondicionirali pri 20 °C in relativni zračni vlažnosti 65 %, da je zopet vzpostavil ravnovesno vlažnost in so se sprostile morebitne notranje napetosti, nastale pri termični modifikaciji. Hkrati smo pri enakih pogojih kondicionirali tudi drugo polovico bukovine.

Po kondicioniranju smo iz 20 desk nemodificirane in iz 20 desk termično modificirane bukovine dimenzij 1300 mm x 135 mm x 25 mm naredili po en preizkušanelec za teste skobljanja in rezkanja ter dva za struženje. Teste obdelave smo izvedli skladno s standardom ASTM D1666-17. Ko smo vzorce obdelali, smo ocenili kakovost površine z ocenami od 1 do 5, kjer pomenijo ocene: 1 - odlično, 2 - zelo dobro, 3 - dobro, 4 - slabo in 5 - zelo slabo, ter podali povprečno oceno za vsako vrsto operacije ter tudi odstotek preizkušancev z različno vrednostjo podane ocene.

Odvisnost kakovosti obdelane površine od tehnoloških parametrov ter med posameznimi operacijami obdelave smo preverili z ANOVA analizo s programom SPSS, kjer smo za stopnjo značilnosti ( $p$  - vrednost) vzeli 5 %. V primeru, da odvisnosti med posameznimi vrednostmi ni bilo možno določiti z osnovno ANOVA analizo, smo naredili še dodatno LSD (Least significant difference) statistično analizo.



## 2.1 SKOBLJANJE

### 2.1 PLANING

Preizkušanci za skobljanje so imeli dimenzije 900 mm x 102 mm x 19 mm. Skobljali smo na debelinskem skobeljnem stroju, ki je imel 4 sveže nabrušena HSS rezila. Prsni kot rezil je znašal 30°, vrtilna hitrost 4500 vrt/min, podajalne hitrosti 5, 8, 12 in 18 m/min, debelina odvzema pa je bila 1,6 mm. Polovico preizkušancev smo poskobljali proti rasti, polovico pa z rastjo lesnega tkiva. Ker so bila rezila na vretenu vpeta na klasičen način s šablono, ni bilo možno zagotoviti, da bi bila vsa rezila na isti rezalni krožnici. Tako je imelo eno rezilo za 0,01 mm večjo rezalno krožnico od ostalih, kar pomeni, da je bila površina enaka, kot če bi skobljali samo z enim rezilom. Ustrežno temu so bila podajanja na zob oz. dolžine valov večje in so pri omenjenih podajalnih hitrostih znašale 1,1; 1,8; 2,7 in 4 mm. Poskobljano površino smo vizualno ocenili glede na dvignjena vlakna, lomljena vlakna, zatrganine (slika 1) in sledove odrezkov. Iz dobljenih ocen smo nato izračunali povprečno oceno za vsak posamezen preizkušanec ter podali odstotek preizkušancev, ki so imeli ocene 1, oz. površino brez napak.

## 2.2 REZKANJE

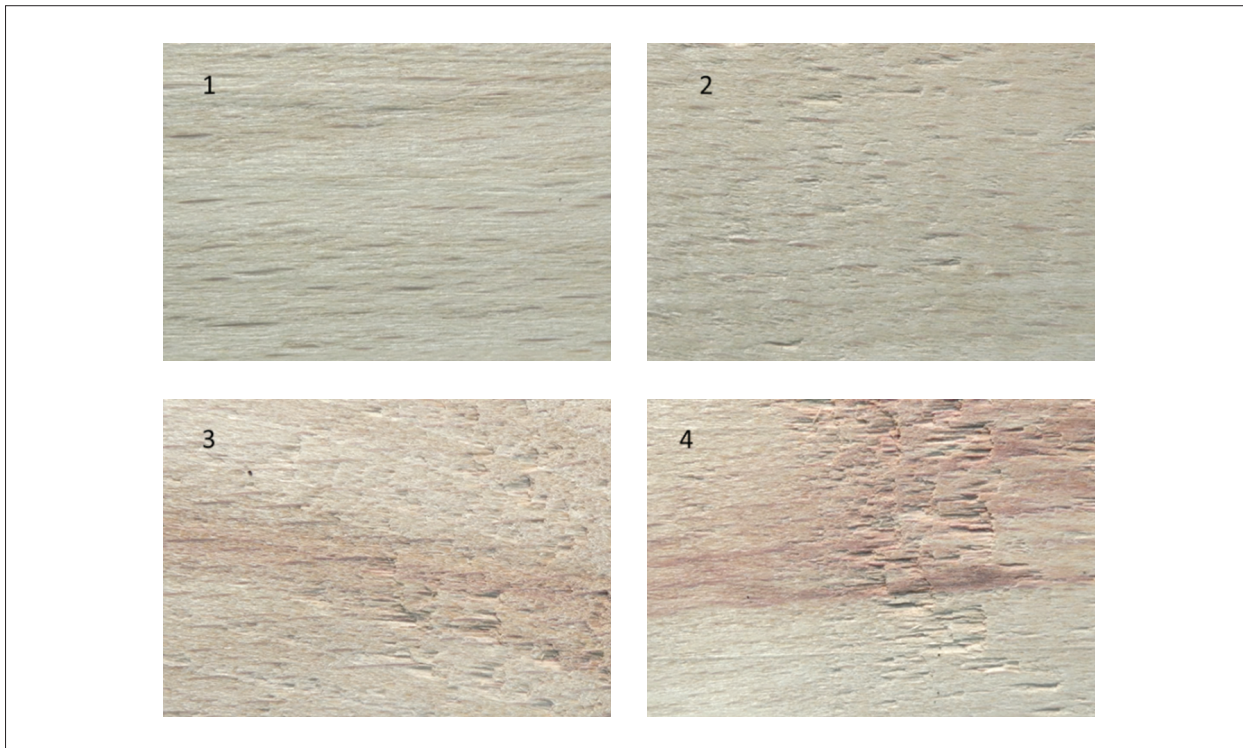
### 2.2 ROUTING

Preizkušanci za rezkanje so imeli dimenzije 305 mm x 76 mm x 19 mm. Rezkali smo na CNC rezkalnem stroju z rezkalno glavo, ki je imela 2 rezili iz karbidne trdnine (slika 2). Vrtilna hitrost rezkalne glave je znašala 6500 vrt/min, podajalna hitrost pa 2 m/min.



Slika 2. Rezkalna glava z 2 reziloma iz karbidne trdnine

Figure 2. Milling head with two tungsten carbide teeth



Slika 1. Kakovost površine po skobljanju – zatrganine: Ocene 1 do 4

Figure 1. Planing surface quality – torn grain: Grades 1 to 4



Slika 3. Preizkušavec za test rezkanja, a – nemodificirana bukovina, b – modificirana bukovina

Figure 3. Specimen for routing test, a – unmodified beech, b – modified beech wood

Najprej smo izvedli prvo grobo rezkanje preizkušanca. Temu je sledilo drugo grobo rezkanje, kjer smo dobili končno obliko z nadmero 1,6 mm na vsaki strani (slika 3). S tem smo odstranili tudi napake, kot so zatrganine, ki so nastale pri prvem grobem rezkanju. Končno je sledilo fino rezkanje, kjer je bila globina odvzema 1,6 mm. Rezkan rob smo ocenili glede na dvignjena vlakna, lomljena vlakna in zatrganine. Oceno smo podali za vzdolžno in prečno površino vzorca ter podali odstotek preizkušancev, ki so imeli ocene 1 in 2, kot navaja standard ASTM D1666-17.

## 2.3 STRUŽENJE

### 2.3 TURNING

Za struženje smo iz deske naredili po dva preizkušanca dimenzij 127 mm x 19 mm x 19 mm. Preizkušavec je imel vrtilno hitrost 3200 vrt/min, podajalna hitrost rezila pa je bila 120 mm/min. Stružili smo v dveh stopnjah, najprej grobo struženje, nato pa še fino, kjer je bila globina odvzema 2 mm.

Površino preizkušanca (slika 4) smo ocenili glede na lomljena vlakna, zatrganine in gladkost površine na treh lokacijah, A, B in C. Omenjene lokacije smo izbrali na podlagi kakovosti površine, saj je bila kakovost površine na lokacijah B in C v primerjavi z A in ostalimi površinami najslabša. Iz ocen na vseh lokacijah smo nato izračunali povprečno vrednost za vsak preizkušavec posebej ter podali odstotek preizkušancev, ki so imeli ocene od 1 do 3, skladno s standardom ASTM D1666-17.

## 3 REZULTATI IN DISKUSIJA

### 3 RESULTS AND DISCUSSION

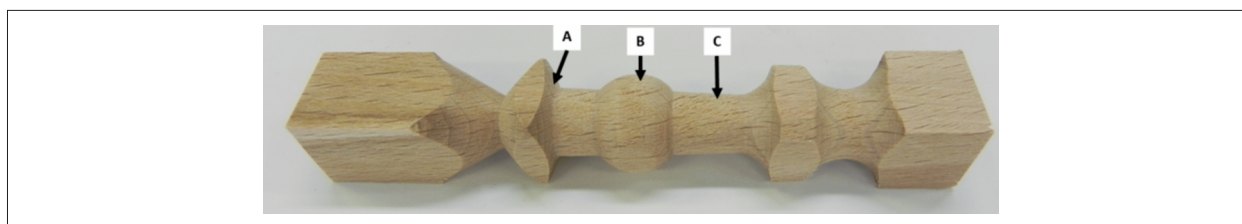
#### 3.1 SKOBLJANJE

##### 3.1 PLANING

Povprečna ocena kakovosti površine pri skobljanju nemodificirane bukovine je bila v razponu od 1,1 pri najnižji podajalni hitrosti 5 m/min do 1,5 pri najvišji podajalni hitrosti 18 m/min, medtem ko je bila pri modificirani bukovini ocena konstantna pri vseh podajalnih hitrostih in je znašala 1,1 (slika 5). Nizke vrednosti kažejo, da se tako nemodificirana kot tudi modificirana bukovina odlično skobljata. Iz slike je razvidno, da se ocene in s tem kakovost slabša s večanjem podajalne hitrosti pri obeh skupinah preizkušancev, le pri nemodificirani bukovini je odvisnost bolj izrazita.

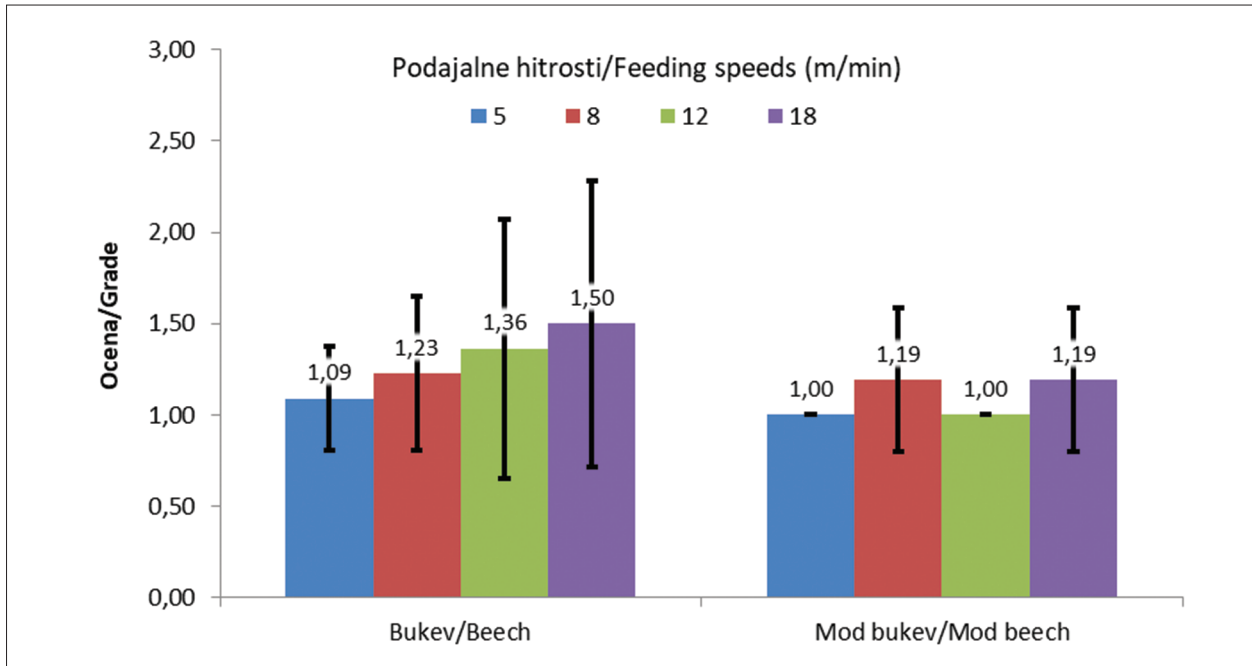
Odvisnost kakovosti obdelane površine od podajalne hitrosti, ki smo jo preverili z ANOVA analizo, prikazuje preglednica 1. Na podlagi  $p$ -vrednosti, kjer smo za mejo vzeli 5 %, je razvidno, da je odvisnost statistično značilna samo pri modificirani bukovini, medtem ko pri nemodificirani bukovini odvisnost ni statistično značilna.

Iz opravljene analize pa ne moremo določiti, ali morda obstaja statistično značilna razlika ocen med



Slika 4. Preizkušavec struženja ter mesta ocenjevanja kakovosti obdelave: A – stranska ravnina, B – zaobljena ravnina in C – ravna površina

Figure 4. Specimen for turning test with locations A, B and C for assessment of the quality of turning



Slika 5. Primerjava kakovosti skobljane površine nemodificirane in modificirane bukovine pri različnih podajalnih hitrostih s standardnim odklonom

Figure 5. Comparison of the quality of the planed surface of unmodified and modified beech wood at different feeding speeds together with the standard deviation

Preglednica 1. Odvisnost kakovosti skobljanja od podajalne hitrosti izražena s p – vrednostjo

Table 1. The quality of planing depended of feeding speed expressed with the p - value

Bukev / Beech	Mod. bukev / Modified beech
0,14	0,03

Preglednica 2. Statistična razlika ocene kakovosti skobljanja med posameznimi podajalnimi hitrostmi, izražena s p – vrednostjo za nemodificirano bukovino.

Table 2. The statistical difference of the planing surface grades between the individual feeding speeds expressed by the p - value of the ANOVA analysis for unmodified beech wood.

Podajalna hitrost / Feeding speed (m/min)	8	12	18
5	0,45	0,14	0,03
8		0,45	0,14
12			0,45

posameznimi podajalnimi hitrostmi. Zato smo naredili dodatno analizo z LSD metodo (preglednici 2 in 3).

Iz preglednice 2 je razvidno, da se ocene kakovosti površine pri nemodificirani bukovini statistično značilno razlikujejo samo med podajalno hitrostjo 5 in 18 m/min, medtem ko se ocene med ostalimi podajalnimi hitrostmi ne razlikujejo. Iz tega lahko sklepamo, da se bukovina enako dobro skoblja pri podajalnih hitrostih 5, 8 in 12 m/min, slabša ocena in

Preglednica 3. Statistična ocena kakovosti skobljanja med posameznimi podajalnimi hitrostmi izražena s p – vrednostjo za modificirano bukovino.

Table 3. The statistical difference of the planing surface grades between the individual feeding speeds expressed by the p - value for modified beech wood.

Podajalna hitrost / Feeding speed (m/min)	8	12	18
5	0,03	1,00	0,03
8		0,03	1,00
12			0,03

s tem kakovost pa se pojavi šele pri podajalni hitrosti 18 m/min. Rahlo drugačna je situacija pri modificirani bukovini, kjer lahko ugotovimo na podlagi rezultatov (preglednica 3), da se ocene statistično značilno razlikujejo povsod, razen med podajalnima hitrostma 5 in 12 m/min ter 8 in 18 m/min. Vendar pa moramo biti pri zadnji ugotovitvi previdni, saj je standardni odklon pri podajalni hitrosti 5 in 12 m/min enak 0, kar vpliva na ANOVA analizo.

*Preglednica 4. Statistična razlika ocene kakovosti skobljanja pri različnih podajalnih hitrostih med nemodificirano in modificirano bukovino, izražena s p – vrednostjo*

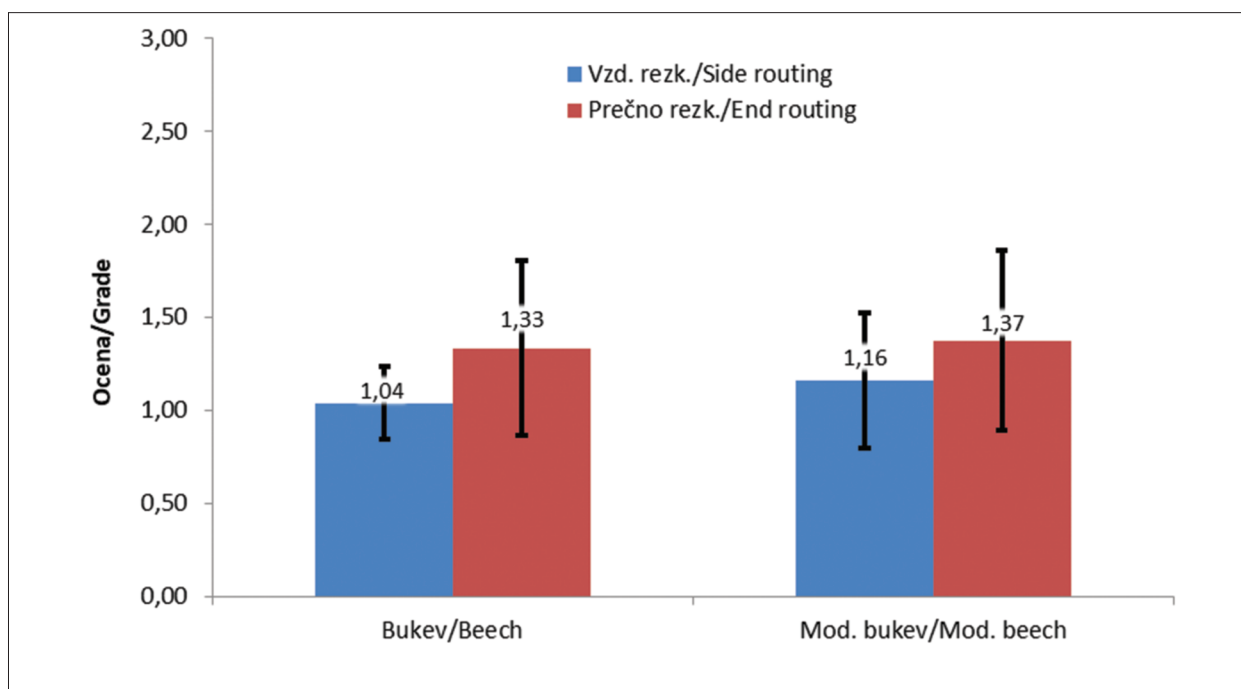
*Table 4. The statistical difference of the planing surface grades at different feeding speeds between unmodified and modified beech expressed by the p - value*

Pod. hitrost / Feeding speed (m/min)	p - vrednost / p -value
5	0,57
18	0,20

Z ANOVA analizo smo preverili tudi, ali se vrednosti pri najmanjši in največji podajalni hitrosti med nemodificirano in modificirano bukovino razlikujejo. Rezultati analize so prikazani v preglednici 4, iz katere je razvidno, da se pri obeh podajalnih hitrostih ocene med nemodificirano in modificirano bukovino ne razlikujejo, kar pomeni, da lahko z verjetnostjo 95 % trdimo, da se nemodificirana in modificirana bukovina enako dobro skobljata, tako pri najnižji kot tudi pri najvišjih podajalnih hitrostih.

### 3.2 REZKANJE 3.2 ROUTING

Rezultati ocen kakovosti površin pri rezkanju (slika 6) so pokazali, da so povprečne vrednosti pri vzdolžnem rezkanju nižje in s tem dobljena boljša kakovost od prečnega rezkanja, tako pri nemodificirani kot pri modificirani bukovini. Z ANOVA analizo smo preverili, ali se vrednosti tudi signifikantno razlikujejo. Rezultati analize (preglednica 5) kažejo, da se vrednosti vzdolžnega rezkanja razlikujejo od prečnega samo pri modificirani bukovini, medtem ko pri nemodificirani bukovini razlike niso značilne.



*Slika 6. Povprečne vrednosti in standardni odklon ocene površine rezkanja nemodificirane in modificirane bukovine*

*Figure 6. Average grades and standard deviations of the evaluated surfaces after routing of unmodified and modified beech wood*

*Preglednica 5. Statistična razlika ocene kakovosti rezkanja v vzdolžni in prečni smeri, izražena s p – vrednostjo*

*Table 5. The statistical difference of the routing surface grades between side and end grain routing expressed by the p – value*

Bukev / Beech	Mod. bukev / Modified beech
1,00	0,03

Iz ocene za vzdolžno in prečno rezkanje za posamezen preizkušanelec smo izračunali povprečno vrednost ter nato z ANOVA analizo preverili, ali se vrednosti med nemodificirano in modificirano bukovino signifikantno razlikujejo. Analiza je pokazala, da se vrednosti med seboj ne razlikujejo značilno, kar pomeni podobno kot pri skobljanju, da se nemodificirana in modificirana bukovina enako kakovostno reza.

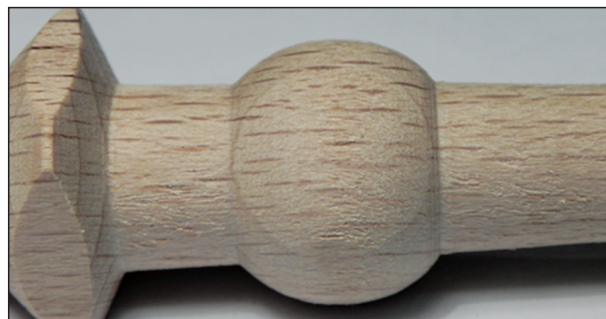
### 3.3 STRUŽENJE

#### 3.3 TURNING

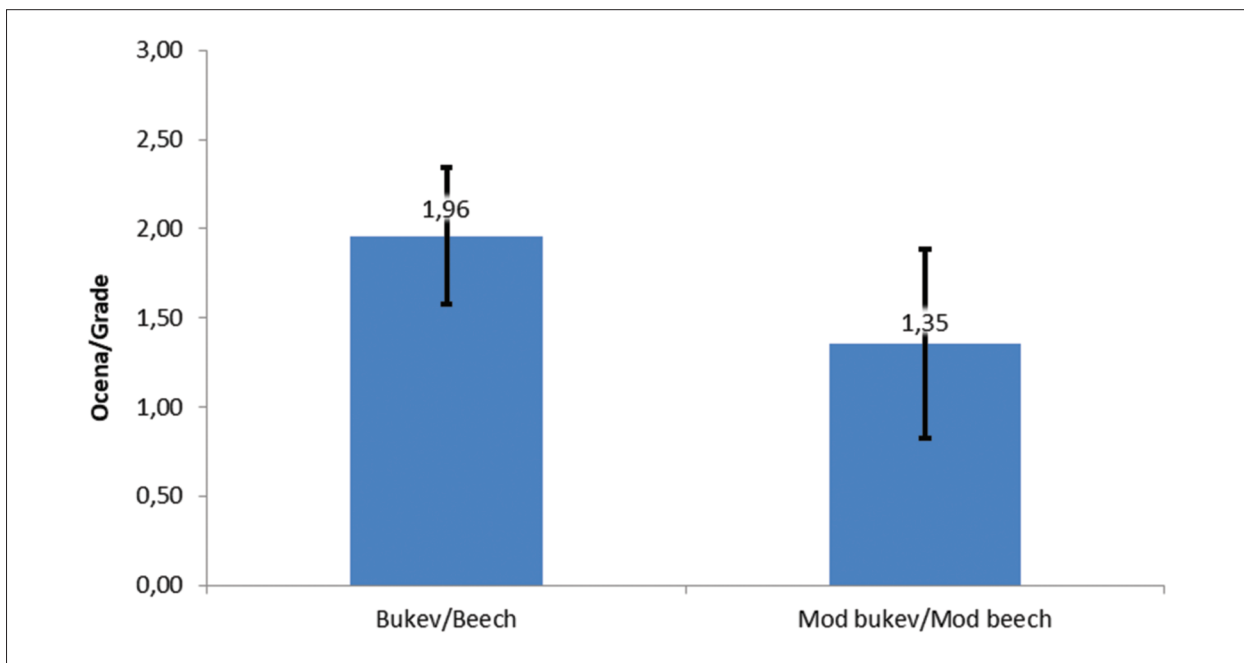
Povprečna vrednost ocen struženja, določenih na površinah A, B in C znaša za nemodificirano bu-

kovino 1,96, za modificirano pa 1,35 (slika 7), kar pomeni, da se modificirana bukovina bolje struži od nemodificirane. Ali so razlike značilne, smo zopet preverili z ANOVA analizo, ki je pokazala, da je p – vrednost 0,05, kar pomeni, da se vrednosti med seboj signifikantno razlikujejo, za razliko od skobljanja in rezkanja, kjer razlik nismo potrdili.

Na sliki 8 je prikazana stružena površina bukovine. Iz slike je razvidna visoka kakovost površine na mestu A, ter malo manj kakovostna površina na mestih B in C, ocenjena z oceno 2, kjer so prisotne manjše zatrganine.



*Slika 8. Ocena 2 na površini struženega vzorca*  
*Figure 8. Grade 2 on surface after turning*



*Slika 7. Skupne povprečne vrednosti ocen površin A, B in C ter standardni odklon za struženje nemodificirane in modificirane bukovine*

*Figure 7. Average grades and standard deviations of evaluated surfaces A, B and C after turning of natural and modified beech wood*

### 3.4 SKUPNE POVPREČNE OCENE IN NORMIRANI REZULTATI

#### 3.4 TOTAL AVERAGE GRADES AND BASE COMPARISON

V preglednicah 6 in 7 so prikazani odstotki preizkušancev s posameznimi ocenami kakovosti površin po skobljanju, struženju in rezkanju za nemodificirano

in termično modificirano bukovino, na sliki 9 pa skupne povprečne ocene kakovosti površin za posamezne obdelovalne postopke za obe vrsti preizkušancev. Iz obeh preglednic je razvidno, da sta naravna in modificirana bukovina glede na ocene 1 in 2 za rezkanje in ocene 1 do 3 za struženje (preglednici 6 in 7) zelo primerni tako za rezkanje kot za struženje, saj

Preglednica 6. Odstotek preizkušancev z ocenami 1, 2 ali 3 za nemodificirano bukovino

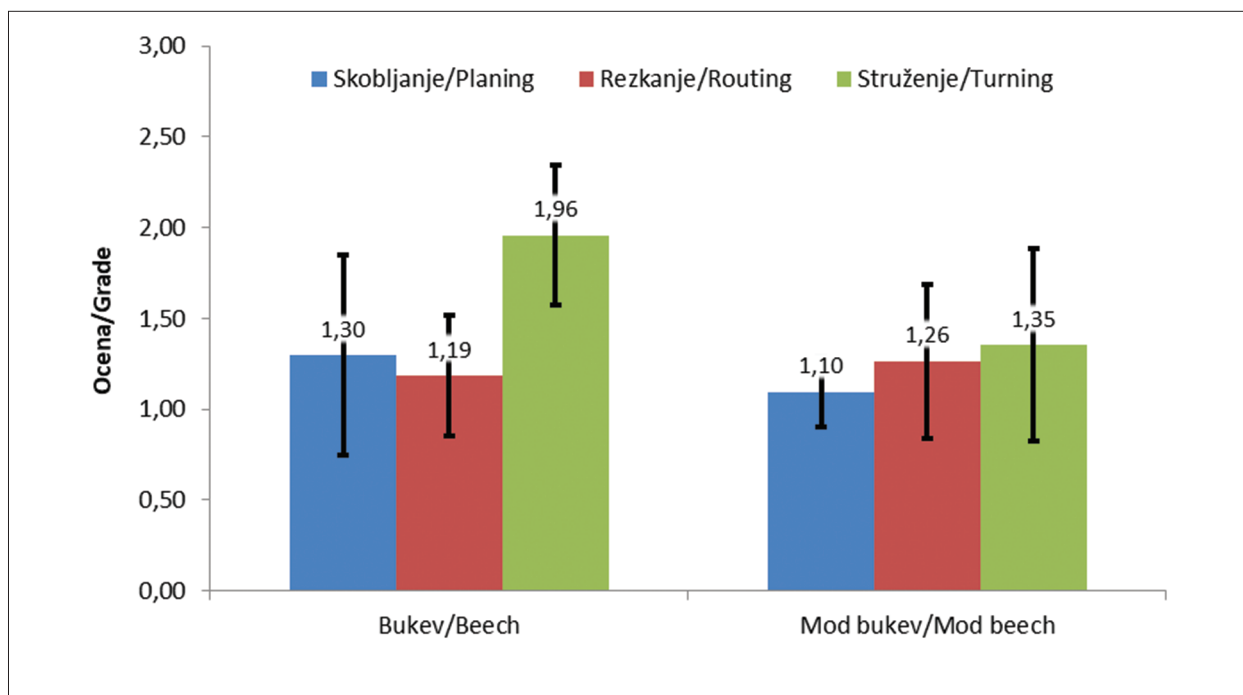
Table 6. Base comparison on percentage of grades No. 1, 2 or 3 for specimens of unmodified beech wood

Bukev / Beech			
Skobljanje / Planing		Rezkanje / Routing	Struženje / Turning
Pod. hitrost / Feeding speed (m/min)	Brez napak / Defect free (%)	Zelo dobro do odlično / Good to excellent (%)	Dobro do odlično / Fair to excellent (%)
5	70	100	100
8	55		
12	55		
18	55		

Preglednica 7. Odstotek preizkušancev z ocenami 1, 2 ali 3 za modificirano bukovino

Table 7. Base comparison on percentage of grades No. 1, 2 or 3 for specimens of modified beech wood

Modificirana bukev / Modified beech			
Skobljanje / Planing		Skobljanje / Planing	Skobljanje / Planing
Pod. hitrost / Feeding speed (m/min)	Brez napak / Defect free (%)	Zelo dobro do odlično / Good to excellent (%)	Dobro do odlično / Fair to excellent (%)
5	100	100	100
8	65		
12	90		
18	65		



Slika 9. Skupne povprečne vrednosti in standardni odklon za vse obdelovalne operacije  
Figure 9. Average grades with standard deviations for all machining operations

imata obe skupini vse preizkušance v opisanem območju ocen. Vendar pa lahko iz slike 9 opazimo, kot je bilo omenjeno že v predhodni razpravi, da so povprečne ocene pri modificirani bukovini nižje kot pri nemodificirani bukovini, kar posledično pomeni boljše površino, tako pri struženju kot pri skobljanju. Ravno tako je pri skobljanju odstotek preizkušancev brez napak pri modificirani bukovini večji kot pa pri nemodificirani bukovini (preglednici 6 in 7).

#### **4 ZAKLJUČEK**

#### **4 CONCLUSION**

Raziskali smo vpliv termične modifikacije na osnovne obdelovalne lastnosti bukovine. Iz povprečnih vrednosti lahko sklepamo, da termična modifikacija pozitivno vpliva na vse obdelovalne lastnosti, vendar pa ANOVA analiza kaže, da termična modifikacija bukovine samo pri določenih operacijah statistično značilno vpliva na kakovost obdelane površine, medtem ko pri večini obdelav razlike med kakovostmi površin nemodificirane in termično modificirane bukovine niso statistično značilne. Poudariti pa je potrebno, da se že nemodificirana bukovina zelo dobro oz. odlično obdeluje, skoblja in rezka, struži pa se zelo dobro. Po termični modifikaciji pa se bukovina tudi struži odlično. Iz slednjega lahko sklepamo, da termična modifikacija na splošno pozitivno vpliva na obdelovalne lastnosti, še zlasti v primeru bolj problematičnih obdelav. Razlike so manjše pri skobljanju in rezkanju, saj se tudi nemodificirana bukovina pri omenjenih operacijah odlično obdeluje.

#### **5 POVZETEK**

#### **5 SUMMARY**

The work carried out determined the influence of thermal modification on the machining properties of beech. The beech for this experiment was thermally modified for 3 hours at 212°C. In accordance with the ASTM D 1666-17 standard, 20 samples of natural and 20 samples of thermally modified beech wood were prepared. From each sample smaller samples for planing, routing and turning were prepared. After machining operation a visual examination of surface quality was made, as evaluated on the basis of five grades or groups as follows: Grade 1 – excellent; Grade 2 – good; Grade 3 – fair; Grade 4 – poor and Grade 5 – very poor.

Planing was done on the thicknessing machine, using four freshly sharpened HSS knives with the rake angle of 30° and revolution speed of 4500 rpm, where the feeding speeds amounted to 5, 8, 12 and 18 m/min and the thickness of the cut amounted to 1.6 mm. Half of the specimens was fed into the machine with the grain and half against the grain. After planing visual examinations for raised, fuzzy and torn grain were made. Base comparison of planing properties on the percentage of defect-free pieces was made, and the average grade for each specimen was calculated.

