



LES/WOOD

VSEBINA / CONTENTS

Letnik 69, številka 2 / Volume 69, Number 2

• Uvodnik	3
Editorial	
Jože Kropivšek	
• Inter-tree variability of autumn leaf phenology of European beech (<i>Fagus sylvatica</i>) on a site in Ljubljana, Slovenia	5
Variabilnost jesenske listne fenologije med drevesi navadne bukve (<i>Fagus sylvatica</i>) na rastišču v Ljubljani	
Nina Škrk, Angela Balzano, Zalika Črepinšek, Katarina Čufar	
• Wood identification of charcoal with Confocal Laser Scanning Microscope	21
Identifikacija lesa oglja s pomočjo konfokalne laserske vrstične mikroskopije	
Angela Balzano, Katarina Čufar, Luka Krže, Maks Merela	
• Barvila za les iz tujerodnih invazivnih rastlin	37
Wood dyes from invasive alien plants	
Monika Horvat, Jernej Iskra, Matjaž Pavlič, Jure Žigon, Maks Merela	
• Anorganska onesnažila v odsluženih oknih	49
Inorganic pollutants in used windows	
Boštjan Lesar, Miha Humar	
• Določanje statičnega in dinamičnega modula elastičnosti bukove vezane plošče	59
Determination of dynamic and static modulus of elasticity of beech plywood	
Miran Merhar	
• Optimizacija CNC tehnologije pri izdelavi umetniškega izdelka	71
Optimization of CNC technology in the manufacturing process of an artistic product	
Katarina Remic, Miran Merhar	
• Plasma treatment of spruce wood changes its dielectric properties	83
Obdelava smrekovega lesa s plazmo spremeni njegove dielektrične lastnosti	
Sebastian Dahle, Jure Žigon, Marko Petrič, Mirko Kariž	
• Razvoj trdnosti polivinilacetatnega lepilnega spoja pri lepljenju furnirja	97
Development of polyvinyl acetate adhesive bond strength when gluing veneer	
Toni Šaupperl, Jaša Saražin, Milan Šernek	
• Uporaba odpadne plastike za izdelavo lepil za lepljenje lesa	107
Use of waste plastics for the preparation of adhesives for wood bonding	
Milan Šernek, Vanja Turičnik, Rožle Repič, Bogdan Šega	
Novice / News	
• Prof. dr. Katarina Čufar – prejemnica Zoisovega priznanja za pomembne dosežke in Zlate plakete Univerze v Ljubljani	117
Prof. Dr. Katarina Čufar received the Zois Prize for important achievements and the Golden Plaque of the University of Ljubljana	
Milan Šernek, Marko Petrič	
• Zasluzni profesor, prof. dr. dr. h.c. Niko Torelli	125
Professor Emeritus, Prof. Dr. Dr. h.c. Niko Torelli	
Primož Oven	
• Prof. dr. Lidija Zadnik Stirn je prejela prestižno nagrado "DONALD MICHIE - ALAN TURING"	132
Prof. Dr. Lidija Zadnik Stirn received the prestigious "Donald Michie - Alan Turing" award	
Leon Oblak	
• Eli Keržič je dobitnica Jesenkove nagrade za najboljšo študentko magistrskega študija v letu 2019	134
Eli Keržič was awarded as the best M.Sc. student of the Biotechnical Faculty in 2019	
Miha Humar, Viljem Vek	
• 13. srečanje kluba alumnov Oddelka za lesarstvo BF UL	136
13th annual meeting of the alumni club of the Department of Wood Science and Technology BF UL	
Katarina Čufar, Boštjan Lesar	

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*
Alan Crivellaro, Velika Britanija / *United Kingdom*
Dominika Gornik Bučar, Slovenija / *Slovenia*
Miha Humar, Slovenija / *Slovenia*
Denis Jelačić, Hrvaška / *Croatia*
Leon Oblak, Slovenija / *Slovenia*
Primož Oven, Slovenija / *Slovenia*
Krishna K. Pandey, Indija / *India*
Manuela Romagnoli, Italija / *Italy*
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 decembru 2020 v 100 izvodih./*Printed in December 2020 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 team
Jože Kropivšek

Leto 2020, ki se počasi izteka, je bilo posebno v več pogledih. Najbolj ga je zaznamovala pandemija covid-19, ki je močno omejila fizične stike, predvsem pa povsem spremenila naše delo in poslovne navade. Dobesedno čez noč smo bili prisiljeni preiti v (skoraj) povsem digitalno komuniciranje in delo na daljavo. Izkazalo se je, da smo v preteklosti očitno delovali v pravo smer, saj nas ta prehod ni povsem ustavil. Tudi v uredništvu revije *Les/Wood* smo dokazali svojo digitalno pismenost in delo nemoteno nadaljevali ter že v poznih pomladanskih mesecih, ko je ravno pojenjal prvi val epidemije, izdali za takrat načrtovano številko. Podobna situacija je bila pri izdaji te številke. Na daljavo so brez večjih zapletov potekali vsi uredniški sestanki, delo na skupnih dokumentih ter vsa komunikacija z avtorji in recenzenti. Iskrena hvala vsem deležnikom v tem procesu za njihovo pripravljenost na spoprijemanje z novimi izzivi.

Leto 2020 pa si bomo zapomnili tudi po odmevnih dogodkih, ki so zelo pomembni za slovensko lesarsko znanost, saj je ta z njimi dobila priznanje za svojo odličnost in splošen družbeni pomen. Najvišje državno priznanje za pomembne znanstvenoraziskovalne dosežke, Zoisovo priznanje, je konec leta 2020 prejela prof. dr. Katarina Čufar za svoje raziskovalne dosežke na področju razvoja dendrokronologije in znanosti o lesu, kar je velika potrditev njene odličnosti in dolgoletnega trdega dela na teh področjih. Hkrati pa je to dokaz, da se dosežki v lesarski znanosti lahko kosajo z najpomembnejšimi znanstvenimi dosežki z drugih področij, npr. fizike in kemije. Prof. dr. Katarina Čufar je prejela tudi Zlato plaketo Univerze v Ljubljani za izjemne znanstvenoraziskovalne dosežke, za zgledno pedagoško delo ter za zasluge pri krepitvi ugleda univerze. To priznanje je zgovorno že samo po sebi in podčrtuje prej zapisano. Še eno pomembno priznanje slovenski lesarski znanosti je bilo izkazano z imenovanjem prof. dr. h.c. Niko-laja Torellija z nazivom »zaslužni profesor Univerze v

Ljubljani«, ki ga Univerza v Ljubljani podeljuje upoko-jenim profesoriciam in profesorjem za prepoznaven prispevek pri delovanju, ugledu in razvoju Univerze v Ljubljani. Omeniti je seveda potrebno tudi prestižno nagrado "Donald Michie - Alan Turing", ki jo je za svo-je znanstvenoraziskovalno delo prejela prof. dr. Lidi-ja Zadnik Stirn. Kot dokaz odličnosti naših študentk in študentov pa z velikim veseljem izpostavljamo Eli Keržič, ki je dobila Jesenkovo nagrado za najboljšo študentko magistrskega študija na Biotehniški fakul-teti v letu 2019, kar je tudi pomembno priznanje ka-kovosti študija lesarstva. Vse te nagrade in priznanja v tej številki podrobno predstavljamo, saj so zelo po-membni kot dokaz sedanje odličnosti lesarske znano-sti pri nas, hkrati pa kot trdna in nepogrešljiva osnova za njen razvoj v prihodnosti.

Na Oddelku za lesarstvo se lahko pohvalimo še z vrsto zelo dobrih, če ne kar izjemnih diplom, ki so bile zagovarjane v septembru 2020. Kar dva prvostopenj-ska diplomanta Katarina Remic (UNI) in Toni Šauperl (VŠŠ) sta ključne dele raziskav iz svojih diplomskih del pripravila v obliki kakovostnih znanstvenih člankov in ju v soavtorstvu z mentorji objavila v tej številki revije. Med soavtorji znanstvenih člankov te številke so tudi naše doktorske študentke in študenti Nina Škrk, Vanja Turičnik, Rožle Repič, Jaša Saražin in Jure Žigon. Zelo smo veseli, ko mladi pristopijo k pisanju člankov, saj s tem zagotavljamo na eni strani potencial za vrhunske znanstvenoraziskovalne dosežke, po drugi strani pa skrbimo za nadaljnji razvoj strokovne terminologije.

Za razvoj revije *Les/Wood* pa je nedvomno po-memben še en dogodek. Potem ko smo v prejšnji številki revije ob znanstvenem članku pionirsko uvedli objavo originalnih podatkov in fotografij na Repozito-riju Univerze v Ljubljani (RUL), sta to prakso v tej šte-vilki uporabila pri svojih člankih tudi Sebastian Dahle s soavtorji in Nina Škrk s soavtorji. Zdi se, da se je na ta način takšna praksa uveljavila in s tem *Les/Wood* stopa v korak z vodilnimi mednarodnimi revijami.

Verjamem, da boste v tej številki revije našli veliko zanimivega branja. Lepo pa ste tudi vabljeni, da pripravite svoje prispevke in nam jih pošljete za objavo v prihodnji(h) številki(ah) ter s tem prispevate k temu, da bo revija postala še boljša. Hvala že vnaprej.

The year 2020, which is slowly coming to an end, was special in several respects. First and foremost, it was marked by the Covid-19 pandemic, which severely limited physical contact and, more importantly, completely changed our work and business habits. Literally overnight, we were forced to switch to (almost) entirely digital communications and telecommuting. As it turned out, we were obviously working in the right direction in the past, because this transition did not stop us completely. We also proved our digital competence in the editorial board of *Les/Wood* and continued our work smoothly, and already in late spring, when the first wave of the epidemic was just ending, published the spring issue, as planned for that time. It was a similar story for this issue. All the editorial meetings, the work on common documents, all the communication with authors and reviewers went online without major issues. Many thanks to all those involved in this process for their willingness to take on new challenges.

The year 2020 will also be remembered for its resounding events, which were very important for Slovenian wood science, as it gained recognition for its excellence and general social importance. The Zois Prize, the highest state award of the Republic of Slovenia for the most important scientific research achievements of the year, was at the end of 2020 awarded to Prof. Dr. Katarina Čufar for her achievements in the development of dendrochronology and wood science, which is a great confirmation of her excellence and years of hard work in these fields. At the same time, this was proof that achievements in wood science can compete with the most important achievements in other scientific fields, such as physics and chemistry. Prof. Dr. Katarina Čufar also received the Golden Plaque from the University of Ljubljana for outstanding scientific research, exemplary teaching and achievements in enhancing the university's reputation, a recognition that only confirms her outstanding abilities. Another important recognition of Slovenian wood science was demonstrated by the appointment of Prof. Dr. h.c. Nikolaj Torelli with the title "Pro-

fessor Emeritus of the University of Ljubljana", an award for retired professors for their recognizable contributions to the operation, reputation and development of the University of Ljubljana. Of course, we also need to mention the prestigious "Donald Michie - Alan Turing" award received by Prof. Dr. Lidija Zadnik Stirn. As a proof of the excellence of our students, we are especially pleased to point out Eli Keržič, who received the Jesenko Award for the best Master's student 2019 at the Biotechnical Faculty, which is also an important recognition of the high quality of the study programmes related to wood science. All these awards and recognitions are presented in detail in this issue, as they are an important proof of the current academic excellence of Slovenian wood science, and also present a firm basis for its future development.

At the Department of Wood Science and Technology, a number of very good, if not exceptional, diplomas were defended in September 2020. However, two graduates – Katarina Remic (Academic Study Programme in Wood Science and Technology) and Toni Šauperl (Professional Study Programme in Wood Engineering) – prepared the main findings of their diploma theses and co-authored them with their mentors in the form of scientific articles to be published in this issue. The articles are both very interesting. Among the co-authors of the scientific articles in this issue are some of our PhD students, Nina Škrk, Vanja Turičnik, Rožle Repič, Jaša Saražin and Jure Žigon. We are very happy when young people start writing articles, because it shows, on the one hand, the potential for scientific excellence in research, and it also represents a solid basis for the further development of technical terminology in Slovenian.

Additionally, another event is undoubtedly important for the development of the journal *Les/Wood*. After pioneering the publication of original data and photographs at the Repository of the University of Ljubljana (RUL) in an earlier issue, Sebastian Dahle and co-authors, as well as Nina Škrk and co-authors, also used this practice in their articles in this issue. Thus, this approach seems to have caught on, keeping *Les/Wood* in step with the leading international journals.

I am thus confident that you will find a lot of interesting reading in this issue. You are also welcome to prepare and submit your articles for publication in future issues so that *Les/Wood* can continue to develop. Thank you in advance.



INTER-TREE VARIABILITY OF AUTUMN LEAF PHENOLOGY OF EUROPEAN BEECH (*FAGUS SYLVATICA*) ON A SITE IN LJUBLJANA, SLOVENIA

VARIABILNOST JESENSKE LISTNE FENOLOGIJE MED DREVESI NAVADNE BUKVE (*FAGUS SYLVATICA*) NA RASTIŠČU V LJUBLJANI

Nina Škrk^{1*}, Angela Balzano¹, Zalika Črepinšek², Katarina Čufar¹

UDK 630*181.8:630*176.1 *Fagus sylvatica*
Original scientific article / Izvirni znanstveni članek

Received / Prispelo: 23. 11. 2020
Accepted / Sprejeto: 2. 12. 2020

Abstract / Izvleček

Abstract: Temporal variability of leaf senescence (autumn phenology) was observed in 2020 in 11 European beech (*Fagus sylvatica*) trees in Tivoli, Rožnik and Šišenski hrib Landscape Park in Ljubljana, Slovenia, and also observed for spring phenology in the same year. General leaf colouring, BBCH94, occurred between 19 and 24 October 2020, with lower inter-individual variability than that of leaf unfolding, BBCH11. The trees had active leaves (time between leaf unfolding and leaf colouring) between 177 and 199 days. In only three trees total leaf fall, BBCH97, occurred before 19 November 2020. Leaf colouring of the tree included in the long-term monitoring program of the Slovenian Environment Agency ARSO occurred on 24 October 2020. This is 7 days later than the 65-year average of the same tree/location and is ascribed to weather conditions. Investigation of tree tissues showed that the width of the last formed tree-ring in the wood varied between 0.39 and 9.61 mm and in the phloem between 0.09 and 0.26 mm, and that the tissues reflect the health condition of the trees.

Keywords: leaf phenology, autumn, leaf colouring, leaf fall, wood formation, inter-individual variability, European beech (*Fagus sylvatica*), Slovenia

Izvleček: V letu 2020 smo spremljali jesensko fenologijo listov 11 dreves navadne bukve (*Fagus sylvatica*) v Krajinskem parku Tivoli, Rožnik in Šišenski hrib v Ljubljani, Slovenija. Na teh drevesih smo spomladi 2020 spremljali proces olistanja. Splošno obarvanje listov, BBCH94, je nastopilo med 19. in 24. oktobrom 2020, v ožjem časovnem intervalu kot spomladansko olistanje, BBCH11. Drevesa so imela aktivne liste (čas med olistanjem in obarvanjem listov) od 177 do 199 dni. Samo s treh dreves je do 19. novembra 2020 odpadlo vse listje, BBCH97. Pri drevesu, ki je vključeno v dolgoletni program spremljanja fenologije listov Agencije Republike Slovenije za okolje ARSO, je obarvanje listov nastopilo 24. oktobra 2020, kar je za 7 dni kasneje od 65-letnega povprečja za isto drevo / lokacijo. Raziskave drevesnih tkiv so pokazale, da je znašala širina zadnje branike v lesu med 0,39 in 9,61 mm in v floemu med 0,09 in 0,26 mm in da tkiva nakazujejo zdravstveno stanje dreves.

Ključne besede: fenologija, jesen, obarvanje listov, odpad listov, nastajanje lesa, variabilnost med osebkami, bukev (*Fagus sylvatica*), Slovenija

1 INTRODUCTION

1 UVOD

The main leaf phenology events in temperate trees like European beech (*Fagus sylvatica*) are often divided into spring and autumn phenology. Spring phenology has generally been studied more frequently than autumn phenology (Gallinat et al., 2015), which covers the processes related

to leaf senescence, including leaf colouring and leaf fall before the tree enters winter dormancy (Žust, 2015). Phenology is generally driven by climate (Doi & Takahashi, 2008), but there exist species-specific responses to climate (Ibáñez et al., 2010). Higher summer temperatures generally delay the occurrence of leaf senescence in beech in autumn (Čufar et al., 2012), and some models predict delayed leaf colouring for beech of 1.4 and 1.7 days per decade due to progressing climatic change (Delpierre et al., 2009). On the other hand, leaf senescence may be advanced due to summer drought, extremely high temperatures which damage the leaves, low temperatures and

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

* e-mail: nina.skrk@bf.uni-lj.si

² Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, SLO

inversions (Schuster et al., 2014).

Foliar senescence which can be visually observed is accompanied by cessation of xylem and phloem formation by the cambium, which can only be studied under the microscope after tissue sampling and preparation (Čufar et al., 2008; Prislán et al., 2013a, 2013b). The combination of the two approaches is therefore of great research interest (Čufar et al., 2008; Dox et al., 2020).

Observations of leaf phenology of European beech are included in the Slovenian National Phenological Network of the Slovenian Environment Agency (ARSO) within the Ministry of Environment and Spatial Planning coordinated by the International Phenological Gardens (IPG) (The international ..., 2020; Chmielewski et al., 2013; Žust, 2015). In autumn they monitor the general leaf colouring and leaf fall (Žust, 2015).

A study based on data on leaf phenology in beech collected by ARSO from 47 localities in Slovenia (altitudes 55 to 1,050 m a.s.l.) in the period 1955-2007, showed that general leaf colouring occurred between 2 October and 29 October (day of the year (DOY) 275-302). It occurred earlier at higher altitudes (1.9 days earlier per 100 m altitude increase). Leaf colouring was found to be positively correlated with temperatures from August to September, whereas long-term trends and relation to altitude were not statistically significant (Čufar et al., 2012).

In addition to the long-term observations of ARSO on representative trees, we need better knowledge on the variability of phenological events in the same species (inter-individual or between tree variability) and in the same tree (intra-individual or within tree variability). A study on deciduous trees in temperate latitudes showed that the inter-individual variability of spring phenology depends on the species, tree size and autumn phenology of the previous year (Denéchère et al., 2019). The same study proposed a minimum sample size of 23 trees to follow leaf senescence, and showed that the within-population average standard deviation was nearly two times larger for leaf senescence (8.5 days) than for budburst (4.0 days).

A recent study on the variability of spring phenology, i.e. leaf development, in European beech growing on a site in Ljubljana-Tivoli, Slovenia, showed that general leaf unfolding in different trees

on the same site occurred within an interval of almost three weeks (between 7 and 25 April 2020) (Škrk et al., 2020a). Moreover, the occurrence and duration of more precisely defined phases of leaf development showed large variations within and between trees. Among the observed trees was also a standard beech tree (*Fagus sylvatica* Hardeggen, plant identification number 221, planting year 1969, origin Germany) included in the long-term monitoring program of ARSO; its leaf unfolding was observed on 14 April 2020, which was 4 days earlier than the long-term average of the same tree/location (Škrk et al., 2020a). Early leaf development in 2020 was ascribed to the above-average temperatures in winter 2019/2020.

As the beech trees in Ljubljana-Tivoli observed in spring 2020 provided valuable information on inter-tree variability on spring phenology, we continued their monitoring till late autumn of 2020. The aim of the present study is to present the progression of leaf senescence, especially leaf colouring and leaf fall, and to relate them to climate data and long-term leaf colouring data for beech in Ljubljana. In addition, we evaluated the condition of tree tissues, last formed wood and phloem, sampled around the day of general leaf colouring and their possible use to evaluate the growth potential and health condition of the trees.

2 MATERIALS AND METHODS

2 MATERIAL IN METODE

2.1 STUDY SITE AND TREES

2.1 OPAZOVANA PLOSKEV IN DREVEŠA

The selected study area was Tivoli, Rožnik and Šišenski hrib Landscape Park in Ljubljana. The 11 trees selected for observation were observed daily for leaf phenology in spring of 2020 (Škrk et al., 2020a, 2020b). We observed the trees on three locations: (1) trees 11-19 and (2) tree 20 – all on the pathway Pod Turnom, near the water reservoir; and (3) tree 30 near the Cekin Mansion, which is included in the long-term monitoring of the Slovenian National Phenological Network (*Fagus sylvatica* Hardeggen, plant identification number 221, planting year 1969, origin Germany) of the Slovenian Environment Agency as a part of the International Phenological Gardens of Europe (Figure 1).



Figure 1. Study trees on 10 September 2020 before the onset of autumn leaf colouring. Trees 11–20 belong to a beech forest site, while tree 30 grows in the park and is a clone (*Fagus sylvatica* Hardeggen) included in the International Phenological Gardens for long-term observations of leaf phenology conducted by ARSO.

*Slika 1. Preučevana drevesa 10. septembra 2020 pred nastopom jesenskega obarvanja listov. Drevesa 11–20 pripadajo območju bukovega gozda, medtem ko drevo 30 raste v parku in je klon (*Fagus sylvatica* Hardeggen), vključen v Mednarodni fenološki vrt za dolgoročno opazovanje fenologije listov, ki ga opravlja ARSO.*

The geographical coordinates of trees and tree group are between 46.052697°– 46.058247° N, 14.489115° and 14.495366° E, and 307–316 m a.s.l. (Škrk et al., 2020a).

2.2 FIELD OBSERVATIONS OF LEAF PHENOLOGY

2.2 TERENSKA OPAZOVANJA RAZVOJA LISTOV

For monitoring phenological phases of leaf colouring we visited the selected trees between 10 September and the end of November 2020. First, we observed them once a week, but then with the onset of leaf colouring and its intense progress we observed them 3 times a week. We took digital photos of all selected trees. We recorded general leaf colouring (yellowing) (BBCH94), which occurs when more than half of the leaves turn yellow in autumn (Table 1) (Žust, 2015). In addition, we also took notes on leaf fall, BBCH97, when 100%

of leaves fell down from trees to the ground (Koch et al., 2009; Žust, 2015) if it occurred till 19 November 2020.

For a better overview of leaf colouring and leaf fall we also took panoramic photos of the observed site. The photos were taken from the Nebotičnik skyscraper and from the Ljubljana Castle hill.

2.3 CLIMATIC AND PHENOLOGICAL DATA FOR COMPARISON

2.3 KLIMATSKI IN FENOLOŠKI PODATKI ZA PRIMERJAVO

To illustrate the weather conditions during the observed leaf colouring we used the daily meteorological data, minimum and maximum temperatures and sums of precipitation for Ljubljana for the period May–Nov 2020 and compared them to the long-term average for

Table 1. Description of autumn phenological phases
Preglednica 1. Opis jesenskih faz listne fenologije

Phase / Faza	Name / Ime	Description	Opis faze
BBCH94	General leaf colouring (yellowing) / Splošno obarvanje (rumenenje) listov	More than 50% of the leaves turn yellow	Več kot polovica listov jesensko obarvanih
BBCH97	General leaf fall / Splošno odpadanje listov	100% of leaves fell down from trees to the ground	100 % listov odpade z dreves

1981-2010. Climatic data were obtained from the online meteorological archive ARSO METEO (ARSO, 2020).

The observed leaf colouring was compared with long-term phenological data of general leaf colouring for Ljubljana for the period 1955-2019 from the database of the Slovenian National Phenological Network of ARSO (Žust, 2015).

2.4 MICROCORE SAMPLING AND INCREMENT OF WOOD AND PHLOEM

2.4 ODVZEM MIKRO IZVRTKOV IN PRIRASTEK LESA IN FLOEMA

As tree size and vitality might affect leaf phenology, we also measured the diameters at breast height (1.3 m) for 7 characteristic trees (numbers 11, 12, 13, 14, 19, 20, 30). As trees grow in an important recreation area representing the “green lungs” of Ljubljana, they cannot be cored

to determine their ages. Therefore, we estimated the age based on nearby felled trees. To estimate the current growth with minimal tree wounding, we took microcores from the 6 selected trees. The microcores were taken from the stems on 13 October 2020 with a Trephor tool at 1.3 m above ground. The microcores were processed in agreement with the methodology of sample collection and tissue preparation protocol of Prislan et al. (2013a, 2014). The 9 µm thick transverse sections stained with safranin and astra blue were observed with a Nikon eclipse 800 light microscope, and analysed with NIS Elements image analysis program.

We inspected the condition (state of differentiation, cell characteristics) and measured the dimensions (width and cell number) of the tissues including cambium, last formed xylem and phloem increments of 2020 along the three radial files (Prislan et al., 2013a).



Figure 2. Variability of leaf colouring (a) among trees and within the same tree, and (b) within the same branch on 31 October 2020 (DOY 305).

Slika 2. Razlike v obarvanju listov (a) med drevesi in znotraj istega drevesa ter (b) znotraj iste veje 31. oktobra 2020 (dan 305).

3 RESULTS AND DISCUSSION

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

3.1 DYNAMICS OF AUTUMN LEAF COLOURING IN 2020

3.1 DINAMIKA JESENSKEGA OBARVANJA LISTOV V LETU 2020

On 10 September 2020 the observed trees had some yellow leaves, but the majority were green (Figure 1). After that date we recorded the gradual onset of leaf colouring, which varied within the same tree and between the trees (Figure 2). Leaf colouring often first occurred near the top of a tree and progressed towards the lower parts of the crown. While the top was already yellow or the leaves already started to fall, the leaves at the bottom of the tree could still be green. There were also great differences in progress of leaf colouring within the same branches.

Leaf colouring was slowly progressing from the end of September till mid-October, and became faster especially after 20 October, when most trees changed leaf colour within a few days (Figures 3, 4, 5).

General leaf colouring, when more than 50% of leaves turned yellow, as defined by IPG (Table 1),

was first observed in trees 12 and 14 (DOY 293), two days later in tree 11 (DOY 295), followed by tree 19 (DOY 296). In trees 20 and 13 general leaf colouring was observed on 23 October (DOY 297) (Figures 4, 5, 6, Table 2). The photos also show the dynamics of leaf fall. Interestingly, tree 14, which had the latest leaf unfolding in spring, was the first tree which lost all its leaves by the end of October. By 19 November, trees 11 and 12 also lost all their leaves. Tree 19 did not vary from other trees regarding timing of leaf colouring, while in spring this tree had a very late leaf unfolding (Figure 6, Table 2). Tree 19 grows solitary after the nearby trees were damaged by an ice storm in February 2014, and has been reported to show a decline characterized by death of shoots, twigs, branches and translucent and sparse canopy (Ogris, 2020).

Compared to the spring dynamics of leaf unfolding, when the difference between the earliest and latest tree was 18 days, the timing of general leaf colouring was less variable; with a difference between the earliest and the latest leaf colouring of 5 days (Table 2).