Routing was done with a CNC machine, where the spindle speed and feeding speed of the CNC router amounted to 6500 rpm and 2 m/min, respectively, and the milling head had two tungsten carbide knives. The side and end grain surfaces were graded for raised, fuzzy, and chipped grain and roughness of end grain after routing. A comparison of routing properties based on percentage of specimens graded 1 and 2 was made, and the average grade for each specimen calculated.

The turning was made on the lathe where the rotational speed of the specimens and feed rate of the blade were 3200 rpm and 120 mm/min, respectively. The specimens were evaluated for fuzzy grain, roughness and torn grain, and the average value of grades was calculated. Comparison of turning properties based on percentage of grades 1, 2 and 3 was made, and the average grade for each specimen calculated.

The results of the planing showed that the average grade increases with increasing feed rate in unmodified beech, and ranges from 1.09 at the feeding speed of 5 m/min to 1.5 at the feeding speed of 18 m/min, while the modified beech wood obtained more or less constant grades between 1.00 and 1.19. The influence of the feeding speed on the grades was verified with ANOVA analysis, which did not confirm any statistically significant influence of the feeding speed on the surface quality. The ANOVA test between the grades at different feeding speeds showed that the values of the grades significantly differed only between the feeding speeds of 5 and 18 m/min, while the ANOVA analysis did not show any significant differences among the other feeding speeds for the planing of unmodified beech.

In routing, it was found that there are no differences in surface quality between natural and mo-

dified beech wood, both for side and end grain routing, where the average values for side and end grain routing for natural and modified beech amounted to 1.04, 1.33, 1.16 and 1.37, respectively.

In turning it was found that the modification has a positive effect on the quality of the surface, which was also confirmed with ANOVA analysis. Thus, the average grade value of unmodified and modified beech wood amounted to 1.96 and 1.35, respectively.

In addition to average grades, the results were also given as percentages of samples with a certain grade value. The percentage of routed samples with a good to excellent grade as well as turning samples with fair to excellent grade amounted to 100%, while for planing the percentage of defect free samples ranged from 55 to 70% for unmodified beech and from 65 to 100% for modified beech.

It can be concluded that thermal modification generally has a positive effect on the machining properties of beech wood, especially with regard to turning. In the case of modified and unmodified beech the differences are not great, as beech without modification can be machined very well.

## LITERATURA IN VIRI

### LITERATURE

- Boonstra, M. J., Van Acker, J., Tjeerdsma, B., & Kegel, E. (2007). Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. *Ann. Forest Sci*, 64, 679–690.
- Čufar, K., Gorišek, Ž., Merela, M., & Pohleven, F. (2012). 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.
- Čufar, K., Gorišek, Ž., Merela, M., Kropivšek, J., Gornik Bučar, D., & Straže, A. (2017). Lastnosti bukovine in njena raba. *Les/Wood*, 66, 1, 27–39.
- Esteves, B. M., & Pereira, H. M. (2009). Wood modification by heat treatment: A Review, *Bioresources*, 4, 1, 370–404.
- Fašalek, A. (2017). Lastnosti lepilnih spojev lameliranega lesa iz termično modificirane bukovine. Dipl. delo. Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za lesarstvo.
- Gorišek, Ž. (1987). Vpliv parjenja na fizikalne in obdelavnostne lastnosti bukovine (*Fagus sylvatica* L). Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani.
- Gorišek, Ž., Plavčak, D., Gornik Bučar, D., Merela, M., Čufar, K., & Straže, A. (2017). Fizikalne in mehanske lastnosti svežega in

osušenega lesa v bukovich deblih, izruvanih med žledolomom. *Acta Silvae et Ligni*, 112, 7–20.

- Gornik Bučar, D., Olenik, M., & Merhar, M. (2017). The new generation of beech veneer based structural elements. *International Conference on Innovative Technologies, IN-TECH 2017, Proceedings*, Ljubljana 11-13.9.2017, p. 205–208.
- Hapla, F., & Militz, H. (2008). Ververtung und Verwendung von Buchenholz. In: *Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt – Band 3: Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche*. Universitätsdrucke Göttingen: 312-325.
- Johansson, D. (2005). Strength and Colour Response of Solid Wood to Heat Treatment. Ph dissertation. Luleå University of Technology.
- Kropivšek, J., & Gornik Bučar, D. (2017). Dodana vrednost v izdelkih v gozdno-lesni verigi – Primer: primarna predelava bukovine. *Les/Wood*, 66, 1, 61–72.
- Militz, H. (2002). Thermal treatment of wood: European processes and their background. In: *Proceedings of Conference on “Enhancing the durability of lumber and engineered wood products” February 11-13, 2002, Kissimmee, Orlando*. Forest Products Society, Madison.
- Piškur, M., & Krajnc, N. (2012). Tokovi in rabe okroglega bukovega lesa. In: *Bončina, A. (ed.). Bukovi gozdovi v Sloveniji : ekologija in gospodarjenje*. Ljubljana: Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, Biotehniška fakulteta, 459–469.
- Prislan, P., Piškur, M., & Gornik Bučar, D. (2015). Stanje žagarske industrije v Sloveniji 2013/2014. *Gozdarski vestnik*, 73, 442–453.
- Sandak, J., Goli G., Cetera, P., Sandak, A., & Cavalli, A. Todaro (2017). Machinability of Minor Wooden Species before and after Modification with Thermo-Vacuum Technology. *Materials*, 10, 121.
- Sandberg, D., Haller, P., & Navi, P. (2013). Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. *Wood Material Science and Engineering*, 8, 1, 64–88.
- Stamm, A., Burr, H., & Kline, A. (1955). Heat stabilized wood. *Forest products laboratory Madison, Wisconsin*, 18 p.
- Zule, J., Gornik Bučar, D., & Kropivšek, J. (2017). Inovativna raba bukovine slabše kakovosti in ostankov. *Les/Wood*, 66, 1, 41–51.
- Zavod za gozdove Slovenije (2018). Poročilo Zavoda za gozdove Slovenije o gozdovih za leto 2017. URL: [http://www.zgs.si/fileadmin/zgs/main/img/PDF/LETNA\\_POROCILA/2017\\_Porocilo\\_o\\_gozdovih.PDF](http://www.zgs.si/fileadmin/zgs/main/img/PDF/LETNA_POROCILA/2017_Porocilo_o_gozdovih.PDF) [mar. 2019]





## THE DYNAMICS OF THICKNESS SWELLING AND BOND STRENGTH LOSS OF DIFFERENT WOOD-BASED PANELS AT EXPOSURE TO HUMID CLIMATE AND IMMERSION INTO WATER

### DINAMIKA SPREMINJANJA DEBELINSKEGA NABREKA IN KAKOVOSTI ZLEPLJENOSTI RAZLIČNIH LESNIH PLOŠČNIH KOMPOZITOV PRI VLAŽNI KLIMI IN POTOPITVI V VODO

Sergej Medved<sup>1\*</sup>, Damjan Žgajner<sup>1</sup>, Alan Antonović<sup>2</sup>

UDK 630\*862.9

Original scientific article / Izvirni znanstveni članek

Received / Prispelo: 25. 4. 2019

Accepted / Sprejeto: 3. 6. 2019

#### Abstract / Izvleček

**Abstract:** An important aspect of wood-based panel usability, especially for construction, load bearing purposes or when in use for longer time, is its resistance against water. The resistance against water is related to type of wood-based panel, morphological characteristics of the constituents that panel is made of, and from the resin that was used for bonding. In an experiment we used four different wood-based panels, namely MDF (urea-formaldehyde adhesive), particleboard (urea-formaldehyde adhesive), OSB (melamine-urea-formaldehyde adhesive) and beech plywood (melamine-urea-formaldehyde adhesive). All panels were immersed into water and exposed to a humid climate for 90 days. Thickness swelling, compression shear strength and shear strength were determined after 1, 5, 30 and 90 days. The results showed that the highest strength decrease was observed at immersion into water. The lowest compression shear strength after immersion into water and exposure to a humid climate was determined for MDF. The occurrence of constituent failure due to exposure to water was demonstrated through SEM analysis.

**Keywords:** plywood, OSB, particleboard, MDF, compression shear strength, shear strength, water, humid condition

**Izvleček:** Pomemben dejavnik uporabnosti lesnih ploščnih kompozitov pri gradnji in nosilnih konstrukcijah je odpornost le-teh proti delovanju vode. Odpornost proti delovanju vode je odvisna od vrste lesnega ploščnega kompozita, morfoloških lastnosti gradnika, iz katerega je plošča narejena, in lepila, uporabljenega za lepljenje. Za izvedbo raziskave smo uporabili štiri različne lesne ploščne kompozite in sicer MDF (urea-formaldehidno lepilo), iverno ploščo (urea-formaldehidno lepilo), OSB (melamin- urea-formaldehidno lepilo) in bukovo furnirno ploščo (melamin- urea-formaldehidno lepilo). Vse plošče so bile potopljene v vodo in izpostavljene vlažnim klimatskim pogojem. Določili smo debelinski nabrek, tlačni strig in strižno trdnost. Lastnosti so bile določene 1, 5, 30 in 90 dni po izpostavitvi. Največja sprememba trdnosti je bila ugotovljena pri preskušancih, potopljenih v vodo. Najnižja odpornost proti delovanju vode je bila ugotovljena pri MDF plošči. S SEM slikovno analizo smo prikazali nastanek razpok in porušitve zgradbe gradnikov.

**Ključne besede:** furnirna plošča, OSB, iverna plošča, MDF, tlačni strig, strižna trdnost, voda, vlažna klima

## 1 INTRODUCTION

### 1 UVOD

Adhesive plays an important role in wood-based composites. It is responsible for "keeping" the constituents in their position, offering protection against external factors (like water) and helping in transferring the load from one to another constituent. Due

to different constituent morphology and share of adhesive as well as differences in production processes, various between wood-based composites occur, and with these also their usability. When considering the usage of wood-based composites in construction and/or for external application, the quality of the bond and moisture resistance of panels is of vital importance. Looking to Eurocode 5 (EN 1995-1-1: 2004), the usability of a material depends on its load bearing capacity (strength and stiffness) and moisture resistance (service class). When water or moisture penetrates wood-based composites it results in

<sup>1</sup> Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, SLO

\* e-pošta: [sergej.medved@bf.uni-lj.si](mailto:sergej.medved@bf.uni-lj.si); telefon: 01-320 3617

<sup>2</sup> University of Zagreb, Faculty of Forestry, Zagreb, CRO

expansion/swelling and displacement of the constituents. When the stresses that occur at water/moisture uptake are high enough to break the bonds between constituents, then this can lower the strength and in the worst case to the failure of the composite. The impact of irreversible thickness swelling on strength loss was determined by Suchsland (1973). Total thickness swelling of wood-based composites can be divided into two components, namely reversible swelling caused by wood, and irreversible swelling that is caused by the production process (Halligan, 1970). Dinwoodie (1978) exposed particleboard (PB) bonded with different adhesives to a high moisture climate and determined the decrease in internal bond strength, which was higher for urea-formaldehyde adhesive, compared to phenol-formaldehyde. A similar study was carried out by DeXin & Östman (1983) for tensile strength, and by Gillespie & River (1976) for plywood shear strength. The negative impact of moisture on the modulus of rupture (bending strength) and modulus of elasticity at OSB was determined by Wu & Suchsland (1997). As concluded by Fenghu & Fangtian (1997) the decrease in strength at exposure to a humid climate could be related to hydrolysis of the adhesive, and development of swelling stresses in the bond line. The degradation and failure of the adhesive bond was the main reason for the increase in creep at PB and MDF, as determined by Zhou et al. (2001). The occurrence of swelling stresses was also determined by Tarkov & Turner (1958), Niemz & Steinmetzler (1992), Medved et al. (2011). Wu & Piao (1999) researched the internal bond strength loss at OSB when exposed to different climate conditions and immersed into water. They determined that the increase in reversible swelling is linear, while the irreversible swelling at a moisture content of around 12% and above was more rapid. They also found that after exposure to high humidity and water the internal bond decreases, mainly due to an increase in irreversible swelling, with similar results reported by Mirski et al. (2012). The degradation of bending strength of different wood-based panels immersed in water was also examined by Norita et al. (2008), while the decrease in shear modulus with increasing relative humidity for UF bonded particleboard was determined by Kociszewski (2014).

The quality of the bond between constituents is an important property of wood-based composites, hence we investigated the decrease in compression

shear strength and shear strength of different wood-based composites due to the immersion in water and exposure to a humid climate.

## 2 MATERIALS AND METHODS

### 2 MATERIALI IN METODE DE LA

For the purpose of the investigation several commercially available wood-based composites were used (Table 1).

Table 1. Panel characteristics overview

Preglednica 1. Pregled lastnosti plošč

Panel type / Vrsta plošče	Label / Oznaka	Adhesive / Lepilo	Thickness / Debelina	Density / Gostota
Particleboard	PB-P2	UF	18 mm	700 kg·m <sup>-3</sup>
OSB	OSB3	MUF	18 mm	600 kg·m <sup>-3</sup>
MDF	MDF	UF	18 mm	730 kg·m <sup>-3</sup>
Beech plywood	PW-B	MUF	18 mm	700 kg·m <sup>-3</sup>

Panels 1500×800 mm<sup>2</sup> were cut to sample size 50×50 mm<sup>2</sup> (PB-P2, MDF, OSB3: internal bond and compression shear strength) and 150×25 mm<sup>2</sup> (PW-B: shear strength). After cutting, samples were exposed to normal climate conditions (temperature 20±1°C and relative air humidity 65±5%). After climatization some of the samples were tested for their strength properties while some them were exposed to humid climate conditions (temperature 20±1°C and relative air humidity 85±5%) or immersed in water. They were exposed to such conditions for 1, 5, 30 and 90 days. After this, the samples were tested for:

- Thickness swelling (TS) and water uptake (WU) according to EN 317; TS and WU were determined after immersion in water and after exposure to humid conditions. TS was determined using equation 1 and WU by equation 2.

$$TS_i = \frac{t_i - t_n}{t_n} \times 100 \quad (1)$$

$$WU_i = \frac{m_i - m_n}{m_n} \times 100 \quad (2)$$

where:

TS is the thickness swelling in %

WU is the water uptake in %

$t_n$  is the thickness of samples before immersion/exposure (after climatization at normal conditions) in mm

$t_i$  is the thickness of samples after immersion/exposure in mm

$m_n$  is the mass of samples before immersion/exposure (after climatization at normal conditions) in g

$m_i$  is the mass of samples after immersion/exposure in g

$i$  is the time of immersion/exposure (1, 5, 30 and 90 days)

- Compression-shear strength (CS) according to DIN 52367 and NT Build 313; samples were placed in the compression-shear load equipment in such a manner that the equipment loading plane and sample symmetry plane coincide (figure 1). Compression-shear strength was determined for OSB3, PB-P2 and MDF, according to equation 3.

$$CS = \frac{F_{max}}{a \cdot b} \quad (3)$$

where:

CS is the compression-shear strength in  $N \cdot mm^{-2}$

$F_{max}$  is the maximum force in N

$a$  is the length of samples in mm

$b$  is the width of samples in mm

- Shear strength according to EN 314. Shear strength was determined for PW-B and was determined in the middle of the sample only. Shear strength was calculated by equation 4.

$$f_v = \frac{F}{a \cdot b} \quad (4)$$

where:

$f_v$  is the shear strength in  $N \cdot mm^{-2}$

$F$  is the failing force in N

$a$  is the length of shear area in mm

$b$  is the width of shear area in mm

The usual method of bond quality determination for wood fibre- and wood particle-based composites is examining the internal bond (also known as tensile strength perpendicular to the plane), which gives information on the strength of the weakest layer in the panel. Although internal bond (IB) is the most important mechanical property there is a drawback to its

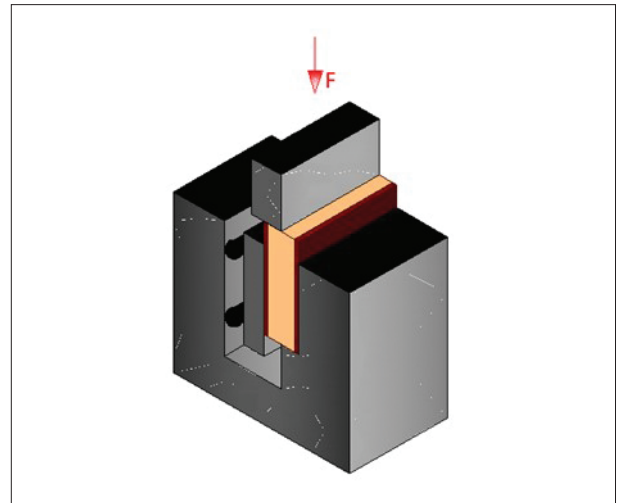


Figure 1. Schematic layout of compression shear strength determination

Slika 1. Shematski prikaz določanja tlačnega striga

examination, which is the preparation procedure. According to EN 319 the sample needs to be glued on two loading blocks with appropriate glue, and then 24 hours need to pass before testing in order for the adhesive to cure. An alternative method is thus preferred in order to evaluate the impact of immersion in water or exposure to a humid climate, one that does not require gluing of loading blocks to the surface. The test that was chosen, the compression shear strength test, is simple and can be applied immediately after exposure, with no need for sample preparation. Several authors (McNatt, 1973; Suzuki & Miyagawa, 2003; Wang et al., 1999) have determined the correlation between CS and IB, and found that with increasing IB the CS also increases. The main advantage of determination of IB is that the sample itself reveals the weak layer, because failure occurs in the weakest layer in the sample, while at CS test the breakage area is predefined (usually in the middle of the sample).

The tensile strength perpendicular to the plane (IB) according to EN 319 was thus determined in samples exposed to normal conditions.

### 3 RESULTS AND DISCUSSION

#### 3 REZULTATI IN RAZPRAVA

The basic characteristics of the panels used, like thickness, density, IB (for PB-P2, OSB3 and MDF) and shear strength (for PW-B) are presented in table 2.

Table 2. Basic characteristic of tested panels (values in brackets represents the standard deviation)  
Preglednica 2. Lastnosti preskušanih plošč (vrednosti v oklepajih predstavljajo vrednosti standardnega odklona)

Panel / Plošča	Thickness / Debelina	Density / Gostota	Internal bond strength / Razslojna trdnost	Compression-shear strength / Tlačni strig	Shear strength / Strižna trdnost
PB-P2	17.77 mm (0.038)	689 kg·m <sup>-3</sup> (15.123)	0.38 N·mm <sup>-2</sup> (0.022)	1.36 N·mm <sup>-2</sup> (0.063)	/
OSB3	17.45 mm (0.078)	584 kg·m <sup>-3</sup> (31.943)	0.37 N·mm <sup>-2</sup> (0.047)	1.07 N·mm <sup>-2</sup> (0.236)	/
MDF	17.86 mm (0.064)	722 kg·m <sup>-3</sup> (5.152)	0.39 N·mm <sup>-2</sup> (0.062)	1.01 N·mm <sup>-2</sup> (0.073)	/
PW-B	17.59 mm (0.045)	693 kg·m <sup>-3</sup> (8.838)	/		4.39 N·mm <sup>-2</sup> (0.553)

As shown in table 2, the IB of PB-P2, OSB3 and MDF are similar, while the differences in CS are significant. Although strands are oriented only in the surface layer (OSB3) the impact of orientation is evident in the higher coefficient of variation (22.06%). The difference between the highest (parallel to strand orientation) and lowest value (perpendicular to strand orientation) is around 40%. The consti-

tuent orientation-based differences are less pronounced for PB-P2 and MDF (the coefficient of variation is 4.63% and 7.23%, respectively).

Immersion in water or exposure to a humid climate causes an increase in thickness (thickness swelling) (figure 2 and figure 3) and decrease of bond quality between constituents (figure 4, figure 5, figure 6 and figure 7).

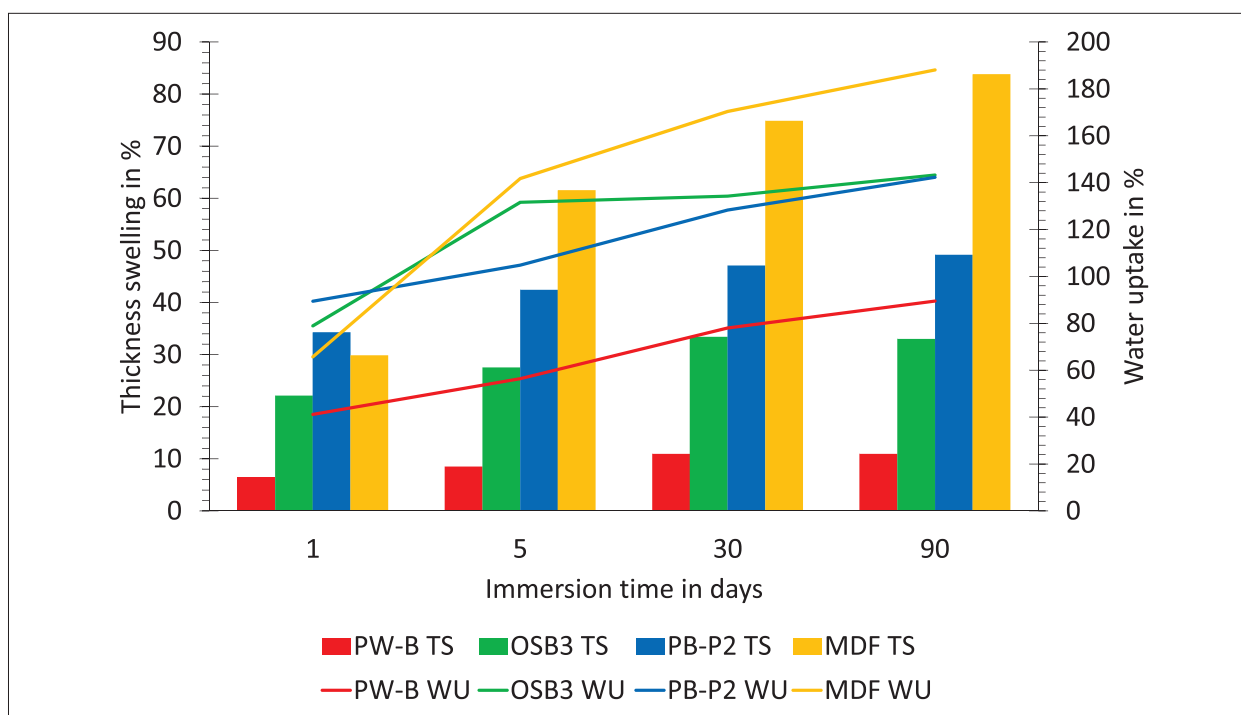


Figure 2. Thickness swelling (box) and water uptake (line) for immersion in water of beech plywood (PW-B), OSB (OSB3), particleboard (PB-P2) and MDF

Slika 2. Debelinski nabrek (stolpec) in vpijanje vode (črta) pri potopitvi v vodo bukove furnirne plošče (PW-B), OSB (OSB3), iverne plošče (PB-P2) in MDF

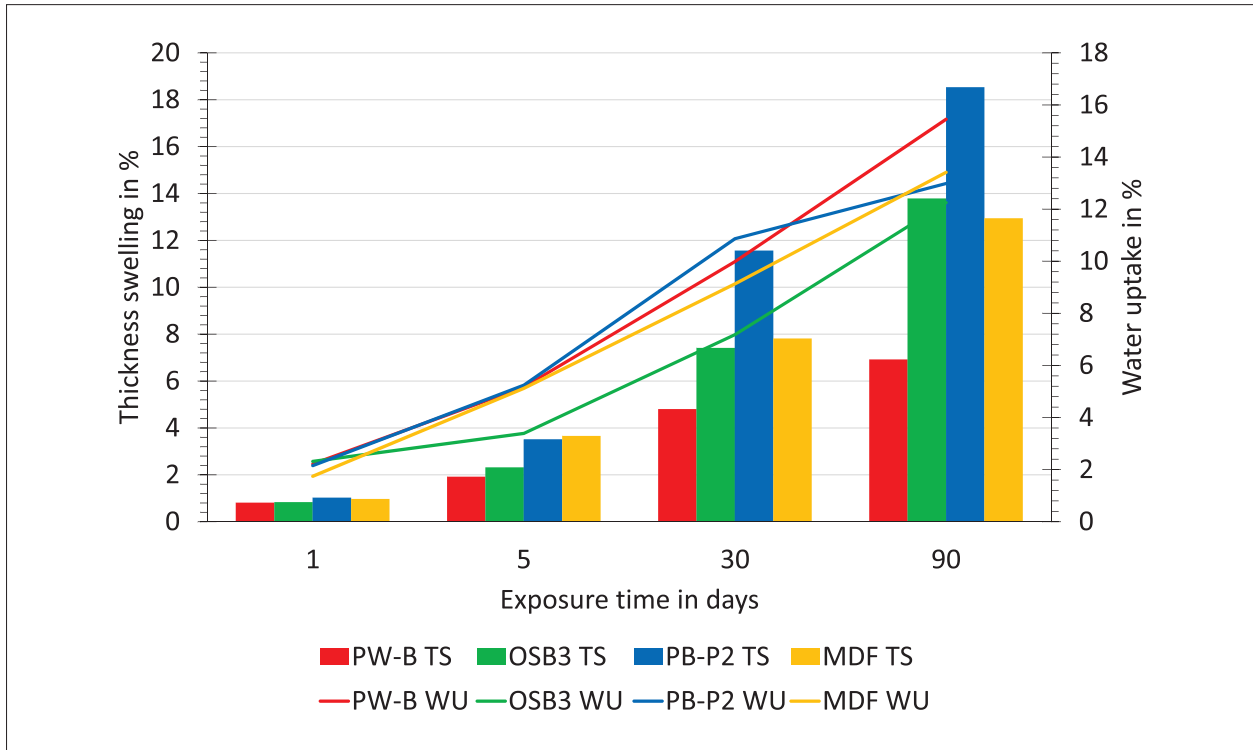


Figure 3. Thickness swelling (box) and water uptake (line) for exposure to a humid climate for beech plywood (PW-B), OSB (OSB3), particleboard (PB-P2) and MDF

Slika 3. Debelinski nabrek (stolpec) in vpijanje vode (črta) pri izpostavitvi vlažni klimi bukove furnirne plošče (PW-B), OSB (OSB3), iverne plošče (PB-P2) in MDF

A comparison of the thickness swelling and water uptake results shows differences between the panels and between the testing procedure. Looking only at the results for 1-day immersion (figure 2), the highest TS and WU can be determined for PB-P2 (TS<sub>1</sub>=34.28%; WU<sub>1</sub>=89.42%), but prolongation of immersion time reveals the highest TS and WU for MDF. The thickness swelling of MDF is 70% higher than that of PB-P2, and this could be related to the densification of constituents, panel density (especially the density profile) and production conditions. During pressing the wood constituents are pressed together (and thus the distance between wood constituents decreases, which also enables the creation of an adhesive bond between constituents) and compressed (with the creation of internal stresses). When panels are exposed to water the constituents start absorbing water and undergo the cell shape recovery procedure (Scharfetter, 1980). The more the constituents are pressed together and compressed (densified), the more resistance they have against water uptake. But when water breaks through the swelling intensity is

high, due more intense adhesive bond removal and the breakage of bonds between constituents.

Although higher densification results in more unreleased internal stresses and higher TS after immersion in water, it is more effective at resisting exposure to a humid climate. The TS of panels when exposed to a humid climate is significantly lower compared to TS after immersion in water. Water in its liquid state more easily penetrates cell lumens and the gaps between constituents compared to gaseous water molecules, which are attracted to wood through the exposed wood surface. The reason for the greater swelling of panels when immersed in water could also be related to the change in water pH value. As was determined by Medved et al. (2019), after 24-hour immersion the water pH value changes from normal to acid, which could affect the adhesive bond between constituents.

At exposure to humid conditions the thickness swelling of PB-P2 was significantly higher, and this could be related to lower compression of the core layer constituents.

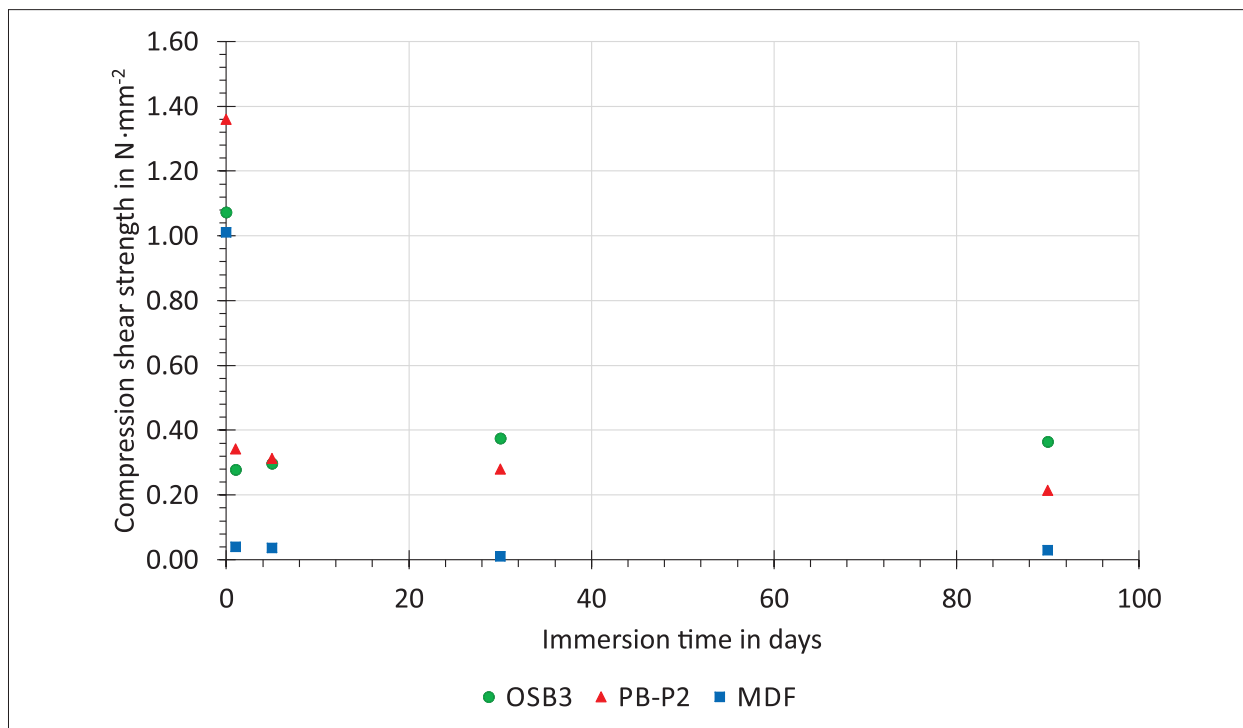


Figure 4. Compression shear strength of OSB (OSB3), particleboard (PB-P2) and MDF after immersion in water

Slika 4. Tlačni strig OSB (OSB3), iverne plošče (PB-P2) in MDF pri potopitvi v vodo

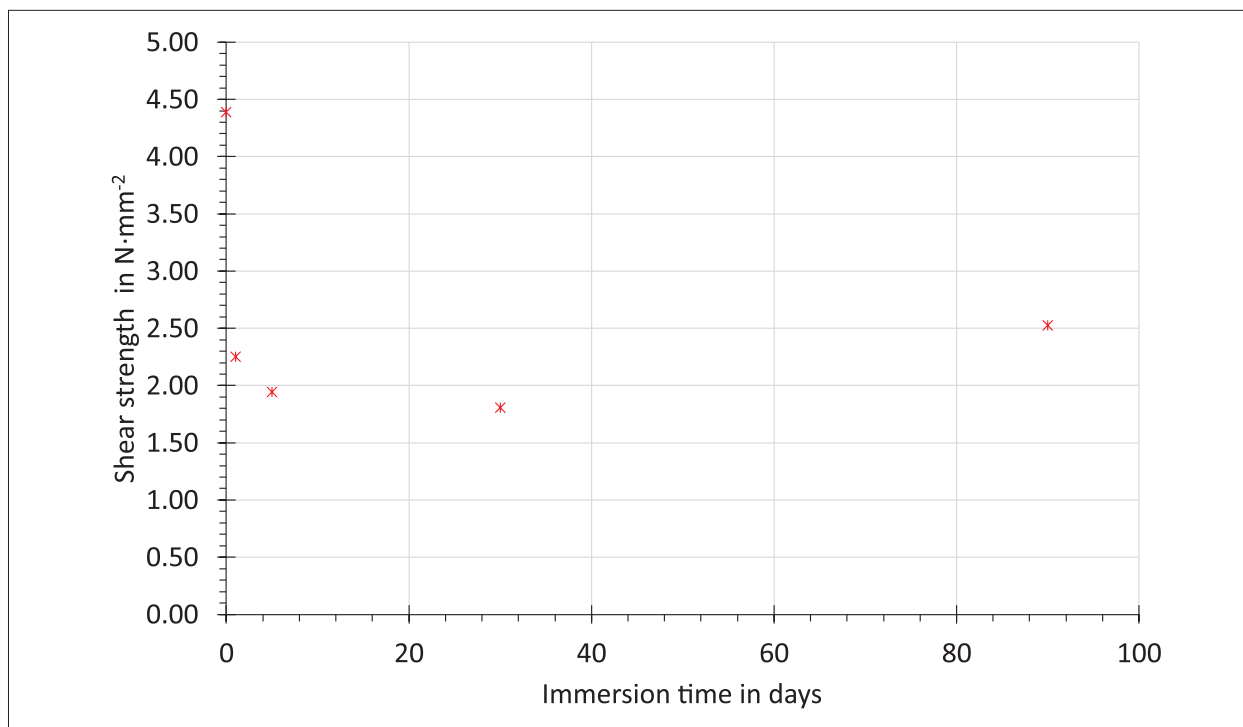


Figure 5. Shear strength of plywood after immersion in water

Slika 5. Strižna trdnost furnirne plošče pri potopitvi v vodo

The decrease in strength (CS and  $f_v$ ) of panels immersed in water was higher compared to that seen with panels exposed to a humid climate, as shown in figure 4, figure 5, figure 6 and figure 7.

For all the selected panels immersion in water resulted in a significant decrease in strength after only one day immersion. The loss in strength for plywood after 24-hour immersion was 49%, while for OSB and PB it was 74% and 75%, respectively, and the highest loss was for MDF (96%). Prolongation of immersion time had no significant impact on CS and  $f_v$ . The results of one-way ANOVA with Tukey post-hoc tests showed no significant difference (at  $\alpha=0,05$ ) between CS in relation to water immersion time (for PW-B, OSB and MDF). With regard to PB-P2, statistically significant differences were found between CS after 1- and 5-day immersion and CS after 30- and 90-day immersion.

The results for CS and  $f_v$  support those for lower TS after exposure to a humid climate. After the first day of exposure to a humid climate, the recorded loss in strength for PW-B, OSB and PB was below 3.5%, while for MDF, the average value, was similar to the reference panel (figure 6 and figure 7).

The decrease in strength after 90 days of exposure to a humid condition was between 38% (at PB-P2 and PW-B) and 56% (at MDF). Statistical analysis of the strength results for MDF shows significant differences ( $\alpha=0,05$ ) at exposures longer than five days, for PB-P2 at exposures longer than 30 days, and for PW-B at 90 days exposure. For OSB, the differences in strength related to exposure time were not significant ( $\alpha=0,05$ ).

The loss in strength of panels immersed in water is also related to the change in moisture, which is significantly higher compared to that seen in panels exposed to a humid climate. The results (figure 2 and figure 3) show that WU for panels exposed to a humid climate for 90 days is significantly lower than WU for panels immersed in water for just one day. Since less water penetrated (at exposure to a humid climate) into and between the constituents, less constituent shape recovery occurred and there was less adhesive bond failure, and thus a smaller loss of strength.

The rate of the decrease in strength (strength difference divided by time) for MDF when exposed to a humid climate was (on average)  $0.321 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$

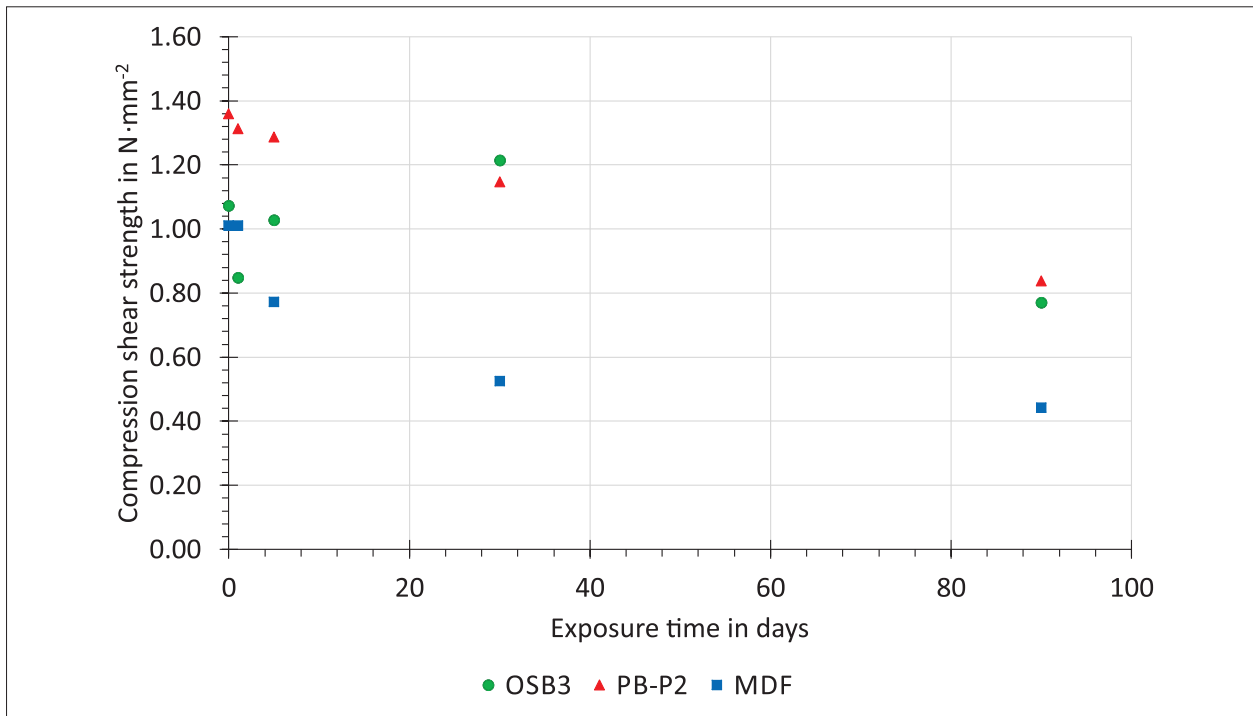


Figure 6. Compression shear strength of OSB (OSB3), particleboard (PB-P2) and MDF after exposure to a humid climate

Slika 6. Tlačni strig OSB (OSB3), iverne plošče (PB-P2) in MDF pri izpostavitvi vlažnim klimatskim pogojem

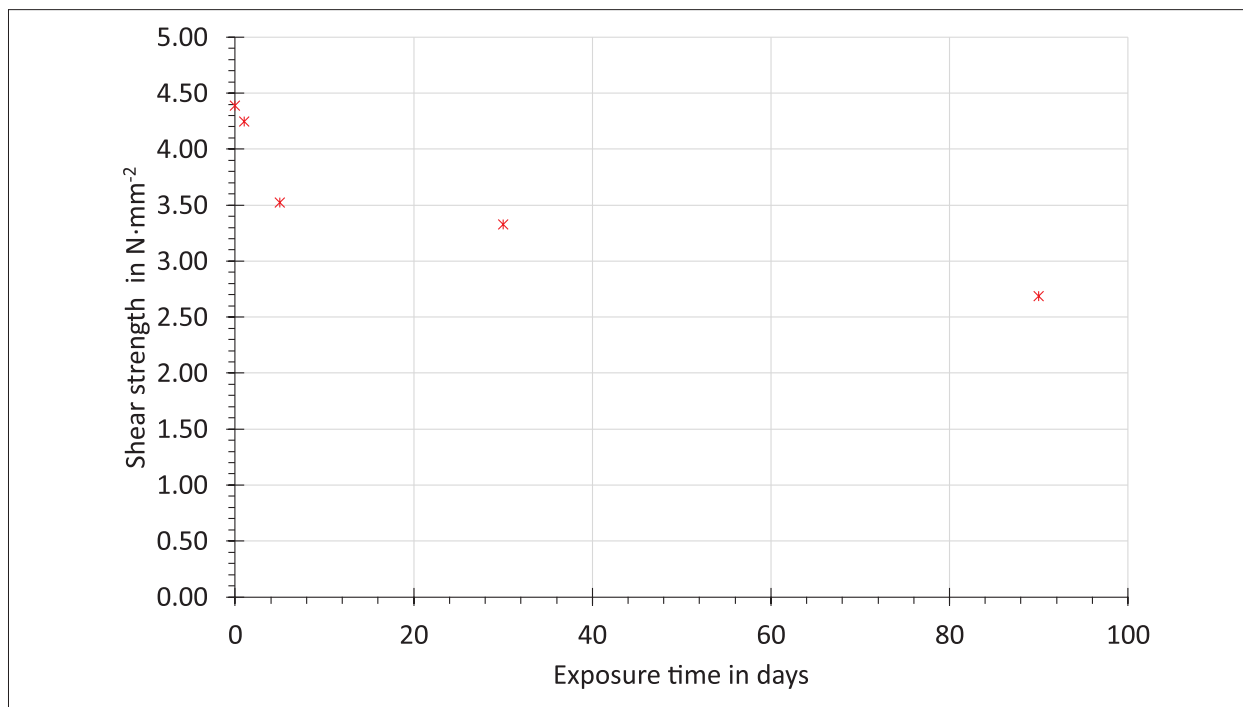


Figure 7. Shear strength of plywood after exposure to a humid climate

Slika 7. Strižna trdnost furnirne plošče pri izpostavitvi vlažnim klimatskim pogojem

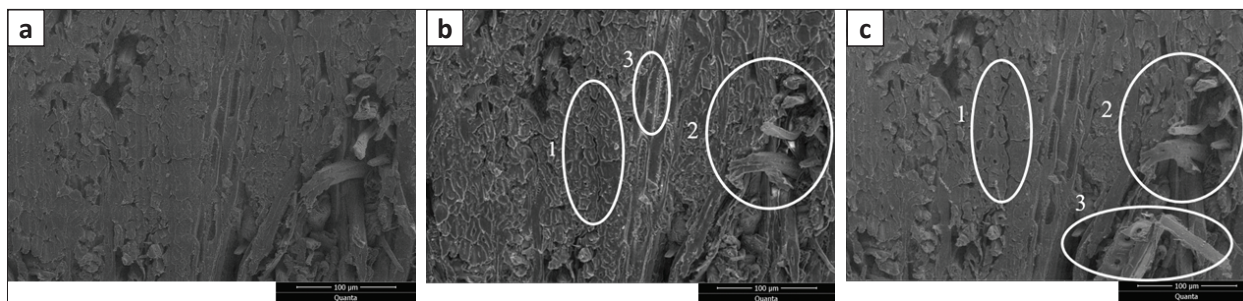


Figure 8. SEM images of MDF before (a) and after exposure to a humid climate ((b) – 1 day and (c) – 30 days)

Slika 8. SEM slike MDF pred (a) in po izpostavitvi vlažnim klimatskim pogojem ((b) – 1 dan in (c) – 30 dni)

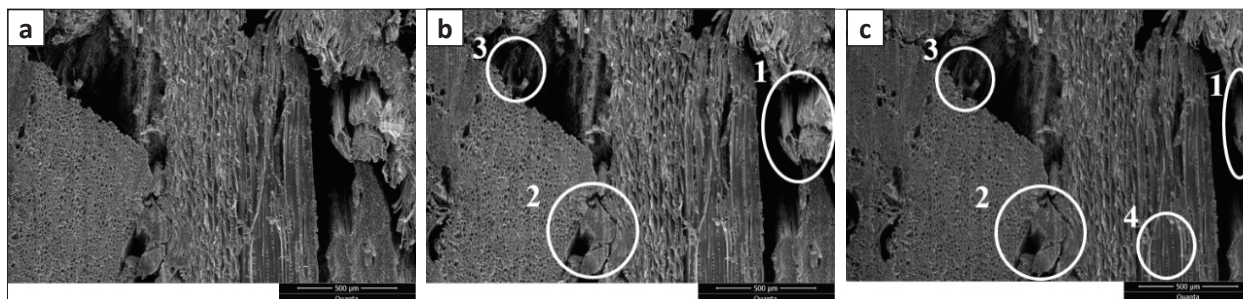


Figure 9. SEM images of particleboard before (a) and after exposure to a humid climate ((b) – 1 day and (c) – 30 days)

Slika 9. SEM slike iverne plošče pred (a) in po izpostavitvi vlažnim klimatskim pogojem ((b) – 1 dan in (c) – 30 dni)



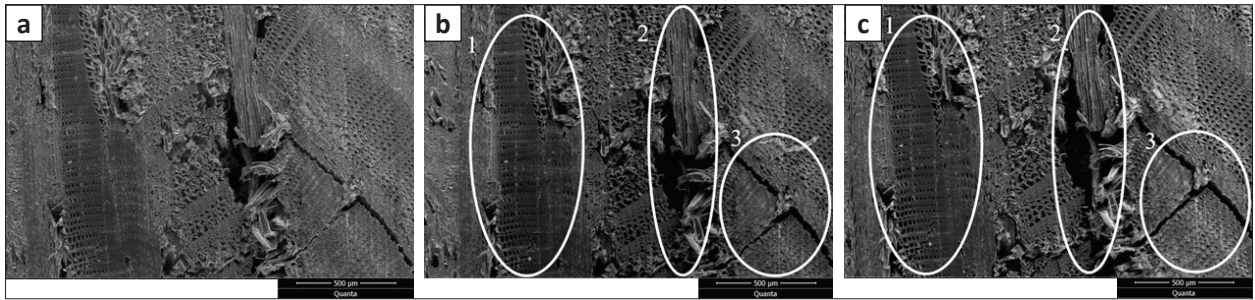


Figure 10. SEM images of OSB before (a) and after exposure to a humid climate ((b) – 1 day and (c) – 30 days)  
Slika 10. SEM slike OSB pred (a) in po izpostavitvi vlažnim klimatskim pogojem ((b) – 1 dan in (c) – 30 dni)

per day of exposure, while for particleboard the rate was  $0.245 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$  per day of exposure.

As noted earlier, the reason for the loss in strength at exposure to water (liquid or gas) is the occurrence of micro and macro cracks/failure in and between constituents, as well as in the adhesive bond between constituents, as shown in figure 8, figure 9 and figure 10.

The marked areas are reference areas where failure (micro and macro cracks) and distance between constituents occurred as a result of exposure to humid conditions. The occurrence of failure is a result of the shape recovery procedure (i.e., the regaining of shape prior to pressing) and relaxation of internal stresses.

Differences in the TS, WU, compression shear strength and shear strength of selected panels are, with regard to the constituent morphology, production process conditions and panel density, dependant on the type of adhesive used. For PB-P2 and MDF the UF adhesive was used, hence there was greater TS and more strength loss compared to OSB3 and PW-B, where MUF adhesive was used. MUF adhesive has, according to Ormondroyd (2015), higher resistance against water than UF adhesive.

## 4 CONCLUSIONS

### 4 ZAKLJUČKI

In the experiment presented in this paper different wood-based panels were immersed in water and exposed to a humid condition for 90 days. According to the obtained results, the following conclusions can be made:

- The highest decrease in strength with immersion in water was determined for MDF, and the lowest for PW-B.

- The highest decrease in strength with 1-day exposure to humid conditions was determined for PB-PB, and after 90 days for MDF.
- The decrease in strength corresponds to the increase in thickness swelling and water uptake.
- The decrease in strength of the studied wood-based panels was more evident when immersed in water compared to when exposed to a humid climate.

## 5 SUMMARY

### 5 POVZETEK

Lepilo ima pomembno vlogo pri zagotavljanju ustreznih lastnosti lesnih ploščnih kompozitov. Njegovo vlogo lahko razdelimo v tri razrede in sicer mora obdržati gradnike v njihovi poziciji v kompozitu, zaščititi mora gradnike pred zunanji dejavniki, npr. vodo ter omogočiti prenašanje obremenitev iz gradnika na gradnik. Uporabnost lesnih ploščnih kompozitov, še posebej v primeru konstrukcijske rabe, rabe v zunanjih pogojih ali pogojih povišane vlažnosti je odvisna od kakovosti vezi, kakor tudi odpornosti proti delovanju vode in vlage. Ob prodiranju vode v kompozit namreč pride do razširitve in nabrekanja gradnika ter posledično do "prelokacije" gradnika. Napetosti, do katerih pride zaradi delovanja vode, so lahko tako velike, da pride do porušitve gradnika in vezi med gradniki. Porušitev vezi med gradniki pa pomeni zmanjšanje trdnosti kompozita, kar je ugotovili tudi Suchsland (1973). Spremembo trdnosti in togosti kot posledico izpostavitve visoki vlažnosti so ugotovili tudi Dinwoodie (1978), DeXin & Östman (1983), Gillespie & River (1976), Wu & Suchsland (1997), Wu & Piao (1999), Norita et al. (2008), Mirski et al. (2012) ter Kociszewski (2014). Dinwoodie

(1978) je ugotovil tudi, da je sprememba trdnosti iverne plošče, lepljene s fenol-formaldehidnim lepilom, manjša kot pri iverni plošči, lepljeni z urea-formaldehidnim lepilom. Fenghu & Fangtian (1997) sta zmanjšanje trdnosti pripisala hidrolizi lepila in napetostim, ki nastanejo kot posledica nabrekanja. Napetosti ob nabrekanju so opazili tudi Tarkov & Turner (1958), Niemi & Steinmetzler (1992), Medved et al. (2011).

Namen študije je bil ugotoviti stopnjo spremembe tlačnega striga oz. strižne trdnosti v odvisnosti od časa izpostavitve delovanju vode pri dveh različnih pogojih in sicer pri potopitvi v vodo in izpostavitvi vlažnim klimatskim pogojem.

Za izvedbo študije smo uporabili štiri različne lesne ploščne kompozite, dostopne na slovenskem trgu in sicer bukovo furnirno ploščo, OSB, iverno ploščo in MDF. Bukova furnirna plošča in OSB sta bili zlepljeni z melamin-urea-formaldehidnim lepilom, iverna plošča in MDF pa z urea-formaldehidnim lepilom (preglednica 1).

Iz plošč velikosti 1500×800 mm<sup>2</sup> smo izžagali preskušance velikosti 50×50 mm<sup>2</sup> za določanje debelinskega nabreka (vse plošče), razslojne trdnosti (OSB, iverna plošča in MDF) in tlačnega striga (OSB, iverna plošča in MDF). Strižno trdnost (bukova furnirna plošča) smo določili na preskušancih velikost 150×25 mm<sup>2</sup>. Preskušanci so bili nato klimatizirani pri normalnih klimatskih pogojih (temperatura 20±1 °C in relativna zračna vlažnost 65±5 %). Po končani klimatizaciji je bila serija preskušancev potopljena v vodo, ena serija pa izpostavljena vlažnim klimatskim pogojem (temperatura 20±1 °C in relativna zračna vlažnost 85±5 %). Čas potopitve v vodo oz. izpostavitve vlažnim klimatskim pogojem je bil 1 dan, 5 dni, 30 dni in 90 dni, nakar smo določili:

- debelinski nabrek in vpijanje vode po standardu EN 317,
- razslojno trdnost po standardu EN 319 (samo preskušanci, klimatizirani v normalni klimi),
- tlačni strig po standardu DIN 52367 in NT Build 313 in
- strižno trdnost po standardu EN 314

Čeprav je običajna metoda določanja kakovosti zlepljenosti pri OSB, iverni plošči in MDF razslojna trdnost, smo se v študiji osredotočili na ugotavljanje razlik z določanjem tlačnega striga. Glavni razlog je povezan s hitrostjo izvedbe preskusa, saj na presku-

šance ni potrebno lepiti prijema kot pri razslojni trdnosti.

Rezultati določanja debelinskega nabreka in vpijanja vode so pokazali, da se z daljšanjem časa izpostavitve vodi debelinski nabrek in vpijanje vode povečujeta (slika 2 in slika 3). Debelinski nabrek in vpijanje vode sta večja pri preskušancih, ki so bili potopljene v vodo. Pri potopitvi v vodo je bil debelinski nabrek po 90-ih dneh največji pri MDF, pri izpostavitvi vlažni klimi pa pri iverni plošči.

Izpostavitve preskušancev delovanju vode je povzročila zmanjšanje tlačnega striga in strižne trdnosti (slika 4 in slika 5). Pri potopitvi v vodo je že enodnevna potopitev povzročila padec trdnosti za 49 % (bukova furnirna plošča) oz. 96 % (MDF). Daljšanje časa potopitve ni značilno poslabšalo trdnosti spoja. Po 90-ih dneh izpostavitve je bil padec trdnosti med 38 % (pri iverni in furnirni plošči) in 56 % (pri MDF).

Sprememba trdnosti spoja preskušancev, izpostavljenih vlažnim klimatskim pogojem (slika 6 in slika 7) je bila manjša kot pri potopitvi v vodo. Po enodnevni izpostavitvi je bil padec trdnosti manjši od 3.5 %, pri MDF pa je bila trdnost primerljiva z referenčno vrednostjo.

Sprememba trdnosti zaradi delovanja vode je posledica tendence gradnikov po vrnitvi v položaj oz. obliko pred stiskanjem, zgostitve in nesproščenih napetosti kot posledica stiskanja. Absorpcija vode privede do nastanka mikro in makro razpok v gradnikih, kakor tudi do povečanja razdalj med gradniki, kar je bilo ugotovljeno s SEM analizo (slika 8, slika 9 in slika 10).

Razlike v debelinskem nabreku, vpijanju vode, tlačnem strigu in strižni trdnosti so, poleg morfoloških značilnosti gradnikov in pogojev izdelave kompozitov povezane tudi z uporabljenim lepilom. Večji nabrek in večjo spremembo trdnosti spoja smo ugotovili pri iverni plošči in MDF, pri katerih je bilo uporabljeno UF lepilo, medtem ko je bilo pri OSB in furnirni plošči uporabljeno MUF lepilo. MUF lepilo zagotavlja večjo odpornost proti delovanju vode (Ormondroyd, 2015).

## ACKNOWLEDGEMENTS

### ZAHVALA

The authors gratefully acknowledge the support provided by the Slovenian Research Agency within the research program P4-0015 (Wood and li-

Medved, S., Žgajner, D., & Antonović, A.: The dynamics of thickness swelling and bond strength loss of different wood-based panels at exposure to humid climate and immersion into water

gnocellulosic composites) and L4-7547 (Performance of wood and lignocellulosic composites in outdoor applications).

## REFERENCES

### VIRI

- DeXin, Y., & Östman, B. A. -L. (1983). Tensile strength properties of particle boards at different temperatures and moisture contents. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 41(7): 281-286.
- Dinwoodie, J. M. (1978). The properties and performance of particleboard adhesives. *Journal of the Institute of Wood Science*, 8: 59-67.
- Fenghu, W., & Fangtian, D. (1997). The degradation of particleboard strength. *Journal of Forestry Research*, 8(1): 59-60.
- Gillespie, H. R., & River, H. B. (1976). Durability of adhesives in plywood. *Forest Products Journal*, 26(10): 21-25.
- Halligan, A. F. (1970). A review of thickness swelling in particleboard. *Wood Science and Technology*, 4: 301-312.
- Kociszewski, M. (2014). Effect of relative humidity on shear modulus of particleboard. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Forestry and Wood Technology*, 88: 112-116.
- McNatt, J. D. (1973). Basic engineering properties of particleboard. In: *Proceedings of the 7th Washington State University symposium on particleboard*, Pullman, WA, USA: 367-385.
- Medved, S., Antonović, A., & Jambreko, V. (2011). Impact of resin content on swelling pressure of three-layer particleboard bonded with urea-formaldehyde adhesive. *Drvena industrija*, 62(1): 37-42.
- Mirski, R., Majka, J., & Dziurka, D. (2012). The effect of residual swelling after drying on internal bond in OSB. *Drvena industrija*, 63(4): 241-247.
- Niemz, P., & Steinmetzler, J. (1992). Untersuchungen zum Quelldruck bei Feuchteänderung von MDF. *Holz-Zentralblatt*, 34(6): 83.
- Norita, H., Kojima, Y., & Suzuki, S. (2008). The aging effects of water immersion treatments in wet-bending for standardized testing of wood panels. *Journal of Wood Science*, 54(2): 121-127.
- Ormondroyd, G. A. (2015). Adhesives for wood composites. In *Wood Composites* (ed. Ansell, M. P.), Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, 47-66.
- Scharfetter, H. (1980). Thickness stability of particleboard. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1(2): 93-95.
- Suzuki, S., & Miyagawa, H. (2003). Effect of element type on the internal bond quality of wood-based panels determined by three methods. *Journal of Wood Science*, 49(6): 513-518.
- Tarkov, H., & Turner, H. D. (1958). The swelling pressure of wood. *Forest Products Journal*, 8(7): 193-197.
- Zhou, Y., Fushitani, M., & Kamdem, D. P. (2001). Bending creep behavior of medium density fiberboard and particleboard during cyclic moisture changes. *Wood and fiber science*, 33(4): 609-617.
- Žgajner, D. (2018). SEM analiza zgradbe lesnih ploščnih kompozitov po izpostavitvi vodi in različnim klimatskim pogojem. Magistrsko delo. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta. 72 p.
- Wang, S-Y., Chen, T-Y., & Fann, J-D. (1999). Comparison of internal bond and compression shear strength of particleboard. *Journal of Wood Science*, 45: 396-401.
- Wu, Q., & Piao, C. (1999). Thickness swelling and its relationship to internal bond strength loss of commercial oriented strandboard. *Forest Products Journal*, 49(7/8): 50-55.
- Wu, Q., & Suchsland, O. (1997). Effect of moisture on flexural properties of commercial oriented strandboards. *Wood and Fiber Science*, 29(1): 46-57.
- DIN 52367:2002-05. Spanplatten - Bestimmung der Scherfestigkeit parallel zur Plattenebene. 8 p.
- EN 1995-1-1:2004. Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. 121 p
- EN 314-1:1996. Plywood - Bonding quality - Part 1: Test methods. 24 p.
- EN 317:1996. Particleboards and fibreboards - Determination of swelling in thickness after immersion in water. 5 p.
- EN 319:1993. Particleboards and fibreboards; determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board. 6 p.
- NT Build 313:1986-11: Particle board: Shear strength parallel to plane of the board. 4 p.





## ODPORNOST KOMPOZITA NA OSNOVI POLIMLEČNE KISLINE IN NANOFIBRILIRANE CELULOZE PROTI RAZENJU

### RESISTANCE OF POLYLACTIC ACID/NANOFIBRILLATED CELLULOSE COMPOSITE TO SCRATCHING

Ida Poljanšek<sup>1\*</sup>, Vesna Žepič<sup>2</sup>, Urša Osolnik<sup>1</sup>, Viljem Vek<sup>1</sup>, Matjaž Pavlič<sup>1</sup>, Marko Petrič<sup>1</sup>, Primož Oven<sup>1</sup>

UDK 630\*8:661.728:620.3

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Prispelo / Received: 24. 4. 2019

Sprejeto / Accepted: 23. 5. 2019

#### Izvleček / Abstract

**Izvleček:** Cilj študije je bil priprava bionanokompozita na osnovi polimlečne kisline (PLA) z dodatkom nanofibrilirane celuloze (NFC) kot ojačitvene komponente. Za izdelavo kompozita smo uporabili nemodificirano in acetilirano NFC (A\_NFC). NFC, posušeno z zamrzovanjem, smo acetilirali v heterogenem sistemu z acetanhidridom v dimetilformamidu (DMF) ob prisotnosti piridina kot katalizatorja. Uspešnost acetiliranja smo ugotavljali z infrardečo (FT-IR) spektroskopijo. Pripravili smo PLA filme z 2,5 %, 5 % in 10 % dodatkom nemodificirane oziroma acetilirane NFC. Osredotočili smo se na proučevanje vpliva dodatka NFC na prosojnost bionanokompozita in na njegovo odpornost proti razenju. Prosojnost bionanokompozitnega filma smo merili z UV-Vis spektrofotometrijo, odpornost površine filmov proti razenju pa smo ovrednotili z vzmetnim svinčnikom. Določili smo optimalno količino dodane NFC in A\_NFC polimeru PLA za doseganje boljše odpornosti proti razenju. Ugotovili smo, da z dodatkom 2,5 % A\_NFC dosežemo najboljšo odpornost pripravljene bionanokompozita proti razenju, ki ima tudi minimalno zmanjšano prosojnost glede na PLA film. Celo z najvišjim dodatkom A\_NFC k PLA polimeru smo dobili bionanokompozitne folije z minimalnim zmanjšanjem prosojnosti.

**Ključne besede:** nanofibrilirana celuloza, PLA, bionanokompozit, prosojnost, odpornost proti razenju

**Abstract:** The aim of the study was to prepare a bionanocomposite based on polylactic acid (PLA) with the addition of nanofibrillated cellulose (NFC) as a reinforcement component. For the production of the composite we used unmodified and acetylated NFC (A\_NFC). Freeze-dried NFC was acetylated in a heterogeneous system with acetic anhydride in dimethylformamide (DMF) in the presence of pyridine as a catalyst. The success of the acetylation was determined by FT-IR spectroscopy. PLA films were prepared with the addition of 2.5%, 5% and 10% of unmodified and acetylated NFC. The focus of this research was the impact of the NFC additive on the transparency and on the resistance of the bionanocomposite to scratching. The transparency of the bionanocomposite film was measured using UV-Vis spectrophotometry, and the resistance of the films to scratching was evaluated with a scratch test. The optimal amount of NFC and A\_NFC added to the polymer PLA to achieve better resistance of the bionanocomposite to scratching was determined. The best resistance of the prepared bionanocomposite to scratching was achieved by the addition of a 2.5% A\_NFC to the PLA polymer, which also has minimal reduced transparency with respect to the PLA film. With the highest addition of A\_NFC to the PLA polymer, bionanocomposite films with minimal reduction of transparency were obtained.

**Keywords:** nanofibrillated cellulose, PLA, bionanocomposite, transparency, resistance to scratching

## 1 UVOD

### 1 INTRODUCTION

Polimerni materiali so postali nepogrešljiv del našega življenja. Sintetični polimeri, ki so marsikje izpodrinili naravne materiale, niso biorazgradljivi, poleg tega pa se pridobivajo iz neobnovljivih virov. V zadnjem desetletju se razvoj znanosti na področju

materialov usmerja v iskanje novih biorazgradljivih materialov, ki bi bili pridobljeni iz obnovljivih naravnih virov (Paul & Robeson, 2008). Dobra rešitev so biopolimerni materiali, ki predstavljajo posebno obliko plastike in jih je mogoče pridobiti iz obnovljivih virov, kot so rastlinsko olje, koruza, grahov škrob, sladkorni trs, celuloza, itd. in se ob koncu življenjskega cikla reciklirajo s pomočjo mikroorganizmov. Tržno uspešen in v svetu vedno bolj prodoren biopolimer je polimlečna ali polilaktična kislina (PLA), ki se odlikuje po dobri mehanski trdnosti, preprosti predelavi in biokompatibilnosti (Liu et al., 2010).

<sup>1</sup> Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, SLO

\* e-pošta: ida.poljansek@bf.uni-lj.si; telefon: 01-320-3650

<sup>2</sup> TECOS, Center orodjarstva, Kidričeva 25, 3000 Celje, SLO

Biološko razgradljivi polimeri pa imajo v primerjavi s sintetičnimi polimeri nekatere negativne lastnosti, kot so krhkost, nizka temperaturna deformacija, visoka prepustnost za pline, nizka viskoznost za nadaljnjo predelavo.

Po drugi strani pa se je ojačitev polimernih matrič z biorazgradljivimi nanoceluloznimi fibrilami izkazala za izjemno učinkovit način izboljšave (bio)polimernih matričnih osnov (Khalil et al., 2012; Freire et al., 2013). Vgradnja nanostruktur v termoplaste izboljša njihov modul elastičnosti, natezno trdnost in zniža prepustnost za pline (Petersson et al., 2007; Tingaut et al., 2010; Sukyai et al., 2012). Nanokompoziti so napredni inovativni materiali visoke prilagodljivosti in z izboljšanimi lastnostmi, ki daleč presega lastnosti njihovih posameznih sestavin (Petersson et al., 2007; Liu et al., 2010; Tingaut et al., 2010; Sukyai et al., 2012; Aulin et al., 2013; Abdulkhani et al., 2014; Baheti et al., 2014; Lee et al., 2014; Song et al., 2014; Abdulkhani et al., 2015; Dhar et al., 2015; Robles et al., 2015; Johari et al., 2016; Lu et al., 2016; Trifol et al., 2016). Nanofibrilirana celuloza dosega približno 25 % trdnosti ogljikovih nanocevk, cena pa je od 10 do 100 krat manjša (Hubbe et al., 2008). Nanofibrilirana celulozna vlakna so zaradi izjemnih fizikalnih, mehanskih in kemičnih lastnosti primerna za razvoj in oblikovanje inovativnih biorazgradljivih nanokompozitnih materialov, ki so uporabni na primer v medicini ter prehranski in farmacevtski industriji. Najpomembnejši dejavnik pri osnovanju nanokompozitnega materiala je kemijska združljivost med ojačitveno in matrično komponento, tako z vidika enakomerne porazdelitve ojačitvenega elementa v matrični osnovi, kot tudi za zagotovitev uspešne adhezije (Bulota et al., 2012; Robles et al., 2015). Nanoceluloza ni združljiva z večino sintetičnih hidrofobnih polimernih matrič zaradi njene hidrofilne narave, ker se tvorijo ireverzibilne vodikove vezi med fibrilami med sušenjem ter pri dispergiranju NFC v nepolarnem mediju, kar nadalje vodi do agregacije oz. tvorjenja skupkov (Peng et al., 2012). Združljivost nanoceluloze z nepolarnimi materiali, hidrofobnimi polimeri, tako zahteva kemično modifikacijo nanofibrilirane celuloze. Med pomembne in enostavne kemične metode modifikacije nanofibrilarne celuloze sodi tudi acetiliranje (Tingaut et al., 2010; Qu et al., 2012; Žepic et al., 2015).