Leaf fall phase (BBCH97), when 100% of leaves fall from trees to the ground, mainly depends on

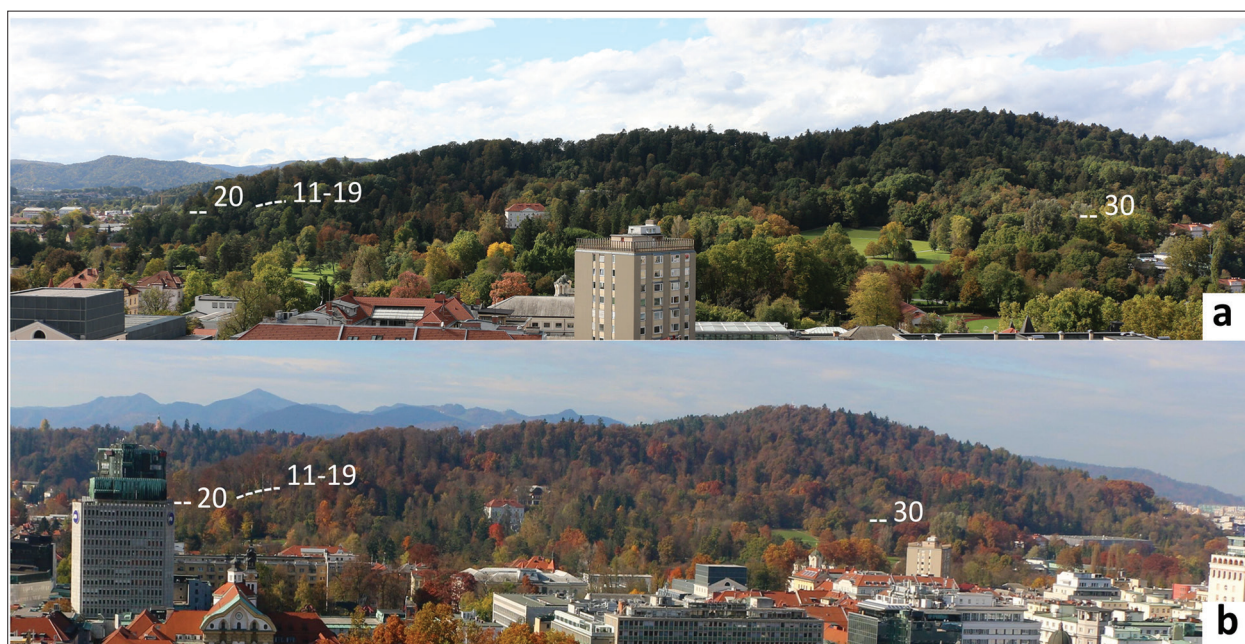


Figure 3. Study site and trees in Tivoli, Rožnik forest as seen (a) from the Ljubljana Skyscraper (Nebotičnik) on 24 September (DOY 268) and (b) from the Ljubljana Castle on 30 October 2020 (DOY 304).

Slika 3. Opazovano območje in drevesa na območju krajinskega parka Tivoli, Rožnik, fotografirana (a) z ljubljanskega Nebotičnika 24. septembra (dan 268) in (b) z ljubljanskega gradu 30. oktobra 2020 (dan 304).



Figure 4. Phenology of leaf senescence in the observed beech trees between 18 September (DOY 262) and 25 October 2020 (DOY 299).

Slika 4. Fenologija senescence listov opazovanih bukev med 18. septembrom (dan 262) in 25. oktobrom 2020 (dan 299).



Figure 5. Phenology of leaf senescence in the observed beech trees between 28 October 2020 (DOY 302) and 22 November 2020 (DOY 327).

Slika 5. Fenologija senescence listov opazovanih bukev med 28. oktobrom (dan 302) in 22. novembrom 2020 (dan 327).

current conditions (wind, rain etc). Gradual leaf fall started soon after leaf colouring, with the exception of tree 30. Total leaf fall was by 19 November 2020 only observed in 3 trees, while on the other trees

the leaves wilted after 21 November when the temperature fell below zero for the first time. After that time, and especially on trees 20 and 30, some of the leaves remained attached to the twigs.

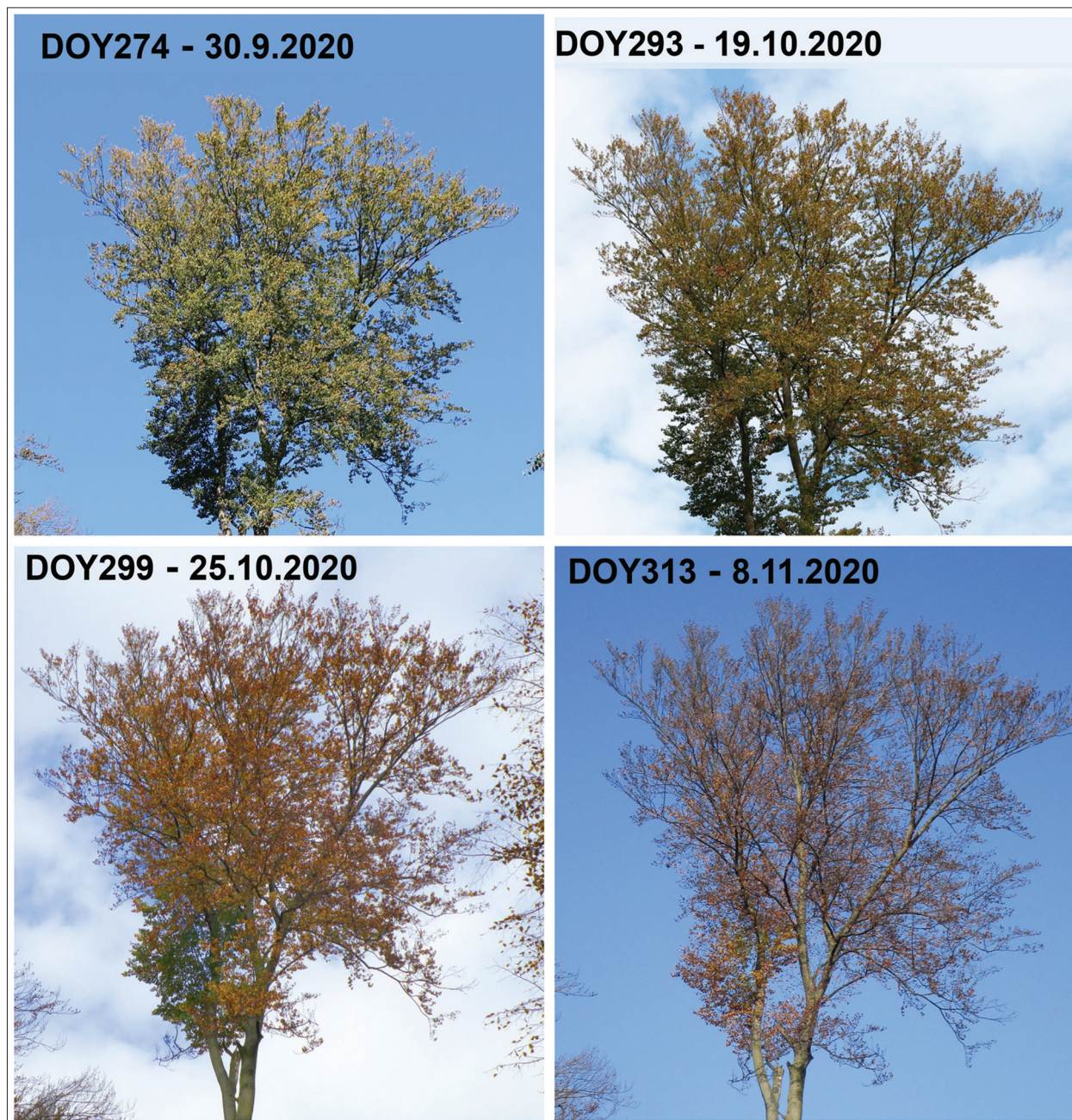


Figure 6. Tree 19 – detailed views of the crown with progressing leaf senescence from September till November 2020.

Slika 6. Drevo 19 - podroben pogled na krošnjo in napredovanje senescence listov od septembra do novembra 2020.

Table 2. Dates of general leaf colouring compared to dates of leaf unfolding, days with active leaves (days between leaf unfolding and leaf colouring) and a note if the leaf fall occurred by 19 November 2020.

Preglednica 2. Datumi splošnega obarvanja listov pri izbranih drevesih, datumi razvoja listov, dnevi z aktivnimi listi (dnevi med olistanjem in obarvanjem listov) in zaznamek, če je bil odpad listov zaključen do 19. novembra 2020.

Tree / Drevo	Leaf unfolding / Razvoj listov		Leaf colouring / Obarvanje listov		Days with active leaves / Dnevi z aktivnimi listi	Leaf fall till 19 Nov 2020 / Odpad listov do 19.11.2020
	Date / Datum	DOY / Dan v letu	Date / Datum	DOY / Dan v letu	Days / Dnevi	
11	9.4.2020	100	21.10.2020	295	195	yes / da
12	9.4.2020	100	19.10.2020	293	193	yes / da
13	16.4.2020	107	23.10.2020	297	190	
14	25.4.2020	116	19.10.2020	293	177	yes / da
19	22.4.2020	113	22.10.2020	296	183	
20	7.4.2020	98	23.10.2020	297	199	
30	14.4.2020	105	24.10.2020	298	193	
Average / Povpr.		106		296	190	
Minimum / Min.		98		293	177	
Maximum / Maks.		116		298	199	
STD		6.90		1.99	7.55	

3.2 LEAF COLOURING IN THE LIGHT OF LONG-TERM OBSERVATIONS

3.2 OBARVANJE LISTOV V LUČI DOLGOLETNIH OPAZOVANJ

In tree 30 (included in the long-term phenology monitoring of ARSO) general leaf colouring occurred at the latest date, on 24 October, DOY 298 (Figure 7, Table 2). On 22 November (DOY 327) the tree still had numerous brown wilted leaves in the upper part of the crown (Figure 5). This agrees with the observation of numerous wilted leaves in the upper crown observed in spring of 2020. The wilted leaves of the previous year remained on the tree till the unfolding of new leaves in spring (Škrk et al., 2020a, 2020b).

As mentioned before, tree 30 is a reference tree for Ljubljana monitored in the framework

of the Slovenian National Phenological Network included in the IPG (plant number 221), and is one of a series of genetically identical trees that are planted all over Europe (The international ..., 2020).

Leaf colouring in Ljubljana has varied over time. The long-term (1955-2019) average day of leaf colouring is 18 October (DOY 291, when not a leap year as in 2020). The earliest leaf colouring in this tree was observed on DOY 270 (27 September 1979), and the latest on DOY 307 (3 November 1991 and 1997) (Figure 8). In 2020 leaf colouring of tree 30 was observed on DOY 298 (24 October 2020), which is 7 days later than the long-term average.

In Ljubljana there is a general trend towards later leaf colouring, but Čufar et al. (2012) showed that the trend was not statistically significant in the period 1955-2007.

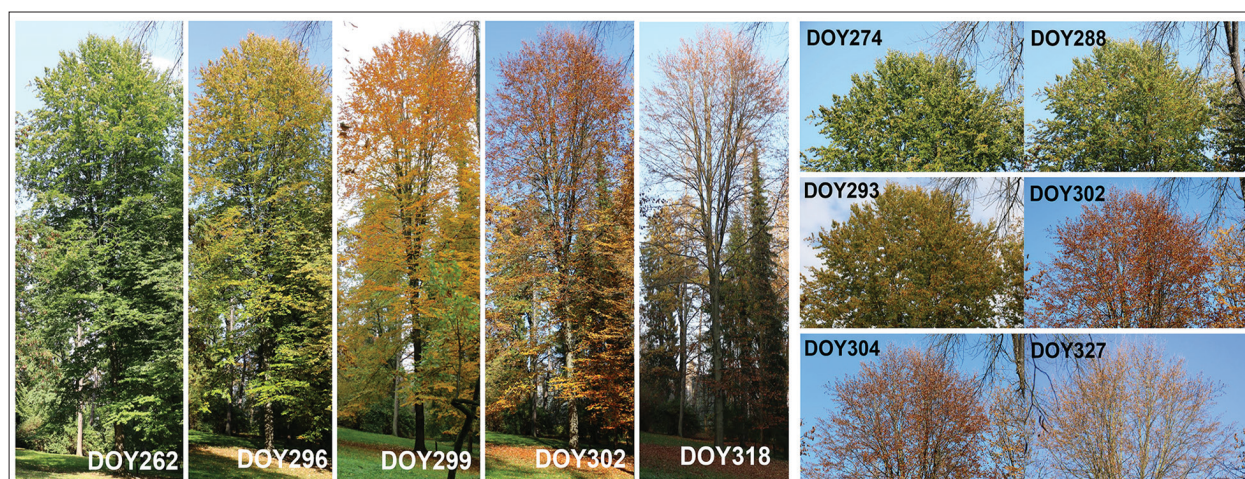


Figure 7. Progression of leaf colouring in tree 30 between 18 September (DOY 262) and 22 November (DOY 327) with detailed view of crown top. General leaf colouring occurred on 24 October 2020 (DOY 298). The tree (*Fagus sylvatica* Hardegsen, plant identification number 221, planting year 1969, origin Germany) is included in the long-term monitoring of the Slovenian National Phenological Network of the Slovenian Environment Agency (ARSO).

Slika 7. Napredovanje obarvanja listov na drevesu 30 med 18. septembrom (dan 262) in 13. novembrom (dan 318) s podrobnim pogledom vrha krošnje. Splošno obarvanje listov se je zgodilo 24. oktobra 2020 (dan 298). Drevo (*Fagus sylvatica* Hardegsen, identifikacijska številka rastline 221, leto sajenja 1969, poreklo Nemčija) je vključeno v dolgoročno spremljanje fenologije v okviru Slovenske nacionalne fenološke mreže Agencije RS za okolje (ARSO).

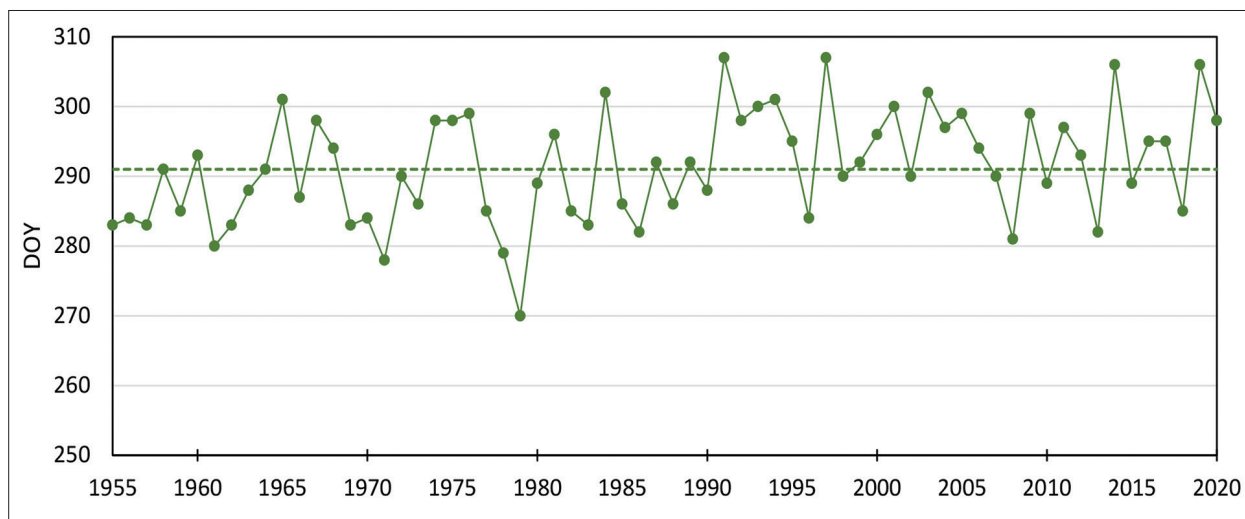


Figure 8. General leaf colouring of beech 30 in Ljubljana (plant 221, IPG) in the period 1955-2020 and the corresponding average (dotted line). DOY - day of the year. Data ARSO (2020).

Slika 8. Dan obarvanja listov bukve 30 v Ljubljani (drevo 221, IPG) v obdobju 1955-2020 in pripadajoče povprečje (črtkana črta). DOY – zaporedni dan v letu. Podatki ARSO (2020).

3.3 WEATHER CONDITIONS AND THEIR IMPACT ON LEAF SENESCENCE

3.3 VREMENSKE RAZMERE IN NJIHOV VPLIV NA SENESCENCO LISTOV

Summer 2020 in Slovenia was warmer (+0.9°C) and wetter (119% precipitation) than the long-term average 1981-2010. The surplus in temperature was relatively small in June and July, whereas August was significantly warmer than the long-term average. Nevertheless, summer 2020 generally had a lower temperature than other summers in the last 5 years. In Ljubljana the maximum summer temperature in 2020 was 33.2°C, with 25 days with a maximum daily temperature of at least 30°C (Figure 9). The sum of precipitation exceeded the long-term average on most summer days in Ljubljana (Cegnar, 2020).

September 2020 was also warmer (+1.5°C) than the long-term average in Ljubljana, but had only 90% of the long-term precipitation. The last 5 days of September were cooler. The average temperature in October was 11.9°C, which is 0.6°C warmer than usual. The amount of precipitation was 138% compared to the long-term average.

There was a slight cool-wet period after 10 October 2020.

According to the weather conditions in summer and autumn 2020, it was less likely that summer temperatures would damage the leaves and cause premature leaf colouring. Therefore, warm and moderately wet conditions in summer and autumn 2020 most likely favoured later occurrence of leaf colouring and leaf fall.

3.4 CAMBIUM, WOOD AND PHLOEM AT THE TIME OF LEAF COLOURING

3.4 KAMBIJ, LES IN FLOEM V ČASU OBARVANJA LISTOV

Investigation of tree tissues collected from the trees by micro-coring in mid-October (around the long-term average day of leaf colouring) showed that wood formation was completed in all trees, except in one (tree 30). The width of the last formed tree ring 2020 in the wood varied between 0.39 and 9.61 mm and in the phloem between 0.09 and 0.26 mm (Table 3). The trees in general had very narrow late phloem with mainly 1-2 cells per radial row.

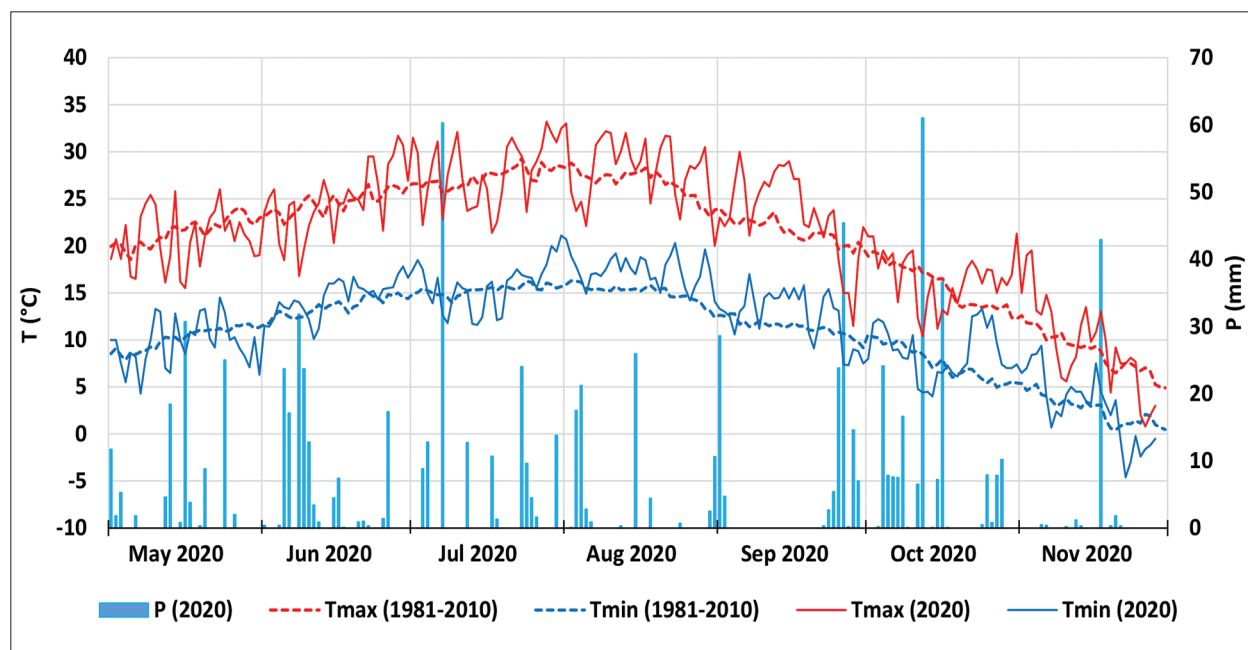


Figure 9. Minimum and maximum daily temperatures (*T*) and precipitation (*P*) in Ljubljana between May and November 2020 and average minimum and maximum temperatures for the period 1981-2010 (data ARSO, 2020).

Slika 9. Minimalne in maksimalne dnevne temperature (*T*) ter padavine (*P*) v Ljubljani od maja do novembra 2020 in povprečne minimalne ter maksimalne temperature za obdobje 1981-2010 (podatki ARSO, 2020).

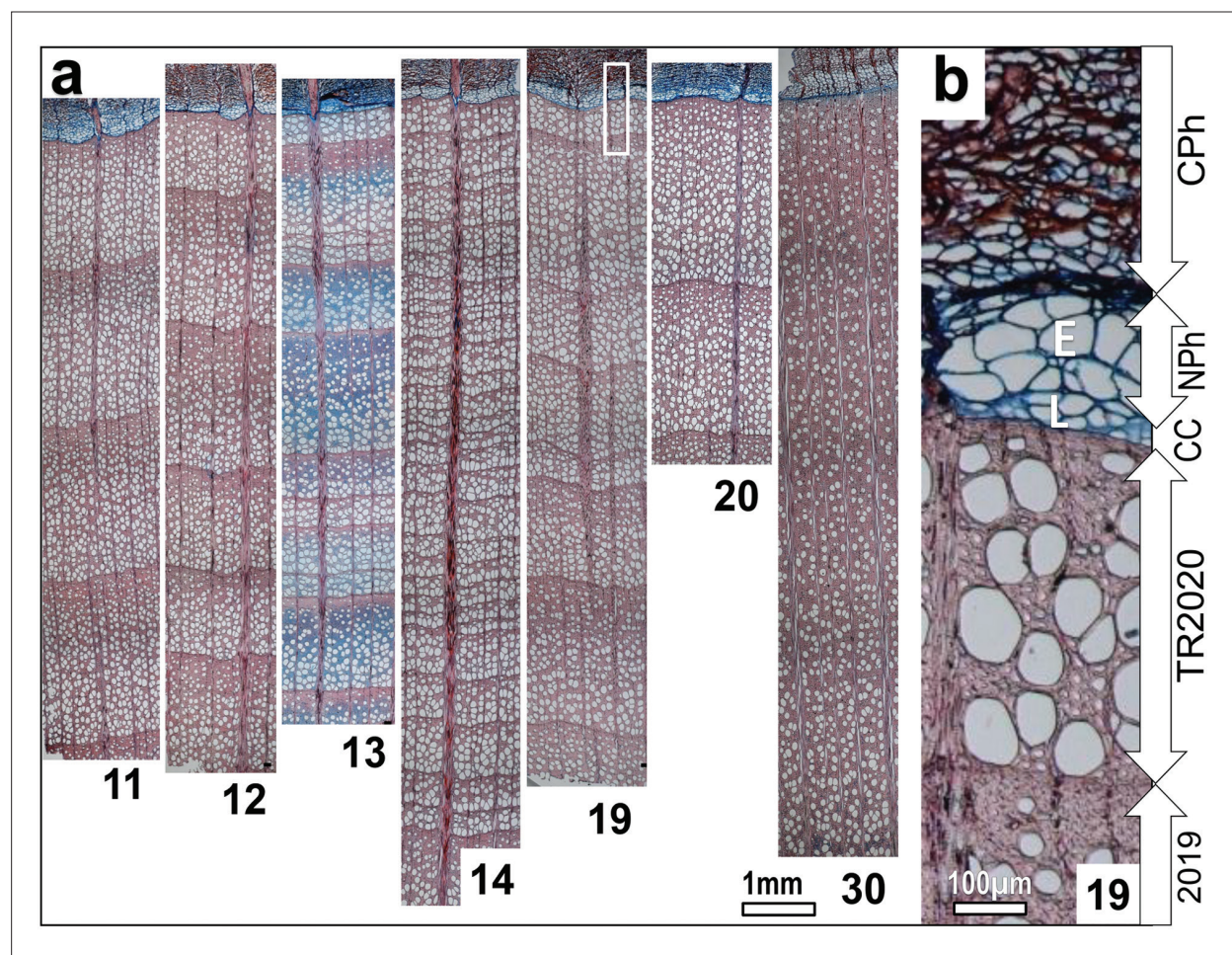


Figure 10. Cross-sections of microcores showing: (a) wood, cambium and bark, and (b) detailed view of the tree 19 with last formed xylem tree-ring 2020 (TR2020), cambium (CC), non-collapsed phloem (NPh), divided in early (E) and late phloem (L), and part of the bark with collapsed phloem (CPh).

Slika 10. Prečni prerezi mikro-izvrtkov, ki prikazujejo: (a) les, kambij in del skorje in (b) podroben pregled tkiv drevesa 19 vključno z zadnjo ksilemsko braniko 2020 (TR2020), kambijem (CC), nekolabiranim floemom (NPh), razdeljenim na rani (E) in kasni floem (L) ter delom kolabiranega floema (CPh).

The observed trees are characterized by large diameters and heights (Table 3). The characteristics of trees 11-20 growing on the location of natural beech forest deviate from those of tree 30, which is a clone growing in the phenological garden.

Trees 11-20 have an estimated age ca. 120-150 years based on tree-ring count of the nearby felled trees. Their cross-sections showed that the cambium already stopped the production of wood and phloem, and that the wood differentiating was completed (with the exception of tree 30). The width of the last formed xylem tree-ring 2020 (TR2020) varied between 0.39 and 2.34. Tree 14 had the narrowest tree-rings especially after 1993

(average 0.38 mm for 1994-2020). Tree 14 was also the latest in spring phenology, the first in leaf colouring and the first which lost all leaves, in line with the findings of Fu et al. (2014). Two trees (13 and 19) showed a pronounced reduction of tree-ring width in 2020, which might be related to tree decline reported for beech in Tivoli (Ogris, 2020).

Trees 11-20 have growth rings 2020 in the phloem between 90 and 185 µm wide, with 3-5 early phloem (E) and 1-2 late phloem (L) cells. LP is generally narrower than in trees at Panška reka with similar climatic conditions (Prislan et al., 2013a).

The characteristics of tree 30 deviated from the ones of the other trees (Table 3). This is possibly

Table 3. European beech (*Fagus sylvatica*), Ljubljana: tree diameter at breast height (DBH), 2020 xylem and phloem ring width, and number of cells in early and late phloem on DOY 287 (13 October, 2020).

Preglednica 3. Navadna bukev (Fagus sylvatica), Ljubljana: premeri dreves na prsni višini (DBH), širine ksilemske in floemske branike, nastale v letu 2020, ter število celic v ranem in kasnem floemu na dan 287 (13. oktober 2020).

Tree / Drevo	DBH / Premer	Xylem ring width 2020 / Širina ksilemske branike 2020	Phloem ring width 2020 / Širina floemske branike 2020	Early phloem / Rani floem	Late phloem / Kasni floem
	[cm]	[mm]	[µm]	Number of cells / Število celic	
11	68	1.73	175	5	2
12	64	1.07	169	4	1
13	59	0.39	90	3	1
14	66	0.48	185	6	1
19	58	0.40	182	4	1
20	70	2.34	147	5	2
30	53	9.61	256	3	4
Average / Povpr.	62	2.29	172	4	2
Minimum / Min.	53	0.39	90	3	1
Maximum / Maks.	70	9.61	256	6	4
STD	6.27	3.31	49.48	1.11	1.11

because tree 30 is a clone, grows in the park (ca. 600 m apart from the other observed beech trees), had the smallest diameter, height and possibly age (ca. 50-60 years), the largest xylem (9.61 mm) and phloem ring (256 µm) formed in 2020, and the widest late phloem (4 cells). It was the only tree where differentiation of the last formed xylem was not yet completed (Figure 10). The tree also had the latest leaf colouring (Figures 1, 3, 7, 8, Tables 2, 3) and leaves which were wilted at the end of November, but may remain on the tree till the next leaf unfolding (as observed in spring of 2020).