V tej študiji smo se odločili razviti in optimizirati postopek priprave bionanokompozitnega filma na

osnovi PLA z dodatkom nemodificirane oziroma modificirane NFC kot ojačitvene komponente. Pripravljenemu bionanokompozitnemu filmu smo določili odpornost proti razenju. Za potrebe embalažne industrije pa je poleg dobrih mehanskih lastnosti pomembna tudi prosojnost materiala, zato smo izmerili prosojnost filma z UV-Vis spektrofotometrijo.

## 2 MATERIALI IN METODE

### 2 MATERIALS AND METHODS

#### 2.1 MATERIALI

##### 2.1 MATERIALS

Uporabili smo nanofibrilirano celulozo (NFC), ki je bila izdelana v *Centre for Biocomposite and Biomaterial Processing* (CBBP); Univerze v Torontu iz Kanade. NFC je bila vodna suspenzija z vsebnostjo 1,6 utežnih % (ut %) suhe snovi, z velikostjo fibril od 20 nm do 60 nm. Čistota celuloze v tem vzorcu je bila 91 %. Vsebnost lignina je bila manj kot 0,3 %. Ostalo so predstavljale predvsem hemiceluloze. Pri delu smo uporabili tudi naslednje kemikalije: anhidrid očetne kisline ( $\text{Ac}_2\text{O}$ ,  $\geq 99\%$ ), N,N-dimetilformamid (DFM, brezvodni, 99,8 %) piridin (brezvodni, 99,8 %), kloroform ( $\text{CHCl}_3$ , brezvodni  $\geq 99\%$ , z 0,5-1,0 % etanola kot stabilizatorja), etanol (96 %) in aceton (99,5 %). Vse našete kemikalije so bile dobavljene s strani Sigma-Aldrich (Steinheim, Nemčija). Reagente smo uporabili brez predhodnega čiščenja.

Za polimerno matrično osnovo pri izdelavi nanokompozitnih filmov smo uporabili Ingeo® Biopolymer 2003D, proizvajalca Natureworks LCC (Ingeo™ 2003D, ZDA), ki je termoplastična, granulirana oblika polimlečne kisline (PLA) z visoko molekulsko maso  $M_W = 199590$  in gostoto  $1,24 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Je transparenten polimer, biološko razgradljiv in kompostabilen material po evropskem standardu SIST EN 13432:2001. Namenjen je uporabi v pakirni industriji, za pakiranje sveže hrane in za izdelavo skodelic, posod in ostalega jedilnega pribora.

#### 2.2 SUŠENJE Z ZAMRZOVANJEM

##### 2.2 FREEZE DRYING

Pred postopkom površinske modifikacije in pred izdelavo bionanokompozitnih materialov smo za sušenje NFC uporabili postopek sušenja z zamrzovanjem. Uporabili smo LyoQuest freeze dryer (Telstar). Pogoji sušenja so predstavljeni v preglednici 1. Pri eksperimentalnem postopku sušenja z zamrzova-

*Preglednica 1. Pogoji sušenja z zamrzovanjem vodnih suspenzij NFC*

*Table 1. Freeze drying conditions for NFC water suspensions*

Eksperiment	Vzorec	Oprema	Pogoji	Čas sušenja
Kemična modifikacija	NFC	LyoQuest	Plak = 0,040 mbar T pladnjev = 22 °C	72 h
Izdelava nanokompozitov	A_NFC	freezedryer	T kondenzatorja = -50 °C	



*Slika 1. Sušilnik za sušenje z zamrzovanjem.*

*Figure 1. Freeze dryer.*

njem smo suspenzijo najprej zamrznili s postopkom hitrega zamrzovanja v tekočem dušiku, nato pa zamrznjen vzorec prenesli v liofilizator, kjer je potekalo sušenje oziroma sublimacija ledu iz NFC. Sušene produkte smo hranili v eksikatorju do pričetka analitskih preiskav in uporabe v nadaljnjih postopkih.

### 2.3 HETEROGENO ACETILIRANJE

#### 2.3 HETEROGENIOUS ACETYLATION

Za potek kemične modifikacije NFC smo pripravili disperzni sistem na osnovi DMF s trdnim deležem snovi 1 %. S homogenizacijo (Ultra Turrax T 25 basic, IKA-Werke, Staufen, Nemčija) in visoko intenzivno ultrazvočno obdelavo (UltrasonicVibracell

VC500, SonicsandMaterials, ZDA) smo dispergirali NFC, ki smo jo pridobili s postopkom sušenja z zamrzovanjem, v DMF.

Acetiliranje je potekalo v heterogeni reakcijski mešanici 100 mL NFC/DMF in 35 mL (37,8 g; 0,37 mol) anhidrida očetne kisline ( $\text{Ac}_2\text{O}$ ). Dodali smo 1, 2 ali 3 vol % piridina, ki je služil kot katalizator. Reakcijsko zmes smo mešali prvih 10 min pri manjših obratih, nato pa smo jo prelili v trogrlo bučko z okroglim dnom. Bučko smo opremili z vodnim hladilnikom, magnetnim mešalom in stekleno uvajalko za dovod dušika (slika 2). Reakcijo smo vodili pri temperaturi ( $105 \pm 5$ ) °C, ob konstantnem mešanju in prepihanju z dušikom. Po 24 urah smo mešanico NFC in reagentov ohladili na sobno temperaturo. Sekundarne produkte reakcije in preostale reagente smo ločili s postopkom centrifugiranja in redisperzije v najmanj petih zaporednih ponovitvah z mešanico toluena, acetona in etanola v volumskem razmerju 4:1:1. Acetilirane vzorce smo sušili v laboratorijskem sušilniku pri 105 °C za 24 ur ter jih do pričetka analitičnih preiskav hranili v eksikatorju.



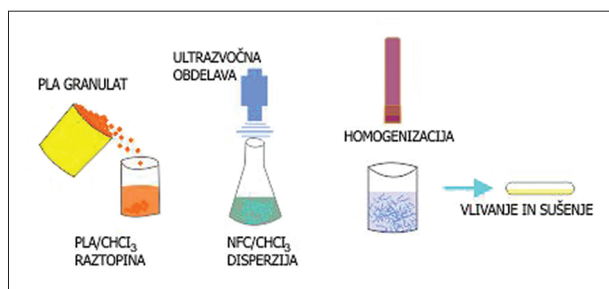
*Slika 2. Sistem za heterogeno reakcijo acetiliranja.*

*Figure 2. System for heterogeneous reaction of acetylation.*

## 2.4 PRIPRAVA PLA/NFC NANOKOMPOZITOV

### 2.4 PREPARATION OF PLA/NFC NANOCOMPOSITES

Bionanokompozitne filme na osnovi polimerne matrice PLA z dodatkom nemodificirane NFC in filme na osnovi polimerne matrice PLA z dodatkom acetilirane NFC (A\_NFC) smo pripravili s tehniko vliivanja. Granulat PLA smo raztopili v  $\text{CHCl}_3$  pri sobni temperaturi ob konstantnem mešanju z magnetnim mešalom. Raztapljanje granulata PLA v omenjenem topilu je bilo zaključeno v 10-ih urah. Ločeno smo s 5 minutnim postopkom homogenizacije in 10 minutno ultrazvočno obdelavo pripravili disperzne sisteme  $\text{NFC}/\text{CHCl}_3$  in  $\text{A\_NFC}/\text{CHCl}_3$ . Za pripravo



Slika 3. Prikaz priprave nanokompozitnih filmov PLA/NFC (Žepič et al., 2014).

Figure 3. Schematic view of nanocomposite film production (Žepič et al., 2014).

Preglednica 2. Končna sestava nanokompozitnih filmov PLA/NFC

Table 2. Final compositions of PLA/NFC nanocomposite films

Končna formulacija	PLA (g)	NFC (g)	A_NFC (g)	Končna sestava (ut. %)
PLA	10,0	-	-	100
PLA/NFC <sub>FD</sub>				
2,5 ut. %	9,8	0,2	-	98/2
5 ut. %	9,5	0,5	-	95/5
10 ut. %	9,0	1,0	-	90/10
PLA/A_NFC <sub>FD</sub>				
2,5 ut. %	9,8	-	0,2	98/2
5 ut. %	9,5	-	0,5	95/5
10 ut. %	9,0	-	1,0	90/10

\*NFC<sub>FD</sub> .... NFC sušen z zamrzovanjem

\*NFC<sub>FD</sub> .... freeze dried NFC

nanokompozitnih mešanic smo disperzne sisteme  $\text{NFC}/\text{CHCl}_3$  združili s suspenzijo  $\text{PLA}/\text{CHCl}_3$  in jih ponovno homogenizirali ter ultrazvočno obdelali v časovnem intervalu 5 minut. Pridobljene vzorce smo vliili v petrijevke ter jih pokrite sušili pri sobnih pogojih 72 ur. Na sliki 3 je prikazan postopek priprave nanokompozitnih filmov PLA/NFC, v preglednici 2 pa so zbrani podatki o končni sestavi filmov PLA/NFC (Žepič et al., 2014).

## 2.5 DOLOČANJE DELEŽA ACETILNIH SKUPIN Z INFRARDEČO (FT-IR) SPEKTROSKOPIJO

### 2.5 DETERMINATION OF ACETYL CONTENT BY FT-IR SPECTROSCOPY

Uspešnost modifikacije NFC smo spremljali z njihajo spektroskopijo. Spektre smo posneli z metodo refleksijske spektroskopske tehnike ATR-IR s spektrometrom Spectrum One (Perkin Elmer, ZDA). Posneli smo FT-IR spektre nemodificiranih vzorcev NFC in modificiranih, acetiliranih vzorcev NFC v območju od  $4000\text{ cm}^{-1}$  do  $650\text{ cm}^{-1}$  pri ločljivosti  $4\text{ cm}^{-1}$ . Vsak spekter je bil povprečje 64-ih meritev. Iz višin vrhov pri valovnih številih  $1060\text{ cm}^{-1}$  in  $1740\text{ cm}^{-1}$  smo določili delež acetilnih skupin in stopnjo substitucije (DS) (Tingaut et al., 2010). Pri določitvi smo izhajali iz razmerja višin omenjenih vrhov ( $H_{1740}/H_{1060}$ ), kjer smo kot bazno linijo za določitev višine vrha pri  $1060\text{ cm}^{-1}$  vzeli območje valovnih števil od  $1500\text{ cm}^{-1}$  do  $860\text{ cm}^{-1}$ , v primeru vrha pri  $1740\text{ cm}^{-1}$  pa smo bazno linijo vzeli v območju od  $1790\text{ cm}^{-1}$  do  $1690\text{ cm}^{-1}$ . Delež acetilnih skupin smo izračunali z uporabo umeritvene krivulje, stopnjo substitucije (DS) pa smo nadalje določili po spodnji enačbi (Žepič et al., 2014).

$$DS = \frac{3,86 \times Ac (\%) }{102,4 - Ac (\%)}$$

Kjer je:

Ac (%) ..... delež acetilnih skupin

Ac (%) ..... acetyl content or fraction of acetyl groups

## 2.6 UV-VIS SPEKTROSKOPIJA

### 2.6 UV-VIS SPECTROSCOPY

Z UV-Vis spektroskopijo smo glede na absorpcijo vidne svetlobe določali prosojnost pripravljenih polimernih bionanokompozitov. Meritve absorpcije svetlobe smo izvedli z UV-Vis spektrofotometrom (Perkin Elmer, Lambda) in sicer v območju od  $300\text{ nm}$  do  $1100\text{ nm}$ .



## 2.7 ODPORNOST PROTI RAZENJU

### 2.7 RESISTANCE TO SCRATCHING

Nanokompozitom PLA z različnimi dodatki nemodificirane NFC (2,5 %, 5 % in 10 %) in nanokompozitom PLA z različnimi dodatki acetilirane NFC (2,5 %, 5 % in 10 %) smo ugotavljali trdoto površine s preskusom razenja, po prilagojeni metodi standarda SIST EN ISO 1518:2001. Razili smo z vzmetnim svinčnikom, v katerem je vstavljena igla s konico poloblaste oblike, premera 1 mm (slika 4). Z vzmetnim svinčnikom smo s hitrostjo od 30 mm/s do 40 mm/s razili površino v dolžini vsaj 60 mm. Konico smo obremenili s silo 5 N, kot rezultat pa smo navedli širino raze in opis nastale deformacije.



Slika 4. Vzmetni svinčnik za določanje trdote s preskusom razenja.

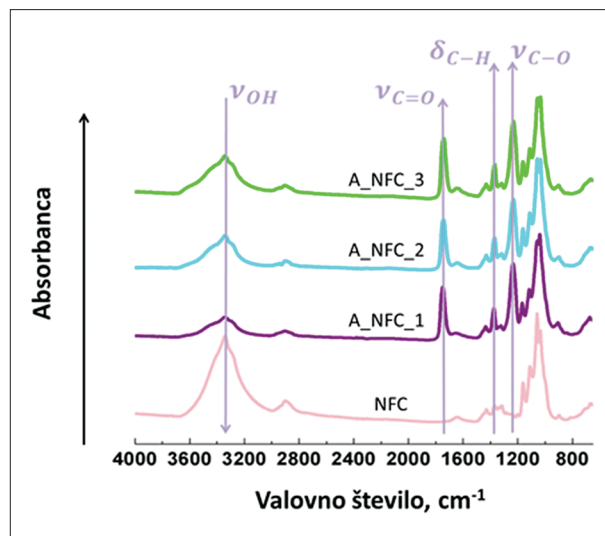
Figure 4. Scratch hardness test pencil for the determination of the scratch resistance.

## 3 REZULTATI IN RAZPRAVA

### 3 RESULTS AND DISCUSSION

#### FT-IR spektroskopija

Strukturo in delež acetiliranih hidroksilnih skupin v modificirani nanofibrilirani celulozi smo določili z analizo FT-IR spektrov. Stopnja acetiliranja s časom reakcije sprva narašča, nato pa se ustali. Na sliki 5 so prikazani FT-IR spektri nemodificirane NFC in trije spektri modificirane oz. acetilirane NFC (A\_NFC\_1, A\_NFC\_2 in A\_NFC\_3) z 1, 2 in 3 vol % piridina. Na spektrih acetiliranih vzorcev opazimo trakove, ki jih prisojamo značilnim nihanjem estrskih skupin. Pri valovnem številu  $1740\text{ cm}^{-1}$  gre za niha-



Slika 5. FT-IR spektri nemodificirane NFC in spektri acetilirane NFC – A\_NFC\_1, A\_NFC\_2, A\_NFC\_3 (Žepič et al., 2015).

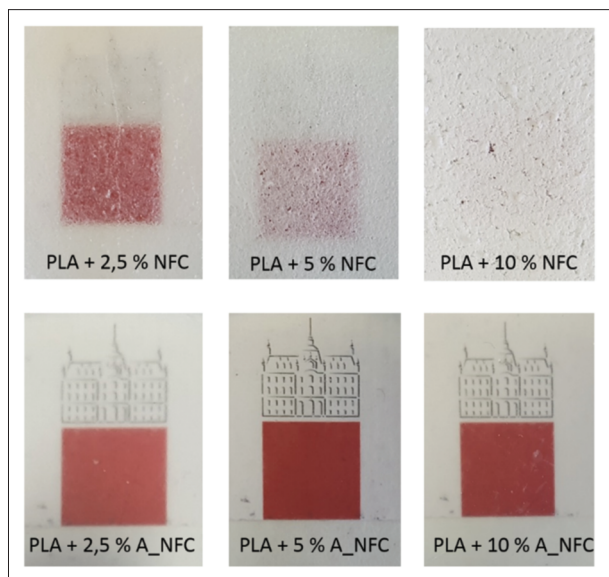
Figure 5. FT-IR spectra of unmodified and acetylated NFC – A\_NFC\_1, A\_NFC\_2, A\_NFC\_3 (Žepič et al., 2015).

nje vezi C=O, pri  $1369\text{ cm}^{-1}$  niha vez C-H metilne skupine v  $-\text{O}(\text{C}=\text{O})\text{CH}_3$  skupini ter pri  $1234\text{ cm}^{-1}$  vez C-O v acetilni skupini. Intenziteta traku pri  $3337\text{ cm}^{-1}$ , karakterističnega za nihanje vezi -OH je nižja za modificiran vzorec NFC v primerjavi z nemodificiranim vzorcem NFC. Trakov v valovnem območju od  $1840$  do  $1760\text{ cm}^{-1}$ , karakterističnih za nihanje vezi v anhidridu očetne kisline, ne opazimo, kar pomeni, da v acetiliranem produktu ni prisotnega reaktanta. Prav tako v spektrih acetiliranih vzorcev ne opazimo traku pri  $1700\text{ cm}^{-1}$ , ki je značilen za nihanje vezi v karboksilnih kislinah in iz tega je razvidno, da acetilirani produkti ne vsebujejo stranskih produktov očetne kisline.

Iz razmerij višin ( $H$ ) in površin ( $A$ ) trakov  $H_{1740}/H_{1060}$ ,  $A_{1740}/H_{1060}$ ,  $A_{1369}/H_{1060}$  in umeritvene krivulje smo izračunali stopnjo substitucije  $DS$  za acetilirane vzorce, ki znaša približno 1 (Tingaut et al., 2010). Ta stopnja acetiliranja zadosti pogojem, da postane površina NFC deloma hidrofobna (Žepič et al., 2015).

#### UV-Vis spektroskopija

Na sliki 6 so prikazani bionanokompozitni filmi na osnovi PLA z dodatki 2,5 %, 5 %, 10 % nemodificirane NFC in 2,5 %, 5 % in 10 % acetilirane NFC –

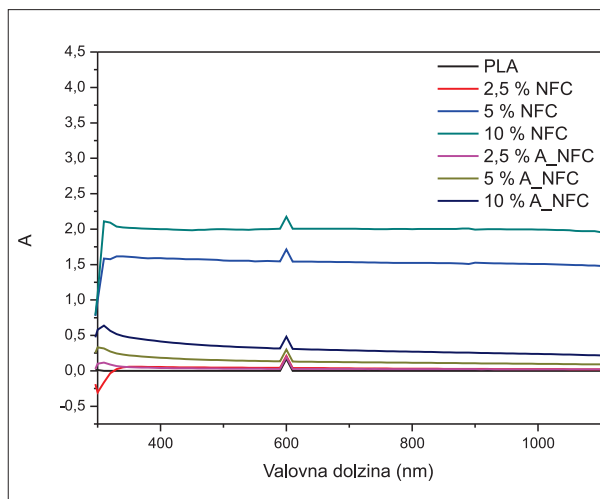


Slika 6. Bionanokompozitni filmi na osnovi PLA z dodatki 2,5 %, 5 %, 10 % nemodificirane NFC (zgoraj) in 2,5 %, 5 % in 10 % acetilirane NFC – A\_NFC (spodaj).

Figure 6. Bionanocomposite films based on PLA with additives 2.5%, 5%, 10% of unmodified NFC (above) and 2.5%, 5% and 10% of acetylated NFC – A\_NFC (below)

A\_NFC. Z vedno večjim dodatkom nemodificirane NFC se prosojnost filma znižuje. Bionanokompozitni film na osnovi PLA z 10 % dodatkom nemodificirane NFC ima izgled papirja. Z vedno večjim dodatkom modificirane, acetilirane NFC pa prosojnost filma ostaja skoraj enaka oz. se minimalno znižuje. Bionanokompozitni film PLA z 10 % dodatkom acetilirane NFC ima še vedno visoko prosojnost.

Z merjenjem absorpcije vidne svetlobe z UV-Vis spektroskopijo smo sklepali na prosojnost pripravljenih bionanokompozitnih filmov. Na sliki 7 so prikazani UV-Vis spektri bionanokompozitnih filmov na osnovi PLA z dodatkom 2,5 %, 5 %, 10 % NFC in 2,5 %, 5 %, 10 % dodatkom acetilirane NFC. Iz UV-Vis spektrov na sliki 7 vidimo, da je pri slepem vzorcu (film PLA) absorpcija vidne svetlobe izredno nizka. PLA filmi z dodatkom nemodificirane (2,5 %, 5 % in 10 %) NFC izkazujejo bistveno višjo absorbanco vidne svetlobe in tako nižjo prosojnost. Z dodatkom 2,5 % nemodificirane NFC se prosojnost bionanokompozitnega filma PLA/NFC zniža. PLA film z 10 % dodatkom nemodificirane NFC absorbira največ vidne svetlobe in je tudi popolnoma netransparenten. V primeru



Slika 7. UV-Vis spektri bionanokompozitnih filmov na osnovi PLA polimera z dodatkom 2,5 %, 5 %, 10 % NFC in 2,5 %, 5 % in 10 % A\_NFC.

Figure 7. UV-Vis spectra of bionanocomposite films based on PLA polymer with the addition of 2.5 %, 5 %, 10 % NFC and 2.5 %, 5 % and 10 % A\_NFC.

dodatkov acetilirane NFC polimerni matrici PLA, absorbanca vidne svetlobe z vedno večjim dodatkom le minimalno narašča in tako se tudi prosojnost tako pripravljenih filmov le minimalno znižuje.

### Odpornost proti razenju

Z določanjem odpornosti proti razenju smo skušali ugotoviti optimalno razmerje med PLA in med dodatkom tako nemodificirane kot tudi modificirane, t.j. acetilirane NFC, da bi pridobili mehansko najbolj odporne bionanokompozitne filme. Pri vsakem vzorcu posebej smo poleg izmerjene širine raze navedli še opis nastale deformacije. Pri kontrolnem preizkusu s silo razenja 5 N je bila širina raze 0,25 mm. Ostali rezultati so zbrani v preglednici 3.

Pri filmu PLA z 2,5 % dodatkom nemodificirane NFC je bila širina raze pri obremenitvi s silo 5 N 0,2 mm, kar je manj kot pri kontrolnem filmu PLA. Ugotovili smo, da se z vedno večjim dodatkom nemodificirane NFC širina raze povečuje in film postaja plastično deformiran. Pri filmu PLA z 10 % dodatkom NFC pride celo do mehanske porušitve filma oziroma do trganja vzorca. Tako lahko sklepamo, da je 2,5 % nemodificirane NFC optimalen dodatek te ojačitvene komponente k polimeru PLA.

Pri vzorcih z 2,5 %, 5 % in 10 % dodatkom A\_NFC k polimeru PLA smo ugotovili, da je smotrno

dodajanje A\_NFC do 2,5 %. Širina raze je pri filmu z 2,5 % dodatkom A\_NFC enaka kot v primeru filma s 5 % dodatkom A\_NFC, pri filmu z 10 % dodatkom A\_NFC pa se ta rahlo poveča in sicer na 0,2 mm, pri tem opazimo tudi rahlo plastično deformacijo. Iz dobljenih rezultatov lahko sklepamo, da je optimalen dodatek acetilirane NFC 2,5 %, saj s tem dodatkom dosežemo izboljšane mehanske lastnosti pripravljene nanokompozita glede na PLA film.

*Preglednica 3. Odpornost proti razenju*

*Table 3. Resistance to scratching*

Končna formulacija	Širina raze (mm)	Opis / Komentar
PLA	0,25	opazna sled
PLA/NFC		
2,5 ut. %	0,20	opazna samo sled, rahla plastična def.
5 ut. %	0,45	film plastično deformiran
10 ut. %	0,60	mehanska poškodba
PLA/A_NFC		
2,5 ut. %	0,15	opazna samo rahla sled
5 ut. %	0,15	zelo slabo se vidi, opazna samo rahla sled
10 ut. %	0,20	opazna samo sled, zelo rahla plastična def.



*Slika 8. Primerjava raz na filmu PLA z 10 % dodatkom A\_NFC (levo) in na filmu PLA z 10 % dodatkom NFC (desno).*

*Figure 8. Comparison of scratches on the PLA film with 10% A\_NFC (left) and PLA film with 10% NFC (right).*

## 4 SKLEP

### 4 CONCLUSION

Za dosegajo boljših mehanskih lastnosti polimernih nanokompozitov v primerjavi z osnovnim polimerom je zelo pomembna stična površina med nanopolnilom in polimerno matrico in pa porazdelitev nanopolnila v matrici. Z namenom, da bi izboljšali porazdelitev in kompatibilnost nanofibrilirane celuloze (NFC) s polimerom polimlečne kisline (PLA) smo NFC površinsko modificirali z reakcijo acetiliranja. Izboljšane mehanske lastnosti oziroma odpornost površine pripravljenih bionanokompozitnih filmov PLA proti razenju dosežemo z 2,5 % dodatkom tako nemodificirane kot tudi modificirane NFC glede na PLA. Pri nemodificirani NFC se odpornost proti razenju izboljša le malenkostno, pri acetilirani NFC pa so te izboljšave bolj opazne. Le-to pripisujemo boljši kompatibilnosti med acetilirano NFC in polimerno matrico PLA. Menimo, da bi bilo pri nadaljnjih študijah glede na ceno NFC smiselno proučiti še manjše količine nemodificirane in modificirane NFC (npr. od 0,5 % do 1 %). Za boljšo kompatibilnost hidrofilne NFC z nepolaro polimerno matrico PLA in s tem povezane izboljšane lastnosti polimernega nanokompozita je potrebna modifikacija površine NFC. Z dodatkom NFC polimerni matrici PLA lahko izboljšamo odpornost osnovne matrice proti razenju. Pri tem ima ključno vlogo količina dodatka NFC.

## 5 POVZETEK

### 5 SUMMARY

In the study, PLA bionanocomposites with various additions of unmodified and modified, acetylated NFC were prepared. The optimal addition of the NFC component to the PLA polymer matrix to improve scratch resistance of the bionanocomposites was determined. Nanofibrillated cellulose (NFC) was freeze dried. Such dried NFC was surface modified by an acetylation reaction to improve the distribution and compatibility of NFC with the non-polar PLA matrix. The success of the modification was monitored by FT-IR spectroscopy. The content of acetylation and the degree of substitution (*DS*) was calculated by using the ratio of band heights ( $H_{1740} / H_{1060}$ ) from the FT-IR spectra. It was estimated that the degree of substitution was approximately 1. PLA / NFC bionanocomposite films with the technology of casting suspensions into Petri dishes

were prepared. We varied the addition of unmodified (2.5%, 5% and 10%) and modified, acetylated (2.5%, 5% and 10%) NFC to the PLA polymer.

By UV-Vis spectroscopy we measured the absorption of visible light or the transparency of the prepared bionanocomposite films. By increasing the addition of an unmodified NFC to PLA polymer, the transparency of the films is significantly reduced, and the film with a 10% addition of an unmodified NFC already looks like paper. In the case of the PLA composite with acetylated NFC, the transparency of films is minimally reduced with the increasing addition of reinforcement.

Surface resistance to scratching of prepared films was also tested. The contact surface between the nanoparticle and the polymer matrix is very important to achieve better resistance of polymer-nanocomposites to scratching compared to the pure polymer, and the distribution of the nanoparticles in the matrix is also crucial. Improved resistance of PLA bionanocomposite films to scratching is achieved by 2.5% addition of unmodified as well as modified NFC. The resistance of PLA bionanocomposite films to scratching is improved only slightly with the addition of unmodified NFC, but with acetylated NFC these improvements are more noticeable. This is attributed to better compatibility between acetylated NFC and PLA. Regarding the price of the NFC, it would be worthwhile to study the addition of even smaller quantities of unmodified and modified NFC (e.g., from 0.5% to 1%).

## ZAHVALA

### ACKNOWLEDGEMENT

Avtorji se zahvaljujemo Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije za finančno podporo programske skupine P4-0015-0481.

## LITERATURA

### REFERENCES

- Abdulkhani, A., Hosseinzadeh, J., Dadashi, S., & Mousavi, M. (2015). A study of morphological, thermal, mechanical and barrier properties of PLA based biocomposites prepared with micro and nano sized cellulosic fibers. *Cellulose Chem. Technol.*, 49, 597-605.
- Abdulkhani, A., Hosseinzadeh, J., Ashori, A., Dadashi, S., & Takzare, Z. (2014). Preparation and characterization of modified cellulose nanofibers reinforced polylactic acid nanocomposite. *Polym. Test.*, 35, 73-79.
- Aulin, C., Karabulut, E., Amy, T., Wagberg, L., & Lindstrom, T. (2013). Transparent nanocellulosic multilayer thin films on polylactic acid with tunable gas barrier properties. *ACS Appl. Mat. Interfaces*, 5, 7352-7359.
- Baheti, V., Mishra, R., Militky, J., & Behera, B. K. (2014). Influence of noncellulosic contents on nano scale refinement of waste jute fibers for reinforcement in polylactic acid films. *Fiber. Polym.*, 15, 1500-1506.
- Bulota, M., Kreitsmann, K., Hughes, M., & Paltakari, J. (2012). Acetylated microfibrillated cellulose as a toughening agent in poly(lactic acid). *J. Appl. Polym. Sci.*, 126, E449-E458.
- Dhar, P., Tarafder, D., Kumar, A., & Katiyar, V. (2015). Effect of cellulose nanocrystal polymorphs on mechanical, barrier and thermal properties of poly(lactic acid) based bionanocomposites. *RSC Adv.*, 5, 60426-60440.
- Freire, C. S. R., Fernandes, S. C. M., Silvestre, A. J. D., & Neto, C. P. (2013). Novel cellulose-based composites based on nanofibrillated plant and bacterial cellulose: recent advances at the University of Aveiro - a review. *Holzforschung*, 67, 603-612.
- Hubbe, M. A., Rojas, O. J., Lucia, L. A., & Sain, M. (2008). Cellulosic Nanocomposites: A review. *Bioresources*, 3, 929-980.
- Johari, A. P., Kurmvanshi, S. K., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2016). Influence of surface modified cellulose microfibrils on the improved mechanical properties of poly (lactic acid). *Int. J. Biol. Macromolec.*, 84, 329-339.
- Khalil, A. H. P. S., Bhat, A. H., & Ireana Yusra, A. F. (2012). Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review. *Carbohydr. Polym.*, 87, 963-979.
- Lee, J. H., Park, S. H., & Kim, S. H. (2014). Surface modification of cellulose nanowhiskers and their reinforcing effect in poly(lactide). *Macromol. Res.*, 22, 424-430.
- Liu, D. Y., Yuan, X. W., Bhattacharyya, D., & Easteal, A. J. (2010). Characterisation of solution cast cellulose nanofibre - Reinforced poly(lactic acid). *Express. Polym. Lett.*, 4, 26-31.
- Lu, F., Yu, H., Yan, C., & Yao, J. (2016). Polylactic acid nanocomposite films with spherical nanocelluloses as efficient nucleation agents: effects on crystallization, mechanical and thermal properties. *RSC Adv.*, 6, 46008-46018.
- Paul, D. R., & Robeson, L. M. (2008). Polymer nanotechnology: Nanocomposites. *Polymer*, 49, 3187-3204.
- Peng, Y., Gardner, D. J., & Han, Y. (2012). Drying cellulose nanofibrils: in search of a suitable method. *Cellulose*, 19, 91-102.
- Petersson, L., Kvien, I., & Oksman, K. (2007). Structure and thermal properties of poly(lactic acid)/cellulose whiskers nanocomposite materials. *Compos. Sci. Technol.*, 67, 2535-2544.
- Robles, E., Urruzola, I., Labidi, J., & Serrano, L. (2015). Surface-modified nano-cellulose as reinforcement in poly(lactic acid) to conform new composites. *Ind. Crops Prod.*, 71, 44-53.
- SIST EN 13432 (2001). Embalaža - Zahteve za embalažo, primerno za kompostiranje in biorazgradnjo - Preskusna shema in ovrednotenje meril za sprejemljivost embalaže. *Packaging - Requirements*

- ments for packaging recoverable through composting and biodegradation - Test scheme and evaluation criteria for the final acceptance of packaging.
- SIST EN ISO 1518 (2001). Barve in laki - Preskus z razenjem (ISO 1518:1992). Paints and varnishes - Scratch test (ISO 1518:1992).
- Song, Z., Xiao, H., & Zhao, Y. (2014). Hydrophobic-modified nanocellulose fiber/PLA biodegradable composites for lowering water vapor transmission rate (WVTR) of paper. *Carbohydr. Polym.* 111: 442-448.
- Sukyai, P., Sriroth, K., Lee, B. -H., & Kim, H. -J. (2012). The effect of bacterial cellulose on the mechanical and thermal expansion properties of kenaf/poly(lactic acid) composites. In: *Materials and Computational Mechanics, Pts 1-3*, Zhang, H. X., Han, Y., Chen, F., & Wen, J. (eds.) (1343-1351).
- Tingaut, P., Zimmermann, T., & Lopez-Suevos, F. (2010). Synthesis and characterization of bionanocomposites with tunable properties from poly(lactic acid) and acetylated microfibrillated cellulose. *Biomacromolecules*, 11, 454-464.
- Trifol, J., Plackett, D., Sillard, C., Hassager, O., Daugaard, A. E., Bras, J., & Szabo, P. (2016). A comparison of partially acetylated nanocellulose, nanocrystalline cellulose, and nanoclay as fillers for high-performance polylactide nanocomposites. *J. Appl. Polym. Sci.*, 133, 43257-43268.
- Qu, P., Zhou, Y., Zhang, X., Yao, S., & Zhang, L. (2012). Surface modification of cellulose nanofibrils for poly(lactic acid) composite application. *J. Appl. Polym. Sci.*, 125, 3084-3091.
- Žepič, V., Poljanšek, I., Oven, P., Škapin, A. S., & Hančič, A. (2015). Effect of drying pretreatment on the acetylation of nanofibrillated cellulose. *BioRes.*, 10, 8148-8167.
- Žepič, V., Fabjan, E. S., Kasunič, M., Korošec, R. C., Hančič, A., Oven, P., Perše, L. S., & Poljanšek, I. (2014). Morphological, thermal, and structural aspects of dried and redispersed nanofibrillated cellulose (NFC). *Holzforschung*, 68, 657-667.





## RAZISKOVALNI POTENCIAL LESA SODOV IZ RIMSKIH VODNJAKOV

## RESEARCH POTENTIAL OF WOOD OF BARRELS FROM ROMAN WATER WELLS

Katarina Čufar<sup>1\*</sup>, Jana Horvat<sup>2</sup>, Tjaša Tolar<sup>2</sup>, Tina Berden<sup>2</sup>, Maks Merela<sup>1</sup>

UDK 902.67:630\*55

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Prispelo / Received: 24. 4. 2019

Sprejeto / Accepted: 14. 5. 2019

## Izvleček / Abstract

**Izvleček:** Pri arheoloških izkopavanjih na območju rimskega Navporta (danes Vrhnika), kjer so bili v letu 2005 odkriti deli različnih lesenih konstrukcij, smo raziskali skoraj 500 vzorcev lesa. Polovico vzorcev je predstavljal les jelke (*Abies alba*) in hrasta (*Quercus* sp.). Posebej smo se osredotočili na dendrokronološko raziskavo treh sodov iz lesa jelke, ki so bili uporabljeni za utrditev sten jaškov treh vodnjakov. Najprej smo sestavili in s pomočjo telekonekcije datirali referenčno kronologijo jelke, nato pa smo datirali še sode. Datacije najmlajših branik so: sod 1 – leto 10 po Kr., sod 2 – leto 3 po Kr. in sod 3 – leto 10 po Kr. Vse datacije predstavljajo terminus post quem, po katerem so bili sodi uporabljeni za vodnjake. Časovni okvir gradnje vodnjakov dopolnjujejo datacije, ki smo jih pridobili z analizo arheoloških najdb. Izkazalo se je, da so sodi z Navporta približno sočasni nedavno raziskanim sodom iz zgodnjerskih vodnjakov z območja Emone (danes Ljubljana). Datacije sodov so med prvimi uspešnimi dendrokronološkimi rezultati raziskav lesa v zgodnjerskih naselbinah v Sloveniji ter bodo omogočile boljše datiranje stratigrafskih arheoloških plasti, gradbenih faz in posameznih najdb na širšem prostoru južno od Alp v obdobju kmalu po rimski zasedbi.

**Ključne besede:** arheologija, rimska doba, vodnjaki, leseni sodi, dendrokronologija, jelka=*Abies alba*

**Abstract:** During archaeological excavations on wet sites in the area of the ancient Roman Nauportus (today's Vrhnika, Slovenia) in 2005, preserved parts of various wooden structures were discovered. We collected and investigated almost 500 samples of wood from these. Half of the samples were silver fir (*Abies alba*) and oak (*Quercus* sp.). In particular, we focused on the dendrochronological investigation of three barrels made of silver fir wood, which were used to consolidate the walls of the three water wells. First, we constructed and dated a silver fir tree-ring chronology with the help of teleconnection. Afterward, we dated the barrels with the end dates: barrel 1 – end date 10 AD, barrel 2 – end date 3 AD, and barrel 3 – end date 10 AD. All dates represent the terminus post quem, after which the barrels were made and used for wells. The time frame for the construction of wells was complemented by the dates we obtained by analysing archaeological finds on the same site. The barrels from Nauportus were compared with contemporaneous barrels from water wells recently excavated in Emona (today's Ljubljana, Slovenia). The barrels are among the first successfully dendrochronologically dated wooden remains from the 1<sup>st</sup> Century AD in Slovenia. They will allow for the better dating of stratigraphic archaeological layers, construction phases and individual archaeological finds in the wider area south of the Alps in the period soon after it was occupied by the Romans.

**Keywords:** archaeology, Roman period, wells, wooden barrels, dendrochronology, European silver fir (*Abies alba*)

## 1 UVOD

### 1 INTRODUCTION

Navport (danes Vrhnika) je bila ena najstarejših rimskih postojank na slovenskem prostoru. Umeščen je bil na strateško lokacijo ob starih poteh, ki so povezovala Apeninski polotok in Panonsko nižino, ter ob izvire Ljubljane, kjer se je začela rečna pot proti

vzhodu. Tu so Rimljani postojanko ustanovili konec 2. ali v začetku 1. st. pr. Kr. (Vojaković et al., 2019). Vsaj od sredine 1. st. pr. Kr. dalje je Navport imel status manjšega naselja (*vicus*). Na desnem bregu Ljubljane je v zadnji tretjini 1. st. pr. Kr. in na začetku 1. st. po Kr. stal utrjen skladišni kompleks s pristaniščem, preko katerega sta potekala tranzitni promet in oskrba legij, ki so delovale v srednjem Podonavju (Horvat, 1990; Mušič & Horvat, 2007). Po drugem desetletju 1. st. po Kr. je Navport izgubil vlogo vodilne rimske naselbine na območju današnje osrednje Slovenije. To vlogo je prevzela Emona (danes Ljubljana), ki je dobila status kolonije (*Colonia Iulia Emona*; Šašel Kos, 2012).

<sup>1</sup> Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, SLO

\* e-pošta: [katarina.cufar@bf.uni-lj.si](mailto:katarina.cufar@bf.uni-lj.si); telefon: 01-320-3645

<sup>2</sup> Znanstvenoraziskovalni center SAZU, Inštitut za arheologijo, Novi trg 2, 1000 Ljubljana, SLO

Čas na prelomu stoletij so zaznamovale velike spremembe: vojaški poseg rimske države na Balkan in v srednje Podonavje, vključitev v rimski imperij, močno priseljevanje iz Italije in dotok trgovskega blaga iz vsega Sredozemlja na jugovzhodnoalpski prostor. Nedavna arheološka raziskovanja v Navportu in Emoni (npr. Mušič & Horvat, 2007; Gaspari, 2010; Istenič, 2019) so dala zelo pomembne podatke za to obdobje. Objekte in drobne najdbe se da povezati z vojsko (utrdbe), trgovino (skladišča), prometom (pristanišča, ladje) ali gradnjami novih bivalnih objektov. Njihova časovna opredelitev se opira na podatke z epigrafskih spomenikov, na novce in različne drobne predmete (predvsem na keramiko, orožje in dele noše). Več izkopavanj je potekalo na vlažnih tleh, kjer so se ohranile večje količine z vodo napojenega lesa. Tako so se odprle nove možnosti za uporabo dendrokronologije in za vpogled v dejavnosti, povezane z lesom, kot so izbor in raba lesa, način obdelave, oblike in funkcije lesenih konstrukcij ter izdelava predmetov.

Naša raziskava se je osredotočila na lesene sode, ki so bili odkriti v vodnjakih v Navportu leta 2005. Cilj te raziskave je bil določiti vrste lesa na rimskem najdišču, izdelati referenčno kronologijo in dendrokronološko datirati les sodov. Zanimale so nas skladnost oziroma razlike med dendrokronološkimi rezultati in datacijami na podlagi stratigrafske

lege ter tipokronološke analize drobnih arheoloških predmetov iz vodnjakov. Rezultate raziskav sodov v Navportu smo nazadnje primerjali še z rezultati raziskav podobnih najdb na območju Emone. Predpostavljali smo, da bodo datacije lesa pripomogle k neodvisnemu datiranju arheoloških depozitov ter boljšemu razumevanju dogajanja na arheološko raziskanih območjih in na širšem prostoru osrednje Slovenije kmalu po rimski zasedbi.

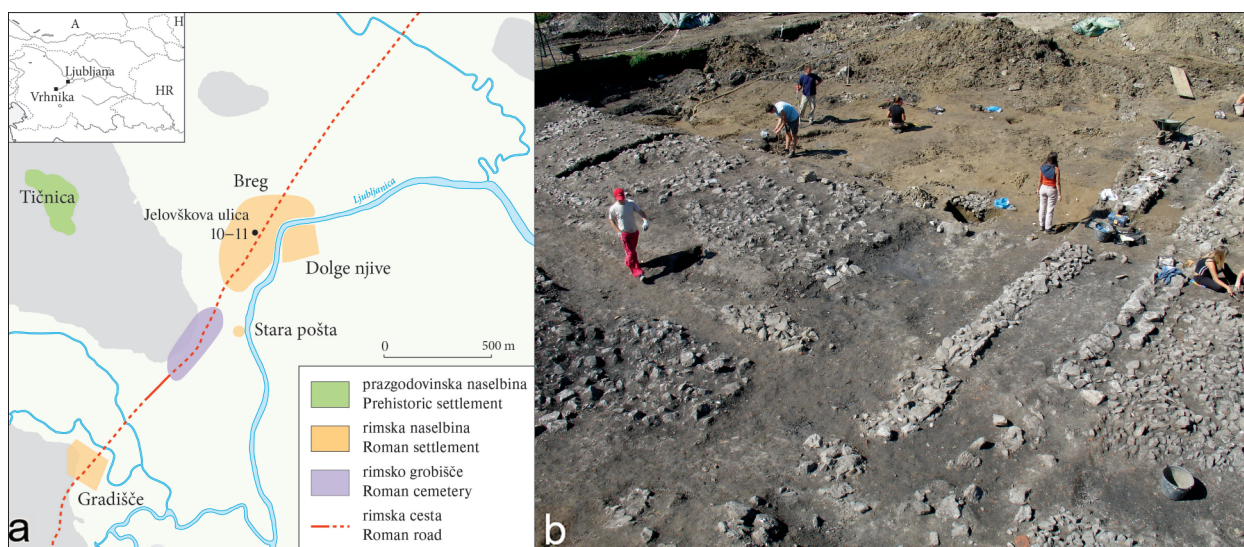
## 2 MATERIAL IN METODE

### 2 MATERIAL IN METHODS

#### 2.1 ARHEOLOŠKA IZKOPAVANJA NA VRHNIKI LETA 2005

#### 2.1 ARCHAEOLOGICAL EXCAVATIONS IN VRHNIKA IN 2005

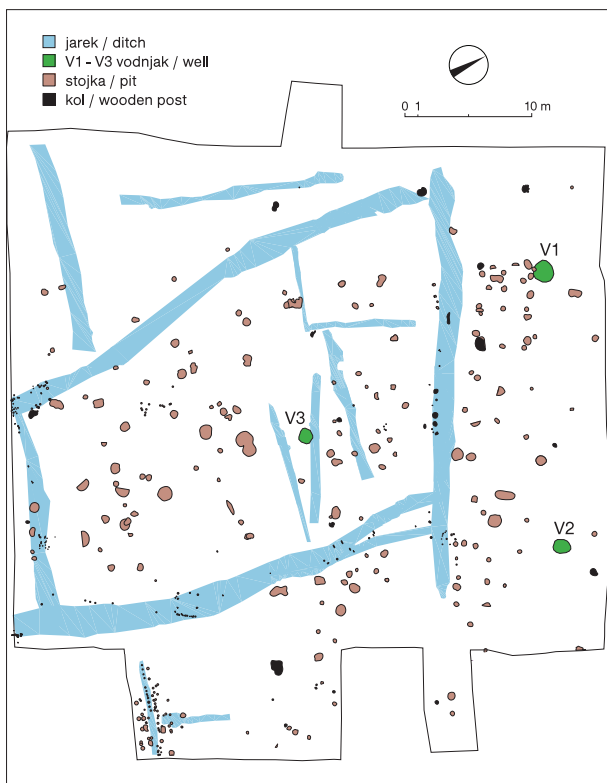
Na območju rimske naselbine Navport so leta 2005 na lokaciji Jelovškova ul. 10–11 na Vrhniki potekala zaščitna arheološka izkopavanja (Horvat & Mušič, 2007). Na 2350 m<sup>2</sup> veliki površini (slika 1) so bile raziskane naselbinske plasti, za katere je bilo na podlagi stratigrafije in tipokronološke analize drobnih najdb ugotovljeno, da obsegajo štiri gradbene faze v času od konca 1. st. pr. Kr. do konca 4. ali začetka 5. st. po Kr. Pokazalo se je, da so bile v prvi gradbeni fazi, ki se stratigrafsko dobro loči od druge faze, postavljene lesene stavbe, grajene s pokon-



Slika 1. Zaščitna arheološka izkopavanja leta 2005 na Bregu na Vrhniki (Jelovškova ul. 10-11): (a) lega najdišča, (b) najdišče med izkopavanji.

Figure 1. Rescue excavations in Breg in Vrhnika in 2005 (Jelovškova ul. 10-11): (a) location of the site (left), and (b) the site during excavations.





Slika 2. Breg na Vrhniku 2005. Tloris izkopnega polja z lego treh vodnjakov (V1, V2, V3).

Figure 2. Breg in Vrhnika in 2005. Ground plan of the excavation field with locations of three water wells (V1, V2, V3).

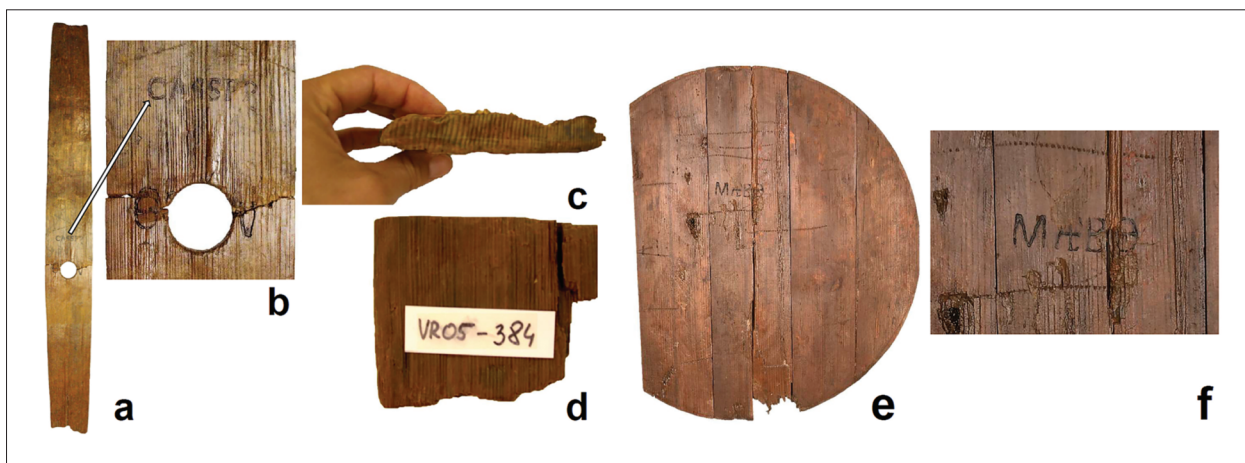
čnimi stojkami. Med njimi so bili izkopani odvodni jarki in trije vodnjaki (slika 2). Zaradi visokega nivoja talne vode so se ohranili spodnji deli lesenih konstrukcij. Jame in odvodni jarki so bili zapolnjeni z velikimi količinami drobnega arheološkega gradiva, ki ga deloma lahko povežemo s časom rabe objektov, deloma pa z nasutji, s katerimi so izravnali območje pred začetkom gradnje objektov druge faze, na začetku druge polovice 1. st. po Kr. Datacija konca prve faze temelji na drobnih arheoloških najdbah.

## 2.2 RAZISKAVA LESA

### 2.2 WOOD RESEARCH

Med izkopavanji smo naleteli na večje količine mokrega lesa. Pobranih je bilo okoli 500 kosov lesa, ki so predstavljali dele različnih konstrukcij. Ves les smo pregledali in dokumentirali ter odvzeli vzorce za identifikacijo lesa in dendrokronološko raziskavo. Vzorci so bili iz večjih kosov lesa odvzeti tako, da so zajemali celoten prečni prerez, v aksialni smeri pa so bili dolgi približno 10 cm (slika 3 c, d).

Z vodo napojene vzorce smo prenesli na Oddelek za lesarstvo Biotehniške fakultete. Tu smo jih pred obdelavo globoko zamrznili, jim s skalpelom ali dletom gladko obdelali prečno površino (slika 3 c) ter opravili makroskopsko identifikacijo lesa in štetje branik. Kjer makroskopska identifikacija lesa ni bila mogoča, smo pripravili preparate vseh treh anatom-



Slika 3. Breg na Vrhniku 2005: (a) doga soda 3 dolžine 82 cm in širine do 14,5 cm; (b) del doge soda 3 - nad luknjo je vžgan napis CASSP P; (c) prečni in (d) radialni prerez vzorca doge soda 1 za raziskave; (e, f) dno soda 3 z vžganim žigom MAEBO.

Figure 3. Breg in Vrhnika in 2005: (a) stave of Barrel 3, 82 cm long and 14.5 cm wide; (b) detail of the stave of Barrel 3 with the branded stamp CASSP P; (c) cross-section and (d) radial section of the stave sample (Barrel 1) prepared for the research; (e, f) bottom of Barrel 3 with the branded stamp MAEBO.

skih prerezov za mikroskopsko identifikacijo lesa (Schoch et al., 2004).

Na vzorcih lesa jelke (*Abies alba*), bukve (*Fagus sylvatica*) in hrasta (*Quercus* sp.), ki so imeli 45 branik ali več, smo opravili dendrokronološko analizo. Najprej smo opravili merjenje širin branik s pomočjo merilne mizice LINTAB, programa TSAP Win in stereo mikroskopa Olympus. V nadaljevanju smo s pomočjo programa TSAP Win zaporedja širin branik medsebojno sinhronizirali (slika 4) in sestavili več kronologij ločeno za posamezno drevesno vrsto. Posebej smo se posvetili sodom iz lesa jelke, ki so bili uporabljeni za utrditev sten jaškov treh vodnjakov (slike 3, 5).

### 2.3 ARHEOLOŠKI ARTEFAKTI

#### 2.3 ARCHAEOLOGICAL ARTEFACTS

Med izkopavanji smo naleteli tudi na številne arheološke artefakte. V tej študiji predstavljamo zgolj artefakte iz treh vodnjakov, ki sodijo v prvo gradbeno fazo.

Med artefakti iz lesa so najpomembnejši že omenjeni trije sodi, s katerimi so utrdili stene vodnjakov. Dokumentirali smo značilnosti njihove konstrukcije ter žige in vreze, ki so bili vidni na lesu.

Ugotovitve smo primerjali s podobnimi najdbami sodov v rimskem imperiju.

Med drobnimi najdbami iz vodnjakov so prevladovali odlomki keramike, malo je bilo stekla in kovinskih predmetov. Značilni predmeti so bili opredeljeni po funkcijah in tipih ter navezani na uveljavljene tipokronološke sheme. Pri datacijah arheoloških sklopov domnevamo določen časovni zamik med izdelavo predmetov in njihovo odložitvijo.

## 3 REZULTATI IN RAZPRAVA

### 3 RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1 LESNE VRSTE NA NAJDIŠČU

##### VRHNIKA - NAVPORT

#### 3.1 WOOD SPECIES ON THE SITE

##### VRHNIKA - NAUPORTUS

Identificirali smo les 436 vzorcev, od tega jih je polovica pripadala dvema lesnima vrstama, jelki (26 %) in hrastu (24 %), ostale ugotovljene lesne vrste z deležem 2–10 % so bile bukev, javor, jelša, leska, beli gaber, jesen, smreka in tisa (preglednica 1). Posamezni vzorci drugih lesnih vrst in vzorci, kjer je bil les preslabo ohranjen za natančno identifikacijo, so predstavljali 10 % vzorcev.

*Preglednica 1. Identifikacija lesa vzorcev z arheološkega izkopavanja na Bregu na Vrhniki v letu 2005. Predstavljeno je število in delež raziskanih vzorcev po lesnih vrstah. Med 57 dendrokronološko raziskanimi vzorci jelke (»Št. Dendro«), jih je 22 pripadalo trem sodom.*

*Table 1. Wood identification in samples from archaeological excavations at the site Breg in Vrhnika in 2005, with the number and percentage of samples per species. A total of 57 silver fir samples were dendrochronologically studied (N. Dendro), 22 of them originated from three barrels.*

Vrsta / Species			Število / Number	Delež / Percentage (%)	Št. Dendro. / N. Dendro.
<i>Abies alba</i>	Navadna jelka	Silver fir	113	26	57
<i>Fagus sylvatica</i>	Navadna bukev	European beech	24	5	7
<i>Quercus</i> sp.*	Hrast	Oak	103	24	46
<i>Acer</i> sp.	Javor	Maple	11	2	
<i>Alnus glutinosa</i>	Črna jelša	Alder	54	12	
<i>Corylus avellana</i>	Leska	Hasel	8	2	
<i>Carpinus betulus</i>	Beli gaber	Hornbeam	10	2	
<i>Fraxinus</i> sp.	Jesen	Ash	22	5	
<i>Picea abies</i>	Navadna smreka	Norway spruce	7	2	
<i>Taxus baccata</i>	Tisa	Yew	42	10	
Ostalo / Others			42	10	
SKUPAJ / TOTAL			436	100	

### 3.2 SESTAVA IN DATIRANJE JELOVE KRONOLOGIJE

#### 3.2 CONSTRUCTION AND DATING OF SILVER FIR CHRONOLOGY

Od skupno 113 vzorcev jelke smo jih 57 izbrali za dendrokronološko raziskavo (preglednica 1). Vzorci so predstavljali dele različnih konstrukcij ali so bili uporabljeni kot polnilo ob zasutju jarkov in jaškov. Od 57 dendrokronološko raziskanih vzorcev jelke jih je bilo 22 odvzetih iz dog treh sodov: sod 1 (8 vzorcev), sod 2 (8 vzorcev), sod 3 (6 vzorcev), ki so jih uporabili za utrditev jaškov treh vodnjakov (slike 2, 3 in 5).

Po merjenju širin branik in sinhroniziranju za poredij širin branik smo sestavili plavajočo kronologijo VR-ABAL-KRO dolžine 153 let. Ker v letu 2005 še nismo imeli lastnih referenčnih kronologij za obdobje rimske dobe, smo za datiranje VR-ABAL-KRO ob pomoči dendrokronologov iz sosednjih držav uporabili nabor kronologij iz različnih arheoloških najdišč in projektov v Avstriji, Nemčiji in Franciji (Nicolussi et al., 1997; Büntgen et al., 2015; Tegel & Büntgen, 2015; Weidemüller & Herzig, 2017). Zadnjo braniko VR-ABAL-KRO smo datirali v leto 10 po Kr. (slika 4), najbolje se je ujemala s kronologijo jelke iz Avstrije (GLK 70\*\*\*, tBP = 4,4, tH = 4,6, OVL = 153), ki so jo sestavili pri raziskavi lesa rimske ceste

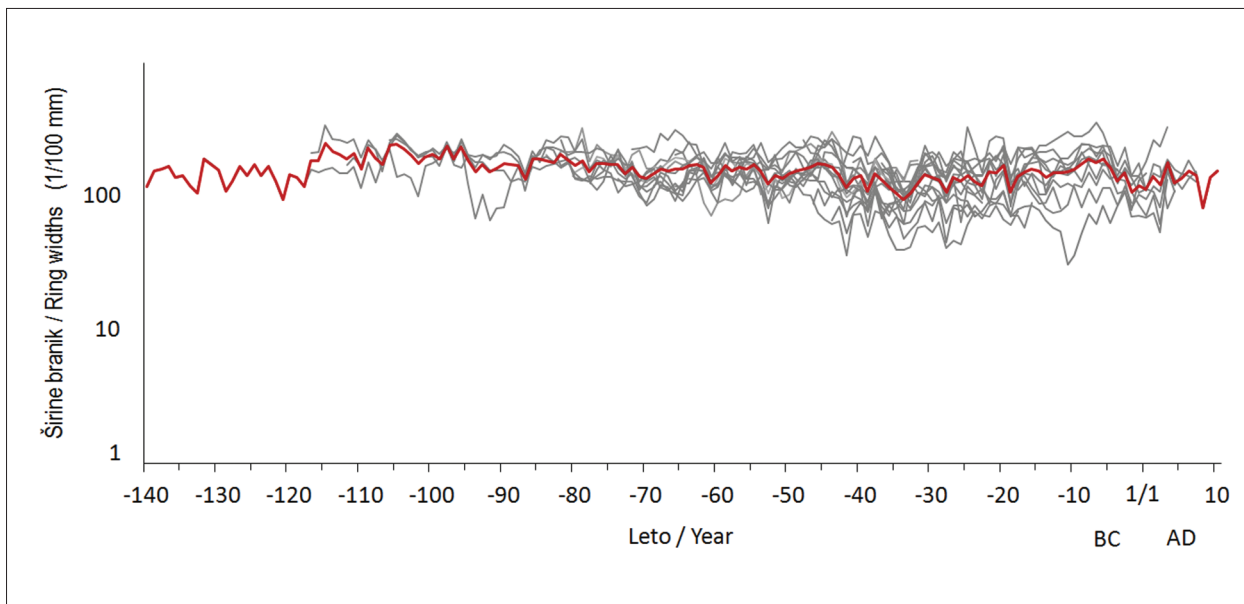
Via Claudia Augusta na Tirolskem (Nicolussi et al., 1997). Omenjeni kazalniki GLK (%) - koeficient skladnosti - Gleichläufigkeit, tBP in tH – t-vrednost po Baillie in Pilcherju in t-vrednost po Hollsteinu so statistično značilni, OVL-prekrivanje kaže, da se VR-ABAL-KRO na celotni dolžini prekriva z avstrijsko kronologijo (za razlago kazalnikov prim. Čufar et al., 2017a). Datacijo smo dodatno potrdili s kronologijami iz Nemčije in Francije. Tako smo tudi potrdili, da je telekonekcija, to je podobnost med jelovimi kronologijami iz oddaljenih rastišč, bistveno boljša kot na primer telekonekcija med hrastovimi kronologijami (prim. Čufar et al., 2008; 2015).

### 3.3 SODI, UPORABLJENI ZA JAŠKE VODNJAKOV

#### 3.3 BARRELS USED FOR THE LINING OF WATER WELLS

V prvi vodnjak je bil vstavljen sod 1, od katerega se je ohranila samo spodnja polovica. Sestavljen je bil iz 23 dog, ki so bile večinoma premaknjene iz prvotne lege in dolge med 57 in 92 cm ter široke od 7 do 15 cm (slika 5-1).

V drugem vodnjaku je bil uporabljen sod 2, od katerega se je ohranila približno spodnja tretjina. Dog je bilo 26, ohranjene so bile v dolžini med 46 in 59 cm, široke od 6 do 12 cm (slika 5-2). Pri dnu je bil



Slika 4. Zaporedja širin branik 24 vzorcev lesa jelke z najdišča Vrhnika v sinhronem položaju (črni grafi) in kronologija VR-ABAL-KRO (oranžna krivulja) po datiranju. Leto zadnje branike je 10 po Kr.

Figure 4. Tree-ring series of 24 samples of silver fir wood from the site in Vrhnika in a cross-dated position (black graphs) and a chronology (orange) after the dating. The end date is 10 AD.

sod štirikrat ovit z vitro iz leskove šibe. Rekonstruiran premer soda na tretjini višine je 74 cm.

Dno tretjega vodnjaka je bilo utrjeno s konstrukcijo iz horizontalnih brun, več navpičnih brun je bilo uporabljeno za utrditev stene. V jašek je bil postavljen sod 3, ki je bil skoraj v celoti ohranjen (slika 5-3). Doge, ki jih je bilo 25, so bile ohranjene v dolžini okoli 140 cm. Steno so sestavljale izmenično ožje in širše doge (širin 6 do 16 cm). V spodnjem delu so se ohranili trije pasovi in v zgornjem en pas leskovih viter. Ena od dog je imela v sredini luknjo s premerom okoli 5 cm (slika 3 a in b). Glede na njeno lego je morala biti prvotna višina soda okoli 170 cm. Poleg soda je ležalo dno, premera 71 cm, sestavljeno iz petih desk (ohranile so se štiri; slika 3 e in f).

Na sredini dna soda 3 je bil prek dveh desk vžgan žig MÆBΘ (sliki 3 e in f). Čez čep v luknji na dogi, ki se ni ohranil, je bil vžgan enak žig, od katerega sta vidni samo začetna in končna črka: M in Θ. Na dogi nad luknjo je bil vžgan napis: CASSP P (sliki 3 a in b).

Vžgani žigi na zunanji strani dna, na dogi ali preko čepa so pripisani trgovcem z vinom. Običajno jih je mogoče pojasniti kot tridelna imena rimskih državljanov. Kadar je sod menjal lastnike, lahko na sodu opazimo zaporedne žige različnih trgovcev (Frei-Stolba, 2015; 2017). Sod 3 sta verjetno uporabila dva trgovca, pri čemer je eden žigosal dno in

dogo preko luknje (oziroma čepa), drugi je žigosal samo dogo poleg luknje.

Dendrokronološko smo analizirali 8 dog iz soda 1. Vse so bile iz lesa jelke, ki so vsebovale 47 do 95 branik. Njihova zaporedja širin branik smo lahko sinhronizirali in združili v kronologijo soda, ki smo jo datirali z zgoraj omenjeno kronologijo VR-ABAL-KRO. Leto nastanka najmlajše branike, ki je ključna za datiranje soda, je 10 po Kr. (slika 6).

Sod 2 je imel 8 dog iz lesa jelke, primernih za dendrokronologijo. Vsebovale so 49 do 95 branik, ugotovljeni datum najmlajše branike je leto 3 po Kr.

Sod 3 je imel doge z manjšim številom branik, zato smo analizirali 6 dog, ki so vsebovale 34 do 72 branik, ugotovljeni datum najmlajše branike je leto 10 po Kr.