4 CONCLUSIONS

4 ZAKLJUČKI

We present inter-tree variability in the autumn leaf phenology of selected beech trees in Ljubljana, which were also monitored in spring of the same year, 2020 (Škrk et al., 2020a). Although there were large differences in the dynamics of spring phenology with an 18-day difference for leaf unfolding phase, all selected trees reached leaf colouring, phase BBCH94, within a 5-day interval between 19 and 24 October 2020. Although changes were gradual from mid-September,

they became very rapid after 19 October, when a large percentage of tree leaves changed colour within a few days. We also observed a high intra-individual variability. Trees 12 and 14, which grow in the immediate vicinity, were the first to have 50% of all leaves coloured (DOY 293). The last leaf colouring was observed in tree 30, which is a clone and is included in the International Phenological Gardens. In tree 30, leaf colouring occurred 7 days later compared to the long term average (DOY 298).

Leaf senescence is mostly affected by summer temperatures and by maximum temperatures from September to October. According to ARSO, temperatures in Ljubljana are generally increasing, which results in a general delay in leaf senescence in autumn. On the observed site the summer was very warm with an above average amount of precipitation. October 2020 in particular was warmer than long term average, and it also had 38% more precipitation, which might favour a delay in leaf colouring.

Since temperatures may be a dominant factor, we can expect, in the context of global warming, delayed dates of leaf senescence in areas without water limitation, such as Ljubljana.

5 SUMMARY

5 POVZETEK

Jesenska fenologija listopadnih dreves, kot je navadna bukev (*Fagus sylvatica*), proučuje obarvanje in odpadanje listov, preden drevo vstopi v zimsko mirovanje (Žust, 2015) in tudi fenološke dogodke, povezane s prenehanjem kambijeve produkcije lesa in floema (Čufar et al., 2008; Prislan et al., 2013a, 2013b).

Opazovanje listne fenologije navadne buke je vključeno v Slovensko nacionalno fenološko mrežo Agencije RS za okolje (ARSO) pri Ministrstvu za okolje in prostor (Žust, 2015).

Predhodna študija fenologije listov buke je na osnovi podatkov, ki jih je zbral ARSO na 47 rastiščih po Sloveniji (nadmorske višine od 55 do 1.050 m) v obdobju 1955-2007, pokazala, da obarvanje več kot polovice listov pri bukvi v Sloveniji nastopi od 2. do 29. oktobra. Obarvanje se pojavi prej na višjih nadmorskih višinah in je pozitivno povezano s temperaturami od avgusta do septembra (Čufar et al., 2012).

V Krajinskem parku Tivoli, Rožnik in Šišenski hrib v Ljubljani smo spomladi 2020 opazovali 11 izbranih bukev in pridobili informacije o razlikah spomladanskega razvoja listov med drevesi. Namen tokratne študije pa je bil spremljati proces senescence listov, zlasti obarvanja in odpada listov ter jih povezati z vremenskimi in dolgoročnimi fenološkimi podatki. Poleg tega smo ocenili stanje drevesnih tkiv, kambija, lesa in floema sredi oktobra.

Za spremljanje obarvanja listov smo izbrana drevesa opazovali od 10. septembra do konca novembra 2020. Ob vsakem opazovanju smo jih fotografirali in pripravili galerije slik (slika 1, 4, 5, 6, 7). Zabeležili smo splošno obarvanje (rumenenje) listov (BBCH94), ko se obarva več kot polovica listov (preglednica 1), in odpad listov, ki se zaključi s fazo BBCH97, ko je 100 % listov odpadlo z drevesa (Žust, 2015). Za boljši pregled obarvanja in odpada listov smo posneli tudi panoramske fotografije opazovanega rastišča. Fotografije smo posneli z ljubljanskega Nebotičnika in z ljubljanskega gradu (slika 3).

Za proučevanje vremenskih razmer smo uporabili dnevne podatke za Ljubljano iz spletnega meteorološkega arhiva ARSO METEO. Obarvanje listov smo primerjali z dolgoročnimi fenološkimi podatki za Ljubljano za obdobje 1955-2019 iz baze

podatkov Slovenske nacionalne fenološke mreže ARSO (Žust, 2015). Opravili smo tudi odvzem mikro izvrtkov pri 7 drevesih, izmerili premere dreves in ocenili njihovo starost. Mikro izvrtke iz debel dreves smo odvzeli 13. oktobra 2020 z orodjem Trephor, jih obdelali in pripravili v skladu s protokolom, ki ga je predlagal Prislan s sodelavci (2013a, 2014) ter pripravili prečne prereze za opazovanje pod mikroskopom.

Splošno obarvanje listov, BBCH94, je nastopilo med 19. in 24. oktobrom 2020, v ožjem časovnem intervalu kot spomladansko olistanje, BBCH11. Drevesa so imela aktivne liste (dnevi med olistanjem in splošnim obarvanjem listov) od 177 do 199 dni. Samo s 3 dreves je do 19. novembra odpadlo vse listje (slike 2, 4, 5, 6, 7, 8, preglednica 2). Pri ostalih drevesih je po prvi zmrzali 21. novembra 2020 vse listje uvelo, a je predvsem pri drevesih 20 in 30 ostalo na drevesih.

Pri drevesu 30, ki je vključeno v dolgoletni program spremljanja fenologije listov Agencije Republike Slovenije za okolje ARSO, je obarvanje listov nastopilo 24. oktobra 2020, kar je za 7 dni kasneje od 65-letnega povprečja za isto drevo / lokacijo (slika 7, preglednica 2). Na drevesu je bilo 22. novembra (DOY 327) v zgornjem delu krošnje še vedno veliko uvelih listov.

Poletje 2020 v Sloveniji je bilo toplejše (+ 0,9 °C) in bolj vlažno (119 % padavin) kot dolgoletno povprečje 1981-2010, a manj vroče kot poletja v zadnjih 5 letih. Količina padavin v Ljubljani je bila poleti za manj kot odstotek manjša od dolgoletnega povprečja. Tudi september je bil toplejši (+1,5 °C) od dolgoletnega povprečja, vendar je imel le 90 % dolgoletnih padavin. Povprečna oktobrska temperatura je bila 11,9 °C, kar je za 0,6 °C več kot običajno. Količina padavin je bila v primerjavi z dolgoročnim obdobjem večja (138 %). Opisane vremenske razmere so najverjetneje vplivale na poznejše obarvanje in odpad listov.

Drevesa 11-20, ki rastejo ob vznožju hriba na območju nekdanj naravnega bukovega gozda, so stara približno 120-150 let. Mikroskopska analiza tkiv je pokazala, da je bila kambijeva proizvodnja ter s tem diferenciacija lesa in floema sredi oktobra že zaključena (z izjemo drevesa 30). Širina zadnje branike v lesu, nastale v letu 2020, je bila pri drevesih od 0,39 do 2,34 mm. Drevo 14 je imelo najožje branike in se je spomladi olistalo zadnje,

jeseni pa se je prvo obarvalo in odvrгло liste. Drevesi 13 in 19 sta imeli v letu 2020 manjši prirastek kot v predhodnih letih, kar je morda povezano s hiranjem bukve, ki so ga opazili tudi na območju Tivolija (Ogris, 2020).

Drevesa 11-20 so imela branike floema, nastale v letu 2020, široke od 90 do 185 μm , v ranem lesu smo zabeležili 3-5 celic, v kasnem pa 1-2 celici v radialnih nizih.

Drevo 30 se je v vseh pogledih razlikovalo od ostalih opazovanih dreves (preglednica 3). To je morda zato, ker je drevo klon, ki raste v parkovnem delu Tivolija. Ima najmanjši premer, višino in starost (približno 50–60 let), najširšo zadnjo ksilemsko (9,61 mm) in floemsko (256 μm) braniko, ter najširši kasni floem (4 celice), diferenciacija lesa zadnje branike pa sredi oktobra še ni bila zaključena (slika 10). Obarvanje listov je pri tem drevesu nastopilo najkasneje. S predstavljeno študijo smo orisali razlike v jesenski fenologiji med drevesi.

SUPPLEMENT DODATEK

The supplement related to this article is available online in the Repository of the University of Ljubljana (RUL) and can be accessed through <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=122429>, and cited as Škrk et al. (2020c).

It contains detailed photos of leaf senescence in European beech (*Fagus sylvatica*) (tree 30 in this study) which is as a plant number 221 included in the long-term monitoring of the Slovenian National Phenological Network of the Environmental Agency of the Republic of Slovenia (ARSO) within the Ministry of the Environment and Spatial Planning as a part of the International Phenological Gardens of Europe.

Dodatek, povezan s tem člankom, je prosto dostopen na spletu v Repozitoriju Univerze v Ljubljani (RUL). Dostop do njega je možen preko povezave <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=122429> in se ga citira kot Škrk et al. (2020c). Dodatek vsebuje podrobne fotografije senescence listov pri navadni bukvi *Fagus sylvatica* (drevo številka 30 v tej študiji), ki je kot drevo z identifikacijsko številko 221 vključeno v dolgoletno spremljanje v okviru Slovenske nacionalne

fenološke mreže Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO) Ministrstva za okolje in prostor Republike Slovenije, ki je vključen v aktivnosti Mednarodnih fenoloških vrtov Evrope.

ACKNOWLEDGEMENTS

ZAHVALA

The study was supported by the Slovenian Research Agency (programs P4-0015 and P4-0085 and young researchers' program). Climatic and long-term phenological data were provided by the Slovenian Environment Agency (ARSO) within the Ministry of the Environment and Spatial Planning. We thank Ana Žust for her support with phenological data, as well as Paul Steed and Darja Vranjek for English and Slovene language editing, respectively.

Študijo je podprla Javna agencija za raziskovalno dejavnost republike Slovenije ARRS (programa P4-0015 in P4-0085 ter program mladih raziskovalcev). Meteorološke in dolgoletne fenološke podatke je posredovala Agencija RS za okolje (ARSO) pri Ministrstvu za okolje in prostor. Zahvaljujemo se Ani Žust za vso pomoč ter Paulu Steedu in Darji Vranjek za lektoriranje angleškega in slovenskega besedila.

REFERENCES

VIRI

- ARSO, arhiv meteoroloških podatkov. (19. 11. 2020). Retrieved from <https://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/>
- Cegnar, T. (2020). Podnebne razmere v avgustu 2020 = Climate in August 2020. *Naše okolje*, 27 (8), 115.
- Chmielewski, F.-M., Heider, S., Moryson, S., & Bruns, E. (2013). International phenological observation networks - Concept of IPG and GPM. In M. D. Schwartz (Ed.), *Phenology: An Integrative Environmental Science*, 137-153.
- Čufar, K., Prislan, P., De Luis, M., & Gričar, J. (2008). Tree-ring variation, wood formation and phenology of beech (*Fagus sylvatica*) from a representative site in Slovenia, SE Central Europe. *Trees*, 22 (6), 749-758.
- Čufar, K., de Luis, M., Saz, M. A., Črepinšek, Z., & Kajfež-Bogataj, L. (2012). Temporal shifts in leaf phenology of beech (*Fagus sylvatica*) depend on elevation. *Trees*, 26 (4), 1091-1100.
- Delpierre, N., Dufrêne, E., Soudani, K., Ulrich, E., Cecchini, S., Boé, J., & François, C. (2009). Modelling interannual and spatial variability of leaf senescence for three deciduous tree species in France. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149 (6-7), 938-948.
- Denéchére, R., Delpierre, N., Apostol, E. N., Berveiller, D., Bonne, F., Cole, ... & Vincent, G. (2019). The within-population

- variability of leaf spring and autumn phenology is influenced by temperature in temperate deciduous trees. *International Journal of Biometeorology*, 1-11.
- Doi, H., & Takahashi, M. (2008). Latitudinal patterns in the phenological responses of leaf colouring and leaf fall to climate change in Japan. *Global Ecology and Biogeography*, 17 (4), 556-561.
- Dox, I., Gričar, J., Marchand, L. J., Leys, S., Zuccarini, P., Geron, C., Prislán, P., ... & Campioli, M. (2020). Timeline of autumn phenology in temperate deciduous trees. *Tree physiology*, 40 (8), 1001-1013.
- Fu, Y. S. H., Campioli, M., Vitasse, Y., De Boeck, H. J., Van Den Berge, J., Abdelgawad, H., ... & Janssens, I. A. (2014). Variation in leaf flushing date influences autumnal senescence and next year's flushing date in two temperate tree species. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (20), 7355-7360.
- Gallinat, A. S., Primack, R. B., & Wagner, D. L. (2015). Autumn, the neglected season in climate change research. *Trends in Ecology & Evolution*, 30 (3), 169-176.
- Ibáñez, I., Primack, R. B., Miller-Rushing, A. J., Ellwood, E., Higuchi, H., Lee, S. D., Kōbori, H., & Silander, J. A. (2010). Forecasting phenology under global warming. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365 (1555), 3247-3260.
- Koch, E., Bruns, E., Chmielewski, F. M., Defila, C., Lipa, W., & Annette, M. (2009). Guidelines for Plant Phenological Observations World Climate Programme. World Climate Data and Monitoring Programme.
- Ogris, N. (2020). Hiranje navadne bukve po vsej Sloveniji 2010-2019. *Novice iz varstva gozdov*, 13, 3-7.
- Prislán, P., Gričar, J., de Luis, M., Smith, K. T., & Čufar, K. (2013a). Phenological variation in xylem and phloem formation in *Fagus sylvatica* from two contrasting sites. *Agricultural and forest meteorology*, 180, 142-151.
- Prislán, P., Čufar, K., Koch, G., Schmitt, U., & Gricar, J. (2013b). Review of cellular and subcellular changes in the cambium. *IAWA journal*, 34 (4), 391-407.
- Prislán, P., Gričar, J., & Čufar, K. (2014). Wood sample preparation for microscopic analysis. University of Ljubljana, Department of Wood Science and Technology.
- Schuster, C., Kirchner, M., Jakobi, G., & Menzel, A. (2014). Frequency of inversions affects senescence phenology of *Acer pseudoplatanus* and *Fagus sylvatica*. *International Journal of Biometeorology*, 58 (4), 485-498.
- Škrk, N., Črepinšek, Z., & Čufar, K. (2020a). Phenology of leaf development in European beech (*Fagus sylvatica*) on a site in Ljubljana, Slovenia in 2020. *Les/Wood*, 69 (1), 5-19.
- Škrk, N., Črepinšek, Z., & Čufar, K. (2020b). Phenology of leaf development in European beech (*Fagus sylvatica*) on a site in Ljubljana, Slovenia in 2020 (data), [online] Retrieved from: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=116807>
- Škrk, N., Balzano, A., Črepinšek, Z., & Čufar, K. (2020c). Inter-tree variability of autumn leaf phenology of European beech (*Fagus sylvatica*) on a site in Ljubljana, Slovenia (data), [online] Retrieved from: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=122429>
- The International Phenological Gardens of Europe. Humboldt University of Berlin. (19. 11. 2020). Retrieved from <http://ipg.hu-berlin.de>
- Žust, A. (2015). Fenologija v Sloveniji: Priročnik za fenološka opazovanja [Phenology in Slovenia: Manual for phenological observations]. Ministry of Environment, Slovenian Environment Agency, Ljubljana, Slovenia, 1-4.



WOOD IDENTIFICATION OF CHARCOAL WITH CONFOCAL LASER SCANNING MICROSCOPY

IDENTIFIKACIJA LESA OGLJA S POMOČJO KONFOKALNE LASERSKE VRSTIČNE MIKROSKOPIJE

Angela Balzano^{1*}, Katarina Čufar¹, Luka Krže¹, Maks Merela¹

UDK 630*811:62-663.8

Original scientific article / Izvirni znanstveni članek

Received / Prispelo: 5. 10. 2020

Accepted / Sprejeto: 4. 11. 2020

Abstract / Izvleček

Abstract: Wood identification of barbecue charcoal from commercial packages of three retailers (B1, B2, B3) in Slovenia and Croatia was performed with help of Confocal Laser Scanning Microscopy (CLSM). CLSM enabled us to image key identification features of charcoal wood that were compared with light micrographs of wood from the reference collection. Product B1 contained charcoal made exclusively of beech wood (*Fagus sylvatica*) and the declaration indicated the address of the producer, in Serbia which allowed traceability of the wood. The selection of wood species in product B2, consisted of red oak (*Quercus cerris* or *Q. rubra*), black locust (*Robinia pseudoacacia*), and cherry (*Prunus avium*), which could originate from Serbia, and it did not contain tropical wood as stated on the package. Product B3 contained wood from at least four (sub)tropical species which could not be exactly identified to species/genus level. The declaration on the product did not allow traceability of wood. As the risks of illegal logging are high for wood of (sub)tropical origin, our results support the initiative that the monitoring of the charcoal trade should be covered by the EUTR - European Timber Regulations.

Keywords: charcoal, confocal laser scanning microscopy (CLSM), wood anatomy, wood identification, domestic wood species, tropical wood species, illegal logging

Izvleček: Identifikacijo lesa oglja iz treh trgovin v Sloveniji in na Hrvaškem smo opravili s pomočjo konfokalne laserske vrstične mikroskopije (CLSM). Predstavili smo slike in opise ključnih znakov za identifikacijo lesa oglja in lesa iz referenčne zbirke. Izdelek B1 je vseboval oglje iz lesa bukve (*Fagus sylvatica*) in deklaracijo z natančnim naslovom proizvajalca iz Srbije, ki omogoča sledenje izvora lesa. Izdelek B2 je vseboval oglje iz lesa enega od rdečih hrastov (*Q. cerris* ali *Q. rubra*), robinije (*Robinia pseudoacacia*) in češnje (*Prunus avium*). To potrjuje, da pošiljka ne vsebuje tropskega lesa, kot je navedeno na deklaraciji in da verjetno prihaja iz Srbije. Izdelek B3 je vseboval les iz vsaj štirih (sub)tropskih lesnih vrst, ki jih ni bilo mogoče natančno določiti. Ker so tropske vrste za oglje pogosto nezakonito posekane, se pridružujemo pobudi, da bi v Evropi nadzor trgovine z ogljem morali vključiti v Uredbo EU o lesu - EUTR.

Ključne besede: oglje, konfokalna laserska vrstična mikroskopija (CLSM), anatomija lesa, identifikacija lesa, domače lesne vrste, tropske lesne vrste, nezakonita sečnja

1 INTRODUCTION

1 UVOD

Charcoal is mainly used as a solid fuel for heating. It is made through the process of carbonisation, where wood is burned in a low oxygen environment and volatile components are removed through pyrolysis. The lower the percentage of volatile components in the charcoal is, the higher its

quality because in this way charcoal burns cleaner, with little or no smoke (Oyedun et al., 2012). Wood charcoal as a source of energy has played an important role in human history. In palaeobotany it is therefore an important macrobotanical remain providing information on the past environment, plant communities, and exploitation of resources (Chabal, 1994; Asouti & Austin, 2005). In archaeology it provides information related to the use of wood by past societies, in domestic and ritual contexts (Scheel-Ybert et al., 2010) and indicators of human mobility in the landscape (Byrne et al., 2013). Charcoal from archaeological sites (Begin & Marguerie, 2002) and in natural soils is studied to

¹ University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology, Ljubljana, Slovenia

* e-mail: angela.balzano@bf.uni-lj.si

Angela Balzano, Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-6494-5850>

Katarina Čufar, Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-7403-3994>

Maks Merela, Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0001-7927-2049>

understand the economics of the fuel, which describes the relationship between humans and the forest (Marguerie & Hunot, 2006). A clear example are the studies conducted in Pompei, where the charcoal analysis was particularly focused to firewood (Coubray, 2013; Veal, 2014).

In Europe, especially large amounts of charcoal were used in pre-industrial times, before it was replaced by the massive use of coal and other sources of energy. From the worldwide perspective it still remains a crucial source of energy in many regions. According to the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), half the wood extracted from forests worldwide is used to produce energy and about 17% is converted into charcoal (FAO 2017; Haag et al., 2020; Zemke et al., 2020). In Europe, charcoal is currently mainly used for barbecues, and Germany has the biggest consumption, with over 230.000 tons in 2018. Slovenia is currently not among the big producers or consumers of charcoal, but in ancient times great amounts of beechwood charcoal were produced and used in metallurgy (Brus & Jarni, 2012; Cimperšek, 2012).

Charcoal is often sold without traceability and the country of origin is not indicated. As its trade is not yet covered by the European Timber Regulations, EUTR, (EU) No. 995/2010, it is suspected that considerable amounts of illegally cut timber from all around the world may be sold in form of charcoal. The recent study of Haag et al. (2017; 2020) examined several European countries and showed that charcoal on the market, especially products without FSC or PEFC certificates (Hansen et al., 1997), often contains timber from subtropical or tropical origin, and the declarations on the packaging were often incorrect and/or incomplete, as also confirmed by the German consumer association (Stiftung Warentest, 2019). Charcoal from illegal logging contributes to forest degradation, deforestation, desertification and soil erosion.

During charcoal production high temperatures and carbonisation modify the structure of wood (Leme et al., 2007; Zemke et al., 2020). Despite this, charcoal may preserve crucial anatomical features for wood identification, especially in case of well-known species with clear diagnostic features (Prior & Alvin, 1983, 1986; Prior & Gasson, 1993; Kwon et al., 2009; Leme et al., 2010; Gonçalves et al., 2012; Hubau et al., 2013; Haag et al., 2020; Zemke et al.,

2020). However, good knowledge of wood anatomy combined with reference collections and databases is needed for the taxonomic identification of charcoal wood. As reported in the literature, the analysis and identification of charcoal based on wood anatomy are widely applied (e.g. Scheel-Ybert, 2000; Théry-Parisot et al., 2010; Dotte-Sarout et al., 2015; Andrič et al., 2016). When wood anatomical features are not sufficiently preserved, charcoal collections are especially important source of reference material to improve identification (Zemke et al., 2020).

The identification of charcoal wood based on anatomical characteristics is thus an important way to track its origin and prevent illegal logging and black market sales. This can be of great importance for ecosystem conservation and can make an effective contribution not only to the environment but also socioeconomics, by increasing the sustainability of the charcoal production chain (Gonçalves & Scheel-Ybert, 2012).

Although charcoal identification is relatively feasible for temperate and boreal wood species, the identification of tropical and subtropical species is more complicated due to the great biodiversity and number of taxa (Haag et al., 2020).

Identification of anatomical traits in charcoal is generally made on fragments not bigger than a few centimetres (Moser et al., 2018). Reflected light microscopy is often used to the taxon. The charcoals are classically identified based on anatomical features observed under the reflected light on prepared surfaces (i.e., transverse, radial, tangential). To obtain thin sections for observation under the transmitted light, time-consuming embedding methods and advanced equipment such as sledge-, rotation- or cryo-microtome are needed (Ludemann & Nelle, 2002; Di Pasquale, 2009; Schweingruber, 2012; Beeckman et al., 2020). Scanning electron microscopy with adequate sample preparation is also used to visualise detailed anatomical traits (e.g., Boutain et al., 2010; Hubau et al., 2013). Recently, modern methods like 3D-reflected light microscopy (Zemke et al., 2020) and Confocal Laser Scanning Microscopy (CLSM) (Balzano et al., 2019; Čufar et al., 2019) have proved to be useful for obtaining three-dimensional information on the anatomical structure of wood, allowing species identification.

The main advantage of CLSM is the possibility to directly observe the surface of interest without time-consuming sample preparation, and at the same time, thanks to the 3D image acquisition, to obtain an adequately high resolution to recognise wood anatomical features.

A recent study of the quality of barbeque charcoal (Stare & Prislan, 2020) showed that 10 out of 11 products on the Slovenian market did not meet the standard for charcoal quality SIST EN 1860-2 (2005). However, Stare and Prislan (2020) do not report on wood identification.

In this article, we collected and analysed barbeque charcoal sold by three retailers in Slovenia and Croatia. We used CLSM to identify the charcoal wood and show the potential of the method for identification on fracture plains without specific sample preparation. Furthermore, we aimed to identify which wood species can be found in selected barbeque charcoal products, if the wood is of European origin or also imported from (sub)topical areas, and finally, if the selection of wood species agrees with the declarations on the commercial products.

2 MATERIALS AND METHODS

2 MATERIAL IN METODE

We randomly collected charcoal from three consignments from local retailers. We inspected the content of three bags, B1, B2 and B3, and their declaration labels (Table 1). The first product B1 was bought in a small shop for gardening products in Croatia, known for high quality products from trustworthy sources; the label reported the country of origin and exact address of the producer in Serbia. The bag B2 was bought in a small shop for chemical products in Slovenia. Its label reported the country of origin – Serbia, and declared that the product did not contain tropical wood. The third bag B3 was bought in a supermarket in Slovenia, which belongs to an international discount chain that operates thousands of stores across Europe and the United States. Its label only reported that the charcoal was made for the given chain.

We checked the content of each bag and macroscopically pre-identified wood species with help of a magnification lens and grouped the charcoal pieces which presumably belonged to the same

species. Finally, larger samples, possibly containing mature wood of the stem (avoiding twigs and juvenile wood), were selected for detailed inspection.

The samples were split with a cutter, to obtain sub-samples of typical wood anatomical surfaces (transverse, tangential and radial) (Scheel-Ybert, 2004). The sub-samples of the same charcoal piece were labelled.

The samples were put in a petri dish with table salt, and placed on the stage of the Confocal Laser Scanning Microscope (CLSM) Olympus LEXT OLS5000 (Olympus Corporation Tokyo 163-0914, Japan) (Figure 1) to observe anatomical features with the following objectives: MPLFLN5x (numerical aperture 0.15, working distance 20 mm), MPLFLN10xLEXT (numerical aperture 0.3, working distance 10.4 mm), and LMPLFLN20xLEXT (numerical aperture 0.45, working distance 6.5mm). By moving the stage in real-time, we first used the optical system to get a panoramic overview to inspect the entire surface. Then, once we detected the key identification features, high resolution laser confocal images were acquired at different focus positions using the stitching function. Measurements of the anatomical traits were performed with the OLS5000 image analysis software.

Wood identification was performed with the available identification keys and wood anatomical literature, dichotomous microscopic keys and illustrated descriptions of the species (e.g., Grosser, 1977; Schweingruber, 1978, 1990; Wagenführ, 1996, 1999; Schoch et al., 2004; Čufar & Zupančič, 2009; Signorini et al., 2014). Wood identification software such as DELTA/ INTKEY for microscopic and macroscopic identification of commercial hardwoods and CITES species (Richter & Trockenbrodt, 1995; Richter & Dallwitz, 2000; Richter et al., 2002, 2005), or programmes available online such as InsideWood (IAWA committee, 1989; InsideWood, 2004 onwards; Wheeler, 2011), and an atlas and macroscopic wood identification software package for Italian timber species (Ruffinatto et al., 2017, 2019; Ruffinatto & Crivellaro, 2019) were used. Wood samples and anatomical sections of the collection of the Department of Wood Science and Technology were used as a reference material. Reference slides were observed with a Nikon Eclipse E 800 light microscope, and the micrographs were taken with a Nikon DS-fi1 digital camera and NIS Elements Br 3.0 software.



Figure 1. Charcoal observation: (A) Confocal Laser Scanning Microscope (CLSM) Olympus LEXT OLS5000 (Olympus Corporation Tokyo 163-0914, Japan), and (B) a detailed view of charcoal sample in a petri dish with table salt placed on the stage, under the objective of 20x magnification.

Slika 1. Opazovanje oglja: (A) konfokalni laserski vrstični mikroskop (CLSM) Olympus LEXT OLS5000 (Olympus Corporation Tokyo 163-0914, Japonska) in (B) vzorec oglja v petrijevki s kuhinjsko soljo, na mizici mikroskopa pod objektivom 20-kratne povečave (podroben pogled).

3 RESULTS AND DISCUSSION

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

CLSM enabled us to observe the main wood anatomical features for precise identification of the charcoal samples. Sample preparation only took few minutes to split the charcoal and get an oriented fracture plain. It was the most challenging to obtain a clear cross-section. The 3D system of the

microscope allowed us to capture high resolution and sharp images, even if the surfaces of the samples were not completely flat. In this way we could find key features for the identification of domestic species from temperate Europe. We recorded also four (sub)tropical taxa where exact wood identification to the level of species or genus was not possible (Table 1).

Table 1. Wood identification of the investigated barbecue charcoal

Preglednica 1. Identifikacija lesnih vrst raziskanega oglja za žar

Consignment / Pošiljka	Declaration label / Navedba na embalaži	Taxon / Takson
B1 small shop for gardening products, Croatia / manjša trgovina za vrtno potrebščine, Hrvaška	produced in Serbia, producer's address known / proizvedeno v Srbiji, naslov proizvajalca znan	<i>Fagus sylvatica</i>
B2 small shop for cleaning products, Slovenia / manjša trgovina s čistili, Slovenija	distributor's address in Slovenia known, made in Serbia, no tropical wood / distributerjev naslov v Sloveniji znan, narejeno v Srbiji, ni tropski les	<i>Prunus avium</i> <i>Quercus sp.</i> <i>Robinia pseudoacacia</i>
B3 supermarket of an international discount chain, Slovenia / veleblagovnica mednarodne diskontne verige, Slovenija	made for the chain / proizvedeno za prodajno verigo	T1 (sub)tropical species / (sub)tropska vrsta T2 (sub)tropical species / (sub)tropska vrsta T3 (sub)tropical species / (sub)tropska vrsta T4 (sub)tropical species / (sub)tropska vrsta

In the following we present the wood anatomy of the investigated charcoal as observed with CLSM and images of the reference material from the collection observed with a light microscope.

3.1 EUROPEAN BEECH, *Fagus sylvatica*, FAGACEAE

3.1 NAVADNA BUKEV, *Fagus sylvatica*, FAGACEAE

The cross-section of the selected sample contains distinct growth rings and growth ring boundaries demarcated by thicker-walled fibres, rays of two distinct sizes, and larger rays noded at the growth ring boundaries. The distribution of vessels is dif-

fuse-porous to semi-ring-porous. Average tangential vessel diameter is up to 80 μm . Axial parenchyma is apotracheal, diffuse and diffuse-in-aggregates (Figure 2 A, B).

On the tangential section we can observe rays of two distinct sizes and vessels with simple perforation plates (Figure 2 C, D). Small rays are more frequent than the multiseriate ones (> 10 cells wide and commonly >1000 μm high). The radial section shows heterogeneous rays (with body ray cells procumbent and one row of square marginal cells), and vessels with simple and scalariform perforation plates (Figure 2 E, F).

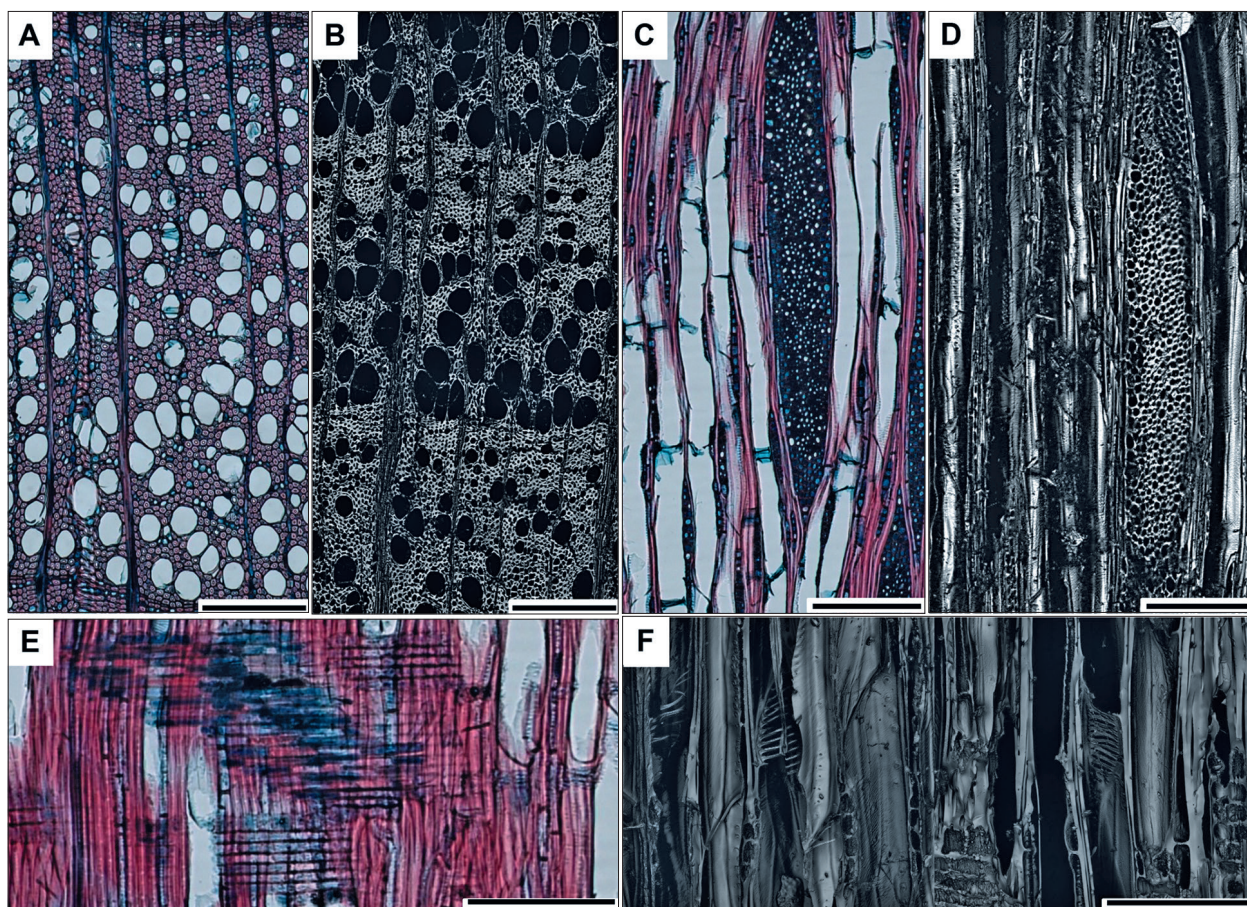


Figure 2. European beech *Fagus sylvatica* (A, C, E) wood from the collection of the Department of Wood Science and Technology, light microscopy and (B, D, F) charcoal, CLSM. (A, B) Cross-sections with diffuse-porous to semi-ring-porous distribution of vessels; (C, D) tangential section with rays of two sizes; (E, F) radial section with heterogeneous rays (body ray cells procumbent with generally one row of square marginal cells) and vessels with simple perforation plates. Scale bars = 250 μm .

Slika 2. Les navadne bukeve *Fagus sylvatica* (A, C, E) iz zbirke Oddelka za lesarstvo; svetlobna mikroskopija in (B, D, F) oglje, tehnika CLSM. (A, B) prečna prereza, difuzen do polvenčast razpored trahej; (C, D) tangencialni prerez, dve velikosti trakov; (E, F) radialni prerez s heterogenimi trakovi (celice trakov ležeče, ob robu običajno ena vrsta kvadratnih robnih celic) in traheje z enostavnimi in lestvičastimi perforacijami. Merilne daljice = 250 μm .

3.2 CHERRY, *Prunus avium*, ROSACEAE

3.2 ČEŠNJA, *Prunus avium*, ROSACEAE

The charcoal sample presents a cross-section with distinct growth ring boundaries and semi-ring-porous vessel distribution. Average tangential diameter of earlywood vessels is up to 70 μm . Fibre cell walls are of medium wall thickness. Axial parenchyma is absent or extremely rare (Figure 3 A, B). On the tangential section we can see mainly up to 4-se-

riate and 15-30 cells high rays (Figure 3 C, D). The radial section contains vessels with simple perforation plates and distinct spiral thickenings throughout the entire bodies of the vessel elements. Rays are mainly heterogenous with square cells mainly restricted to one marginal row (Figure 3 E, F). The described anatomy and good agreement with the reference material indicates that the wood belongs to cherry (*Prunus avium*) from the family Rosaceae.

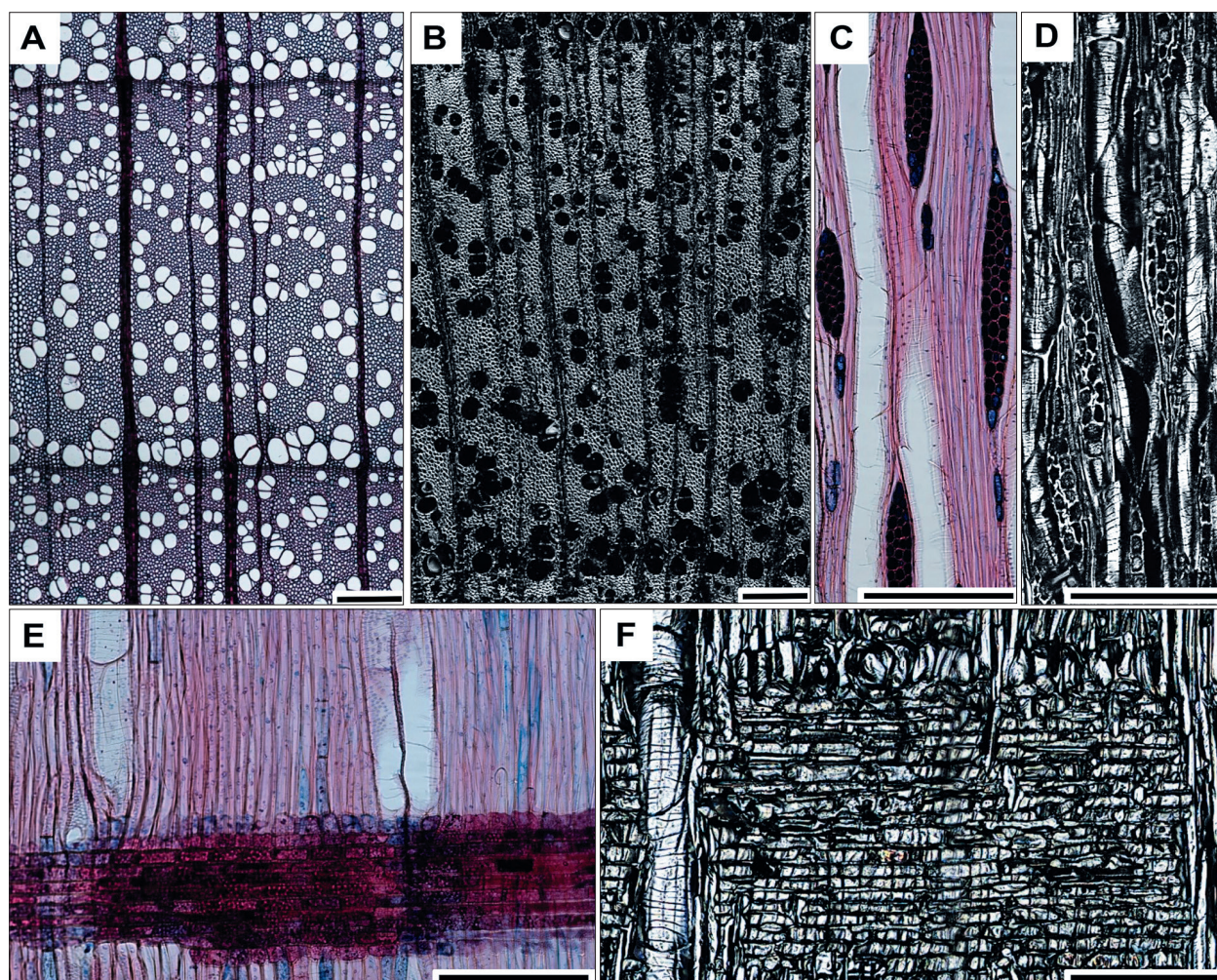


Figure 3. Cherry, *Prunus avium* (A, C, E) wood from the collection of the Department of Wood Science and Technology, light microscopy and (B, D, F) charcoal, CLSM. (A, B) Cross-section of semi-ring-porous wood, vessels solitary or in small clusters; (C, D) tangential section with mainly 3-seriate rays; (E, F) radial sections with heterogeneous rays containing one marginal row of square cells, vessels with simple perforation plates and distinct spiral thickenings. Scale bars = 250 μm .

Slika 3. Les češnje *Prunus avium* (A, C, E) iz zbirke Oddelka za lesarstvo; svetlobna mikroskopija in (B, D, F) oglje, tehnika CLSM. (A, B) prečna prereza polvenčasto poroznega lesa, traheje posamezne ali v manjših skupinah; (C, D) tangencialni prerez s pretežno 3-rednimi trakovi; (E, F) radialni prerezi s heterogenimi tračkovi, ki vsebujejo po eno robno vrsto kvadratastih celic, traheje z enostavnimi perforacijami in spiralnimi odebelitvami. Merilne daljice = 250 μm .

3.3 RED OAK, *Quercus* sp., FAGACEAE

3.3 RDEČI HRAST, *Quercus* sp., FAGACEAE

The sample is ring-porous wood, vessels are exclusively solitary and in latewood arranged in diagonal and/or radial pattern. Latewood vessels are round and thick-walled. Earlywood vessels occasionally contains thin walled tyloses. Ground tissue consists of vasicentric tracheids (around the vessels) and libriform fibres of medium cell wall thickness. Axial parenchyma is predominantly apotracheal, diffuse and diffuse-in-aggregates (Figure 4 A, B). On the tangential section we see homoge-

nous rays of two distinct sizes. They are uniseriate and multiseriate; the large rays are >10 cells wide and > 1mm high (Figure 3 C, D). Vessels have simple perforations, rays are homogeneous (Figure 3 C, D).

The described features are typical for red oaks, which are in our region (Slovenia and surrounding countries) represented by the native Turkey oak (*Q. cerris*) or by artificially introduced American red oak (*Q. rubra*). The two red oaks can be distinguished from the white oaks in the region mainly represented by the pedunculate (*Q. robur*) and sessile oak (*Q. petraea*) oak (Richter & Dallwitz, 2000; Merela & Čufar, 2013).

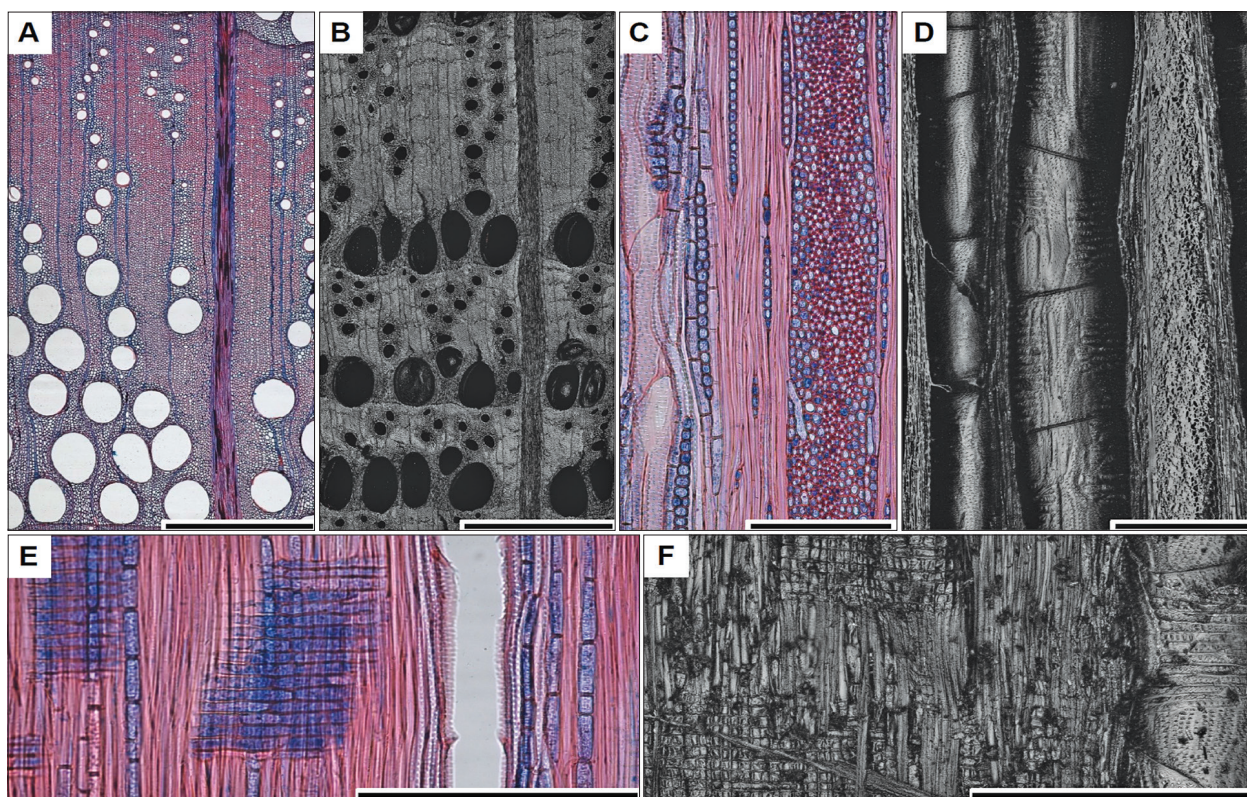


Figure 4. Red oak, Turkey oak *Quercus cerris* or American red oak *Q. rubra*. (A, C, E) wood from the collection of the Department of Wood Science and Technology, light microscopy and (B, D, F) charcoal, CLSM. (A, B) cross-sections of ring porous wood with exclusively solitary vessels. In the latewood vessels are round, thick walled, and arranged in diagonal and/or radial pattern. Earlywood vessels contain few tyloses (B), ground tissue consists of tracheids (around the vessels) and fibres. Apotracheal axial parenchyma is diffuse and diffuse-in-aggregates; (C, D) tangential section with uniseriate to very large multiseriate rays; (E, F) radial section with homogeneous rays and vessels with simple perforation plates. Scale bars = 250 µm.

Slika 4. Rdeči hrast, cer *Quercus cerris* ali ameriški rdeči hrast *Q. rubra*. (A, C, E) les iz zbirke Oddelka za lesarstvo; svetlobna mikroskopija in (B, D, F) oglje, tehnika CLSM. (A, B) prečna prereza venčasto poroznega lesa z izključno posameznimi trahejami. V kasnem lesu so traheje okrogle, debelostene in diagonalno in / ali radialno razporejene. Traheje ranega lesa vsebujejo malo til (B), osnovno tkivo je sestavljeno iz traheid (okoli trahej) in vlaken. Apotrachealni aksialni parenhim je difuzen in difuzen v agregatih; (C, D) tangencialni prerez z enorednimi in velikimi trakovi; (E, F) radialni prerez s homogenimi trakovi in traheje z enostavnimi perforacijami. Merilne daljice = 250 µm.

3.4 BLACK LOCUST, *Robinia pseudoacacia*, FABACEAE

3.4 ROBINIJA, *Robinia pseudoacacia*, FABACEAE

The wood is ring-porous with early- and especially latewood vessels arranged in clusters. Tyloses are particularly abundant in earlywood vessels. Fibres have medium thick cell walls. Axial parenchyma is paratracheal, scanty, vasicentric, and aliform

(Figure 5 A, B, C). On the tangential section we can observe 3- or 4-cell wide rays, axial parenchyma and vessel elements are storied (Figure 5 D, E, F). On the radial section we can see vessels with simple perforation plates filled with tyloses and homogeneous rays (Figure 5 G, H, I). These features helped us to identify black locust, *Robinia pseudoacacia* from the family Fabaceae-Faboideae.

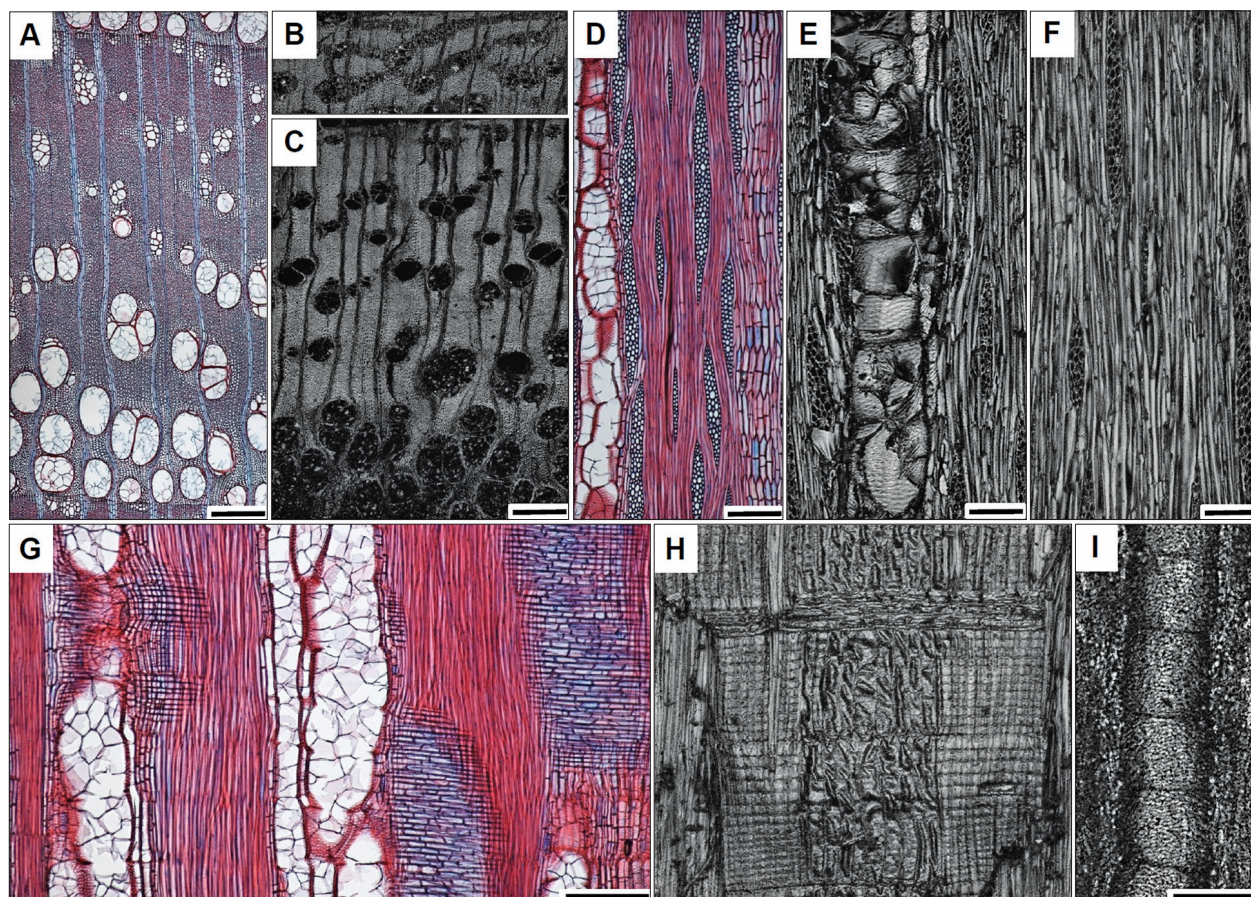


Figure 5. Black locust, *Robinia pseudoacacia* (A, D, G) wood from the collection of the Department of Wood Science of Technology, light microscopy and (B, C, E, F, H, I) charcoal, CLSM. (A, B, C) Cross-section with ring porous wood, vessels arranged in clusters, earlywood vessels contain tyloses, axial parenchyma paratracheal vasicentric and aliform; (D, E, F) tangential sections with 3 or 4 seriate rays and storied axial parenchyma (D); (G, H, I) radial sections, vessels with simple perforation plates filled with tyloses and homogeneous rays. Scale bars = 250 μ m.

Slika 5. Les robinije, *Robinia pseudoacacia* (A, D, G) iz zbirke Oddelka za lesarstvo; svetlobna mikroskopija in (B, C, E, F, H, I) oglje, tehnika CLSM. (A, B, C) prečna prereza venčasto poroznega lesa, traheje razporejene v gnezdih, traheje ranega lesa močno otiljene, aksialni parenhim paratrahealen, vasicentričen in krilast; (D, E, F) tangencialni prerezi s 3 - 4-rednimi trakovi in etažnim aksialnim parenhimom (D); (G, H, I) radialni prerezi, traheje z enostavnimi perforacijami, zapolnjene s tilami, trakovi homogeni. Merilne daljice = 250 μ m

3.5 CHARCOAL MADE OF WOOD OF TROPICAL OR SUBTROPICAL WOOD ORIGIN

3.5 OGLJE IZ LESA TROPSKEGA ALI SUBTROPSKEGA IZVORA

The B3 package of barbecue charcoal mainly contained charcoal made of wood species of (sub) tropical origin. We could recognise four different taxa (T1, T2, T3, T4) with several diagnostic features which do not appear in species of temperate or bo-

real forests. However, due to the great number and anatomical variety of subtropical or tropical species and lack of reference material, the observed fragments could not be assigned definitively to either a subtropical or tropical region. As exact identification to level of genus or species was not possible, and we only present the wood structure of four typical samples (Figures 6, 7).

In T1 and T2 we could observe all three an-

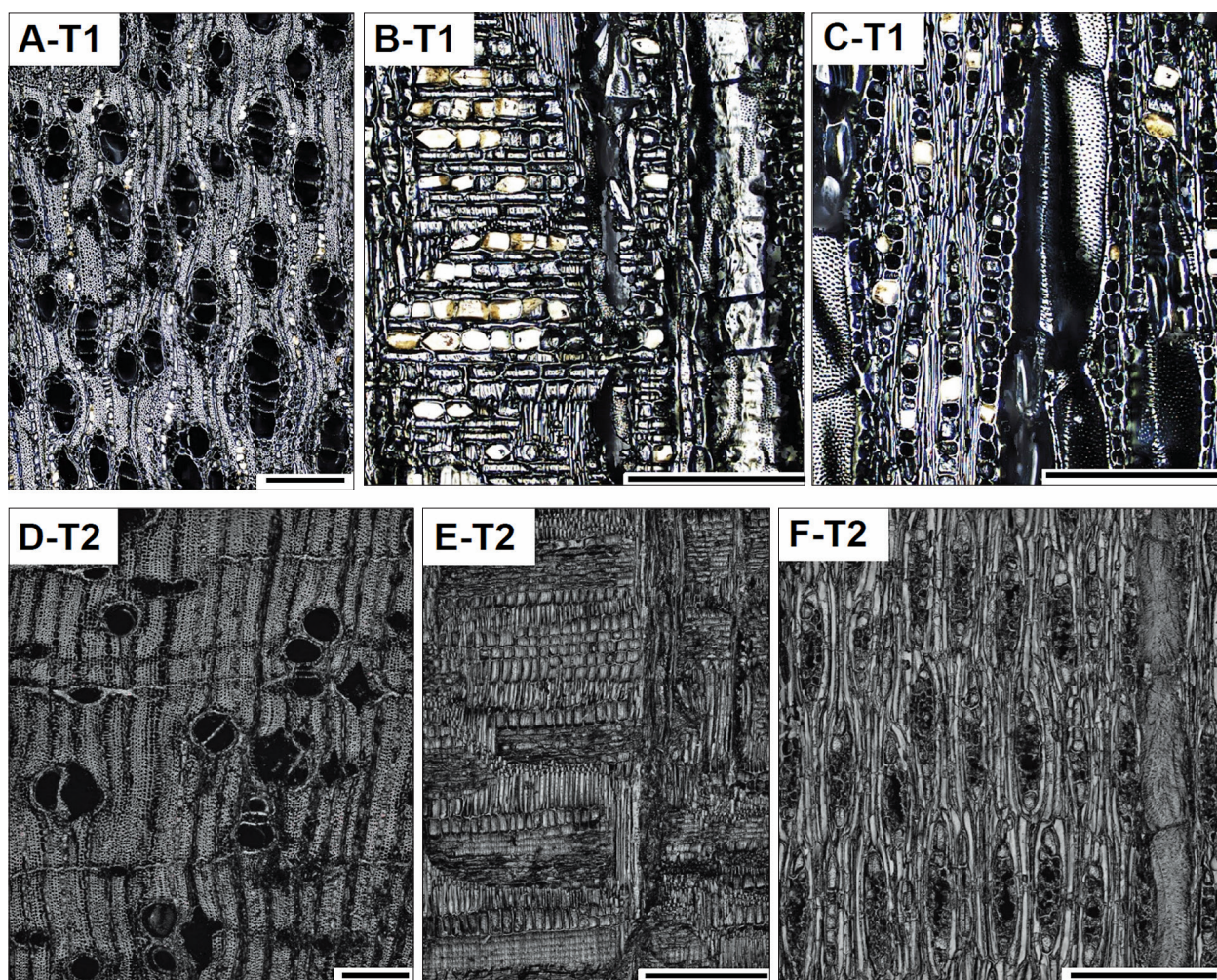


Figure 6. Diffuse porous species T1 and T2 of sub-tropical or tropical origin with diagnostically important anatomical features: (A) large vessels in radial multiples, axial parenchyma aliform, thick-walled fibres, (B) heterogeneous ray with numerous crystals and vessels with simple perforations, (C) uniseriate rays, intervessel pits alternate to opposite, (D) large vessels, axial parenchyma aliform and banded, thick-walled fibres, (E) rays heterogeneous, (F) rays and axial parenchyma storied. Scale bars = 250 μ m.