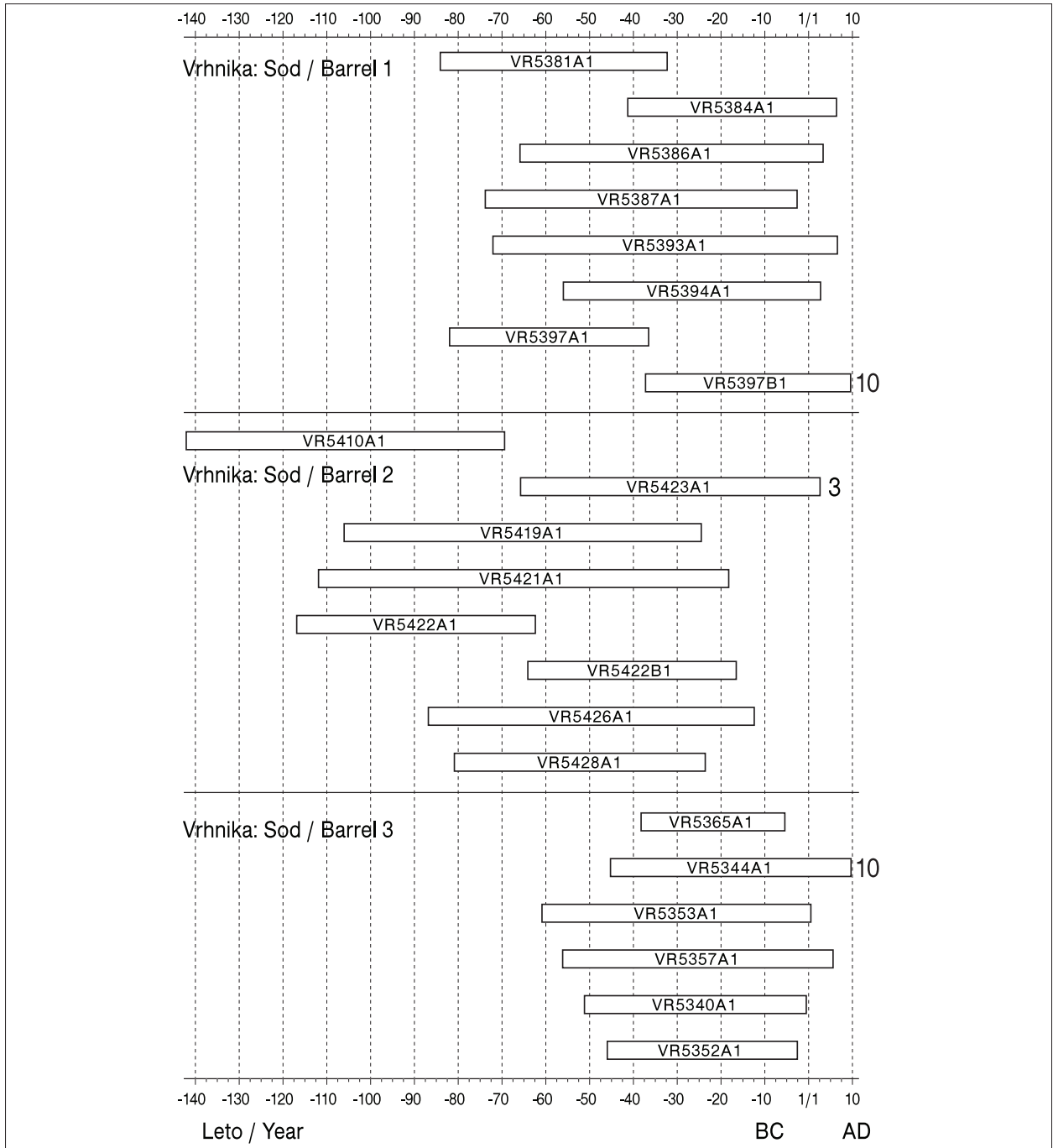
Na dnu tretjega vodnjaka je bila ohranjena tudi konstrukcija, od katere smo datirali en jelov tram (leto zadnje branike 22 pr. Kr.). S pregledom materiala in primerjavami zaporedij širin branik nismo mogli ugotoviti, ali zgodnejši datum v primerjavi z datacijo soda pomeni, da je na tramu zaradi obdelave manjkalo več zunanjih branik, ali je konstrukcija starejša od soda.

Za datiranje treh sodov so torej ključni datumi najmlajše branike na posameznem sodu, čeprav imajo posamezne doge različne datume zadnjih branik, kar je posledica načina razreza debel in obde-



Slika 5. Breg na Vrhniki 2005. Vodnjaki in sodi 1, 2 in 3 ob odkritju na terenu. V sodu 2 leži cela amfora za oljčno olje Dressel 6B (prim. sliko 7).

Figure 5. Breg in Vrhnika 2005. Water wells and Barrels 1, 2 and 3 as they were discovered during excavation. A complete Dressel 6B amphora for olive oil was found in Barrel 2 (comp. Figure 7).



Slika 6. Breg na Vrhniki 2005. Časovni razpon zaporedij širin branik posameznih dog sodov: sod 1 (8 dog), sod 2 (8 dog) in sod 3 (6 dog). Za datiranje posameznega sode so ključni datumi najmlajše branike: sod 1 – leto 10 po Kr., sod 2 – leto 3 po Kr. in sod 3 – leto 10 po Kr. Datumi predstavljajo terminus post quem, oz. mejnik (leto), po katerem so bili sodi izdelani in uporabljeni za vodnjake.

Figure 6. Breg in Vrhnika in 2005. Time-spans of tree-ring series of the individual staves of three barrels: Barrel 1 (eight staves), Barrel 2 (eight staves), and Barrel 3 (six staves). The dates of the most recent tree-rings crucial for the dating of each barrel are: Barrel 1 – 10 AD, Barrel 2 – 3 AD, Barrel 3 – 10 AD. The dates should be considered as terminus post quem, representing the year after which the barrels were made and the wells were constructed.

lave lesa za proizvodnjo dog. Za izdelavo dog (širine 6 do 16 cm) so verjetno uporabili les debel večjih premerov, ki so jih razcepili ali razžagali, tako da niso vse deščice oz. doge segale do zunanega dela drevesa. Nobena doga ni vsebovala sledov skorje, zato nismo mogli ugotoviti, če se je katera od branik nahajala tik pod skorjo oz. če je nastala v zadnjem letu pred posekom drevesa.

Datacije najmlajše branike na posameznem sodu predstavljajo *terminus post quem* oz. časovni mejnik, po katerem je bil sod izdelan. Na žalost ne moremo ugotoviti, koliko branik so odstranili pri obdelavi, koliko časa so sode uporabljali za prvotni namen (shranjevanje in transport vina) ter kdaj je bil posamezen sod uporabljen za utrditev jaška vodnjaka. S podobnimi težavami pri oceni časa med posekom drevesa in izdelavo ter uporabo izdelka se srečujemo pri večini izdelkov iz lesa (prim. Čufar et al., 2014a; 2017a). Omenjeni zamik bi v najboljšem primeru lahko predstavljal le nekaj let, kar bi pome-

nilo, da so bili vodnjaki najverjetneje postavljeni v drugem desetletju oz. kmalu po letu 10 po Kr.

### 3.4 ARHEOLOŠKI ARTEFAKTI

#### 3.4 ARCHAEOLOGICAL ARTEFACTS

Ker je v rimskih naselbinah v Sloveniji les redko ohranjen in ker do sedaj nismo imeli referenčnih kronologij za njegovo datiranje, so skoraj vse datacije doslej temeljile na arheoloških predmetih, ki jih je bilo veliko tudi na Vrhniki.

Za datiranje je zelo zanimiva fina namizna keramika (zvrsti tera sigilata in keramika tankih sten), ki so jo v drugi polovici 1. st. pr. Kr. in v 1. st. po Kr. izdelovali v osrednji in severni Italiji in jo je mogoče datirati celo na dve ali tri desetletja natančno (Schindler-Kaudelka, 1975, 2012; Ricci, 1985; Conspectus, 1990). Pri drugih sočasnih vrstah keramike je zaradi počasnega spreminjanja oblik natančnost datiranja slabša.

V prvem vodnjaku oziroma v sodu 1 je bilo najdeno razmeroma malo predmetov. Najbolj natan-



Slika 7. Breg na Vrhniki 2005: (a) skodelica iz prvega vodnjaka je datirana med drugim in sedmim desetletjem 1. st. po Kr.; (b) krožnik iz drugega vodnjaka, datiran od prvega desetletja 1. st. pr. Kr. do četrtega desetletja 1. st. po Kr.; (c) trinožnik iz sode 2; (d) vrček z dna tretjega vodnjaka; (e) amfora za olje iz sode 2. (a in b) v merilu 1:3; ostalo ni v merilu.

Figure 7. Breg in Vrhnika in 2005: (a) cup from the first well, dated between the second and seventh decades of the 1<sup>st</sup> cent. AD; (b) plate from the second well, dated between the first decade of the 1<sup>st</sup> cent. BC and the fourth decade of the 1<sup>st</sup> cent. AD; (c) tripod vessel from Barrel 2; (d) jug from the bottom of the third well; (e) amphora from Barrel 2. (a, b) 1:3; the items are not shown in the same scale.

čno smo lahko datirali skodelico iz severnoitalske sigilate B, oblike Consp. 27 (slika 7 a), ki je bila izdelana med drugim in sedmim desetletjem 1. st. po Kr. (Conspetus, 1990) in skodelico iz keramike tankih sten, ki je bila izdelana v severni Italiji v drugi četrtini 1. st. po Kr. (Schindler-Kaudelka, 1975: oblika 105, kompleks 6; Schindler-Kaudelka, 2012).

V sodu 2 sta bila najdena dva odlomka krožnikov severnoitalske sigilate B, ki sta opredeljena kot obliki Consp. 18 in 19 (slika 7 b) ter datirana od prvega desetletja pr. Kr. do četrtega desetletja po Kr. (Conspetus, 1990). Skodelica iz keramike tankih sten izvira iz severne Italije in je datirana v obdobje zadnje četrtine 1. st. pr. Kr. in prve četrtine 1. st. po Kr. (Schindler-Kaudelka, 1975: fabrikat C, oblika 68 ali 80; Schindler-Kaudelka, 2012; Ricci, 1985, tip 2/232, 2/405). Amfora za olje istrske ali severnoitalske proizvodnje (tip Dressel 6B; slika 7 e) je bila izdelana med koncem 1. st. pr. Kr. in začetkom 2. st. po Kr. (Cipriano, 2009), amfora za jadransko vino (tip Dressel 6A) je datirana med zadnjo tretjino 1. st. pr. Kr. in sredino 1. st. po Kr. (Carre, 1985; Bezeczeky, 1994).

Iz časa uporabe tretjega vodnjaka zanesljivo izvira zgolj cel vrček (slika 7 d), najden na dnu, ki se ga ne da natančneje datirati. Odlomek krožnika iz severnoitalske sigilate B, oblike Consp. 18, sodi v čas od prvega desetletja pr. Kr. do četrtega desetletja po Kr. (Conspetus, 1990). Skodelice iz keramike tankih sten, kakršna je bila najdena v vodnjaku, so izdelovali v Italiji do drugega desetletja po Kr. (Schindler-Kaudelka, 1975: fabrikat A, oblika 28; Ricci, 1985: tip 2/232, 2/405).

Večino artefaktov iz vodnjakov 1 do 3 lahko torej grobo datiramo med prvo desetletje pr. Kr. in konec 1. st. po Kr. (slika 7 c-e). Samo nekaj odlomkov fine namizne keramike bi lahko postavili natančneje v prvo polovico 1. st. po Kr. (slika 7 a, b). Datacijo sklopa v prvo polovico 1. st. po Kr. potrjuje tudi odsotnost predmetov, ki se prvič pojavijo v drugi polovici 1. st. po Kr. Natančnejšo časovno opredelitev onemogoča maloštevilnost artefaktov.

#### **3.4 POMEN DATACIJE RIMSKIH SODOV Z VRHNIKE ZA ARHEOLOGIJO**

#### **3.4 SIGNIFICANCE OF THE DATING OF ROMAN WELLS FROM VRHNIKA FOR ARCHAEOLOGY**

Po stratigrafski legi in tipokronološki opredelitvi arheoloških artefaktov lahko sklepamo, da so bili vodnjaki iz Navporta najverjetneje izkopani in upo-

rabljani v prvi polovici 1. st. po Kr. Dendrokronološka analiza je omogočila bolj natančen časovni vpogled na dogajanje, saj dendrokronološke datacije kažejo, da so bili sodi izdelani po letu 3 po Kr. (sod 2) in po letu 10 po Kr. (soda 1 in 3). Raba sodov v vodnjakih je sekundarna, saj so v njih najprej shranjevali in tvorili vino. Dvoje različnih žigov na sodu 3 nakazuje, da je bil v lasti vsaj dveh trgovcev z vinom, preden je bil uporabljen za vodnjak. Kakšen je bil časovni razmak med izdelavo sodov in njihovo sekundarno uporabo v Navportu sicer ni mogoče natančno ugotoviti, vendar dendrokronološke datacije dopuščajo domnevo, da so bili vodnjaki verjetno zgrajeni v drugem ali tretjem desetletju po Kr.

Datacija opustitve vodnjakov v sredini ali na začetku druge polovice 1. st. po Kr. temelji samo na tipokronološki analizi predmetov, ki so padli v vodnjak v času rabe oziroma so prišli vanj pri zasipanju. Vse kaže, da so bili vodnjaki v uporabi zgolj nekaj desetletij.

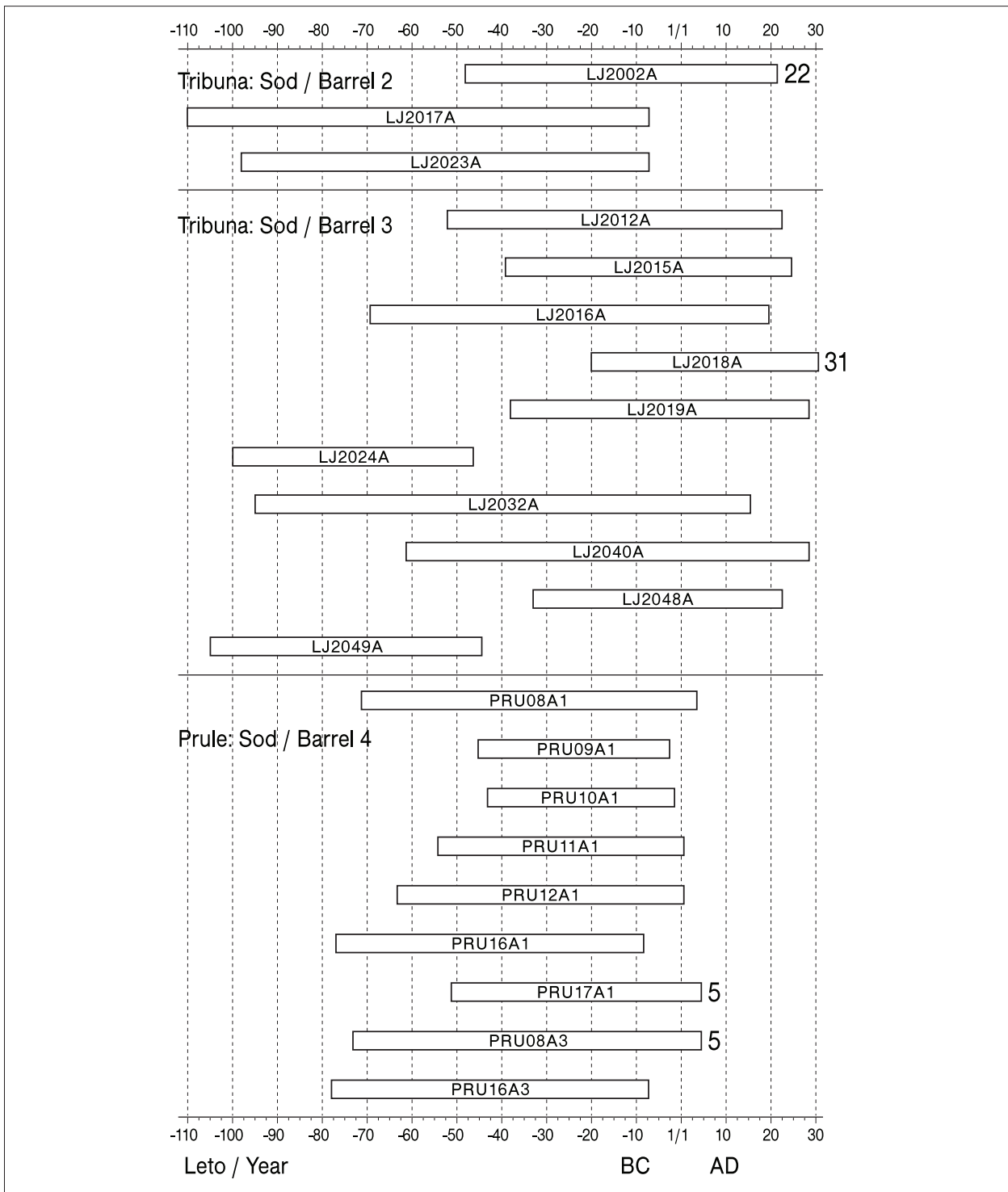
Kratko obdobje rabe vodnjakov, ugotovljeno s kombinacijo dendrokronoloških in tipokronoloških datacij, omogoča boljšo časovno opredelitev odlomkov tistega posodja iz vodnjakov, ki je bilo izdelano v lokalnih ali regionalnih delavnicah in katerega datacije do sedaj niso bile jasne (npr. loncev in trinožnikov iz grobe kuhinjske keramike ali vrčev iz navadne namizne keramike; slika 7 c, d).

Sodi so bili pogosto namenjeni transportu vina in drugih dobrin na večje razdalje, zato bi les za sode, ki so bili odkriti na Vrhniki, lahko izviral od tam, kjer so sode izdelali (prim. Frei-Stolba, 2015; Frei-Stolba, 2017). Žal jelka zaradi dobre telekonekcije (podobnosti kronologij z oddaljenih rastišč) ni primerna za ugotavljanje izvora lesa v smislu dendroprovenience (prim. Čufar et al., 2014a).

#### **3.5 POMEN DATACIJE SODOV Z VRHNIKE ZA ŠIRŠE ZEMLJEPISNO OBMOČJE**

#### **3.5 SIGNIFICANCE OF BARRELS FROM VRHNIKA FOR THE WIDER GEOGRAPHICAL AREA**

Raziskave sodov na Vrhniki so pokazale, da je z njimi mogoče izboljšati arheološke datacije artefaktov in plasti iz zgodnjerickega obdobja. Zato niso nič manj pomembne dendrokronološke raziskave štirih sodov, ki so jih odkrili pri zaščitnih arheoloških izkopavanjih na dveh lokacijah na območju Prul v Ljubljani. Tudi tukaj so bili sodi uporabljeni kot opažajškov vodnjakov. Na lokaciji Tribuna je ekipa za ar-



Slika 8. Ljubljana. Časovni razpon zaporedij širin branik posameznih dog sodov: Tribuna - sod 2 (3 doge) zadnja branika leto 22 po Kr., Tribuna - sod 3 (11 dog) zadnja branika leto 31 po Kr. in Prule - sod 4 (7 dog) zadnja branika leto 5 po Kr.

Figure 8. Ljubljana. Time-spans of tree-ring series of individual staves of three barrels: Tribuna - Barrel 2 (three staves) end date 22 AD, Tribuna - Barrel 3 (11 staves) end date 31 AD, and Prule - Barrel 4 (seven staves) end date 5 AD.



heološke raziskave podjetja Arhej odkrila tri sode, izmed katerih sta bila dva dendrokronološko raziskana in datirana: sod 2 (zadnja branika leto 22 po Kr.) in sod 3 (zadnja branika leto 31 po Kr.) (Čufar & Merela, 2010). Soda sodita v V. fazo najdišča Tribuna, ko je bil na tem območju že podrt vojaški tabor in so bile zgrajene lesene stavbe civilne narave (Gaspari et al., 2014). V letu 2016 je ekipa podjetja Tica sistem na drugi lokaciji na Prulah blizu Špice odkrila vodnjak z zelo slabo ohranjenim sodom, ki je bil tudi dendrokronološko datiran (sod 4, zadnja branika leto 5 po Kr.) (Čufar et al., 2017b). Vse datirane doge sodov z območja Prul so bile jelove.

Podobno kot na Vrhniki so tudi v Ljubljani sodi pripomogli k bolj natančnemu datiranju naselbinskih faz in arheoloških artefaktov. Ker so si naselbinske plasti v Navportu in Emoni, iz katerih izvirajo sodi, geografsko in časovno zelo blizu, nam dobro datiranje omogoča boljše razumevanje dinamičnih procesov v 1. stoletju našega štetja na celotnem jugovzhodnoalpskem prostoru.

## 4 ZAKLJUČKI

### 4 CONCLUSIONS

V Navportu in Emoni je bilo v najstarejših naselbinskih fazah razmeroma veliko lesene gradnje. Les se je ohranil v anaerobnih razmerah in v z vodo napojenem stanju, kjer se je nahajal v najglobljih arheoloških plasteh. Na obeh najdiščih je bilo odkritih več sodov, ki so bili dendrokronološko in stratigrafsko datirani v prvo polovico 1. st. po Kr. Predstavljajo redke vir lesa iz rimske dobe, ki ima velik raziskovalni potencial.

Najdbe in časovna opredelitev sodov se dobro ujemajo z navedbami geografa Strabona (5.1.8) iz konca 1. st. pr. Kr., ki je poročal, da so na vzhodnem obrobju Alp tovorili vino v lesenih sodih. Naše raziskave potrjujejo, da so bili, tako kot je bilo običajno drugod po Evropi v rimskem obdobju, sodi izdelani iz lesa jelke, odsluženi sodi so bili uporabljeni v drugotne namene, kot so opaži vodnjakov (Frei-Stolba, 2015; 2017).

Trije vodnjaki iz Navporta so bili na podlagi tipologije fine namizne keramike datirani v prvo polovico 1. st. po Kr. Dendrokronološka analiza je pokazala, da so bili sodi izdelani po letu 3 oziroma po letu 10 po Kr. Predvidevamo določen časovni zamik med izdelavo sodov in njihovo sekundarno

rabo za vodnjake in ocenjujemo, da so bili vodnjaki zgrajeni sredi prve polovice 1. st. po Kr. Po tipokronoloških datacijah fine namizne keramike, ki je kronološko najbolj občutljiva, so bili vodnjaki zasuti v tretji četrtini 1. st. po Kr. Zaradi razmeroma kratkotrajne rabe vodnjakov (največ pol stoletja), lahko tudi ostale, kronološko manj občutljive drobne arheološke najdbe, ožje datiramo v drugo in tretjo četrtino 1. st. po Kr. Datacije sodov so tako pripomogle k neodvisnemu datiranju arheoloških depozitov, ki jih prej ni bilo mogoče natančno datirati in boljšemu razumevanju dogajanja na območjih raziskovanj.

Raziskave arheološkega lesa in datacije sodov z Vrhnike, ki so poleg rimske ladje iz Sinje gorice pri Vrhniki med prvimi dendrokronološko datiranimi arheološkimi artefakti iz rimske dobe na območju Slovenije (prim. Čufar et al., 2014b), se dopolnjujejo z datacijami na osnovi arheoloških artefaktov, ki so pri raziskavah arheoloških plasti iz rimske dobe pri nas doslej predstavljale glavni vir za časovno opredelitev predmetov in dogajanj. Skoraj istočasne datacije sodov z območja Ljubljane in njihova opredelitev v prvo polovico 1. st. po Kr. pomen raziskav z Vrhnike uvršča v širši prostor. Glede na to, da so sodi premično blago in bi bili lahko izdelani izven območja Slovenije, so predstavljeni rezultati pomembni tudi za širše geografsko območje.

## 5 POVZETEK

### 5 SUMMARY

Parts of various wooden structures were discovered during archaeological excavations in 2005 in the area of the Roman settlement Nauportus, today's Vrhnika, Slovenia (Figures 1, and 2) (Horvat & Mušič, 2007). The wood survived in a waterlogged condition in the deepest archaeological layers (1<sup>st</sup> settlement phase). Almost 500 wood samples were collected and examined, half of which represented silver fir (*Abies alba*) and oak (*Quercus* sp.) (Table 1, Figure 3). The present research was focused on the dendrochronological investigation of three barrels made of silver fir wood, which were used to consolidate the walls of the three wells (Figures 2, 3, and 5). First, a reference chronology of silver fir based on 57 samples was assembled and dated (length 153 years, end date 10 AD) (Figure 4). The dating was based on teleconnection with a silver fir chronology from Austria (Nicolussi et al., 1997) with

cross-dating statistics:  $GLK\ 70^{***}$ ,  $tBP=4,4$ ,  $tH=4,6$ ,  $OVL=153$ . The dating was confirmed with chronologies from Germany and France (Tegel & Büntgen, 2015; Tegel, personal communication). On the basis of this, the barrels were also dated. Their end dates are: Barrel 1 (end date 10 AD), Barrel 2 (end date 3 AD), and Barrel 3 (end date 10 AD) (Figures 3 and 6). All dates represent the *terminus post quem* after which the barrels were made and used for wells. A certain time interval between the manufacture of barrels and their secondary use for wells is presumed. Based on this, it is estimated that the wells were built in the middle of the first half of the 1<sup>st</sup> century AD.

The chronology of the well constructions was complemented by the stratigraphic position and typonchronological analysis of small archaeological artefacts. Most of the artefacts from the wells were produced between the first decade BC and the end of the first century AD (Figure 7). Only a few fragments of fine tableware could be placed more precisely in the first half of the 1<sup>st</sup> century AD (Figures 7a and b; Schindler-Kaudelka, 1975; Conspectus, 1990). The focus in the first half of the 1<sup>st</sup> century AD is also confirmed by the absence of objects that appeared for the first time in the second half of the 1<sup>st</sup> century AD.

Dendrochronological dating that indicates the construction of wells in the middle of the first half of the 1<sup>st</sup> century AD provides more precise information than just a stratigraphic position or typonchronology of artefacts. On the other hand, the abandonment of the wells in the middle or at the beginning of the second half of the 1<sup>st</sup> century AD is based only on the typonchronology of artefacts that fell into the wells during use or came to fill them after their abandonment. A relatively short period of use (about half a century) suggests a better chronological position of those artefacts from the wells, which were produced in local or regional workshops and have not yet been dated well (Figures 7 c, and d).

Two different burned stamps on Barrel 3 (MÆBΘ, CASSP P, Figures 3a, b, e, and f) indicate that the barrel was owned by at least two wine dealers before it was used in the well. Since the barrels were often intended for the transport of wine and other goods over long distances, it is likely that the wood for the Vrhnika barrels was felled on remote

sites, i.e. in the wider area of the Southern Alps (see Frei-Stolba, 2015; Frei-Stolba, 2017).

The wells with barrels from Nauportus are approximately contemporary with four similar wells from the Emona area (present-day Ljubljana, Figure 8). Two barrels from the location Tribuna were dendrochronologically researched and dated: Barrel 2 (end date 22 AD) and Barrel 3 (end date 31 AD). Both barrels belong to phase V of the Tribuna site when a military camp was already demolished and wooden buildings of civilian nature were built (Gaspari et al., 2014). Barrel 4 from a nearby location in the Prule area was dendrochronologically dated to 5 AD; all dates represent the *terminus post quem*.

The occurrence and chronology of barrels from Vrhnika and Ljubljana correspond well with a report of the Greek geographer Strabo (5.1.8) from the end of the 1<sup>st</sup> century BC, which stated the wine was transported in wooden barrels in the eastern outskirts of the Alps. As elsewhere, our research has shown that the Roman barrels were predominately made of silver fir wood, and that the barrels were reused for secondary purposes in wells and work pits (Frei-Stolba, 2015; Frei-Stolba, 2017).

The barrels from Vrhnika and Ljubljana are beside a barge from the same time (Čufar et al., 2014a), among the few dendrochronologically dated Roman wooden artefacts in Slovenia. Their dating is complemented by the chronology of archaeological artefacts, which until now represented the main evidence for the dating of objects and archaeological layers in the region. Since barrels are mobile goods and could be manufactured outside the territory of their discovery, the results presented in this work could be important for the wider geographical area south of the Alps. The find spots of barrels contribute additionally to the relevance of our results. Nauportus (Vrhnika) and Colonia Iulia Emona (Ljubljana) were the oldest and most significant Roman settlements in today's central Slovenia. They are thus crucial for understanding the major changes during the time of the Roman advance into the central Danube region and the Western Balkans (in the 1<sup>st</sup> century BC and 1<sup>st</sup> century AD (Mušič & Horvat, 2007; Gaspari, 2010; Šašel Kos, 2012).

The study was supported by the Slovenian Research Agency, programs P4-0015 (KC and MM) and P6-0064 (JH, TT) and the program Young Researchers (TB). We are indebted to Willy Tegel, Kurt Ni-

colussi, Roswitha Schweichel, Franz Herzig and Niels Bleicher who provided us their reference chronologies for dating. We also thank Luka Krže for his support in the laboratory as well as Dragotin Valoh and Mateja Belak for making plans and maps.

## ZAHVALA

### ACKNOWLEDGEMENT

Delo je nastalo v okviru programskih skupin P4-0015 (KČ in MM) in P6-0064 (JH, TT) ter programa mladi raziskovalci (TB), ki jih financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost republike Slovenije (ARRS). Pri delu so nam pomagali Luka Krže ter Dragotin Valoh in Mateja Belak, ki sta izdelala načrte in karte. Willy Tegel, Kurt Nicolussi, Roswitha Schweichel, Franz Herzig in Niels Bleicher so nam omogočili uporabo njihovih referenčnih kronologij za preverbo datacij. Vsem lepa hvala!

## VIRI

### REFERENCES

- Bezeczky, T. (1994). Amphorenfunde vom Magdalensberg und aus Pannonien. Ein Vergleich. *Kärntner Museumsschriften* 74. Archäologische Forschungen zu den Grabungen auf dem Magdalensberg 12. Klagenfurt: Verlag des Landesmuseum für Kärnten.
- Büntgen, U., Tegel, W., Kaplan, J., Schaub, M., Hagedorn, F., Bürgi, M., ... Liebhold, A. (2014). Placing unprecedented recent fir growth in a European-wide and Holocene-long context. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12, 100–106.
- Carre, M.-B. (1985). Les amphores de la Cisalpine et de l'Adriatique au début de l'empire. *Mélanges de l'École française de Rome. Antiquité*, 97(1), 207–245.
- Cipriano, S. (2009). Le anfore olearie Dressel 6b. In: Pesavento Mattioli S., Carre, M.-B. (eds.), *Olio e pesce in epoca Romana, produzione e commercio nelle regioni dell'alto Adriatico*. *Antenor quaderni* 15 (173-189). Roma: Quasar.
- Conspectus (1990): Ettliger, E. (ed.), *Conspectus formarum terrae sigillatae Italico modo confectae*. *Materialien zur römisch-germanischen Keramik* 10. Bonn: R. Habelt.
- 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., & Merela, M. (2010). Raziskave in dendrokronološka datacija lesa z najdišča na lokaciji bivše Tribune pod Ljubljanskim gradom, poročilo 2009-2010. Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo. 12 str.
- Čufar, K., Bizjak, M., Kitek Kuzman, M., Merela, M., Grabner, M., & Brus, R. (2014a). Castle Pišece, Slovenia – building history and Wood economy revealed by dendrochronology, dendroprovenancing and historical sources. *Dendrochronologia*, 32, 357–363.
- Čufar, K., Merela, M., & Erič, M. (2014b). A Roman barge in the Ljubljana river (Slovenia): wood identification, dendrochronological dating and wood preservation research. *Journal of Archaeological Science*, 44, 128–135.
- Čufar, K., Tegel, W., Merela, M., Kromer, B., & Velušček, A. (2015). Eneolithic pile dwellings south of the Alps precisely dated with tree-ring chronologies from the north. *Dendrochronologia*, 35, 91–98.
- Čufar, K., Beuting, M., Demšar, B., & Merela, M. (2017a). Dating of violins – the interpretation of dendrochronological reports. *Journal of Cultural Heritage*, 27S, 44–54.
- Čufar, K., Krže, L., & Merela, M. (2017b). Dendrokronološka raziskava lesa soda iz rimskega vodnjaka na Prulah. Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, 5 str.
- Frei-Stolba, R. (2015). *Holzfässer in der römischen Welt und in der Schweiz zur römischen Zeit*. *Helvetica Archaeologica*, 46, 38–102.
- Frei-Stolba, R. (2017). *Holzfässer. Studien zu den Holzfässern und ihren Inschriften im römischen Reich mit Neufunden und Neulesungen der Fassinschriften aus Oberwinterthur/Vitudurum*. *Zürcher Archäologie* 34. Zürich: Baudirektion Kanton Zürich, Amt für Raumentwicklung, Kantonsarchäologie.
- Gaspari, A. (2010). "Apud horridas gentis...", Začetki rimskega mesta Colonia Iulia Emona, Beginnings of the Roman Town Colonia Iulia Emona. Ljubljana, Muzej in galerije mesta Ljubljane.
- Gaspari, A., Bekljanov Zidanšek, I., Krajšek, J., Masaryk, R., Miškec, A., & Novšak, M. (2014). Novejša arheološka spoznanja o Emoni med zatonom prazgodovinske skupnosti in gradnjo rimskega mesta (druga polovica 1. stol. pr. n. št. in začetek 1. stol. n. št.) / New Archaeological Insights about Emona between the Decline of the Prehistoric Community and the Construction of the Roman Town (second half of the 1<sup>st</sup> century BC and early 1<sup>st</sup> century AD). In: *Emona, mesto v imperiju, a city of the empire (135–179)*. Mestni muzej, Ljubljana.
- Horvat, J., & Mušič, B. (2007). Nauportus, a commercial settlement between the Adriatic and the Danube. In: Chiabà, M., Maggi, P., & Magrini, C. (ed.) *Le valli del Natisone e dell'Isosno tra Centroeuropa e Adriatico (165–174)*. Trieste: Edizioni Quasar.
- Horvat, J. (1990). Nauportus (Vrhnika). *Dela Slovenske akademije znanosti in umetnosti, Razred za zgodovinske in družbene vede* 33. Znanstvenoraziskovalni center SAZU. Institut za arheologijo 16. Ljubljana: Slovenska akademija znanosti in umetnosti.
- Istenič, J. (2019). Roman military equipment from the river Ljubljana: typology, chronology and technology / Rimska vojaška oprema iz reke Ljubljance: arheološke in naravoslovne raziskave. *Katalogi in monografije* 43. Ljubljana: Narodni muzej Slovenije (Ljubljana: Pesent).
- Mušič, B., & Horvat, J. (2007). Nauportus – an Early Roman trading post at Dolge njive in Vrhnika. *Arheološki vestnik* 58, 219–283.
- Nicolussi, K., Pöll, J., & Walde, E. (1997). *Jahrringdaten zur über 300-jährigen Baugeschichte der römischen Staatsstraße Via Claudia Augusta im Lermooser Moos*. - In Oeggel K., Patzelt, G., & Schä-

- fer D. (eds.), *Alpine Vorzeit in Tirol. Begleitheft zur Ausstellung - Innsbruck* (63-65). Innsbruck.
- Ricci, A. (1985). *Ceramica a pareti sottili*. In: *Atlante delle forme ceramiche. 2, Ceramica fine romana nel bacino mediterraneo (tardo ellenismo e primo impero) (231–357)*. Roma: Istituto della Enciclopedia italiana.
- Šašel Kos, M. (2012). *Colonia Iulia Emona – the genesis of the Roman city*. *Arheološki vestnik*, 63, 79–104.
- Schindler-Kaudelka, E. (1975). *Die dünnwandige Gebrauchskeramik vom Magdalensberg*. *Kärntner Museumsschriften* 58. *Archäologische Forschungen zu den Grabungen auf dem Magdalensberg 3*. Klagenfurt: Landesmuseum für Kärnten.
- Schindler-Kaudelka, E. (2012). *La ceramica a pareti sottili del Magdalensberg 1975–1998–2011*. In: Lazar, I., & Županek, B. (ed.), *Emona - med Akvilejo in Panonijo (323–366)*. Koper, Univerzitetna založba Annales.
- Schoch, W., Heller, I., Schweingruber, F. H., & Kienast, F. (2004). *Wood Anatomy of Central European Species*. Online version: [www.woodanatomy.ch](http://www.woodanatomy.ch)
- Tegel, W., Elburg, R., Hakelberg, D., Stäuble, H., & Büntgen, U. (2012). *Early Neolithic water wells reveal the world's oldest wood architecture*. *PloS one*, 7(12), e51374.
- Vojakovič, P., Bekljanov Zidanšek, I., & Toškan, B. (2019). *Poznorepublikanski Navport: območje Stare pošte = Late Republican Nauportus: the Stara pošta site*. *Arheološki vestnik* 70, 93–126.
- Weidemüller, J., & Herzig, F. (2017). *Das Jahrringarchiv im Holz. Aschheims Brunnen und ihre Geschichte im ersten Jahrtausend n. Chr.* *Archäologische Berichte*, 27, 151–162.