Slika 6. Difuzno porozni (sub)tropski vrsti T1 in T2 z diagnostično pomembnimi anatomskimi znaki: (A) velike traheje v radialnih skupinah, aksialni parenhim krilast, vlakna z debelimi stenami, (B) heterogeni trak s številnimi romboidnimi kristali in stiloidi, traheje z enostavnimi perforacijami, (C) enoredni trakovi, intervaskularne piknje izmenične in nasprotne, (D) velike traheje, aksialni parenhim je krilast in v pasovih, vlakna z debelimi stenami, (E) heterogeni trakovi, (F) trakovi in aksialni parenhim v etažah. Merilne daljice = 250 μ m

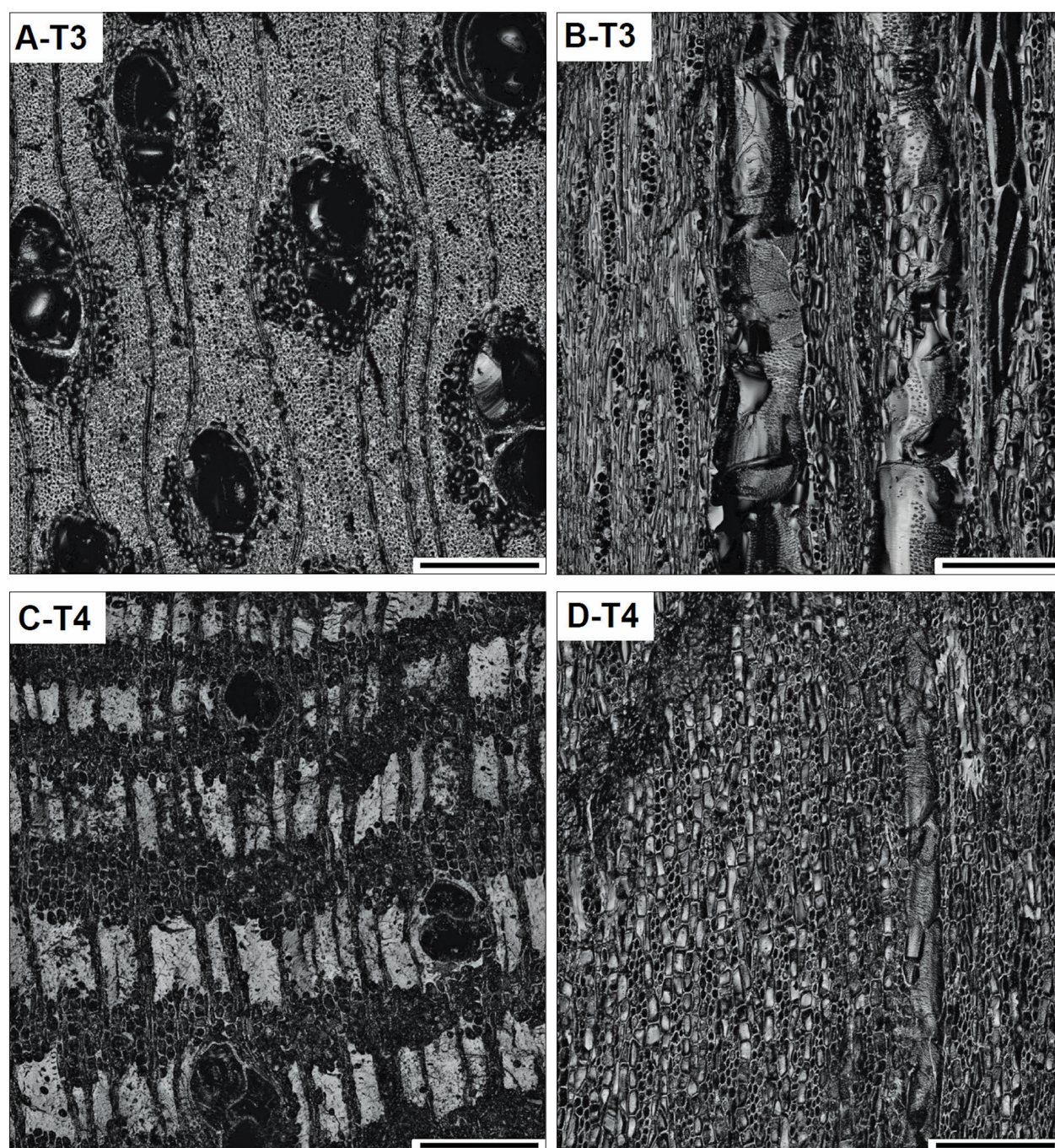


Figure 7. Species of sub-tropical or tropical origin T3 and T4 with diagnostically important anatomical features: (A) large vessels filled with tyloses, axial parenchyma aliform - lozenge, thick-walled fibres, (B) rays homogenous mainly 2 cells wide, vessels with simple perforations and intervessel pits alternate, (C) large vessels, axial parenchyma banded, bands more than 3 cells wide, fibres very thick walled, (D) rays mainly 2 or 3 cells wide. Scale bar= 250 μ m.

Slika 7. Difuzno porozni (sub)tropski vrsti T3 in T4 (sub)tropskega ali tropskega izvora z diagnostično pomembnimi anatomskimi znaki: (A) velike traheje zapolnjene s tilami, aksialni parenhim krilast – romboidne oblike, vlakna z debelimi stenami, (B) homogeni trakovi široki pretežno 2 celici, traheje z enostavnimi perforacijami in intervaskularne piknje izmenične, (C) velike traheje, aksialni parenhim v pasovih, širokih več kot 3 celice, vlakna debelostena, (D) trakovi v glavnem široki 2-3 celice. Merilne daljice = 250 μ m

atomical sections. T1 (Figure 6 A, B, C) has large vessels in radial multiples, paratracheal aliform axial parenchyma, thick-walled fibres, heterogeneous rays with numerous prismatic and elongated styloid crystals and vessels with simple perforations. Rays are uniseriate, intervessel pits are alternate to opposite.

T2 also has large vessels, axial parenchyma is paratracheal aliform and banded, fibres are thick walled, rays are heterogeneous and 2 or 3 cells wide. Rays and axial parenchyma are storied (Figure 6 D, E, F). According to the recognised features the wood resembles *Dicorynia guianensis* (Angélique, basalocus), Fabaceae-Caesalpinioideae family with geographical distribution in tropical South America.

On samples T3 and T4 we could only observe transverse and tangential surfaces. Both species are diffuse porous with large vessels and other features indicating sub-tropical or tropical origin (Figure 7). T3 has large vessels filled with tyloses, axial parenchyma aliform - lozenge, thick-walled fibres, homogenous rays are mainly 2 cells wide, vessels have simple perforations and intervessel pits alternate (Figure 7 A, B). The structure can be described as *Afzelia*-like wood type. *Afzelia* spp. (*Afzelia*, doussie), Fabaceae-Caesalpinioideae, from tropical Africa.

T4 has large vessels and banded axial parenchyma with bands more than 3 cells wide and thick-walled fibres (Figure 7 C, D). Rays are mainly 2 or 3 cells wide. The wood could be described as *Lophira alata* like type. *Lophira alata* (azobe, bongossi), Ochnaceae, grows in tropical Africa. Haag et al. (2020) described wood with similar vessel and axial parenchyma characteristics as *Millettia* type wood, however in their case the wood also had storied rays which were not found in our case.

The attribution of four hardwoods to (sub) tropical origin is assumed on a combination of typical wood anatomical features which do not appear in temperate or boreal species (e.g., diffuse distribution of very large vessels, no clear growth rings, no early- and late- wood, abundant paratracheal axial parenchyma, storied structures). Lack of features like colour, sapwood/heartwood differentiation, density, odour and potential deformation or loss of minute structures hamper more precise identification.

4 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

4 RAZPRAVA IN ZAKLJUČKI

As previously demonstrated, CLSM enables the recognition of features crucial for wood identification on various objects (Balzano et al., 2019; Čufar et al., 2019), and this study confirms that the method is also useful for identification of charcoal wood without special sample preparation.

Regarding the origin of wood species and the issue of traceability, our study shows that the charcoal from two retailers, products B1 and B2, presumably originated in Serbia. Product B1 proved to be exclusively made of beechwood, as declared by the label on the package, which also enabled traceability. Product B2 contained red oak (*Q. cerris* or *Q. rubra*), black locust (*Robinia pseudoacacia*) and cherry (*Prunus avium*). The species grow in Serbia and are not tropical, therefore the statement on the label "made in Serbia" and "no tropical wood" can be confirmed. However, the declaration did not enable traceability of wood source.

The declaration on product B3 from the big international discount supermarket chain only reported that charcoal was produced for the given chain. However, the content of at least four tropical species revealed that we were dealing with a product of the global market, where the country of wood origin is not known and the possibility of illegal logging cannot be excluded.

Charcoal is generally considered of high quality if it is dry, solid, with pieces of uniform size, does not crumble excessively, emits heat evenly and burns (or smoulders) with a small amount of smoke (Stare & Prislan, 2020). The European standard SIST EN 1860-2: 2005 defines precise criteria for the quality of charcoal for grilling and contains five key quality indicators: (1) charcoal humidity (as low as possible or $\leq 8\%$), (2) quantity of ash, (3) volatile compound content (related to the amount of smoke,) (4) the amount of bound carbon (proportional to the amount of heat energy emitted per unit weight of coal and longer and cleaner combustion), and (5) the particle size of the charcoal.

Stare and Prislan (2020) tested charcoal from 11 distributors in Slovenia and found that only the Slovenian product from the "ogljarska dežela", or "charcoal country", had adequate quality. This product is probably comparable to our B1 charcoal made of beechwood. Our product B2 contained a

lot of dust, especially because oak (due to its wood structure) typically disintegrated into lamella like particles. Our B3 was a low-price product from a big supermarket chain; another product from the same chain that was tested for charcoal quality was found not to meet the standard EN 1860-2 (2005) (Stare & Prislán, 2020).

The identification of four European and four (sub)tropical wood species and incomplete information on wood origin shown in this study are in line with the situation observed in other European countries. Therefore, the general public and professionals should be notified that wood from commercial products that is sold without proper declarations cannot be traced and may originate from illegal logging in distant areas. As such, we support the initiative that charcoal trading should be controlled and included in the corresponding annex of the EU Timber Regulation (EUTR).

5 SUMMARY

5 POVZETEK

Z uporabo laserske konfokalne vrstične mikroskopije (Confocal Laser Scanning Microscopy – CLSM) smo raziskali lesno oglje za žar. Preverili smo uporabnost metode za prepoznavanje anatomskih znakov lesnih vrst, iz katerih je oglje narejeno. Želeli smo ugotoviti, katere lesne vrste vsebuje oglje v prodaji, če je les lokalnega izvora ali uvožen in če izvira tudi iz gozdov (sub)tropskega pasu. Zanimalo nas je tudi, kakšne podatke vsebujejo navedbe (deklaracije) na proizvodih. Preverili smo pomen identifikacije lesa oglja za ugotavljanje izvora lesa in ocenili, če je tudi v Sloveniji morda naprodaj oglje iz ilegalno posekanega tropskega lesa.

Raziskali smo 3 vreče oglja iz treh trgovin. Prvi izdelek (B1) je bil kupljen v majhni trgovini z vrtnarskimi potrebščinami na Hrvaškem. Na embalaži je bil naveden točen naslov proizvajalca iz Srbije, kar omogoča sledljivost izvora lesa. Izdelek B2 smo kupili v manjši trgovini v Sloveniji. Na embalaži je bilo navedeno, da izdelek ne vsebuje tropskega lesa in da je bil narejen v Srbiji. Vreča B3 je bila kupljena v Sloveniji, v diskontni trgovini velike mednarodne verige, ki upravlja trgovine po Evropi in ZDA. Napis na embalaži je navajal samo, da je izdelek narejen za omenjeno verigo.

Oglje vsake posamezne vreče smo pregledali pod lupo. Za podrobnejši pregled smo izbrali najpri-

mernejše kose, ki so po možnosti vsebovali zrel (adulten) les debla in jih je bilo mogoče pripraviti za opazovanje zgradbe lesa na vseh treh anatomskih ravninah. Izogibali smo se lesu drobnih vej in juvenilnemu lesu. Izbrane vzorce smo razlomili ali razcepili z nožem, da smo lahko opazovali prečno, radialno in tangencialno lomno površino.

Razlomljeno oglje smo postavili v petrijevko s kuhinjsko soljo in ga pregledali s konfokalnim vrstičnim mikroskopom (Confocal Laser Scanning Microscope, CLSM) Olympus LEXT OLS5000 (Olympus Corporation Tokyo 163-0914, Japonska) z objektiv: MPLFLN5x (numerična odprtina 0,15, delovna razdalja 20 mm), MPLFLN10xLEXT (numerična odprtina 0,3, delovna razdalja 10,4 mm) in LMPLFLN20xLEXT (numerična odprtina 0,45, delovna razdalja 6,5 mm) (slika 1). S premikanjem mizice smo z optičnim sistemom najprej pridobili panoramsko sliko za pregled celotne površine. Poiskali smo ključne lesnoanatomske identifikacijske znake in s pomočjo funkcije sestavljanja slik zajeli laserske konfokalne slike visoke ločljivosti z veliko globinsko ostrino. Meritve dimenzij anatomskih znakov smo izvedli s programom za analizo slike OLS5000.

Identifikacijo lesa smo opravili s pomočjo različnih identifikacijskih ključev in specialne lesno anatomske literature (npr. Grosser, 1977; Schweingruber, 1978, 1990; Wagenführ, 1996, 1999; Schoch et al., 2004; Čufar & Zupančič, 2009; Signorini et al., 2014). Za mikroskopsko in makroskopsko identifikacijo lesa listavcev in lesnih vrst s seznama CITES smo uporabili program DELTA / INTKEY (Richter & Trockenbrodt, 1995; Richter & Dallwitz; Richter et al., 2002, 2005) in spletni računalniški ključ InsideWood (InsideWood, 2004; Wheeler, 2011), ki temelji na naboru mikroskopskih znakov za identifikacijo lesa listavcev (IAWA committee, 1989). V pomoč nam je bil tudi programski paket za makroskopsko identifikacijo lesa na italijanskem trgu (Ruffinatto et al., 2017, 2019) in atlas za makroskopsko identifikacijo lesa (Ruffinatto & Crivellaro, 2019). Kot referenčni material smo uporabili les in mikroskopske preparate iz zbirke na Oddelku za lesarstvo. Referenčne preparate smo opazovali s svetlobnim mikroskopom Nikon Eclipse E 800, mikrofotografije pa smo posneli z digitalno kamero Nikon DS-fi1 in programom za analizo slike NIS Elements Br 3.0.

Predstavljena študija je ena prvih raziskav oglja z novo mikroskopsko metodo CLSM, ki se je izkaza-

la za primerno, čeprav se zgradba lesa zaradi visokih temperatur in karbonizacije med izdelavo oglja spremeni. Domače vrste smo lahko natančno identificirali, tudi zato, ker jih dobro poznamo in imamo zanje na razpolago referenčni material. V oglju so bile zastopane tudi vrste, ki rastejo v subtropskem in tropskem pasu.

Oglje dobavitelja B1 je bilo narejeno iz lesa bukve (*Fagus sylvatica*) (slika 2, preglednica 1). Prodajalna na Hrvaškem, kjer smo ga kupili, že leta ponuja oglje istega manjšega proizvajalca iz Srbije, ki slovi po visoki kakovosti. Na embalaži je bil natančen naslov proizvajalca, kar omogoča sledljivost. Bukev je tradicionalna in najbolj cenjena vrsta za oglje v Sloveniji in širši regiji (Brus & Jarni, 2012; Cimperšek, 2012).

V vreči B2 smo identificirali les enega od rdečih hrastov, cera ali ameriškega rdečega hrasta (*Q. cerris* ali *Q. rubra*), robinije (*Robinia pseudoacacia*) in češnje (*Prunus avium*). Vse vrste, ki jih podrobno predstavljamo (slike 3, 4, 5), uspevajo tudi v Srbiji, kar je v skladu z napisom na embalaži „narejeno v Srbiji“. Napis na embalaži tudi navaja, da izdelek ne vsebuje tropskega lesa, kar smo potrdili. Na embalaži ni podatkov o proizvajalcu.

V vreči B3 iz trgovine velike mednarodne diskontne verige je bilo oglje vsaj štirih tropskih vrst neznanega izvora, na embalaži pa je bilo navedeno samo, da je izdelek narejen za omenjeno trgovsko verigo. Da gre za les (sub)tropskih vrst (slika 6, 7) smo ugotovili na osnovi znakov, ki jih naše domače vrste iz zmerno celinskega ali hladnega podnebne pasu nimajo. Preiskane (sub)tropske vrste so difuzno porozni listavci z zelo velikimi trahejami in obilnim paratrahealnim krilastim ali trakastim aksialnim parenhimom. Pri nobeni nismo zaznali jasno vidnih prirastnih plasti (branik in letnic) ter ranega ali kasnega lesa. Dve vrsti sta imeli aksialne elemente razporejene v etažah. Ugotovljeni znaki niso zadoščali, da bi natančno določili vrsto, rod ali regijo izvora, saj je nabor (sub)tropskih vrst izredno velik, lesnoanatomske razlike med vrstami in rodovi pa so pogosto majhne. Pri identifikaciji smo pogrešali znake kot so barva, razlika med beljavo in jedrovino, vonj in gostota, ki so se izgubili pri predelavi lesa v oglje. Glede na navedeno smo lahko samo navedli znane tropske vrste, ki imajo podobno zgradbo kot raziskani les.

Raziskana vrsta T1 (slika 6 A, B, C) ima diagnostično pomembne znake: velike traheje v radialnih

skupinah, aksialni parenhim krilast, vlakna z debeli mi stenami, heterogeni trakovi s številnimi romboidnimi kristali in stiloidi, traheje z enostavnimi perforacijami, enoredni trakovi, intervaskularne piknje izmenične in nasprotne.

Vrsta T2 je po naboru znakov podobna lesu vrste *Dicorynia guianensis* (Angélique, basralocus) iz družine Fabaceae-Caesalpinioideae, ki uspeva v tropski južni Ameriki. T3 ima podobno zgradbo kot vrste iz rodu *Afzelia* sp. (*afzelia*, *doussie*), Fabaceae-Caesalpinioideae iz tropske Afrike. T4 pa je podoben vrsti *Lophira alata* (*azobe*, *bongossi*), Ochnaceae iz tropske Afrike.

Pri ugotovljenem naboru lesnih vrst in popolnem pomanjkanju navedb o izvoru lesa, je B3 tipičen izdelek globalne trgovine, kjer sledljivost ni mogoča. Tovrstni izdelki so pogosto tudi slabše kakovosti, kar sta pokazala Stare in Prislan (2020), ki sta preiskala izdelek iz iste verige kot je B3 in njegova kakovost ni bila skladna s standardom EN 1860-2 (2005).

V glavnem velja, da je kakovostno oglje suho, trdno, s kosi enakomerne velikosti in se pretirano ne drobi, toploto oddaja enakomerno in gori (oziroma tli) z zelo malo dima (Stare & Prislan, 2020). Pri tem Evropski standard SIST EN 1860-2:2005 opredeljuje natančna merila za kakovost oglja za žar in navaja pet ključnih kazalnikov z vidika: (1) vlažnosti oglja (čim nižja ali $\leq 8\%$), (2) količine pepela, (3) vsebnosti hlapnih snovi (povezane s količino dima), (4) količine vezanega ogljika (sorazmerno s količino oddane toplotne energije na enoto teže oglja ter daljšim in čistejšim izgorevanjem) in (5) velikosti delcev oglja. Stare in Prislan (2020) ugotavljata, da je imelo kakovost skladno s standardom samo slovensko oglje iz oglarske dežele, ki je po naši oceni primerljivo z našim izdelkom B1. Čeprav vrsta lesa za oglje ni vključena v kriterije standarda, se v Sloveniji pričakuje, da je najboljše oglje iz bukovine. Ugotovljeni širok nabor domačih in tropskih vrst v preiskanih izdelkih s polic trgovin zato nakazuje, da bi bilo treba splošno in strokovno javnost vključno z nadzornimi službami v Sloveniji in širši regiji ozavestiti, da tudi v primeru oglja pomanjkanje sledljivosti povečuje nevarnost nedovoljene trgovine z lesom. Na osnovi ugotovitev raziskave se pridružujemo pozivom obsežnejših projektov v Evropi, da bi bilo tudi trgovino z ogljem treba nadzorovati v skladu z Uredbo EU o lesu (EUTR).

ACKNOWLEDGEMENTS

ZAHVALE

The study was supported by the Slovenian Research Agency (ARRS), program P4-0015. We thank Aleš Straže for providing us samples of barbecue charcoal as well as Paul Steed for English language editing.

REFERENCES

VIRI

- Andrič, M., Tolar, T., & Toškan, B. (2016). Okoljska arheologija in paleoekologija: palinologija, arheobotanika in arheozoologija. 1. izd. Ljubljana, Založba ZRC, ZRC SAZU.
- Asouti, E., & Austin, P. (2005). Reconstructing woodland vegetation and its exploitation by past societies, based on the analysis and interpretation of archaeological wood charcoal macro-remains. *Environmental Archaeology*, 10(1), 1-18.
- Balzano, A., Novak, K., Humar, M., & Čufar, K. (2019). Application of confocal laser scanning microscopy in dendrochronology. *Les/Wood*, 68(2), 5-17. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2019.v68n02a01>
- Beeckman, H., Blanc-Jolivet, C., Boeschoten, L., Braga, J., Cabezas, J. A., Chaix, G., Crameri, S., Degen, B., Deklerck, V., Dormontt, E., Espinoza, E., Gasson, P., Haag, V., Helmling, S., Horacek, M., Koch, G., Lancaster, C., Lens, F., Lowe, A., & Schmitz, N. (2020). Overview of current practices in data analysis for wood identification. A guide for the different timber tracking methods. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21518.79689>
- Bégin, Y., & Marguerie, D. (2002). Characterization of tree macro-remains production in a recently burned conifer forest in northern Quebec, Canada. *Plant Ecology*, 159(2), 143-152.
- Boutain, J. R., Brown, A. R., Webb, D. T., & Toyofuku, B. H. (2010). Simplified procedure for hand fracturing, identifying, and curating small macrocharcoal remains. *IAWA journal*, 31(2), 139-147.
- Brus, R., & Jarni, K. (2012). Genetska variabilnost navadne bukve v Sloveniji. In: A. Bončina (Ed.), *Bukovi gozdovi v Sloveniji: ekologija in gospodarjenje* (pp. 31-44). Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. 31-44
- Chabal, L. (1994). Apports récents de l'anthracologie à la connaissance des paysages passés: performances et limites. *Histoire & mesure*, 317-338.
- Cimperšek, M. (2012). Zgodovinski prikaz rabe bukovih gozdov. In: A. Bončina (Ed.), *Bukovi gozdovi v Sloveniji: ekologija in gospodarjenje* (pp. 293-326). Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelk za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire.
- Coubray, S. (2013). Combustibles, modes opératoires des bûchers et rituels: l'analyse anthracologique. Collection de l'Ecole française de Rome, 468, 1433-1449.
- Čufar, K., & Zupančič, M. (2009). Wood anatomy: instructions for laboratory work. Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology, 98 p.
- Čufar, K., Balzano, A., Krže, L., & Merela, M. (2019). Wood identification using non-destructive confocal laser scanning microscopy. *Les/Wood* 68(2), 19-29. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2019.v68n02a02>
- Dotte-Sarout, E., Carah, X., & Byrne, C. (2015). Not just carbon: assessment and prospects for the application of anthracology in Oceania. *Archaeology in Oceania*, 50(1), 1-22.
- European standard (2005). Appliances, solid fuels and firelighters for barbecuing Barbecue charcoal and barbecue charcoal briquettes. Requirements and test methods. BS EN 1860-2:2005.
- FAO 2017 (2017). FAOSTAT Database. Forestry production and forest trade (2017), <http://www.fao.org/faostat/en/#home>
- Gonçalves, T. A., Marcati, C. R., & Scheel-Ybert, R. (2012). The effect of carbonization on wood structure of *Dalbergia violacea*, *Stryphnodendron polyphyllum*, *Tapirira guianensis*, *Vochysia tucanorum*, and *Pouteria torta* from the Brazilian cerrado. *Iawa Journal*, 33(1), 73-90.
- Grosser, D. (1977). *Hölzer Mitteleuropas*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer, 208 p.
- Haag, V., Koch, G., & Kaschuro, S. (2017). Womit grillen wir da eigentlich? Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass viele Chargen zumindest fehlerhaft deklariert sind. *Holz Zentralblatt*, 143(38), 876.
- Haag, V., Zemke, V. T., Lewandrowski, T., Zahnen, J., Hirschberger, P., Bick, U., & Koch, G. (2020). The European charcoal trade. *IAWA Journal*, 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1163/22941932-bja10017>
- Hansen, E., Fletcher, R., Cashore, B., & McDermott, C. (1997). Forest certification. *Forest Products Journal*, 47(3), 16-22.
- Hubau, W., Van den Bulcke, J., Kitin, P., Brabant, L., Van Acker, J., & Beeckman, H. (2013). Complementary imaging techniques for charcoal examination and identification. *IAWA journal*, 34(2), 147-168.
- IAWA Committee (1989). IAWA List of microscopic features for hardwood identification. Wheeler, E. A., Baas, P., Gasson, P. E. (Eds.). *IAWA Bulletin n.s.*, 10 (3), 226-332.
- InsideWood (2004 onwards). (16.4.2018). <http://insidewood.lib.ncsu.edu>
- Kwon, S. M., Kim, N. H., & Cha, D. S. (2009). An investigation on the transition characteristics of the wood cell walls during carbonization. *Wood science and technology*, 43(5-6), 487-498.
- Leme, C. L. D., Cartwright, C., & Gasson, P. (2010). Anatomical changes to the wood of *Mimosa ophthalmocentra* and *Mimosa tenuiflora* when charred at different temperatures. *IAWA journal*, 31(3), 333-351.
- Leme, C. L. D., Gasson, P., & Cartwright, C. (2017). Anatomical changes to the wood of *Croton sonderianus* (Euphorbiaceae) when charred at different temperatures. *IAWA Journal*, 38. 117-123. DOI: <https://doi.org/10.1163/22941932-20170161>
- Ludemann, T., & Nelle, O. (2002). Die Wälder am Schauinsland und ihre Nutzung durch Bergbau und Köhlerei. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abteilung Botanik und Standortkunde, 15, Freiburg.

- Marguerie, D., & Hunot, J. Y. (2007). Charcoal analysis and dendrology: data from archaeological sites in north-western France. *Journal of archaeological science*, 34(9), 1417-1433.
- Merela, M., & Čufar, K. (2013). Density and mechanical properties of oak sapwood versus heartwood in three different oak species. *Drvna Industrija*, 64 (4): 323-334.
- Moser, D., Nelle, O., & Di Pasquale, G. (2018). Timber economy in the Roman Age: charcoal data from the key site of Herculaneum (Naples, Italy). *Archaeological and Anthropological Sciences*, 10(4), 905-921.
- Oyedun, A. O., Lam, K. L., & Hui, C. W. (2012). Charcoal production via multistage pyrolysis. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 20(3), 455-460.
- Prior, J., & Alvin, K. L. (1983). Structural changes on charring woods of *Dichrostachys* and *Salix* from southern Africa. *IAWA Journal*, 4(4), 197-206.
- Prior, J., & Alvin, K. L. (1986). Structural changes on charring woods of *Dichrostachys* and *Salix* from southern Africa: the effect of moisture content. *IAWA journal*, 7(3), 243-250.
- Prior, J., & Gasson, P. (1993). Anatomical changes on charring six African hardwoods. *Iawa Journal*, 14(1), 77-86.
- Regulation, E. T. No 995/2010 of the European Parliament and of the Council of 20 October 2010 laying down the obligations of operators who place timber and timber products on the market.
- Richter, H. G., & Trockenbrodt, M. (1995). Computer gestützte Holzartenbestimmung unter Einsatz des DELTA/INTKEY-Programmpaketes. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 53 (4), 215-219.
- Richter, H. G., & Dallwitz, M. J. (2000 onwards). Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval. In English, French, German, Portuguese and Spanish. Version: May 2000.
- Richter, H. G., Oelker, M., & Krämer, G. (2002): macroHOLZdata – Computer-gestützte makroskopische Holzartenbestimmung sowie Informationen zu Eigenschaften und Verwendung von Nutzhölzern. CD-ROM, Holzfachschule Bad Wildungen, Selbstverlag.
- Richter, H., G., Gembruch, K., & Koch, G. (2005). CITESwoodID – Innovative medium for education, information and identification of CITES protected trade timbers. CD-ROM. Federal Agency for Nature Conservation (BfN) and Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH), self-published.
- Ruffinatto, F., Cremonini, C., & Zanuttini, R. (2017). *Atlante dei principali legni presenti in Italia*. Torino, 102 p.
- Ruffinatto, F., & Crivellaro, A. (2019). *Atlas of macroscopic wood identification, with a special focus on timbers used in Europe and CITES-listed species*. Springer Nature Switzerland AG.
- Ruffinatto, F., Castro, G., Cremonini, C., Crivellaro, A., & Zanuttini, R. (2019). A new atlas and macroscopic wood identification software package for Italian timber species. *IAWA Journal*, 1-19.
- Scheel-Ybert, R. (2000). Vegetation stability in the Southeastern Brazilian coastal area from 5500 to 1400 14C yr BP deduced from charcoal analysis. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 110(1-2), 111-138.
- Scheel-Ybert, R. (2004). Teoria e métodos em antracologia. 1. Considerações teóricas e perspectivas. *Arquivos do Museu Nacional*, 62(1), 3-14.
- Scheel-Ybert, R., Caromaro, C. F., Cascon, L. M., Bianchini, G. F., Beaulclair, M., Pereira, E., & Guapindaia, V. B. (2010). Estudos de paleoetnobotânica, paleoambiente e paisagem na Amazônia Central eo exemplo do sudeste-sul do Brasil. *Arqueologia Amazônica*, 2, 909-935.
- Schoch, W., Heller, I., Schweingruber, F. H., & Kienast, F. (2004). Wood anatomy of central European Species. Online version: www.woodanatomy.ch
- Schweingruber, F. H. (1978). *Microscopic Wood Anatomy*, Swiss Federal Institute of Forestry Research, Birmensdorf, 226 p.
- Schweingruber, F. H. (1990). *Anatomy of European Woods*, WSL/FNP, Paul Haupt, Bern, Stuttgart, 800 p.
- Schweingruber, F. H. (2012). Microtome Sections of Charcoal: –Technical Note–. *IAWA journal*, 33(3), 327-328.
- Signorini, G., Giulio, G., & Fioravanti, M. (2014). *Il Legno nei Beni Culturali – guida alla determinazione delle specie legnose*. 344 p.
- SIST (2005). *Naprave, trdna goriva in naprave za vžiganje žara - 2. del: Lesno oglje in briketi lesnega oglja za žar - Zahteve in prekusne metode*. SIST EN 1860-2:2005.
- Stare, D., & Prislan, P. (2020). Lesno oglje za žar. (16.9.2020). <http://wcm.gozdis.si/lesno-oglje-za-zar>
- Stiftung Warentest 2019. Grillkohle. (3. 11. 2020). <https://www.test.de/Grillkohle-CSR-Test-5474364-0/>
- Théry-Parisot, I., Chabal, L., & Chrzavetz, J. (2010). Anthracology and taphonomy, from wood gathering to charcoal analysis. A review of the taphonomic processes modifying charcoal assemblages, in archaeological contexts. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 291(1-2), 142-153.
- Veal, R. (2014). Pompeii and its Hinterland connection: The fuel consumption of the house of the vestals (c. Third Century BC to AD 79). *European Journal of Archaeology*, 17(1), 27-44.
- Wagenführ, R. (1996). *Holzatlas*. Leipzig, Fachbuchverlag: 688 p.
- Wagenführ, R. (1999). *Anatomie des Holzes*. Stuttgart, DRW Verlag: 188 p.
- Wheeler, E. A. (2011). InsideWood – A Web resource for hard wood anatomy. *IAWA Journal*, 32 (2), 199–211.
- Zemke, V. T., & Haag, V. (2020). Wood identification of charcoal with 3D-reflected light microscopy. *IAWA Journal*, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1163/22941932-bja10033>



BARVILA ZA LES IZ TUJERODNIH INVAZIVNIH RASTLIN

WOOD DYES FROM INVASIVE ALIEN PLANTS

Monika Horvat¹, Jernej Iskra^{1*}, Matjaž Pavlič², Jure Žigon², Maks Merela^{2*}

UDK 630*829.1:667.74:581.96

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Prispelo / Received: 12. 11. 2020

Sprejeto / Accepted: 4. 12. 2020

Abstract / Izvleček

Izvleček: Cilj raziskave je bil pripraviti različne tipe premazov na osnovi naravnih barvil, pridobljenih iz invazivnih tujerodnih rastlin ter iz ostankov proizvodnje papirja. Kot vir barvil smo uporabili ekstrakte iz octovca, japonskega dresnika, žlezave nedotike ter kanadske in orjaške zlate rozge. Podlaga za premaze sta bila les velikega pajesena in les navadnega divjega kostanja. Premaze smo opazovali vizualno, hidrofbnost premazanih površin pa ugotavljali z metodo merjenja stičnih kotov kapljic vode. Poleg prozornih in rjavo obarvanih premazov smo dosegli tudi intenzivna obarvanja, od rdeče, rumene, zelene, rjave do vijolične barve. S kombinacijo različnih komponent so se spreminjale hidrofbne lastnosti premazanih površin. Uspelo nam je pridobiti premaz z izrazito hidrofbnostjo, in sicer iz kombinacije ekstrakta iz cvetov orjaške zlate rozge in 3-(trietoksisilil)propil izocianata.

V okviru raziskave je bil razvit postopek za pripravo barvnih ter transparentnih hidrofbnih premazov. S prisotnimi različnimi silanskimi molekulami in z aplikacijo premazov na površine lesov smo tako spremenili njihov izgled in izboljšali njihovo hidrofbnost.

Ključne besede: Invazivne tujerodne rastline, naravna barvila, japonski dresnik, octovec, žlezava nedotika, kanadska zlata rozga, orjaška zlata rozga

Abstract: The aim of the study was to produce different types of coatings based on natural dyes obtained from invasive alien plant species and residues after paper production. As a source of dye we used extracts of *Rhus typhina*, Japanese knotweed, Himalayan balsam and Canadian and giant goldenrod. The substrates for the application of the coating were the wood of the tree of heaven and the wood of the horse chestnut. The coatings were observed visually, and the hydrophobicity of the coated surfaces was determined by measuring the contact angles of water droplets. In addition to the transparent and brown coloured coatings, we also achieved intense red, yellow, green, and brown and purple colourings. With a combination of different components, the hydrophobic properties of the coated surfaces varied. By combining an extract of giant goldenrod flowers and 3-(triethoxysilyl)propyl isocyanate, we succeeded in producing a coating with pronounced hydrophobicity.

A process for the production of coloured and transparent hydrophobic coatings was developed in this research. Through the presence of various silane-containing molecules and the application of the coating to wooden surfaces, we changed their appearance and improved their hydrophobicity.

Keywords: Invasive alien plants, natural dyes, Japanese knotweed, staghorn sumac, Himalayan balsam, Canadian goldenrod, giant goldenrod

1 UVOD

1 INTRODUCTION

V današnjem času se vse več pozornosti usmerja k pridobivanju materialov, spojin in uporabnih kemikalij iz naravnih virov. Pri izkoriščanju naravnih virov je potrebno upoštevati, da pri njihovem izrab-

ljanju ne uporabljamo surovin, ki lahko predstavljajo vir hrane. Z izkoriščanjem surovin ne smemo negativno vplivati na ekosisteme. Prav tako moramo ravnati trajnostno in zagotavljati, da izkoriščen material stalno zagotavlja potreben vir rastlinske biomase v naravi. Invazivne tujerodne rastline (ITR) so rastline, ki so vnesene na določeno območje, kjer prej niso uspevale. Vnesene so lahko s človekovim posrednim ali neposrednim vplivom. S svojim razraščanjem in razmnoževanjem povzročajo gospodarsko škodo, so škodljive za zdravje ljudi, prav tako pa povzročajo škodo v naravi. Znano je, da ogrožajo habitate, so vzrok

¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Večna pot 113, 1000 Ljubljana, SLO

* e-mail: jernej.iskra@fkkt.uni-lj.si

² Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, SLO

* e-mail: maks.merela@bf.uni-lj.si

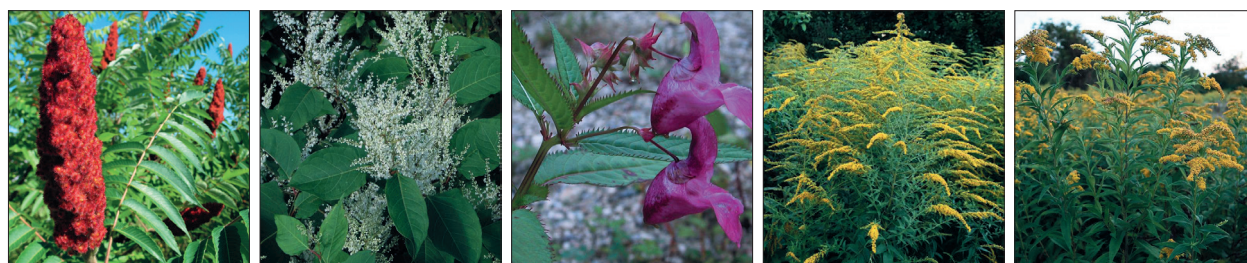
za upad biodiverzitete in tudi za rušenje ravnovesij v ekosistemi (Kumar Rai & Singh, 2020). ITR vedno večji problem postajajo tudi v Sloveniji in jih je zato na določenih območjih potrebno načrtno odstranjevati (Strgulc-Krajšek et al., 2016). Kot takšne predstavljajo dober vir biomase z uporabno vrednostjo. S to tematiko se srečujejo raziskovalci na projektu APPLAUSE (<https://www.ljubljana.si/sl/moja-ljubljana/applause/>). V okviru naše raziskave smo se osredotočili na naslednje tujerodne in invazivne rastline: octovec (*Rhus typhina* L.) / ang. staghorn sumac, japonski dresnik (*Fallopia japonica* (Houtt.) Ronse Decr.) / angl. japanese knotweed, žlezava nedotika (*Impatiens glandulifera* Royle.) / angl. Himalayan balsam, kanadska zlata rozga (*Solidago canadensis* L.) / angl. Canadian goldenrod ter orjaška zlata rozga (*Solidago gigantea* L.) / angl. Giant goldenrod.

Biomasa v splošnem sestavljajo celuloza, hemiceluloza, lignin ter sekundarni metaboliti, kot so jedrovinske snovi, ekstraktivi, čreslovine, tanini itd. Delež posameznih podenot je odvisen tako od rastlinskega materiala kot tudi od rastlinske vrste. S procesom delignifikacije se iz biomase pridobijo celulozna vlakna, ki so uporabna za proizvodnjo papirja. Tekom delignifikacije pa, kot odpadni material, nastaja tudi ligninska lužnica. Le-ta je sestavljena v večini iz lignina in sladkorjev. Lignin je makromolekula, ki predstavlja edini trajnostni vir aromатов v naravi, sladkorji pa se lahko uporabijo za mikrobiološko pretvorbo do polihidroksialkanoatov (PHA) (Bugnicourt et al., 2014; Klapiszewski et al., 2018). Sekundarni metaboliti so prav tako pomemben del biomase, ki med drugim predstavljajo vir različnih strukturnih tipov naravnih barvil. V zadnjem času vse bolj narašča zanimanje za uporabo naravnih produktov. Mednje spadajo tudi naravna barvila,

ki so vse bolj zaželeni, saj so okolju prijazna, biorazgradljiva in enostavna za uporabo. Rastlinska barvila so enostavno dostopna iz različnih delov biomase. Uporabna so v številnih panogah, kot so barvanje tekstilnega materiala ter v prehrabni, farmacevtski in kozmetični industriji (Nambela et al., 2020; Yusuf et al., 2017).

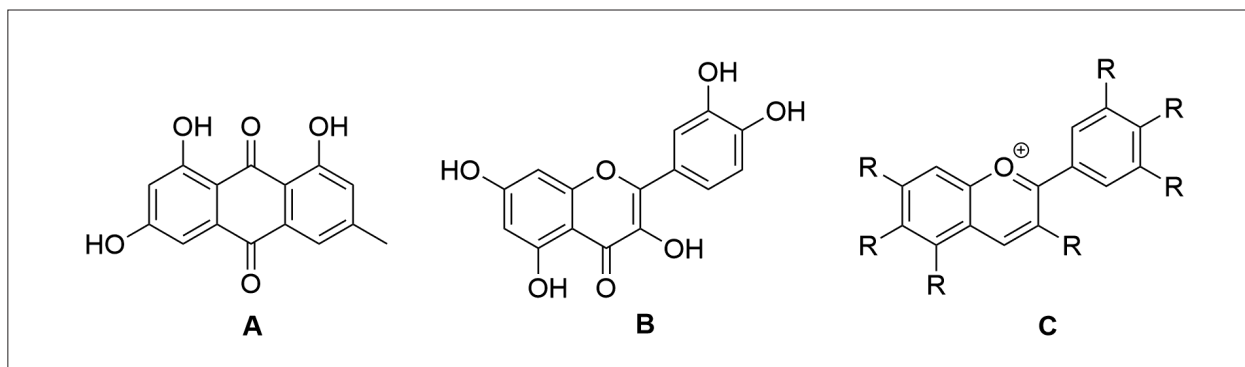
Japonski dresnik predstavlja bogat vir antrakinonskega derivata emodina, ki je biološko aktivna spojina ter naravno rumeno barvilo (Bechtold, 2009). Za antrakinone je značilno, da so v osnovni obliki obarvani rumeno, s kemijsko modifikacijo pa lahko vplivamo na njihovo obarvanost ter na kemijske in fizikalne lastnosti (Gordon & Gregory, 1987). Cvetovi domorodne zlate rozge vsebujejo rumeno flavonoidno barvilo kvercetin, ki je biološko pomembna spojina (Toiu et al., 2019). S kemijsko modifikacijo njegove strukture lahko načrtno vplivamo na njegove lastnosti in obarvanost (Castañeda-Ovando et al., 2009; Flamini et al., 2013). Barvilo v temno rdečih plodovih octovca je antocianskega tipa (Wang & Zhu, 2017; Wu et al., 2013). Manj pa je znanega o vsebnosti flavonoidov v cvetovih žlezave nedotike. V cvetovih iz rodu *Impatiens* je pestra mešanica flavonoidov, antocianinov, kumarinov in kinonov, ki obarvajo cvetne liste vijolično (Vieira et al., 2016).

Modifikacija površin naravnih materialov, kot je na primer les, je zaželena z vidika zaščite materiala pred zunanjimi vplivi, z vidika spreminjanja izgleda, izboljšanja njihovih lastnosti ter tudi zaradi možnosti dodatnega vnosa novih funkcionalnosti. Za dodatke, ki tvorijo premaze silanskega tipa, je značilno, da se lahko dobro vežejo na različne materiale. Naknadna vezava naravnih barvil iz invazivnih tujerodnih rastlin na les predstavlja novo področje njihove uporabe. Organo-silanski dodatki so zanimivi



Slika 1. Invazivne tujerodne rastline (od leve proti desni: octovec, japonski dresnik, žlezava nedotika, kanadska zlata rozga, orjaška zlata rozga) (Strgulc-Krajšek et al., 2016).

Figure 1. Invasive alien plants (left to right: staghorn sumac, Japanese knotweed, Himalayan balsam, Canadian goldenrod and giant goldenrod).



Slika 2. Struktura emodina (A, japonski dresnik), kvercetina (B, zlata rozga) in antocijanina (C, octovec).

Figure 2. Structure of emodine (A, Japanese knotweed), quercetin (B, Canadian goldenrod,) and anthocyanin (C, staghorn sumac).

zaradi možnosti izboljšanja lastnosti premazom ter možnosti vključitve dodatnih funkcionalnosti, kot je na primer hidrofbnost. Organo-silanski premazi omogočajo naknadno vezavo ekstraktivov, lignina ter tudi polihidroksialkanoatov, ki se lahko pridobijo z mikrobiološko pretvorbo sladkorjev, ki so (tako kot lignin), odpadek pri proizvodnji papirja. Njihove lastnosti omogočajo pripravo kakovostnih premazov za zaščito pred mikroorganizmi, vlago ter tudi korozijo (Carlos de Haro et al., 2019; Khan et al., 2019).

V okviru projekta APPLAUSE, »Od škodljivih do uporabnih tujerodnih rastlin z aktivnim vključevanjem prebivalcev«, ki ga financira Evropska skupnost preko programa Urban Innovative Actions, se ukvarjamo s pretvorbo invazivnih tujerodnih rastlin v koristne namene. Na Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo smo se pri študiji osredotočili na naravna barvila iz octovca, japonskega dresnika, žlezave nedotike ter kanadske in orjaške zlate rozge ter na ostanke, ki nastanejo pri proizvodnji papirja (lignin in PHA). Naravna barvila, lignin in PHA smo skušali inkorporirati v prevleke silanskega tipa. Osredotočili smo se na pripravo barvnih premazov, ki imajo dodatne funkcionalnosti kot sta antimikrobna in hidrofbnost. Za nanos pripravljenih premazov smo izbrali les ene difuzne in les ene venčasto porozne tujerodne lesne vrste.

2 MATERIALI IN METODE

2 MATERIALS AND METHODS

Za podlage nanosa premazov smo na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete pripravili les dveh tujerodnih vrst, in sicer les velikega pajesena (*Ai-*

lanthus altissima (Mill.) Swingle) in les navadnega divjega kostanja (*Aesculus hippocastanum* L.). Kot vir barvil smo na Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo uporabili ekstrakte iz plodov octovca, korenin in listov japonskega dresnika, cvetov žlezave nedotike ter plodov orjaške in kanadske zlate rozge. Vzorce plodov, listov in korenin (nabranih na območju Mestne občine Ljubljana) sta nam dobavila partnerja projekta APPLAUSE (podjetji Tisa d.o.o. in JP VOKASNAGA d.o.o.). Vsi pridobljeni vzorci predstavljajo odpadni vir biomase, ki so jo pridobili pri urejanju zelenih površin. Korenike japonskega dresnika smo predhodno zmleli v frakcije nivoja velikosti 1 mm, liste smo posušili, plodove rastlin pa ločili od stebel ter jih uporabili sveže. Kemikalije (lignin, ϵ -kaprolakton, TEPI (3-(trietoksisilil)propil izocianat), TMOS (trimetoksi(oktadecil)silan), HCl (klorovodikovo kislino) in THF (tetrahidrofuran) smo pridobili od podjetij Sigma Aldrich in Fluorochem.

2.1 IZOLACIJA BARVIL

2.1 ISOLATION OF DYES

Zmlete korenike japonskega dresnika smo 24 h mešali na magnetnem mešalu pri sobni temperaturi v diklorometanu. Po pretečenem času smo korenike filtrirali, topilo pa uparili na rotavaporju pod znižanim tlakom ter tako pridobili intenzivno rumeno barvilo. Posušene liste japonskega dresnika smo pri sobni temperaturi 24 h mešali v etanolu ter jih zatem filtrirali. Tekoči preostanek smo skoncentrirali pod znižanim tlakom na rotavaporju ter izolirali zeleno barvilo. Plodove octovca in cvetove žlezave nedotike smo naprej ločili od stebel, nato pa jih čez noč pri sobni temperaturi ekstrahirali v etanolu z

dodatkom HCl. Po 24 h smo plodove filtrirali, preostanek pa skoncentrirali pri znižanem tlaku. V primeru octovca smo pridobili intenzivno rdeče naravno barvilo, v primeru žlezave nedotike pa vijolično. Tako cvetove kanadske kot orjaške zlate rozge smo ekstrahirali v acetonu pri sobni temperaturi. Po 24 h smo plodove odstranili ter preostanek posušili pod znižanim tlakom, s čimer smo pridobili svetlo rumeno barvilo. Barvili kanadske in orjaške zlate rozge sta bili na videz podobni.

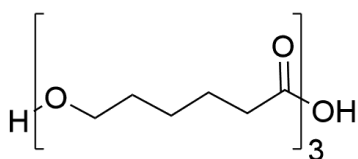
2.2 PRIPRAVA BARVNIH PREMAZOV ZA LES

2.2 PREPARATION OF COATINGS FOR WOOD

Pripravili smo šest različnih tipov premazov silanskega tipa na osnovi barvil, PHA in lignina.

Sinteza PHA:

PHA smo pripravili iz komercialno dostopnega ϵ -kaprolaktona. ϵ -kaprolaktonu (1 mmol) v THF (1 mL) smo dodali HCl (100 μ L) in mešali 24 h pri sobni temperaturi. Tako pripravljeno raztopino smo v nadaljevanju uporabili za pripravo premazov. Spodnja shema 1 prikazuje strukturo pripravljenega PHA.



Shema 1. Struktura PHA

Scheme 1. Structure of PHA.

Sinteza premazov:

- Tip B:** 20 mg barvila in 0,1 mmol TEPI smo raztopili v 1 mL THF ter mešali 24 h pri sobni temperaturi.
- Tip B-PHA:** 20 mg barvila in 0,1 mmol TEPI smo raztopili v 1 mL THF ter mešali 24 h pri sobni temperaturi. Raztopino barvila in predhodno pripravljeno raztopino PHA smo združili ter mešali čez noč pri sobni temperaturi.
- Tip B-lig:** 20 mg barvila in 0,1 mmol TEPI smo raztopili v 1 mL THF ter mešali 24 h pri sobni temperaturi. Po pretečenem času smo dodali 30 mg lignina, HCl (0,1 mmol) ter TMOS (0,1 mmol). Reakcijsko zmes smo mešali 24 h.
- Tip B-PHA-lig:** 20 mg barvila in 0,1 mmol TEPI smo raztopili v 1 mL THF ter mešali 24 h pri sobni temperaturi. Raztopini barvila in PHA smo združili, dodali 30 mg lignina, HCl (0,1

mmol) ter TMOS (0,1 mmol). Končen premaz smo pridobili s 24-urnim mešanjem reakcijske zmesi pri sobni temperaturi.

2.3 PRIPRAVA LESENIH PODLAG

2.3 PREPARATION OF THE WOODEN SUBSTRATES

Pri izbiri podlag je bilo osnovno vodilo uporabiti les tujerodne vrste in hkrati izbrati eno vrsto z velikimi venčasto razporejenimi porami ter vrsto z manjšimi difuzno razporejenimi porami. Veliki pajesen ima izmed obravnavanih vrst največje pore in spada v skupino venčasto poroznih vrst z grobo teksturo, navadni divji kostanj pa predstavlja difuzno porozno vrsto in z majhnimi porami spada v skupino lesov s fino teksturo (Torelli, 1998). Drevesa so bila posekana v okviru aktivnosti projekta APPLAUSE. Primarno razžagovanje sveže posekanih hlodov je bilo izvedeno na manjši zasebni žagi (Kumše, Ig). Les je bil prepeljan na skladišče JP VOKASNAGA, kjer se je sušil na prostem od decembra 2019 do marca 2020. Tehnično sušenje lesa je potekalo v sušilnici Oddelka za lesarstvo na končno vlažnost lesa 8 %. Sušilne karakteristike so podrobno opisane v prispevku Plavčaka in sodelavcev (Plavčak et al., 2019). Vzorci lesa za nanos premazov so bili pripravljene v mizarski delavnici Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete. Na miznem krožnem žagalnem stroju smo razžagali deske na končne dimenzije, površina lesa je bila finalno obdelana na debelinskem skobeljnem stroju ter pobrušena z vibracijskim brusilnikom s papirji granulacij 120, 160, 180 in 220 (slika 3).