## OCENA RAZKROJENOSTI LESA V PODZEMNI SLEMENSKI UTRDBI GOLI VRH

### EVALUATION OF THE WOOD DEGRADATION IN THE UNDERGROUND FORT GOLI VRH

Miha Humar<sup>1\*</sup>, Boštjan Lesar<sup>1</sup>, Andreja Žagar<sup>1</sup>, Angela Balzano<sup>1</sup>, Davor Kržišnik<sup>1</sup>

UDK 630\*844.2

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Prispelo / Received: 26. 5. 2019

Sprejeto / Accepted: 27. 5. 2019

#### Izveček / Abstract

**Izveček:** Pred drugo svetovno vojno so v okolici Golega vrha postavili obsežno podzemno utrdbo. Še od časa izgradnje je v utrdbi ostalo nekaj lesa, dodatno so pred leti namestili nekaj lesenih razstavnih predmetov. Na lesu je bilo nekaj let po odprtju opaziti obsežen glivni razkroj. V utrdbi smo namestili senzor za spremljanje relativne zračne vlažnosti in temperature, izolirali nekaj vzorcev lesa in jih preiskali z rentgensko fluorescenčno spektroskopijo in lasersko konfokalno vrstično mikroskopijo. Analiza je potrdila visoko vlažnost lesa in prisotnost gliv razkrojevalk na vseh lesenih eksponatih z izjemo lesenih zabojnikov za strelivo.

**Ključne besede:** podzemna utrdba, les, razkroj, vlažnost lesa, lesne glive, biocidni proizvodi

**Abstract:** Before the Second World War, a large underground fortress was built around Goli vrh. Some wood remains in the fort from the time of construction, and some wooden objects have been exhibited in the fort. Several years after the opening of the fort, large scale decomposition was observed on the wood. A sensor for monitoring the relative air humidity and temperature was installed. In addition, a few samples of wood were isolated and examined by X-ray fluorescence spectroscopy and laser confocal linear microscopy. The analysis confirmed the high humidity of the wood and the presence of wood decay fungi on all wood objects, with the exception of wooden ammunition boxes.

**Keywords:** underground fort, wood, decay, moisture content, wood decay fungi, biocidal products

## 1 UVOD

### 1 INTRODUCTION

V 20. stoletju so na mejah gradili obsežne obrambne sisteme. Še posebej je znana slovita »Maginotova linija« na meji med Nemčijo in Francijo. S podobnim namenom je bila v Sloveniji načrtovana »Rupnikova linija«. Rupnikova linija ali Rupnikova črta je sistem utrdb, ki jih je leta 1935 začela graditi Kraljevina Jugoslavija na ozemlju zahodne Slovenije zaradi splošnega poslabšanja političnega položaja v Evropi. Poimenovali so jo po generalu Leonu Rupniku (Smrdel, 2015). Oba utrdbeni sistema sta klavarno propadla in nista nikoli opravljala svoje naloge (Zupančič, 2008). Podobnih utrdbenih sistemov je bilo še več, na primer Siegfridova linija na nemški strani francosko-nemške meje in Alpski zid, ki so ga na severni meji postavili Italijani in je segal od Genovskega do Reškega zaliva. Obsežnejša dela so se na Rupnikovi liniji začela leta 1937, do leta 1939 je

bilo za gradnjo odgovornih že 40.000 oseb. V tem obdobju jim je uspelo zgraditi 12 močno utrjenih položajev in 4000 manjših betonskih bunkerjev (Smrdel, 2015). Zaradi pomanjkanja izkušenj pri gradnji utrdbe je Kraljevina Jugoslavija za pomoč pri gradnji prosila Češkoslovaško, saj so utrdbe v Sudeatih veljale za vrhunec evropskega utrdbenega vojskovanja (Smrdel, 2015). Med najlepše ohranjene utrdbe Rupnikove linije sodi tudi podzemna slemenska utrdba Goli vrh. Sestavljena je iz nadzemnega visokega vršnega bunkerja ter podzemnih galerij približno 25 m globoko. Glavna galerija je dolga 200 m, ob njej pa je razvejan in skrbno odvodnjen sistem manjših galerij in dvoran.

V utrdbi je že od časa gradnje ostalo nekaj lesa, del lesa pa so v utrdbo prinesli po ponovnem odprtju kot razstavne predmete, gradbeno in zaščitno opremo ter podobno. Na tem lesu se je v nekaj letih pojavil obsežen razkroj. Pogoji v podzemni utrdbi so verjetno podobni pogojem v starih rudnikih. Novejši rudniki so praviloma dobro prezračevani, zato je relativna zračna vlažnost in temperatura višja (Oprešnik, 2018). Les je v starih rudnikih navadno hitro

<sup>1</sup> Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, SLO

\* e-pošta: [miha.humar@bf.uni-lj.si](mailto:miha.humar@bf.uni-lj.si); telefon: 01-320-3638

propadel. Podatki v literaturi navajajo (Kervina-Hamovič, 1990), da je bila življenjska doba nezaščitenega lesa v rudniku med pol leta do treh let. V primerljivih, a nekoliko bolj toplih pogojih je les v Partizanski bolnici Franja propadel po približno petih letih (Kržišnik et al., 2019). Na življenjsko dobo lesa poleg naravne odpornosti v največji meri vpliva še vlažnost okolja in temperatura (Meyer-Veltrup et al., 2017). Namen prispevka je raziskati mikroklimatske pogoje v podzemni utrdbi in oceniti razkrojenost lesa.

## 2 MATERIALI IN METODE

### 2 MATERIAL AND METHODS

#### 2.1 SPREMLJANJE RELATIVNE VLAŽNOSTI ZRAKA

##### 2.1 MONITORING OF RELATIVE HUMIDITY OF THE AIR

V delu podzemne utrdbe, kjer je postavljena stalna razstava, smo namestili opremo za spremljanje relativne zračne vlažnosti in temperature proizvajalca Scanntronik. Opremo smo namestili pod vitrine, približno 50 cm nad tlemi (Slika 1). Tako smo preprečili kapljanje na merilno opremo in s tem povezane poškodbe. Na zapisovalnik podatkov (data logger) Thermofox smo namestili senzor ThermoHygro, ki deluje v merilnem območju med  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  in relativni zračni vlažnosti (RZV) med 0 in 99 % RZV (ponovljivost 1,8 % RZV oziroma  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

(Anonymus, 2019). Podatke (meritev, najnižja in najvišja vrednost) smo beležili v urnih razmikih v obdobju med 12. 10. 2018 in 8. 1. 2019. V tem obdobju smo zabeležili 12.000 podatkov. Podobna opazovanja izvajamo tudi na drugih lokacijah (Kržišnik et al., 2018).



Slika 1. Senzor za spremljanje temperature in relativne zračne vlažnosti v bunkerju Goli vrh.  
Figure 1. Sensor for monitoring of the relative humidity of air and temperature in the underground fort Goli vrh.

Preglednica 1. Ocene razkroja vzorcev (SIST EN 252, 2004).

Table 1. Ratings of sample degradation (SIST EN 252, 2004)

Ocena	Razvrstitev	Opis preizkušanca
0	Ni znakov razkroja	Na preizkušancu ni zaznavnih sprememb.
1	Neznaten razkroj	Na preizkušancu so vidni znaki razkroja, vendar razkroj ni intenziven in je prostorsko zelo omejen: - Spremembe, ki se pokažejo predvsem kot sprememba barve ali zelo površinski razkroj (mehčanje lesa je najpogostejši kazalec), ki sega do 1 mm v globino.
2	Zmeren razkroj	Jasne spremembe v zmernem obsegu: - Spremembe, ki se kažejo kot mehčanje lesa od 1 mm do 3 mm globoko na $1\text{ cm}^2$ ali večjem delu vzorca.
3	Močen razkroj	Velike spremembe: - Izrazit razkroj lesa od 3 mm do 5 mm globoko na velikem delu površine (večje od $20\text{ cm}^2$ ), ali mehčanje lesa globlje kot 10 mm, na površini večji od $1\text{ cm}^2$ .
4	Propadanje	Preizkušanec je močno razkrojen: - Ob padcu z višine 0,5 m se preizkušanec zlomi.

## 2.2 DOLOČANJE LESNIH GLIV IN OCENA RAZKROJENOSTI

### 2.2 DETERMINATION OF WOOD FUNGI AND ESTIMATION OF DEGRADATION

Prisotnost gliv na muzejskih razstavnih predmetih smo določili na podlagi morfoloških znakov (Schmidt, 2006). Razkrojenost lesenih predmetov smo ocenili v skladu s standardom SIST EN 252 (2004) z ocenami med 0 (popolnoma zdrav les) in 4 (popolnoma trhel les) (Preglednica 1).

## 2.3 ANALIZA VLAŽNOSTI LESA

### 2.3 WOOD MOISTURE CONTENT ANALYSIS

Vlažnost lesa na lesenih muzejskih razstavnih predmetih smo določali z električnim uporabnim merilnikom GANN, ki omogoča natančno merjenje vlažnosti lesa med 6 % in 60 % (Anonymus, 2019b). Vlažnost lesa je določena kot je običajno v lesni tehnologiji (razmerje med maso vode in maso lesa v absolutno suhem stanju, izraženo v %).



Slika 2. Izvedba meritev vlažnosti lesa z vlagomerom GANN.

Figure 2. Measurements of wood moisture content with a GANN device.

## 2.4 ANALIZA RAZKROJENOSTI LESA Z UPOROVNIM VRTANJEM

### 2.4 ANALYSIS OF DEGRADATION WITH RESISTANCE DRILLING

Oceno razkrojenosti lesa smo izvedli z napravo Resistograph IML PD500 (Slika 3), ki temelji na beleženju upora pri vrtanju. Z drobnim svedrom premera 2 mm v les vrtamo luknjico in pri tem beležimo upor materiala pri vrtanju. Metoda temelji na tem, da se za vrtanje luknje v razkrojen les uporabi manj energije kot za vrtanje v zdrav les. Če naprava ne za beleži upora, pomeni, da je les močno razkrojen.

Meritve smo izvajali le na predmetih, kjer vizualno nismo ocenili izrazite razkrojenosti (Nutto & Biechele, 2015).



Slika 3. Izvedba meritev razkrojenosti lesa z napravo Resistograph IML PD500.

Figure 3. Analysis of degradation with a Resistograph IML PD500 resistance drilling device.

## 2.5 ELEMENTNA ANALIZA VZORCEV LESA

### 2.5 ELEMENTAL ANALYSIS OF WOOD SAMPLES

Micelij lesnih gliv je bil prisoten na večini lesenih razstavnih predmetov v bunkerju Goli vrh, z izjemo dveh zabojev za strelivo (Slika 4), zato nas je zanimalo, s katerim biocidnim proizvodom sta bila zašči-



Slika 4. Lesen zaboj za strelivo v bunkerju Goli vrh.

Figure 4. Wooden box for ammunition in the underground fort Goli vrh.

tena. Iz obeh zabojev smo izolirali dva vzorca in izvedli kvantitativno elementno analizo. Vsebnost anorganskih elementov v vzorcih smo določali z rentgenskim fluorescenčnim spektrometrom (XRF TwinX, Oxford instruments). Meritve so bile opravljene s PIN-detektorjem ( $U = 26 \text{ kV}$ ,  $I = 112 \text{ } \mu\text{A}$ ,  $t = 360 \text{ s}$ ).

## 2.6 MIKROSKOPSKA ANALIZA LESA

### 2.6 MICROSCOPIC ANALYSIS OF WOOD

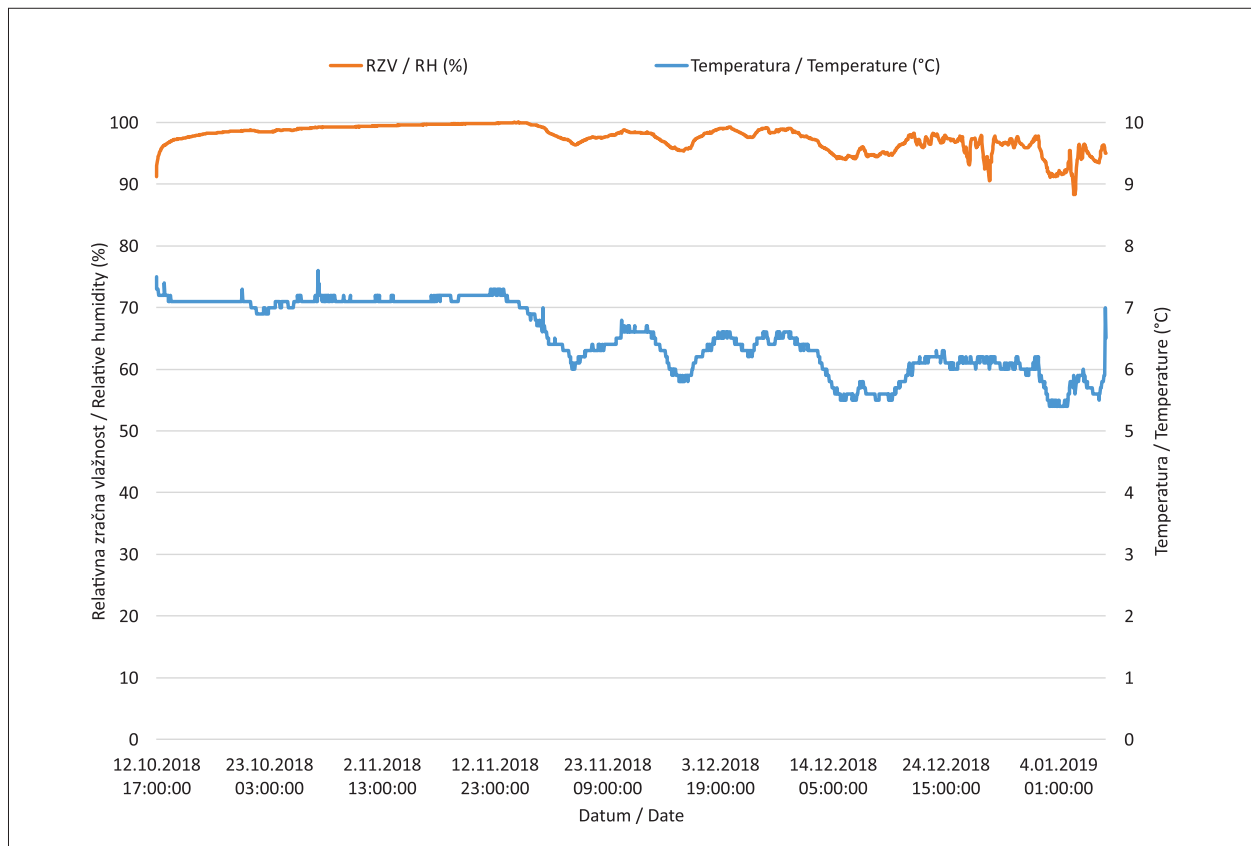
Na vzorcih, izoliranih iz zabojev za strelivo, in vzorcih vrvi smo izvedli tudi mikroskopsko analizo. Za analizo smo uporabili laserski konfokalni vrstični mikroskop (Olympus, Lext OLS 5000). Mikroskopska tehnika ne zahteva posebne priprave, zato je še posebej primerna za preiskave vlažnega in trhlega lesa. Del vzorcev je bil analiziran tudi s klasično svetlobno mikroskopijo. Vzorce smo obrezali in jih vklopili v parafin. Pripravo rezin smo izvedli z rotacijskim mikrotomom (Leica, RM2245). Rezine so bile obarvane z barviloma safranin in astra-modro. Rezine so bile vklopljene v Euparal (Prislan et al., 2008).

## 3 REZULTATI IN RAZPRAVA

### 3 RESULTS AND DISCUSSION

Temperatura in relativna zračna vlažnost (RZV) sta osnovna podnebna parametra, ki vplivata na vlažnost lesa. Les kot higroskopni material absorbira vodo iz zraka. V obdobju spremljanja teh dveh parametrov (med 12. 10. 2018 in 8. 1. 2019) je bila povprečna temperatura v bunkerju  $6,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ , povprečna RZV pa  $97,4 \text{ } \%$ . Temperatura je bila najvišja v mesecu oktobru ( $7,3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), v zimskih mesecih pa je nekoliko upadla (januarja  $5,7 \text{ } ^\circ\text{C}$ ). Podobno kot temperatura je bila oktobra in novembra najvišja tudi RZV ( $98,7 \text{ } \%$ ) (Slika 5), najnižja pa je bila v prvi polovici januarja ( $94,0 \text{ } \%$ ). Razlog za padec relativne zračne vlažnosti lahko pripišemo meteorološki suši. Jeseni je bilo v Sloveniji relativno veliko padavin, medtem ko decembra 2018 in v prvi polovici januarja 2019 v Sloveniji ni bilo veliko padavinskih dogodkov (ARSO, 2019).

RZV v stanovanjskih objektih je navadno bistveno nižja in se giblje okoli  $50 \text{ } \%$ , še zlasti pozimi je



Slika 5. Gibanje relativne zračne vlažnosti in temperature v bunkerju Goli vrh.

Figure 5. Relative humidity and temperature in the underground fort Goli vrh.



vlažnost zraka še nižja. Jorge & Dias (2013) poročata, da znaša povprečna RZV v telovadnicah okoli 65 %, v javnih kopalnicah pa 87 %. Višje povprečne vrednosti so zabeležili le v tropskih regijah. Visoka RZV se pogosto odraža v plesnenju in modrenju lesa in drugih gradbenih materialov, kasneje pa lahko pride tudi do razkroja. Plesnim ustrezajo RZV, ki so višje od 75 % (pri 25 °C) oziroma 85 % (pri 10 °C) (Viitanen et al., 2010, Gradeci et al., 2017). Zanimivo je, da v bunkerju ni bilo opaziti veliko znakov plesnenja. Eden od razlogov za to je verjetno tudi pomanjkanje hranljivih snovi (cvetni prah, prah, prst, spore gliv ...).

Visoka RZV se odraža tudi v visoki vlažnosti lesa. Z naraščajočo RZV sorazmerno narašča tudi vlažnost lesa. Tako pri 95 % RZV znaša vlažnost lesa okoli 20 % (Kržišnik et al., 2019). Poleg tega je treba upoštevati, da je vlažnost lesa v bunkerju odvisna tudi od kondenzacije, zamakanja ... Iz sten še zlasti ob padavinskih dogodkih pogosto kaplja. Ker je relativna zračna vlažnost v bunkerju zelo visoka, se vlažen les praktično ne more posušiti.

Glavni namen meritev vlažnosti lesa je določiti, ali so pogoji primerni za razkroj lesa. Tako nas je v prvi vrsti zanimalo, ali je vlažnost višja od območja nasičenja celičnih sten. Avtorji se zavedamo, da so meritve vlažnosti nad območjem nasičenja celičnih sten bolj razpršene, vendar to ni ključno za interpretacijo rezultatov. Poleg tega na vlažnost lesa lahko vpliva še prisotnost drugih elektrolitov, kot na primer biocidnih proizvodov. Meritve električne upornosti lesa kažejo, da je vpliv večine anorganskih biocidov višji pri nižjih vlažnostih lesa, nad območjem nasičenja celičnih sten znaša med 2 do 3 odstotne točke (Kržišnik et al., 2019). Po drugi strani zadnje raziskave kažejo, da razkrojenost nima večjega vpliva na električno upornost lesa in ne vpliva na točnost meritev (Brischke et al., 2018). Seveda pa je razkrojen les bolj higroskopen in lahko vpije več vode kot nerazkrojen les. Tako smo mnenja, da je meritev vlažnosti lesa z opremo, ki deluje na osnovi električne upornosti, primerna tehnika za vrednotenje ogroženosti lesa. To nenazadnje dokazujejo tudi številne objave (npr.: Humar et al., 2015; Brischke & Meyer-Veltrup, 2016; Žlahtič Zupanc et al., 2018; Kržišnik et al., 2019, 2018). Povprečna vlažnost lesenih eksponatov v bunkerju se je gibala med 21 % in 54 % (Preglednica 2). Delež vode v lesu je posledica visoke relativne zračne vlažnosti in kapljanja vode iz sten. Poleg tega je treba upoštevati,

da so bili na površini vzorcev opazni tudi ostanki malte, cementa in ostalih materialov. Prisotnost nekaterih anorganskih elementov lahko vpliva na vlažnost lesa (Lesar et al., 2009). Poleg tega so glive razkrojevalke zmožne translokacije vode. Okolica je bila dovolj vlažna, tako da je vodnih virov dovolj. Pri oceni ogroženosti posamezne lokacije se postavi vprašanje, kakšna je spodnja mejna vlažnost lesa, da pride do glivnega razkroja. To vprašanje je relativno zahtevno. V literaturi je mogoče zaslediti nasprotujoče si podatke. V klasični literaturi so mejne vlažnosti v največji meri odvisne le od vrste glive. Schmidt (2006) poroča, da je minimalna vlažnost za razkroj lesa pri glivah *Fibroporia vaillantii* in *Gloeophyllum trabeum* 30 %, pri glivah *Coniophora puteana* in *Serpula lacrymans* so te vrednosti nekoliko nižje. V najnovejši literaturi zasledimo bistveno višji razpon vlažnosti. Raziskovalci poročajo, da vlažnost ni odvisna le od vrste glive, temveč tudi od vrste lesa. Optimalne vlažnosti lesa na primer nihajo med 16,3 % (*G. trabeum* na beljavi rdečega bora) in 52,3 % (*Donkioporia expansa* na lesu duglazije) (Meyer & Brischke, 2015).

Večina lesenih razstavnih predmetov je bila relativno močno razkrojena. Nekateri so bili močno preraščeni z micelijem lesnih gliv, predvsem z micelijem bele hišne gobe. Ime označuje več vrst gliv s podobnim videzom, ki jih na podlagi morfoloških znakov zelo težko ločimo med seboj. Najpomembnejša je *Fibroporia vaillantii* (DC.: Fr.) Ryv, poleg tega pa z imenom bela hišna goba označujemo še vrsti *Rhodonía placenta* in *Postia placenta*. Podobno kot v slovenščini se tudi v angleščini uporablja eno ime za navedene glive. Poimenovali so jih »white pore fungus« ali »mine fungus« (Unger et al., 2001). Bela hišna goba je zelo pogosta v kletih, rudnikih in ostalih zelo vlažnih okoljih, po čemer je tudi dobila angleško ime »mine fungus«. Bela hišna goba pogosteje okužuje zelo vlažen les iglavcev, še zlasti, če se na lesu nabira kondenzirana voda. Ta vrsta je tipičen predstavnik rjave trohnoobe. Razkrojen les prizmatično razpoka, vendar so razpoke plitvejšje kot pri sivi hišni gobi, prizme pa večje kot pri kletni gobi. V praksi belo hišno gobo najlažje spoznamo po značilnih belih, gladkih rizomorfi (Slika 6), ki ostanejo prožni tudi, ko gliva odmre. Micelij (rizomorfi) na lesu pogosto razrašča v obliki ledene rože na oknih, ki ga z lahkoto odstranimo s površine. Rizomorfi navadno ne prodrejo v zidake ali beton (Humar, 2008).

Preglednica 2. Pregled razstavnih predmetov ter njihova vlažnost in razkrojenost.  
 Table 2. Overview of the exhibited objects and assessed degradation.

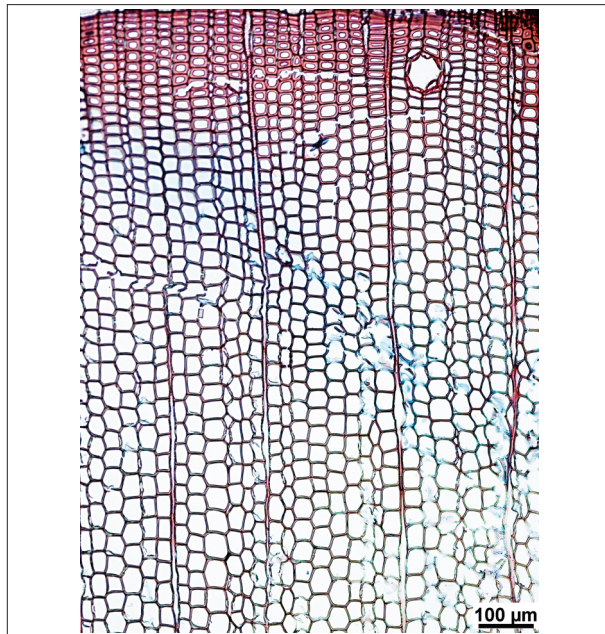
Mesto	Predmet	Povprečna vlažnost lesa (%)	Razkrojenost EN 252	Opis	Gliva / trohnoba
Razstavni predmeti na stojalu	Samokolnica 1	54	4	Micelij na površini	Kletna goba, Bela hišna goba
	Samokolnica 2	23	4	Micelij na površini	Bela hišna goba
	Samokolnica 3	35	4	Micelij na površini	Bela hišna goba
	Ročaj krampa	35	3	Micelij na površini	Bela hišna goba
	Ročaj lopate	27	3	Micelij na površini	Bela hišna goba
	Nosilka za pesek	45	4	Micelij na površini	Kletna goba
Razstavni predmeti v vitrinah	Ročaj krampa	24	2	Micelij na površini	Kletna goba
	Ročaj lopate	25	2	Trosnjaki, Micelij	
	Zidarska zajemalka	32	3	Micelij na površini	Rjava trohnoba
	Večja zidarska gladilka	25	3	Micelij na površini	Rjava trohnoba
	Manjša zidarska gladilka	45	4	Micelij na površini	Rjava trohnoba
	Kolut bodeče žice	50	2	Micelij na površini	Bela hišna goba
	Puškino kopito	23	2	Micelij na površini	?
	Zaboj za strelivo	21	0	/	
Zaboj za strelivo	22	0	/		



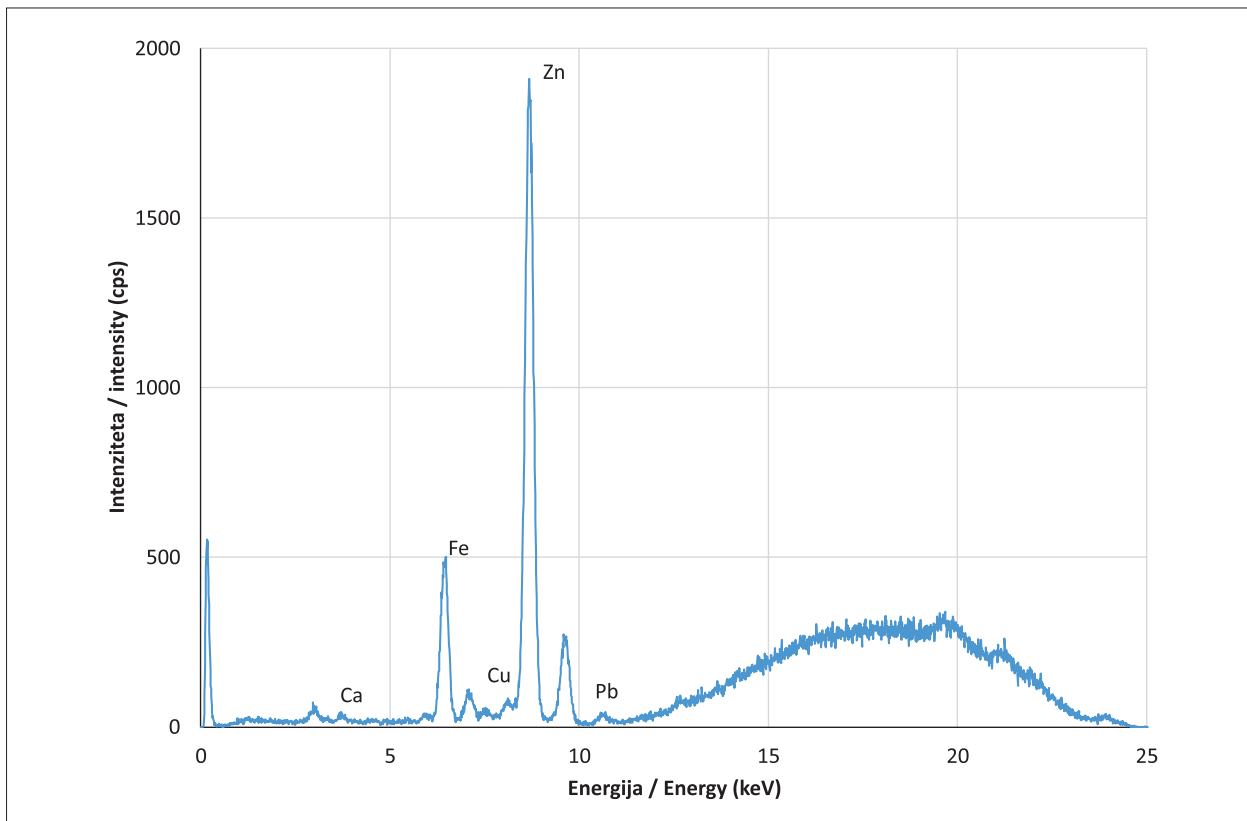
Slika 6. Najpomembnejši razstavni predmeti v bunkerju Goli vrh.  
 Figure 6. Key exhibited objects in the underground fort Goli vrh.

Zaradi destruktivne narave meritev smo meritve z rezistografom izvedli le na vzorcih, kjer poškodbe niso moteče. Meritve so potrdile rezultate ocen o razkrojenosti. Predvsem zidarsko orodje je bilo močno razkrojeno in bi lahko pod večjo obremenitvijo razpadlo. Ta raziskava nakazuje, da ta metoda ni najbolj primerna za vrednotenje močno razkrojenega lesa.

Micelij oziroma znaki razkroja so bili prisotni na vseh razstavnih predmetih, z izjemo zaboja za strelivo. Zato smo izvedli mikroskopsko in elementno analizo, da bi ocenili prisotnost biocidnih učinkovin. XRF analiza je potrdila prisotnost cinka in železa (Slika 7). Vzrok za visoko koncentracijo železa (Fe) je verjetno korozija jeklenih elementov v stiku z lesom (Lesar et al., 2018). Povišano koncentracijo cinka (Zn) bi lahko pripisali biocidnim učinkovinam. Cink je bil sestavina več aktivnih učinkovin, ki so jih v obdobju med obema vojnama uporabljali za zaščito lesa, in sicer cinkov klorid ( $ZnCl_2$ ) in cinkov naftenat (Unger et al., 2001). Cinkov naftenat se je še zlasti pogosto uporabljal za zaščito lesa v vojski (Hughes, 1999).