2.4 NANOS PREMAZOV NA POVRŠINO LESOV

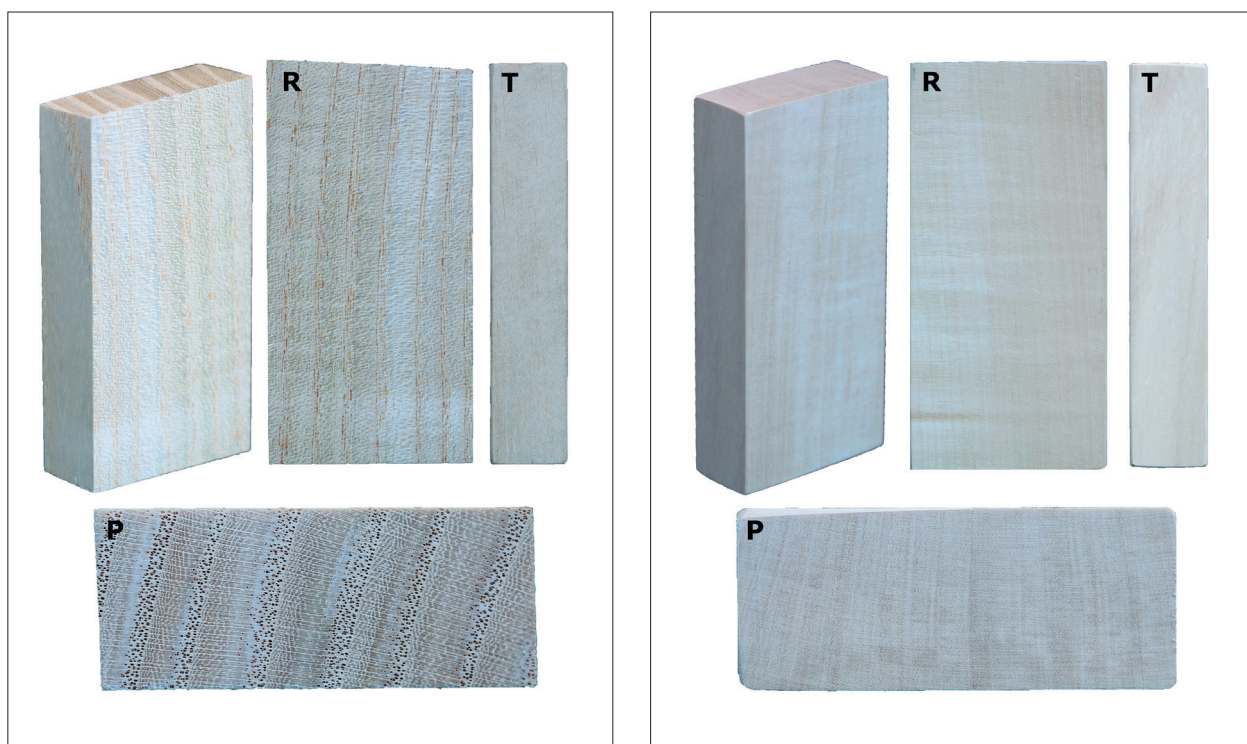
2.4 APPLICATION OF COATINGS ON THE WOOD SURFACES

Les velikega pajesena in navadnega divjega kostanja smo pobarvali s premazi tipa B, B-PHA, B-lig ter B-PHA-lig brez vsebnosti barvila ter v prisotnosti vseh šestih naravnih barvil. Premaze smo na les nanесли s čopičem ter jih pri sobni temperaturi na zraku sušili 48 h (slika 4).

2.5 ANALIZA PREMAZANIH POVRŠIN

2.5 ANALYSIS OF COATED SURFACES

Posušene premaze smo opazovali ter po barvi in intenziteti odtenkov ocenjevali vizualno, hidrofbnost premazanih površin pa smo določali na optičnem tenziometru - Attension theta lite (Biolin scientific, Espoo, Finska) na Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo.



Slika 3. Izgled površin lesa velikega pajesena (slika levo) in navadnega divjega kostanja (slika desno). (P – prečni prerez, R – radialni prerez, T – tangencialni prerez).

Figure 3. Appearance of the wood surfaces of Chinese sumac (left figure) and horse chestnut (right figure). (P – cross section, R – radial section and T – tangential section).



Slika 4. Vzorci lesa navadnega divjega kostanja (zgornja polovica vzorcev) in velikega pajesena (spodnja polovica vzorcev), ki so premazani z različnimi barvili iz invazivnih tujerodnih vrst.

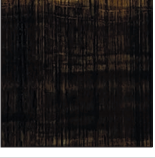
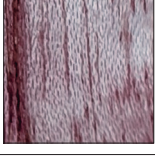
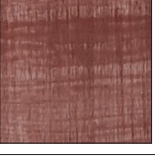
Figure 4. Wood samples of horse chestnut (upper half of the samples) and Chinese sumac (bottom half of the samples) coated with various dyes from invasive alien species.

3 REZULTATI IN RAZPRAVA 3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 BARVNI PREMАЗI 3.1 COLOURED COATINGS

Premazi tipov B, B-PHA, B-lig in B-PHA-lig brez prisotnosti barvila ter s prisotnostjo barvil iz ITR na lesu velikega pajesena so prikazani na sliki 5. Po-

vršine lesa, premazane s silanskimi premazi brez prisotnosti barvila, imajo barvo naravnega lesa, le v primeru premaza B-lig in premaza B-PHA-lig je odtenek barve lesa nekoliko temnejši. Temnejši odtenek pripisujemo prisotnosti lignina, ki je temno rjav. Premazi, ki smo jim dodali naravna barvila, dajejo površinam lesa intenzivno obarvanje, od

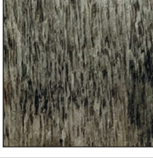
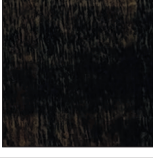
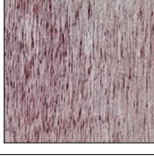
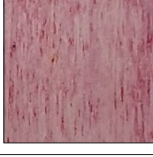
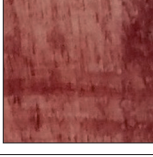
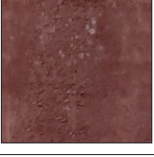
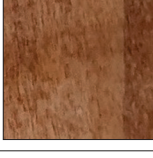
	B	B-PHA	B-lig	B-PHA-lig
Brez barvila / No dye				
octovec (plodovi) / staghorn sumac (fruits)				
japonski dresnik (korenike) / Japanese knotweed (rhizome)				
japonski dresnik (listi) / Japanese knotweed (leaves)				
žlezava nedotika (cvetovi) / Himalayan balsam (flowers)				
orjaška zlata rozga (cvetovi) / giant goldenrod (flowers)				
Kanadska zlata rozga (cvetovi) / Canadian goldenrod (flowers)				

Slika 5. Barvni premazi iz invazivnih tujerodnih vrst na lesu velikega pajesena. Prikazane površine lesa so dimenzij 2×2 cm.

Figure 5. Coloured coatings from invasive alien species on Chinese sumac wood. The wood surfaces dimensions shown are 2×2 cm.

rdeče, rumene, zelene, rjave do vijolične. Barvilo octovca je temno rdeče barve, kot lahko vidimo v primeru premaza tipa B. Ob prisotnosti PHA-jev in lignina v premazu nanos izgubi rdečo barvo, zato so ti premazi kljub prisotnemu barvilu octovca rjavi. Intenzivno rumene premaze smo pripravili na osnovi barvila iz korenin japonskega dresnika. Vsi

tipi premazov dajo površinam lesov intenzivno rumeno obarvanje. Zeleno barvilo, pridobljeno iz listov japonskega dresnika, omogoča pripravo zelenih premazov. Naravno barvilo iz žlezave nedotike je intenzivno vijolične barve. Z njegovim dodatkom smo pripravili vijolične premaze, ki se dobro vežejo na les velikega pajesena. Premazi iz plodov kanadske

	B	B-PHA	B-lig	B-PHA-lig
Brez barvila / No dye				
octovec (plodovi) / staghorn sumac (fruits)				
japonski dresnik (korenike) / Japanese knotweed (rhizome)				
japonski dresnik (listi) / Japanese knotweed (leaves)				
žlezava nedotika (cvetovi) / Himalayan balsam (flowers)				
orjaška zlata rozga (cvetovi) / giant goldenrod (flowers)				
Kanadska zlata rozga (cvetovi) / Canadian goldenrod (flowers)				

Slika 6. Barvni premazi iz invazivnih tujerodnih vrst na lesu navadnega divjega kostanja. Prikazane površine lesa so dimenzij 2×2 cm.

Figure 6. Coloured coatings from invasive alien species on horse chestnut. The wood surfaces dimensions shown are 2×2 cm.

in orjaške zlate rozge pa prispevajo k svetlo rume-no/zelenemu obarvanju lesa. Kot lahko vidimo iz rezultatov, sta barva in intenziteta odvisni od same sestave premazov (sliki 5 in 6). Vpliv na barvo ima tako prisotnost lignina kot tudi PHA. S kombinacijo različnih substratov lahko pripravimo premaze si-lanskega tipa različnih barv.

Izgled površin površinsko obdelanih lesov je poleg odtenkov barvil odvisen tudi od vrste pod-lage, na katero so bili premazi naneseni. Razlike v večji poroznosti lesa velikega pajesena in manjše poroznosti lesa navadnega divjega kostanja so vpli-vale na vezavo barvil v strukturo lesov. V primeru lesa velikega pajesena so barvila temneje obarva-la odprte pore večjih premerov kot pa ostalo lesno tkivo na površini lesa (slika 5). V primeru lesa na-vadnega divjega kostanja pa so barvila les obarvala bolj enakomerno, intenzivno temnejše obarvanje por oz. trahej pa je zaradi njihovih manjših preme-rov manj izrazito (slika 6).

Vsa barvila se na les vežejo odlično, sušenje poteka pri sobni temperaturi in ne zahteva poviša-nih temperatur. Tako pripravljeni premazi so odpor-ni na spiranje v različnih topilih, kot sta na primer voda in etanol.

Slika 6 prikazuje izgled površin lesa navadnega divjega kostanja po nanosu premazov tipa B, B-P-HA, B-lig in B-PHA-lig brez barvila ter po nanosu premazov z dodanimi barvili. Barvni premazi si-lanskega tipa dajejo podobno obarvanje ne glede

na uporabljen les – veliki pajesen ali navadni divji kostanj. Les navadnega divjega kostanja je v osno-vi nekoliko svetlejši, zato je sama intenziteta barv v primeru premazov na lesu divjega kostanja večja. Pobarvana površina ima v primerjavi z velikim paje-senom tudi bolj enoten oz. homogen videz, kar je posledica fine teksture navadnega divjega kostanja, saj les ne vsebuje velikih por. Tudi v površine lesa divjega kostanja se barvila intenzivno absorbirajo.

3.2 STIČNI KOT KAPLJICE VODE NA PREMAZANIH POVRŠINAH LESA

3.2 WATER DROPLET CONTACT ANGLES ON COATED WOOD SURFACES

Hydrofobne lastnosti premazanih lesov so bile primerjane na podlagi izmerjenih stičnih kotov ka-pljic vode, nanesenih na površine vzorcev. Meritve stičnih kotov so bile izmerjene po 10 s od nanosa kapljice na površino lesenih vzorcev, da se je ka-pljica vode uravnovežila ter ustalila. Iz rezultatov, prikazanih v preglednici 1, lahko vidimo, da sesta-va premazov silanskega tipa močno vpliva na veli-kost stičnega kota kapljice vode, tako na lesu veli-kega pajesena kot tudi na lesu navadnega divjega kostanja. Stični kot vode na lesu velikega pajesena, ki ni bil premazan z nobenim premazom, je znašal $43,0^\circ (\pm 1,6^\circ)$. Vsi premazi, ki smo jih pripravili na osnovi silanov, naravnih barvil, PHA in lignina, so povečali vodoodbojnost lesa. Premazi tipa B (TEPI in barvilo) na osnovi naravnih barvil (razen v prime-

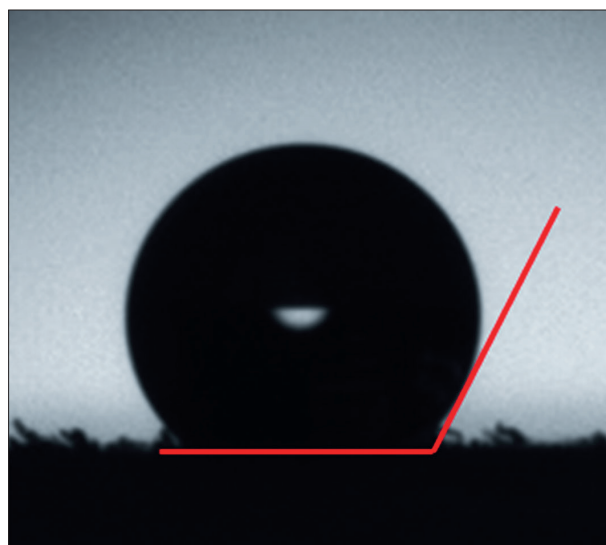
Preglednica 1. Stični koti kapljic vode na lesu velikega pajesena, premazanem z različnimi premazi.

Table 1. Water droplet contact angles on Chinese sumac wood coated with different coatings.

	B	B-PHA	B-lig	B-PHA-lig
Brez barvila / no dye	$43,0^\circ \pm 1,6^\circ$	$65,9^\circ \pm 2,2^\circ$	$109,6^\circ \pm 0,6^\circ$	$109,9^\circ \pm 1,8^\circ$
Octovec (plodovi) / staghorn sumac (fruits)	$84,8^\circ \pm 0,5^\circ$	$62,8^\circ \pm 2,5^\circ$	$96,0^\circ \pm 1,1^\circ$	$95,8^\circ \pm 2,5^\circ$
japonski dresnik (korenike) / Japanese knotweed (rhizome)	$124,4^\circ \pm 0,1^\circ$	$69,7^\circ \pm 2,4^\circ$	$91,7^\circ \pm 0,3^\circ$	$118,2^\circ \pm 1,6^\circ$
japonski dresnik (listi) / Japanese knotweed (leaves)	$100,0^\circ \pm 0,2^\circ$	$87,3^\circ \pm 2,0^\circ$	$108,7^\circ \pm 0,2^\circ$	$124,2^\circ \pm 0,1^\circ$
žlezava nedotika (plodovi) / Himalayan balsam (fruits)	$92,1^\circ \pm 2,1^\circ$	$79,5^\circ \pm 2,4^\circ$	$96,5^\circ \pm 1,3^\circ$	$106,4^\circ \pm 1,5^\circ$
orjaška zlata rozga (plodovi) / giant goldenrod (fruits)	$139,3^\circ \pm 0,4^\circ$	$36,4^\circ \pm 2,4^\circ$	$93,0^\circ \pm 0,1^\circ$	$103,8^\circ \pm 1,0^\circ$
kanadska zlata rozga (plodovi) / Canadian goldenrod (fruits)	$117,5^\circ \pm 0,2^\circ$	$75,9^\circ \pm 2,3^\circ$	$98,8^\circ \pm 0,9^\circ$	$126,4^\circ \pm 1,1^\circ$

ru octovca) so povečali vodoodbojnost premaza, saj so vsi stični koti znašali več kot 90° . Pri premazih tipa B-PHA (premazi z dodatkom PHA) so bili (tako brez prisotnosti barvila kot tudi z barvili) stični koti nizki (med 36° in 87°). Stični kot kapljice vode je bil v primeru vseh premazov na osnovi lignina večji kot 90° . Najboljše rezultate z vidika hidrofnosti površin smo dosegli v primeru premaza tipa B z dodatkom barvila iz cvetov orjaške zlate rozge, kjer je bil stični kot 139.3° (preglednica 1).

Podobne rezultate stičnih kotov vode smo zasledili tudi pri premazih na lesu navadnega divjega kostanja. Rezultati so zbrani v preglednici 2. Stični kot kapljice vode na nepobarvanem lesu je znašal $46,4^\circ$. Zaščitni sloj, ki je bil pripravljen iz premaza B (TEPI in barvilo), je tudi v tem primeru s kombinacijo naravnih barvil iz korenin japonskega dresnika, listov japonskega dresnika, žlezave nedotike ter kanadske in orjaške zlate rozge naredil površine bolj hidrofnosti. Stični koti kapljice vode so tudi v tem primeru v prisotnosti lignina, ne glede na dodatek ostalih komponent večji kot 90° . Stični koti vode na vzorcih, premazanih s premazom B-PHA, so bili tudi opazno nižji v primerjavi s stičnimi koti vode na vzorcih, premazanih z ostalimi premazi. V primeru lesa navadnega divjega kostanja smo največji stični kot vode dobili, ko smo pripravili premaz v kombinaciji barvila iz plodov orjaške zlate rozge in silana TEPI. Stični kot kapljice vode je znašal v tem primeru kar $150,0^\circ$ (slika 7).



Slika 7. Stični kot vode na lesu navadnega divjega kostanja, premazanem s premazom B s prisotnostjo barvila iz plodov orjaške zlate rozge.

Figure 7. Contact angle of water on the wood of the horse chestnut coated with coating B with the presence of dye from the fruits of the giant goldenrod.

4 SKLEPI

4 CONCLUSION

S kombinacijo naravnih barvil ter substratov smo uspešno pripravili premaze silanskega tipa različnih barv, ki dajejo površinam intenzivna obarvanja, od rdečega, rumenega, zelenega, rjavega do vijoličnega. Na obarvanje pomembno vpliva

Preglednica 2. Stični koti kapljic na lesu navadnega divjega kostanja, premazanem z različnimi premazi.
Table 2. Water droplet contact angles on horse chestnut coated with different coatings.

	B	B-PHA	B-lig	B-PHA-lig
Brez barvila / no dye	$46,4^\circ \pm 0,9^\circ$	$25,0^\circ \pm 0,5^\circ$	$119,4^\circ \pm 0,1^\circ$	$125,1^\circ \pm 3,1^\circ$
Octovec (plodovi) / staghorn sumac (fruits)	$77,8^\circ \pm 0,9^\circ$	$56,9^\circ \pm 2,6^\circ$	$105,4^\circ \pm 0,6^\circ$	$113,8^\circ \pm 3,2^\circ$
japonski dresnik (korenike) / Japanese knotweed (rhizome)	$117,7^\circ \pm 0,1^\circ$	$93,0^\circ \pm 0,8^\circ$	$109,2^\circ \pm 0,6^\circ$	$123,6^\circ \pm 0,8^\circ$
japonski dresnik (listi) / Japanese knotweed (leaves)	$113,6^\circ \pm 0,9^\circ$	$96,2^\circ \pm 0,4^\circ$	$125,9^\circ \pm 0,4^\circ$	$121,0^\circ \pm 0,2^\circ$
žlezava nedotika (plodovi) / Himalayan balsam (fruits)	$102,0^\circ \pm 2,2^\circ$	$87,4^\circ \pm 1,7^\circ$	$106,9^\circ \pm 1,0^\circ$	$125,9^\circ \pm 2,1^\circ$
orjaška zlata rozga (plodovi) / giant goldenrod (fruits)	$150,0^\circ \pm 0,4^\circ$	$48,5^\circ \pm 3,1^\circ$	$104,7^\circ \pm 0,5^\circ$	$100,2^\circ \pm 2,4^\circ$
kanadska zlata rozga (plodovi) / Canadian goldenrod (fruits)	$106,8^\circ \pm 0,2^\circ$	$88,1^\circ \pm 3,1^\circ$	$109,7^\circ \pm 0,1^\circ$	$122,4^\circ \pm 1,8^\circ$

prisotnost lignina in tudi PHA. Premazi z dodanim ligninom so nekoliko temnejši. Dokazali smo tudi, da na vezavo barvila vplivajo anatomske značilnosti uporabljenih lesov. V primeru lesa velikega pajesena so barvila temneje obarvala odprte pore večjih premerov, v primeru lesa navadnega divjega kostanja pa so barvila les obarvala bolj enakomerno. Vsa barvila se na les vežejo odlično, so odporna na spiranje z etanolom in vodo, sušenje pa zadostuje pri sobni temperaturi.

Tako pripravljeni premazi z dodatkom naravnega barvila, lignina in PHA, v kombinaciji s silanskimi prekurzorji so izkazovali tudi zelo izrazite hidrofobne lastnosti. Na lesu pajesena se je kot premaz z najboljšimi hidrofobnimi lastnostmi izkazal premaz tipa B, z dodatkom barvila iz cvetov orjaške zlate rozge (stični kot kapljice vode 139,3°), na lesu divjega kostanja pa premaz v kombinaciji barvila iz plodov orjaške zlate rozge in 3-(trietoksisilil)propil izocianata. Stični kot vodne kapljice je v tem primeru znašal kar 150,0°.

5 POVZETEK

5 SUMMARY

The extraction of raw materials from natural resources is a vital project, but ideally the exploitation of the material has no negative impact on the ecosystem, and that the material is not a source of food. Invasive alien plants are a suitable resource which, when propagated, can have negative effects on habitats, the balance of ecosystems, human health and the economy. In the Applause project we focused on the extraction of raw materials from selected invasive alien plants: staghorn sumac, Japanese knotweed, Himalayan balsam, Canadian goldenrod and giant goldenrod. Cellulose fibres can be obtained by delignification plant biomass, with black liquor as a by-product. This consists mainly of aromatic macromolecules of lignin and sugars, which could be a source of polyhydroxyalkanoates (PHA). Secondary metabolites are also a source of natural dyes, which have been in great demand recently as they are environmentally friendly and biodegradable.

The treatment of wooden surfaces with coatings is desirable in terms of protection against external influences and the introduction of additional functionalities. The binding of natural dyes from in-

vasive alien plants to wood represents an untapped field of application. Silane coatings enable the additional binding of dyes, lignin and PHA. The study focused on natural dyes from staghorn sumac, Japanese knotweed, Himalayan balsam, Canadian goldenrod and giant goldenrod and lignin and PHA, which could be extracted from the residues of paper production. At the Faculty of Chemistry and Chemical Technology we prepared extracts from the fruits of staghorn sumac, rhizomes and leaves of Japanese knotweed and flowers of Himalayan balsam, Canadian goldenrod and giant goldenrod, which served as a source of the dyes.

Six different types of silane coatings based on natural dyes, PHA and lignin were produced. For the substrates we prepared wood of two non-native species, namely the tree of heaven (*Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle), which belongs to a group of ring porous species with a coarse texture, and the horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.), which is a diffuse porous species with pores of small diameter and belongs to a group of woods with fine texture. We prepared the wood samples in the Department of Wood Science and Technology and sanded them with papers of grits 120, 160, 180 and 220. The wood was painted with coatings of the types B, B-PHA, B-lig and B-PHA-lig without the addition of dyes and in the presence of all six natural dyes. The dried coatings were observed and visually evaluated, while the hydrophobicity of the coated surfaces was compared with the measurement of the contact angles of water droplets.

During our research we found that a combination of natural dyes and substrates can be used to produce silane coatings with different colours. The surfaces of wood coated with silane coatings without the presence of dyes have the colour of natural wood, and coatings with the presence of natural dyes give the surfaces an intense colour that ranges from reddish, yellowish, greenish, and brownish to purple. The presence of lignin and PHA also influences the colour. Coatings with added lignin are slightly darker. Differences in the increased porosity of the tree of heaven wood and the low porosity of the wood of the horse chestnut influenced the binding of the dyes into the wood structure. In the case of wood from the tree of heaven the dyes coloured darker in the open pores with a larger diameter, whereas the horse chestnut wood was

more evenly coloured. All the dyes were found to bind perfectly to the wood, were resistant to rinsing with ethanol and water, and drying at room temperature was sufficient.

The hydrophobic properties of the coated woods were compared on the basis of the contact angles of water droplets applied to the surfaces of the wood samples. On the tree of heaven wood, the coating with the best hydrophobic properties turned out to be a type B coating with the addition of a dye from the flowers of the giant goldenrod (139.3°), while on the horse chestnut wood the best hydrophobic properties were found for a coating with a combination of dye from flowers of the giant goldenrod and silane TEPI., with a water droplet contact angle of 150.0°.

We thus prepared numerous silane coatings based on natural dyes from invasive alien plants. We developed a process for the production of coloured and transparent hydrophobic coatings containing various silane molecules and lignin and PHA. By adding natural dyes, lignin and PHA in combination with the silane-containing precursors, we were able to improve the properties of the wood coatings.

ZAHVALE

ACKNOWLEDGEMENTS

Projekt APPLAUSE sofinancira Evropski sklad za regionalni razvoj preko pobude Urban Innovative Actions (UIA). Avtorji se zahvaljujejo Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS), ki financira programsko skupino Kemija za trajnostni razvoj (P1-0134) in programsko skupino Les in lignocelulozni kompoziti (P4-0015). Avtorji se za tehnično pomoč zahvaljujemo Luki Kržetu, dipl. inž. les. ter Jožetu Planinšiču, mag. inž. les.

LITERATURA

REFERENCES

- Bechtold, T. (2009). Natural colorants – quinoid, naphthoquinoid and anthraquinoid dyes. In (pp. 151-182).
- Bugnicourt, E., Cinelli, P., Alvarez, V., & Lazzeri, A. (2014). Polyhydroxyalkanoate (pha): Review of synthesis, characteristics, processing and potential applications in packaging. *eXPRESS Polymer Letters*, 8, 791-808. DOI: <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2014.82>
- Carlos de Haro, J., Magagnin, L., Turri, S., & Griffini, G. (2019). Lignin-based anticorrosion coatings for the protection of aluminum surfaces. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(6), 6213-6222. DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b06568>
- Castañeda-Ovando, A., Pacheco-Hernández, M. d. L., Páez-Hernández, M. E., Rodríguez, J. A., & Galán-Vidal, C. A. (2009). Chemical studies of anthocyanins: A review. *Food Chemistry*, 113(4), 859-871. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.001>
- Flamini, R., Mattivi, F., De Rosso, M., Arapitsas, P., & Bavaresco, L. (2013). Advanced knowledge of three important classes of grape phenolics: Anthocyanins, stilbenes and flavonols. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(10), 19651-19669. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms141019651>
- Gordon, P. F., & Gregory, P. (1987). Anthraquinone dyes. In P. F. Gordon & P. Gregory (Eds.), *Organic chemistry in colour* (pp. 163-199). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Khan, T. A., Lee, J.-H., & Kim, H.-J. (2019). Chapter 9 - lignin-based adhesives and coatings. In H. Ariffin, S. M. Sapuan, & M. A. Hassan (Eds.), *Lignocellulose for future bioeconomy* (pp. 153-206): Elsevier.
- Klapiszewski, Ł., Szalaty, T., & Jesionowski, T. (2018). Depolymerization and activation of lignin: Current state of knowledge and perspectives. In.
- Kumar Rai, P., & Singh, J. S. (2020). Invasive alien plant species: Their impact on environment, ecosystem services and human health. *Ecological Indicators*, 111, 106020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106020>
- Mansfield, S. D., Kim, H., Lu, F., & Ralph, J. (2012). Whole plant cell wall characterization using solution-state 2d nmr. *Nature Protocols*, 7(9), 1579-1589. DOI: <https://doi.org/10.1038/nprot.2012.064>
- Nambela, L., Haule, L. V., & Mgani, Q. (2020). A review on source, chemistry, green synthesis and application of textile colorants. *Journal of Cleaner Production*, 246, 119036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119036>
- Plavčak, D., Gorišek, Ž., Straže, A., & Merela, M. (2019). Drying characteristics of wood of invasive tree species growing in an urban environment. *Les/Wood*, 68(2). DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2019.v68n02a03>
- Strgulc-Krajšek, S., Bačič, M., & Jogan, J. (2016). Invazivne tujerodne rastline v mestni občini Ljubljana: Mestna občina Ljubljana, Mestna uprava, Oddelek za varstvo okolja.
- Toiu, A., Vlase, L., Vodnar, D. C., Gheldiu, A.-M., & Oniga, I. (2019). Solidago graminifolia L. Salisb. (asteraceae) as a valuable source of bioactive polyphenols: Hplc profile, in vitro antioxidant and antimicrobial potential. *Molecules*, 24(14), 2666.
- Torelli, N. (1998). Lesna tekstura.
- Vieira, M. N., Winterhalter, P., & Jerz, G. (2016). Flavonoids from the flowers of *impatiens glandulifera* royle isolated by high performance countercurrent chromatography. *Phytochemical Analysis*, 27(2), 116-125. DOI: <https://doi.org/10.1002/pca.2606>

- Wang, S., & Zhu, F. (2017). Chemical composition and biological activity of staghorn sumac (*Rhus typhina*). Food Chemistry, 237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.111>
- Wu, T., McCallum, J. L., Wang, S. N., Liu, R. H., Zhu, H. H., & Tsao, R. (2013). Evaluation of antioxidant activities and chemical characterisation of staghorn sumac fruit (*Rhus hirta* L.). Food Chemistry, 138(2-3), 1333-1340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.10.086>
- Yusuf, M., Shabbir, M., & Mohammad, F. (2017). Natural colorants: Historical, processing and sustainable prospects. Natural Products and Bioprospecting, 7(1), 123-145. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13659-017-0119-9>



ANORGANSKA ONESNAŽILA V ODSLUŽENIH OKNIH

INORGANIC POLLUTANTS IN USED WINDOWS

Boštjan Lesar^{1*}, Miha Humar¹

UDK 630*839.8

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Prispelo / Received: 17. 8. 2020

Sprejeto / Accepted: 1. 10. 2020

Abstract / Izvleček

Izvleček: Krožno gospodarstvo in uporaba sekundarnih surovin postajata vedno bolj pomembna. Uporaba odsluženega lesa za materialno izrabo je trenutno še zelo slabo izkoriščena. Večino odsluženega lesa se namreč porabi v energetske namene. Eden od potencialnih virov odsluženega lesa so tudi stara lesena okna. Večino oken se v današnjem času zamenja zaradi neustreznih energetskih karakteristik, medtem ko je les večine zamenjanih oken še brez znakov razkroja. Težavo pri uporabi lesa odsluženih oken za proizvodnjo novih izdelkov predstavljajo predvsem površinski premazi. V raziskavi smo preverili vpliv starosti, tipa in površinske obdelave na delež onesnažil. Iz okenskih profilov smo najprej odstranili vse nelesne materiale, profile razžagali po debelini, ter s tem preverili, kako globoko v les so prodrla anorganska onesnažila. Les smo analizirali z rentgenskim fluorescenčnim spektrometrom (in določili deleže posameznih anorganskih onesnažil (Cr, Cu, Cl, Fe, Zn, Pb). Rezultati so pokazali, da odslužena okna vsebujejo anorganska onesnažila zgolj na površini (do 5 mm globoko), količine onesnažil močno variirajo glede na starost oken in uporabljeno površinsko zaščito. Raziskava je pokazala, da so odslužena okna lahko surovina za proizvodnjo novih izdelkov in materialov, ob pogoju, da pred uporabo odstranimo površinski sloj.