Slika 8. Prečni prerez lesa iz zaboja za strelivo.  
Figure 8. Cross-section of wood from the ammunition box.

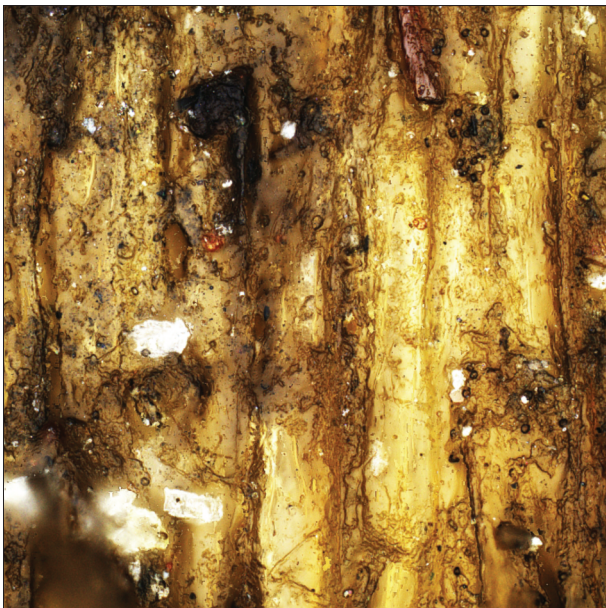


Slika 7. XRF spekter lesa iz zaboja za strelivo.  
Figure 7. XRF spectra of wood from the ammunition box.

Analiza vzorca s svetlobno mikroskopijo je potrdila, da je bil zaboj za strelivo izdelan iz lesa smreke (*Picea abies*) (Slika 8). Smrekovina nima odpornega lesa, zato razlog za visoko trajnost v vlažnih pogojih lahko pripišemo biocidni zaščiti lesa. Tudi analiza površin z lasersko konfokalno mikroskopijo je potrdila, da na površini (Slika 9) ni opaziti micelija gliv modrivk in razkrojevalk. Na površini je bilo opaziti prah, svetle kristale, ki jih lahko pripišemo cinkovemu kloridu ali kalcijevemu karbonatu. Na površini vzorca lesa ni bilo opaziti hif gliv ali melaminskih madežev. Tako so rezultati mikroskopske analize potrdili predhodna opazovanja razkrojenosti in elementne analize. Po drugi strani so bili nekateri drugi eksponati močno preraščeni z glivami. Za primerjavo je prikazana mikroskopska slika vrvi, ki jo je prerasel glivni micelij (Slika 10).

#### 4 SKLEPI 4 CONCLUSIONS

Visoka relativna zračna vlažnost in obilica tekoče vode zagotavljata ustrezne pogoje za uspevanje lesnih gliv. Temperatura v utrdbi je relativno nizka, a v mejah, ki še omogoča rast lesnih gliv. Na lesnih predmetih je opaziti intenziven razrast micelija lesnih gliv, najbolj pogosto bele hišne gobe. Raz-

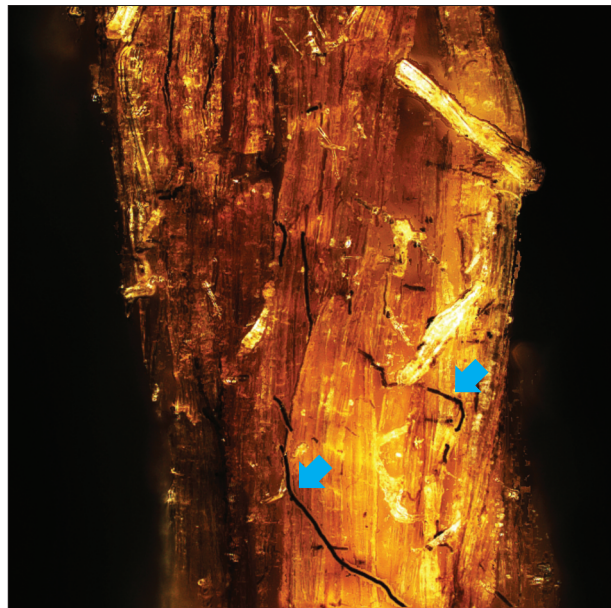


Slika 9. Mikroskopska slika površine lesenega zaboja za strelivo ( $256 \mu\text{m} \times 256 \mu\text{m}$ ).  
Figure 9. Microscopy image of the surface of wood from the ammunition box ( $256 \mu\text{m} \times 256 \mu\text{m}$ ).

kroja ni bilo opaziti le na zaboju za strelivo, ki je bil po vsej verjetnosti zaščiten z biocidnim proizvodom na osnovi cinkovih spojin.

#### 5 POVZETEK 5 SUMMARY

Before the Second World War, a large underground fortress was built around Goli vrh. Some wood still remains from the time of construction, and some wooden objects have been exhibited in the fort. Several years after the opening of the fort, large-scale decomposition was observed on the wood in the fort. Brown rot fungi belonging to the genus *Antrodia* caused the majority of the decay. This fungus is associated with wet, condensing environments, such as mines. The decay caused by this fungus is develops rather rapidly. A sensor for monitoring the relative air humidity and temperature was thus installed in the ort, with Scantronik equipment being chosen. In the monitored period a total of 12,000 measurements were recorded. The relative humidity was rather high (97.4 %). The average temperature was 6.6 °C and was sufficient for fungal growth, as seen in the high moisture content of wood and prominent decay. In addition, a few



Slika 10. Mikroskopska slika vlaken vrvi z dobro vidnimi hifami (puščica) ( $640 \mu\text{m} \times 640 \mu\text{m}$ ).  
Figure 10. Microscopy image of rope fibers with clearly visible hyphae (arrows) ( $640 \mu\text{m} \times 640 \mu\text{m}$ ).

samples of wood were isolated from ammunition boxes that were in fort. Those objects were chosen as they were not degraded, and no fungal mycelia were found in them. Isolated wooden specimens were examined by X-ray fluorescence spectroscopy, light microscopy, and laser confocal linear microscopy. The analyses confirmed the high moisture content of the wood and the presence of wood decay fungi on all wood objects, with the exception of wooden ammunition boxes. The ammunition boxes were made of spruce wood. Microscopic analysis confirmed that there were no fungal mycelia present. XRF analysis confirmed the presence of iron ions, due to the corrosion of metal parts and zinc, which likely acted as a fungicide. In order to exhibit wooden objects in this location, it is necessary for glass showcase with a controlled climate to be used.

## ZAHVALA

### ACKNOWLEDGMENT

Prispevek je rezultat več med seboj povezanih projektov, ki jih je sofinancirala Agencija za raziskovalno dejavnost RS: L4-7547 – Obnašanje lesa in lignoceluloznih kompozitov v zunanjih razmerah, P4-0015 – Programska skupina les in lignocelulozni kompoziti, 0481-09 Infrastrukturni center za pripravo, staranje in terensko testiranje lesa ter lignoceluloznih materialov (IC LES PST 0481-09). Del raziskav je potekal tudi v okviru projekta FORESDA (Forest-Based, Cross-Sectoral Value Chains Fostering Innovation And Competitiveness In The Danube Region) in projektov Razvoj verig vrednosti v okviru razpisov Strategije pametne specializacije; TIGR4-smart (C3330-16-529003) in Woolf.

## LITERATURA

### REFERENCES

- Anonymus (2019). URL: [http://www.scantronik.de/Produkt\\_Standard\\_Sensoren\\_deu.php](http://www.scantronik.de/Produkt_Standard_Sensoren_deu.php) [24. 1. 2019].
- Anonymus (2019b). URL: <http://www2.gann.de/Produkte/ElektronischeFeuchtigkeitsmessger%C3%A4te/ClassicSerie/HydrometteRTU600/tabid/104/language/en-US/Default.aspx> [10. 5. 2019].
- ARSO (2019). Klimatološki podatki. Agencija Republike Slovenije za okolje. URL: <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/app/webmet/>
- Brischke, C., Stricker, S., Meyer-Veltrup, L., & Emmerich, L. (2018). Changes in sorption and electrical properties of wood caused by fungal decay. *Holzforschung*, 73 (5), 445–455.
- Brischke, C., & Meyer-Veltrup, L. (2016). Modelling timber decay caused by brown rot fungi. *Materials and Structures*, 49(8): 3281–3291.
- De Angelis, M., Romagnoli, M., Vek, V., Poljanšek, I., Oven, P., Thaler, N., ... Humar, M. (2018). Chemical composition and resistance of Italian stone pine (*Pinus pinea* L.) wood against fungal decay and wetting. *Industrial crops and products*, 117: 187–196.
- Gradeci, K., Labonnote, N., Time, B., & Köhler, J. (2017). Mould growth criteria and design avoidance approaches in wood-based materials – A systematic review. *Construction and Building Materials*, 150, 77–88.
- Hughes, A. S. (1999). Studies on the fixation mechanisms, distribution and biological performance of copper based timber preservatives. Ph. D. thesis, London, Imperial College of Science, Technology and Medicine: 313.
- Humar, M. (2008). Bela hišna goba: gliva, ki razkrajata tudi zaščiten les. *Les*, 60, 77.
- Humar, M., Kržišnik, D., Lesar, B., Ugovšek, A., Rep, G., Šubic, B., Thaler, N., & Žlahtič, M. (2015). Monitoring of window, door, decking and façade elements made of thermally modified spruce wood in use. In: 8th European Conference on Wood Modification (ECWM8). Helsinki, Finland: Aalto University: 419–428.
- Jorge, L., & Dias, A. (2013). X-Lam panels in swimming-pool building – monitoring the environment and the performance. *Advanced Materials Research*, 778, 779–785.
- Kervina-Hamović, L. (1990). Zaščita lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 126 str.
- Kržišnik, D., Brischke, C., Lesar, B., Thaler, N., & Humar, M. (2019). Performance of wood in the Franja partisan hospital. *Wood material science & engineering*, 14, 24–32. DOI: 10.1080/17480272.2018.1438512.
- Kržišnik, D., Lesar, B., Thaler, N., & Humar, M. (2018). Micro and material climate monitoring in wooden buildings in sub-Alpine environments. *Construction & building materials*, 166, 188–195. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.118
- Kržišnik, D., Lesar, B., Thaler, N., Planinšič, J., & Humar, M. (2019). A study of moisture performance of wood determined in laboratory and field trials. *European Journal of Wood and Wood Products* In press.
- Lesar, B., Gorišek, Ž., & Humar, M. (2009). Sorption properties of wood impregnated with boron compounds, sodium chloride and glucose. *Drying technology*, 27, 94–102.
- Lesar, B., Humar, M., & Hora, G. (2018). Quality assessment of recycled wood with and without non-wooden materials from selected recycling companies in Europe. *Waste management*, 79, 362–373.
- Meyer, L., & Brischke, C. (2015). Fungal decay at different moisture levels of selected European-grown wood species. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 103, 23–29.
- Meyer-Veltrup, L., Brischke, C., Alfredsen, G., Humar, M., Flæte, P.-O., Isaksson, T., ... Jermer, J. (2017). The combined effect of wetting ability and durability on outdoor performance of wood –

- development and verification of a new prediction approach. *Wood Science and Technology*, 51, 615–637.
- Nutto, L., & Biechele, T. (2015). Drilling resistance measurement and the effect of shaft friction – using feed force information for improving decay identification on hard tropical wood. In: 19<sup>th</sup> International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium.
- Oprešnik, D. (2018). Zagotavljanje varnosti in reševanja v podzemnih rudnikih – primer Premogovnika Velenje. URL: <https://repositorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?lang=slv&id=101341> [25. 1. 2019].
- Prislan, P., Gričar, J., Koch, G., Schmitt, U., & Čufar, K. (2008). Mikroskopske tehnike za študij nastanka lesa pri bukvi. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, 87, 113–122.
- Schmidt, O. (2006). *Wood and Tree Fungi*. Springer, Berlin, Germany.
- SIST EN 252 (2004). Terenska preskusna metoda za ugotavljanje relativne preventivne učinkovitosti zaščitnega sredstva za les v stiku z zemljo.
- Smrdel, V. (2015). Vojaškozgodovinska dediščina utrdbenega sistema Alpskega zidu na območju Pivške kotline : diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta. URL: <http://dk.fdv.uni-lj.si/diplomska/pdfs/smr-del-valentina.pdf> [25. 01. 2019].
- Unger, A., Schniewind, A. P., & Unger, W. (2001). *Conservation of Wood Artifacts, a handbook*. Springer, Berlin.
- Viitanen, H., Vinha, J., Salminen, K., Ojanen, T., Peuhkuri, R., Paajanen, L., & Lähdesmäki, K. (2010). Moisture and Bio-deterioration Risk of Building Materials and Structures. *Journal of Building Physics*, 33, 201–224.
- Zupančič, J. (2008). Značaj in funkcije političnih meja v Evropi. *Ars & Humanitas*, 2(1), 82–96. DOI: 10.4312/ah.2.1.82-96
- Žlahtič Zupanc, M., Lesar, B., & Humar, M. (2018). Changes in moisture performance of wood after weathering. *Construction & building materials*, 193: 529–538.

## Jože Resnik, zaslužni profesor Univerze v Ljubljani

Milan Šernek

Rektor Univerze v Ljubljani prof. dr. Igor Papič je decembra 2018 v tednu univerze upokojenim učiteljicam in učiteljem Univerze v Ljubljani, ki so pomembno prispevali k razvoju znanstvene ali umetniške panoge ter za predano opravljanje pedagoškega in mentorskega dela, podelil nazive zaslužna profesorica in zaslužni profesor. Ta častni naziv je prejel tudi prof. dr. Jože Resnik, ki je poučeval in raziskoval na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete.



Redni profesor v pokoju dr. Jože Resnik se je rodil leta 1942. Njegova življenjska pot je močno prepletena z lesarstvom na več nivojih, najprej na industrijskem in strokovnem nato pa znanstvenoraziskovalnem in pedagoškem. Dodiplomski študij lesarstva je zaključil v letu 1966 na Biotehniški fakulteti v Ljubljani in se zaposlil v Industriji pohištva BREST, Cerknica, kjer je štiri leta vodil pripravo proizvodnje in razvoj podjetja. Potem je bil kot vodja tehničnih služb zaposlen v Industriji pohištva MEBLO, Nova Gorica. V tem času je uspešno nadaljeval z izobraževanjem in leta 1974 pridobil znanstveni naziv magister lesarskih znanosti.

Svojo poklicno pot je nato usmeril v projektiranje tehnoloških procesov in sicer je bil dobro desetletje vodilni projektant, svetovalec za lesarske tehnologije v INDUSTRIJSKEM BIROJU Ljubljana. Projektiral je več lesno-industrijskih obratov doma in po svetu. Bogate izkušnje iz lesnih podjetij in industrijskega biroja je leta 1986 vključil v pedagoško in raziskovalno delo na Oddelku za lesarstvo, Biotehniške fakultete, kot predavatelj predmeta »Furnir in

lepljen les« in »Projektiranje tehnoloških procesov«. Leta 1987 je uspešno zagovarjal doktorsko disertacijo in pridobil naziv doktor lesarskih znanosti. Leta 1991 je bil izvoljen v naziv izrednega profesorja in konec leta 1994 v rednega profesorja za področje žagarstva in lesnih tvoriv. Dva mandata je bil prodekan Oddelka za lesarstvo ter prodekan in dekan Biotehniške fakultete (2002-2004). Vodstvene funkcije je opravljal s predanostjo, uspešno in profesionalno.

Profesor Resnik je vrhunski strokovnjak in odlični pedagog. Do študentov je bil zahteven, vendar korekten in načelen. Študenti so ga cenili in spoštovali ter ga kot izjemnega strokovnjaka pogosto izbirali za mentorja pri zaključnih delih. Bil je mentor 74 diplomantom in recenzent pri 84 diplomskih delih ter mentor 6 magistrim in 2 doktorjema znanosti ter tako slovensko lesarstvo okreplil s številnimi kadri.

Večkrat je predaval v tujini in sicer je leta 1992 na univerzi Bangor predaval enosemestrski predmet »Design of technological processes in the wood-processing industry«. Imel je vabljen predavanja na univerzah v Veliki Britaniji, Avstriji in ZDA. Sodeloval je z lesarskimi oddelki številnih tujih univerz in s specializiranimi lesarskimi raziskovalnimi inštituti: Madison, ZDA; Espoo, Finska; Otto Graf, Nemčija in Holzforschung, Avstrija.

Profesor Resnik je bil nosilec več industrijskih projektov, povezanih z raziskovanjem lesnih kompozitov in lepil. Bil je vodja štirih raziskovalno-razvojnih projektov, ki jih je sofinanciralo Ministrstvo za znanost in tehnologijo, ter sodelavec pri več znanstveno-razvojnih projektih na Oddelku za lesarstvo. Bil je vodja triletnega mednarodnega projekta z Brunell University »The bonding of juvenile wood from important plantation tree species with adhesives«. Vodil je triletni ameriško-slovenski projekt »Modelling the cure of adhesive-wood bonds using high-frequency energy«, za katerega je prejel posebno priznanje od ameriške agencije USDA. Od leta 1995 do 1997 je bil vodja mednarodnega projekta Copernicus, v okviru katerega je razvijal inovativne proizvode iz luščenega furnirja in v Slovenijo prvi v laboratorijsko proučevanje vpeljal proizvod LVL. Raziskovalno je vzpostavil odlično sodelovanje z Zav-



dom za gradbeništvo in na osnovi rezultatov vpeljal številne mehanske preskuševalne metode v laboratorij na Oddelku za lesarstvo.

Prof. Resnik je oral ledino pri snovanju in nastajanju laboratorija za preskušanje lesnih tvoriv. Vzpostavil je pogoje in način natančnega ter strokovnega dela v laboratoriju, ki je rezultiral v pridobitvi akreditacijske listine. Bil je pobudnik in glavni nosilec posodobitve lesnoobdelovalnih strojev v mizarški delavnici in pri nabavi sodobnih strojev za mehansko testiranje lesa in lesnih kompozitov. Več let je bil član komisije za standardizacijo in predsednik tehničnega komiteja za lesne plošče, član Forest Products Society in Society of Wood Science and Technology v ZDA, član DIT lesarstva in recenzent znanstvenostrokovnega časopisa *Drvna industrija* iz Zagreba.

Bogato in plodno raziskovalno delo v okviru domačih in mednarodnih projektov odseva v njegovi

obsežni bibliografiji, ki obsega 304 enote različnih del ali dogodkov. Sam ali v soavtorstvu je napisal 37 izvirnih znanstvenih člankov ter več strokovnih in poljudnih člankov. S 25 referati je sodeloval na znanstvenih ali strokovnih posvetovanjih po Sloveniji in tujini. Posebej pomemben je njegov znanstveni in strokovni prispevek na področju lepil za les, lepljenega lesa in lesnih tvoriv. Napisal je tri znanstvene monografije in obogatil slovensko lesarsko stroko z učbeniki za področja: (1) Tehnološko-tehnično projektiranje proizvodnih procesov v lesarstvu; (2) Lepila in lepljenje lesa ter (3) Visokofrekvenčno segrevanje in lepljenje lesa.

Profesor Resnik tudi po upokojitvi še naprej zavzeto spremlja dogajanje v lesarstvu in lesni industriji. Je tudi velik ljubitelj narave, še posebej hribov in gora, kamor se še vedno pogosto podaja.



## Udeleženci delavnice Zaščita, vgradnja in uporaba lesa na prostem napolnili predavalnico Janeza Hribarja

Tina Drolc

V februarju 2019 je na Biotehniški fakulteti (BF) Univerze v Ljubljani potekala delavnica Zaščita, vgradnja in uporaba lesa na prostem. Delavnico so organizirali Oddelek za lesarstvo BF, Društvo lesarjev Slovenije, Lesarski grozd, Odprte hiše Slovenije, Zbornica za arhitekturo in prostor, Zavod za gradbeništvo Slovenije (ZAG), Silvaprodukt, Gozdarski inštitut Slovenije, Strateška razvojno-inovacijska partnerstva (SRIP), Pametne stavbe in dom z lesno verigo, Triple Wood in Ministrstvo za kmetijstvo gozdarstvo in prehrano. Delavnica je bila prednostno namenjena arhitektom, udeležili pa so se je tudi svetovalci Eko sklada, predstavniki Zavoda za varstvo kulturne dediščine Slovenije in Tehniškega muzeja Slovenije, predstavniki podjetij, povezanih z lesom in leseno gradnjo, študenti Biotehniške fakultete, študenti Fakultete za arhitekturo, dijaki Šolskega centra Novo mesto ter drugi. V okviru delavnice so bile izpostavljene prednosti lesene gradnje za uporabnika, predvsem pa znanje in praksa, kako zagotoviti kvalitetno leseno gradnjo. Delavnica je bila tako tudi tokrat organizirana s široko podporo deležnikov, ki spodbujajo in ustvarjajo pogoje za kvalitetno leseno gradnjo, v letu 2019 pa še posebej s podporo projekta Triple Wood, ki spodbuja kulturo trajnostne lesene gradnje v alpski regiji. Udeleženci delavnice so si lahko ogledali razstavo izbranih primerov kvalitetnih lesenih objektov v alpskem prostoru, med katerimi so enakovredno predstavljeni tudi leseni objekti slovenskih arhitektov in proizvajalcev, drevesna opazovalnica v Mestnem gozdu Celje, večstanovanjska stavba Karantnika v Domžalah, skandinavski hiša na Visokem, mladinski hostel Punkl na Ravnah na Koroškem, nadgradnja hotela Terme Čatež v Brežicah, opazovalni objekt v naravnem rezervatu Škocjanski zatok v Kopru in paviljon EXPANO, ki je bil z Milana prestavljen v Mursko Soboto.

V uvodnem delu so prisotne nagovorili prof. dr. Miha Humar, prodekan za kakovost in gospodarske zadeve Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani, dr. Jože Podgoršek, državni sekretar na Ministrstvu za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano RS ter prof. dr. Milan Šernek, prodekan za področje lesarstva z Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.



Prof. dr. Miha Humar, prodekan za kakovost in gospodarske zadeve Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani

Prof. dr. Miha Humar je prisotne pozdravil in predstavil fakulteto: *»Biotehniška fakulteta je družbeno odgovorna fakulteta, ki pokriva dve različni proizvodni verigi, gozdno-lesno in živilsko-prehrabeno. Zagotovo je gozdno-lesna veriga ena od, v preteklosti, zanemarjenih verig, in še danes se velike količine lesa izvozijo. Eden od neizkoriščenih potencialov rabe lesa je prav zagotovo v gradbeništvu, kjer želimo vse deležnike izobraziti, da bodo znali pravilno in odgovorno uporabljati les.«*

Dr. Jože Podgoršek: *»Na Ministrstvu za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano RS je zelo pomembno, da znamo les pripeljati do čim višje dodane vrednosti. S tega zornega kota je projekt Triple Wood pomemben aktivator za rabo lesa v gradnji. Projekt Triple Wood je pomemben tudi z drugega zornega kota, saj pri leseni gradnji govorimo tudi o ponoru CO<sub>2</sub>. V tem duhu lesena gradnja pomembno prispeva k zmanjšanju izpusta toplogrednih plinov. Današnja delavnica je pomembna za prepoznavanje lesa kot gradbenega materiala prav pri tistih, ki bodo v prihodnje odločali o rabi lesa, za arhitekte, ki bodo vključevali lesene elemente v gradnjo. Zelo*

*zanimiva je tudi razstava, ki predstavlja primere dobrih praks, da je mogoče iz lesa zgraditi odlične zgradbe, tako za bivanje, za javne zavode kot velike hale v živalskih vrtovih.«*



*Dr. Jože Podgoršek, državni sekretar na Ministrstvu za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano RS*

Prof. dr. Milan Šernek, prodekan za področje lesarstva z Biotehniške fakultete je predstavil študij na Oddelku za lesarstvo in povabil vse prijavljene mentorje, da se skupaj z dijaki udeležijo informativnega dne ali pa predstavnike oddelka povabijo na srednje ali višje šole: *»Les je edina obnovljiva surovina, ki je imamo v Sloveniji v izobilju. Študij lesarstva omogoča predvsem poglobitev znanj o lesu in lesnih kompozitih ter sodobnih tehnologijah za predelavo in obdelavo lesa, pa tudi obogatitev znanj o konstruiranju in oblikovanju ter gospodarjenju z lesom in lesnimi proizvodi.«*



*Prof. dr. Milan Šernek, prodekan za področje lesarstva na Biotehniški fakulteti*

Sledila so zelo različna in aktualna strokovna predavanja, ki so udeležencem ponudila najnovejša znanja in odgovore na vprašanja, povezana z estetikou lesenih stavb, njihovo funkcionalnostjo, namembnostjo, vzdrževanjem, ekološko funkcijo, potresno in požarno zaščito ter drugo.

Strokovna predavanja je začela arhitektka Lenka Kavčič, direktorica arhitekturnega festivala ODPRTE HIŠE SLOVENIJE (OHS), ki je izpostavila: *»Delavnica v pravem trenutku in na pravem mestu postavlja in odgovarja na prava vprašanja v zvezi z leseno gradnjo.«* Lenka Kavčič spremlja inovativne pristope in posege v prostor, ki trajnostno, smotrno in razumsko oblikujejo prostor in uporabnikom ponujajo priložnosti za kakovostno bivanje in delo. Na delavnici je poleg prednosti uporabe lesa kot najbolj modernega materiala pri gradnji udeležencem predstavila več primerov kakovostnih večnadstropnih lesenih stavb, ki predstavljajo nov trend v stavbarstvu.

Sledilo je predavanje prof. dr. Mihe Humarja, vodje Katedre za lesne škodljivce, zaščito in modifikacijo lesa na Biotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani, ki je skupaj s sodelavci tesno povezan z razvojnimi oddelki lesnopredelovalnih podjetij. V zadnjih letih sta na katedri razvita patenta prešla na industrijski nivo proizvodnje. Za svoje delo je prof. dr. Miha Humar skupaj s sodelavci prejel Puhovo nagrado Republike Slovenije za pomembne dosežke na področju lesarstva. Prof. dr. Miha Humar je predstavil, kako zagotoviti zeleno življenjsko dobo lesa. Izpostavil je tri dejavnike: izbira primerne vrste lesa, primerna zaščita lesa in primerna konstrukcija. Opozoril je na karakteristike, ki vplivajo na življenjsko dobo lesene fasade, predvsem, da je potrebno les v primeru navlažitve čimprej posušiti in da mora v ta namen imeti lesena fasada prezračevalni kanal, vsaj 30 cm oddaljena od tal in biti zaščiten z dovolj velikim nadstreškom, ki les ščiti pred vremenskimi dejavniki.

V naslednjem predavanju je prof. dr. Marko Petrič s Katedre za lepljenje, lesne kompozite, obdelavo površin in konstruiranje na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani, predstavil izzive in novosti pri zaščiti površin lesa v zunanji uporabi. Dejal je, da je les na prostem nujno treba zaščititi, če želimo podaljšati njegovo življenjsko dobo. Opozoril je, da površinskipremazi na prostem nudijo zaščito površine lesa do 5 let, potem je potrebno premaz obnoviti. Premazi se bolje obnesejo na prostem, če so temnejših barv, če so enakomerno na-

nešeni po vsej površini, če vsebujejo UV zaščito in če so nanešeni na les z nižjo gostoto, ki je bil predhodno obdelan z biocidi.



*Prof. dr. Marko Petrič s Katedre za lepljenje, lesne kompozite, obdelavo površin in konstruiranje na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani*

Sledilo je predavanje Gregorja Repa iz podjetja Silvaprodukt d.o.o., ki je sodeloval pri razvoju inovativnega postopka in opreme za termično modifikacijo lesa. Po osnovni izobrazbi kemik je prepričan, da je les iz domačih gozdov edina prava izbira ter priložnost za hiter in zares trajnosten razvoj, zato je udeležencem delavnice predstavil prednosti in možnosti uporabe termično modificiranega lesa kot alternativo pogosto uporabljenega sibirskega macesna in tropskih vrst lesa. Na fotografijah je prikazal več primerov uporabe termično modificiranega lesa, ki tudi po daljšem obdobju izpostavljenosti na prostem ohranja svojo kakovost, funkcionalnost in estetiko. Opozoril je, da je termična modifikacija lesa v Sloveniji prisotna nekje od leta 2000, njegova uporaba pa je tako v slovenskem kot svetovnem merilu v porastu.

V naslednjem predavanju je raziskovalka Zavoda za gradbeništvo Slovenije dr. Katja Malovrh Rebec predstavila okoljsko vrednotenje lesa v stavbah in kako bodo podatki LCA vključeni v BIM. Posebej je izpostavila, da je potrebno pri uporabi različnih materialov za gradnjo upoštevati vplive materiala na okolje in na zdravje ljudi. Predstavila je izvajanje celostnega vrednotenja stavb ter kako bo z vnosom tovrstnih podatkov v BIM potencialni uporabnik lahko dobil odgovor na vprašanja kot so npr. koliko CO<sub>2</sub> je vgrajenega v njegovo hišo, kolikšen bo CO<sub>2</sub> odtis v primeru jeklene oziroma lesene konstrukcije, ipd.

Milan Hajduković iz Slovenskega združenja za požarno varnost (SZPV) je opozoril, da so na SZPV pripravili predlog tehničnih smernic »Požarna varnost v stavbah«, ki naj bi izšle v letu 2019 in ki za gradnjo stavb z leseno nosilno konstrukcijo dopuščajo višino do 22 m. Skladno z novimi smernicami je predstavil zasnovano požarne varnosti lesenih objektov in opozoril, da lesene konstrukcije lahko dosežajo predpisano požarno odpornost, problematično je lahko le nadaljnje tlenje lesa. Slabosti lesa kot gradbenega materiala v primerjavi s klasično gradnjo v primeru požara se pojavijo takrat, ko lastnosti lesa ne poznamo dovolj dobro in posledično z njim ne ravnamo pravilno. Opozoril je, da je med sprejemljivejšimi ukrepi varstva pred požarom vgradnja pršilnega sistema in da je treba poskrbeti za ustrezno odvodnjavanje, da se prepreči razlitje vode v votle dele stavbe, ki jih je težko osušiti in jih je treba zavarovati pred razvojem gliv. Izpostavil je tudi, da je smiselno graditi do 6 nadstropne lesene stavbe, višje konstrukcije so z vidika požarne varnosti vprašljive.

Sledilo je predavanje dr. Bruna Dujića, ustanovitelja svetovalnega in projektivnega podjetja CBD za projektiranje sodobnih lesenih konstrukcij na potresnih območjih, ki je za svoje delo prejel tudi nagrado Inženirske zbornice Slovenije. V svojem predavanju je predstavil prednosti uporabe lesa v stavbah s poudarkom na potresni odpornosti ter poudaril pomen poznavanja lastnosti lesa v gradnji. Med prednostmi je izpostavil les kot izolator, ki v primeru požara ščiti sam sebe in da je po nosilnosti v določenih primerih primerljiv z jeklom. Opozoril je, da izračun premika pri potresnih testih poteka prek jeklenih elementov in posebej izpostavil, da je z vidika potresne odpornosti priporočljiva gradnja lesenih stavb do 6 nadstropij, ter da je nujno izobraževati lastnike lesenih zgradb, saj pri neodgovornem ravnanju in pomanjkljivem vzdrževanju lahko hitro pride do poškodb konstrukcijskih elementov (npr. pojav gliv ob zamaikanju).

Strokovnim predavanjem so sledile tri predstavitve dobrih praks v Sloveniji, Sašo Stošič, Mizarstvo Hrovat, je predstavil lesene izdelke, ki jih v njihovi delavnici izdelujejo za uporabo na prostem; Matej Gašperič iz Biroja Gašperič je v predavanju z naslovom Lesene fasade pa ne! predstavil pomisleke naročnikov in argumente, s katerimi jih nagovarja k odločitvi za leseno fasado; Maja Mehlin iz Tesarstva Mehlin d.o.o. pa je zaključila delavnico s pojasnilom,

zakaj je zaščita lesenih konstrukcij pomembna in na kakšen način jo izvajajo v njihovem podjetju.



*V imenu organizatorjev je zahvale za sodelovanje vsem predavateljem in sponzorjem delavnice Zaščita, vgradnja in uporaba lesa na prostem podelil doc. dr. Boštjan Lesar, predsednik Društva lesarjev Slovenije (na fotografiji z Lenko Kavčič, direktorico OHS)*

Udeleženci delavnice Zaščita, vgradnja in uporaba lesa na prostem so izmenjavno izkušenj zaključili z druženjem v avli predavalnice Janeza Hribarja in ogledom razstave Triple Wood.

Evalvacija delavnice je pokazala, da so bili udeleženci zadovoljni s predstavljeno vsebino in da si v prihodnje želijo več primerov dobrih praks oziroma rešitev za zagotavljanje kvalitetne lesene gradnje, ki je edino zagotovilo, da se bodo investitorji tudi v prihodnje odločali zanjo.



*Spletna stran projekta Triple Wood*



*FB stran Kultura lesene gradnje*