Ključne besede: anorganska onesnažila, odslužena okna, kaskadna raba lesa, les

Abstract: Although the circular economy and use of secondary raw materials are becoming increasingly important, recycled wood is currently still very poorly utilised, with most used to produce energy. One potential sources of recycled wood is old wooden windows. Many wooden windows are now being replaced due to inadequate energy characteristics, while such wood is often still in good condition, without signs of decay. The main problem with the use of wood from used windows for the production of new products is surface coatings. The study examined the influence of age, type and surface treatment on the proportion of inorganic pollutants. First, all non-wood materials were removed from the window profiles. Afterwards, the profiles were cut into the 5 mm thick slides, to measure how deeply the inorganic contaminants penetrated into the wood. The wood was analysed with an X-ray fluorescent spectrometer, and the concentrations of individual inorganic pollutants were determined (Cr, Cu, Cl, Fe, Zn, Pb). The results showed that the concentrations of inorganic pollutants depended on the age of the windows and the surface protection used. This study has shown that used windows can be a raw material for the production of new products and materials, provided that the surface layer is removed before use.

Keywords: inorganic pollutants, used windows, cascading use of wood, wood

1 UVOD**1 INTRODUCTION**

Krožno gospodarstvo je eden ključnih ciljev sodobne politike tako v Evropi kot v Sloveniji. Politike stremijo h krožnemu gospodarstvu, z močnim poudarkom na zmanjševanju odpadkov in učinkovite izrabe virov (EC, 2014). Tem trendom mora slediti tudi lesna industrija, saj projekcije kažejo, da bo v Evropi v naslednjem desetletju povpraševanje preseglo po-

nudbo lesa in na lesu osnovanih materialov (Mantau et al., 2010). Kljub temu da je les obnovljiv material, je njegovo pridobivanje omejeno s prirastkom in trajnostnim gospodarjenjem z gozdovi. Dovoljen posek nam določajo tudi mednarodni sporazumi, kot na primer LULUCF (Land Use, Land-Use Change and Forestry) (Peeters & Elia Antonio, 2020). Zato bo potreben nov koncept uporabe lesa. Vedno bolj se razvija kaskadna raba lesa, ki sledi materialnemu toku preko različnih življenjskih ciklov. Rezultati raziskav kažejo, da kaskadna raba lesa vodi do manjše porabe virov v primerjavi z uporabo svežega lesa, kar se kaže v večji učinkovitosti virov (46 % v primerjavi

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

* e-mail: bostjan.lesar@bf.uni-lj.si

z 21 %) na ravni življenjskega cikla (Risse et al., 2017) the demand for wood could likely exceed its sustainable supply within the next decades. In response to this development, cascading, i. e. the sequential use of one unit of material in material applications with energy generation as final step, is expected to enhance the resource efficiency of wood utilization. In this context, the objective of this paper is to determine the resource consumption and resource efficiency of wood cascading compared to the use of primary wood to provide the same multiple functions. To account for resource use and calculate the efficiency, exergy analysis was applied. The exergy of a material is the potential work that can be obtained from the material in the natural environment. By using Exergy Flow Analysis, key drivers of exergy dissipation and thus hotspots for improvement were identified. Exergetic Life Cycle Assessment was applied to determine resource use and the resource efficiency at a life cycle level. The results indicate that cascading leads to less resource consumption compared to the use of primary wood, indicated by higher resource efficiency (46% vs. 21%). Na primer, uporaba masivnega odsluženega lesa za proizvodnjo lameliranih nosilcev je z vidika LCA 15 % do 150 % bolj okoljsko učinkovita v primerjavi z energetske izrabo odsluženega lesa (Risse et al., 2019) the demand for renewable resources like wood is likely to increase. To satisfy the demand, cascading, i.e. the sequential use of one unit of a resource in multiple applications with energy recovery as the final step, is a key concept to improve the efficiency of wood utilization. Today, the systematic wood cascading is still in its infancies and limited to the downcycling of wood, i.e. the degradation of material quality. New recycling technologies are needed, which maintain the material quality at the beginning of the cascade chain and mobilize yet unused resources. Therefore, a new recycling technology for recovered solid wood from construction into glued laminated timber products was developed. 1 To identify the environmental and economic performance of the process, the eco-efficiency was assessed by the joint application of life cycle assessment (LCA). Kljub temu v EU, v večjih industrijskih energetskih obratih, konča okoli 80 % odsluženega lesa (Mantau et al., 2012).

Odslužen les je vir z velikim potencialom, vendar so kakovost, dimenzije in oblike odsluženega lesa zelo različne (Humar, 2010; Humar & Lesar, 2016).

Največji vir odsluženega lesa je gradbeni sektor. Pri odstranjevanju starih objektov je približno 45 % lesa primerne za materialno izrabo (proizvodnja ivernih ali vlaknenih plošč). 26 % te količine lesa bi lahko ponovno uporabili ter tako dodali nov življenjski krog in s tem podaljšali čas uskladiščenega ogljika. Sedemindvajset odstotkov odsluženega lesa bi bilo mogoče uporabiti za proizvodnjo drugih proizvodov z visoko dodano vrednostjo (Höglmeier et al., 2013). Za zgoraj opisane namene se lahko uporabi les, ki je le mehansko obdelan in ne vsebuje onesnažil. V skladu z nemško direktivo za odslužen les, ta les sodi v kategoriji A I in A II (Altholzverordnung, 2002; Humar & Lesar, 2016). Ta direktiva je prva celostno obravnavala problematiko odsluženega lesa, zato iz nje izhaja tudi veliko nacionalnih zakonodaj. V ti dve kategoriji ne moremo razvrstiti lesa, ki je površinsko obdelan. Takšen primer so okna in vrata, ki so največkrat obdelana z biocidnimi proizvodi in površinskimi premazi. Zato okna in vrata spadajo v A IV po nemški direktivi, kar pomeni, da direktiva dovoljuje uporabo le za energetske namene. V skladu s slovensko Uredbo o predelavi nevarnih odpadkov v trdna goriva (Ur. l. RS, 96/2014) odslužena okna ravno tako sodijo pod odpadke, ki jih ne smemo predelovati v trdna goriva, ki so namenjena splošni rabi (preglednica 1). Pomemben dokument, ki predpisuje mejne vrednosti onesnažil v odsluženem lesu, so tudi priporočila evropskih proizvajalcev plošč (EPF, 2004), ki predpisuje delež onesnažil v odsluženem lesu za proizvodnjo lesnih kompozitov. Za okna je značilno, da vsebujejo onesnažila zgolj v površinskem sloju. Površinsko obdelan površinski sloj lahko z relativno enostavnimi metodami odstranimo in tako dobimo čist les brez onesnažil, ki ga lahko uporabimo za proizvodnjo najrazličnejših izdelkov (Ugovšek, 2017) in predelavo v energente.

Večino odsluženih oken se danes zamenja predvsem zaradi višjih zahtev po energetske učinkovitosti stavb, tako da je večina lesenih oken brez znakov razkroja lesa. Iz uporabe prihajajo okna iz različnih časovnih obdobj. Za posamezno časovno obdobje so značilni posamezni tipi oken in njihova površinska obdelava. Poznamo naslednje tipe oken: enojna škatlasta okna, vezana okna in enojna okna z izolacijsko zasteklitvijo (Stegne, 2015). Pri vsakem tipu oken je prisoten različen delež lesa. Poleg prisotnih kovinskih elementov je glavna ovira pri uporabi lesa iz odsluženih oken njihova površinska obdelava.

Preglednica 1. Mejne vrednosti za vsebnost onesnažil v odsluženem lesu (EPF 2004, Ur. l. RS, 96/2014)
Table 1. Limit values of inorganic pollutants in recycled wood (EPF 2004, Ur. l. RS, 96/2014)

Onesnažilo / <i>Inorganic pollutant</i>	Priporočila EPF* / <i>Recommendation EPF*</i> [mg/kg]	Uredba o predelavi nenevarnih odpadkov** / <i>Regulation on non-hazardous waste treatment**</i> [mg/kg]
Arzen / <i>Arsenic</i>	25	2
Baker / <i>Copper</i>	40	20
Fluor / <i>Fluorine</i>	100	100
Kadmij / <i>Cadmium</i>	50	2
Klor / <i>Chlorine</i>	1000	600
Krom / <i>Chromium</i>	25	30
Pentaklorofenol / <i>Pentachlorophenol</i>	5	3
Svinec / <i>Lead</i>	90	30
Živo srebro / <i>Mercury</i>	25	0.4

* EPF, 2004

** Ur. l. RS, 96/2014

Z namenom karakterizacije lesa odsluženih oken smo iz različnih virov pridobili odslužena okna iz različnih obdobj ter jih analizirali po različnih kriterijih glede vsebnosti anorganskih onesnažil. Glavni namen te raziskave je določiti globino prodora onesnažil in s tem določiti delež lesa v okenskih profilih, ki ga lahko uporabimo za materialno izrabo. Predvidevamo, da so koncentracije onesnažil odvisne od tipa okna in površinske zaščite. Največ onesnažil je v površinskem sloju do globine 5 mm, medtem ko osrednji del profila ni onesnažen. Delež onesnažil je neodvisen od lesne vrste, iz katere je izdelano okno.

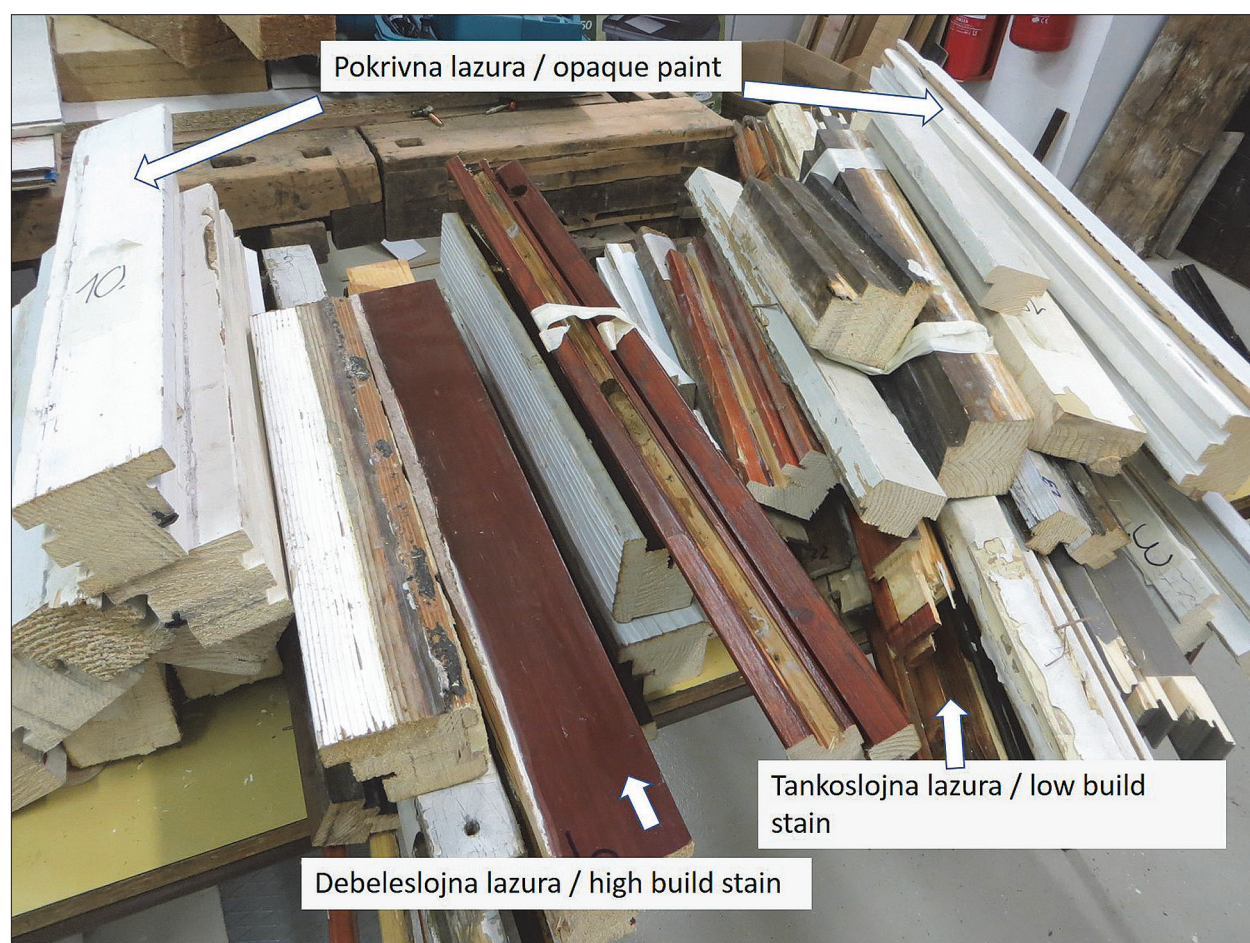
2 MATERIALI IN METODE

2 MATERIAL AND METHODS

Odslužena lesena okna smo pridobili iz treh različnih virov; iz podjetja M Sora d.d. in Mizarstvo Willi Dolinar s.p. ter iz Ljubljanskega regijskega centra za ravnanje z odpadki (RCERO Ljubljana). Izbrali smo več vzorcev, ki se med seboj čim bolj razlikujejo. Tako smo pridobili šestindvajset različnih lesenih

oken, ki so se med seboj razlikovala po: tipu okna, lesni vrsti, površinski zaščiti, barvi in starosti (preglednica 2).

Najprej je bilo potrebno okna razstaviti in odstraniti vse nelesne materiale (ostanke različnih poliuretanskih pen, silikonov, kovinskih delov okovja in vijakov ter stekel), ki bi lahko poškodovali stroje ali vplivali na rezultate. V nadaljevanju smo vzorce označili in vzdolžno razžagali na tračni žagi na 5 mm debele rezine. Pri tem razžagovanju smo praviloma dobili šest rezin ter osrednji del (slika 2). Rezine smo oštevilčili glede na pozicijo v okenskem profilu. Med rezinami je 2 milimetrski razmik, ki je posledica razžagovanja.



Slika 1. Del vzorcev odsluženih oken pred razžagovanjem z označenimi površinskimi sistemi.

Figure 1. Some of the samples of used windows before sawing with marked surface coatings

Preglednica 2. Pregled izbranih vzorcev odsluženih oken

Table 2. Overview of used wooden windows samples

Vrsta okna / Window type	Površinska zaščita / Surface treatment	Barva / Colour	Lesna vrsta / Wood
ENOJNO / single window	pokrivni premaz / opaque paint	siva / gray	smreka / spruce
ENOJNO / single window	transparentni premaz / low build stain	rdeča / red	smreka / spruce
DVOJNO / double window	pokrivni premaz / opaque paint	bela / white	smreka / spruce
DVOJNO / double window	pokrivni premaz / opaque paint	bela / white	smreka / spruce
VEZANO / coupled window	tankoslojna lazura / low build stain	rdeča / red	smreka / spruce
ENOJNO / single window	pokrivni premaz / opaque paint	bela / white	smreka / spruce
ENOJNO / single window	debeloslojna lazura / high build stain	rjava / brown	smreka / spruce
ENOJNO / single window	debeloslojna lazura / high build stain	bela / white	smreka / spruce
PODBOJ / frame	tankoslojna lazura / low build stain	rjava / brown	smreka / spruce
PODBOJ / frame	pokrivni premaz / opaque paint	bela / white	smreka / spruce
PODBOJ / frame	debeloslojna lazura / high build stain	rjava / brown	smreka / spruce
PODBOJ / frame	transparentni premaz / low build stain	rjava / brown	smreka / spruce

Vrsta okna / Window type	Površinska zaščita / Surface treatment	Barva / Colour	Lesna vrsta / Wood
PODBOJ / frame	debeloslojna lazura / high build stain	črna / black	smreka / spruce
PODBOJ / frame	pokrivni premaz / opaque paint	bela / white	bor / pine
VEZANO / coupled window	pokrivni premaz / opaque paint	bela / white	smreka / spruce
ENOJNO / single window	pokrivni premaz / opaque paint	bela / white	smreka / spruce
ENOJNO / single window	transparentni premaz / low build stain	rjava / brown	smreka / spruce
VEZANO / coupled window	pokrivni premaz / opaque paint	bela / white	smreka / spruce
VEZANO / coupled window	pokrivni premaz / opaque paint	bela / white	smreka / spruce
VEZANO / coupled window	transparentni premaz / low build stain	rjava / brown	bor / pine
ENOJNO / single window	pokrivni premaz / opaque paint	črna / black	smreka / spruce
ENOJNO / single window	transparentni premaz / low build stain	rjava / brown	smreka / spruce
VEZANO / coupled window	transparentni premaz / low build stain	rjava / brown	smreka / spruce
VEZANO / coupled window	pokrivni premaz / opaque paint	bela / white	smreka / spruce
ENOJNO / single window	tankoslojna lazura / low build stain	rdeča / red	smreka / spruce
PODOJ-VRAT / door frame	pokrivni premaz / opaque paint	bela / white	smreka / spruce

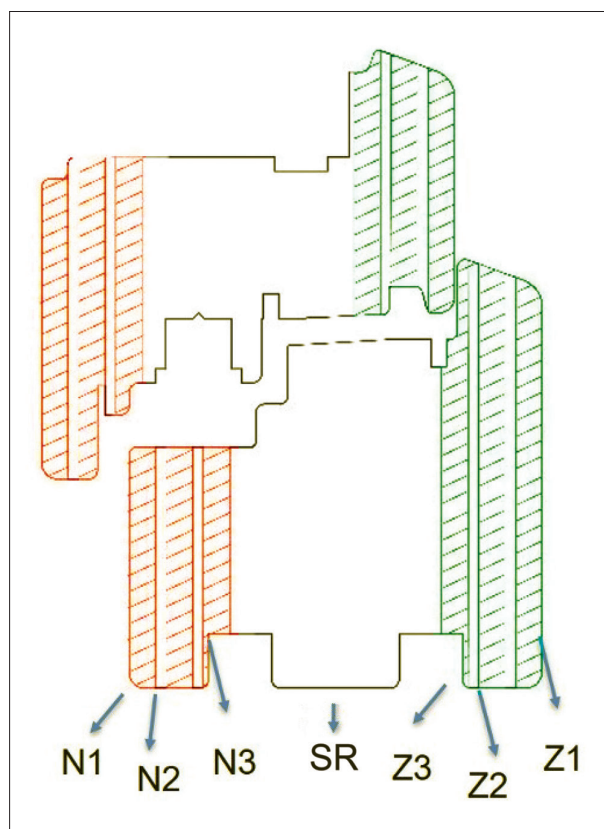
V nadaljevanju smo vzorce posameznih plasti zmleli (velikost sita < 1 mm) v rezalnem mlinu (Retsch SM 2000, Haan Nemčija). Iz zmletega lesa smo za vsak posamezen vzorec okna izdelali po tri tabletki na stiskalnici (Chemplex, Palm City, FL, Združene države Amerike), ki smo jih v nadaljevanju analizirali z rentgenskim fluorescenčnim spektrometrom (TwinX, Oxford instruments, Velika Britanija) in določili deleže posameznih anorganskih onesnažil (Cr, Cu, Cl, Fe, Zn, Pb). Vse meritve razen določanja klora smo izvedli s PIN detektorjem ($U = 26 \text{ kV}$, $I = 115 \mu\text{A}$, $t = 300 \text{ s}$). Prisotnost klora smo določili pri istih pogojih s proporcionalnim detektorjem v helijevi atmosferi.

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

3 RESULTS AND DISCUSSION

V raziskavi smo podatke analizirali v skladu z različnimi kriteriji, glede na vrsto okna, tip premaza in pozicijo vzorca v oknu. Onesnažila smo skupno analizirali v 460 vzorcih.

Najprej smo določili število in delež vzorcev s preseženimi mejnimi vrednostmi po uredbi o predelavi nenevarnih odpadkov v trdo gorivo (Ur. l. RS, 96/2014). Največkrat smo v vzorcih zaznali prekoračitev mejnih vrednosti za svinec (147 vzorcev / 32 %), sledili so vzorci s prekoračenim deležem kroma (120 vzorcev / 26 %), bakra (69 vzorcev / 15 %) in klora (23 vzorcev / 5 %). V uredbi ni postavljenih



Slika 2. Shema razžagovanja elementov na rezine, kjer zelena barva predstavlja zunanji del (Z), oranžna pa notranji (N)

Figure 2. Scheme of sawing elements into slices, where green represents the outer part (Z) and orange the inner part (N)

mejnih vrednosti za železo in cink, zato za njiju nimamo podatkov o preseženih vrednostih. Vendar se je izkazalo, da so povišane vrednosti za omenjena elementa pri vzorcih, ki imajo visoke vrednosti, tudi že pri ostalih preučevanih elementih.

Glede na tip okna se je izkazalo, da edino pri enojnih oknih nismo izmerili preseženih vrednosti za preučevane elemente, medtem ko smo pri vseh ostalih zaznali presežene vrednosti glede na uredbo o predelavi nenevarnih odpadkov v trdo gorivo (preglednica 3). To kaže na smiselnost, da so okna uvrščena v IV razred v skladu z Altholz direktivo, kamor se uvršča zaščiten les. V skladu z uredbo o predelavi nenevarnih odpadkov v trdo gorivo (Ur. l. RS, 96/2014) lahko takšen les uporabimo v energetske namene zgolj v ustreznih sežigalnicah z ustrezno urejenim filtrskim sistemom in okoljevarstvenim dovoljenjem. Seveda pa to velja, če za kurivo uporabimo celotne okenske profile.

V raziskavi smo ugotovili, da se večina one-

snažil nahaja na površini lesenih profilov. Rezultati, prikazani v preglednici 4, jasno kažejo, da so mejne vrednosti za posamezna onesnažila presežene zgolj v zunanjih obarvanih slojih. To potrjuje dejstvo, da površinski premazi za les penetrirajo le v prve celice na površini lesa, ki so longitudinalno odprte. Le malo premaza pa penetrira tudi nekoliko globlje preko radialnih trakov (De Meijer, 2004). Vzroki za onesnaženje odsluženega lesa z anorganskimi onesnažili so lahko različni, vendar pri oknih prevladujejo uporaba površinskih premazov in obdelava z biocidnimi pripravki (CEN/TS 14961, 2005; Humar & Lesar, 2016). V raziskavi smo izmerili nekoliko presežene mejne vrednosti svinca tudi pri notranjem (N3) vzorcu. Menimo, da je vzrok za preseženo vrednost v dejstvu, da s posameznih vzorcev na zgornjem in spodnjem delu nismo odstranili površinskega sloja. Tako smo poleg osrednjega dela profila pri pripravi vzorca zmlili tudi nekaj površinskega premaza, kar je vzrok za povečanje deleža onesnažil.

Preglednica 3. Povprečne količine onesnažil v mg/kg v posameznih tipih lesnih oken. V rdeče obarvanih celicah so vrednosti s preseženo mejno vrednostjo po uredbi Ur. l. RS, 96/2014.

Table 3. Average amounts of pollutants in mg/kg in individual types of wooden windows. In the red-colored cells are values that exceed the limit value according to the regulation Ur l. RS, 96/2014.

Vrsta okna / Window type	Anorganska onesnažila / Inorganic pollutants [mg/kg]					
	Cu	Cr	Cl	Fe	Zn	Pb
DVOJNO / double window	40	86	422	262	1372	46
ENOJNO / single window	4	11	245	208	27	15
PODBOJ / frame	6	31	248	85	144	99
PODBOJ-ENOJNO / frame single window	9	53	191	44	258	172
PODOJ-VRAT / door frame	58	55	369	68	1602	31
VEZANO / coupled window	32	43	259	216	1127	34

V različnih obdobjih so prevladovali posamezni tipi oken in tipi površinske zaščite. V splošnem velja, da so starejša premazna sredstva vsebovala več težkih kovin in drugih onesnažil (CEN/TS 14961, 2005; Humar, 2010). S povečevanjem okoljske ozaveščenosti in razvojem premazni sistemi postajajo vedno bolj okoljsko sprejemljivi. To dokazujejo tudi pridobljeni rezultati našega testiranja (preglednica 5). Najvišje deleže onesnažil smo določili pri pokrivnem premazu, ki je najstarejši tip površinske zaščite na oknih, ki smo jih obravnavali. Pri omenjenem

premazu smo določili presežene vrednosti za baker, krom in svinec, medtem ko smo pri tankoslojni lazuri zaznali povišane vrednosti za baker in svinec. Pri debeloslojni lazuri, ki je najnovejši tip površinske zaščite, smo v vzorcih našli zgolj preseženo vrednost za baker. Glede na to, da je mejna vrednost le malenkostno presežena, sklepamo, da je do povišane vrednosti najbrž prišlo zaradi korozije kovinskih delov na oknu, medtem ko je majhna verjetnost, da bi bil za povišane vrednosti bakra vzrok uporaba biocidnih zaščitnih sredstev, ki vsebujejo bakrove

Preglednica 4. Povprečne količine onesnažil v mg/kg glede na pozicijo odvzetega vzorca v oknu. V rdeče obarvanih celicah so vrednosti s preseženo mejno vrednostjo po uredbi Ur. l. RS, 96/2014. Pozicije vzorcev so označene na sliki 2.
Table 4. Average amounts of pollutants in mg/kg according to the position of the sample taken in the window. In the red-coloured cells are values that exceed the limit value according to the regulation Ur. l. RS, 96/2014. Positions in windows are marked on figure 2.

Pozicija vzorca v oknu / Position in window	Anorganska onesnažila / Inorganic pollutants [mg/kg]					
	Cu	Cr	Cl	Fe	Zn	Pb
N1	56	26	377	335	1044	99
N2	18	10	222	112	223	24
N3	17	14	221	134	423	30
SR	10	9	209	51	240	15
Z1	61	27	317	252	771	79
Z2	12	9	203	84	199	18
Z3	18	7	211	82	149	26

Preglednica 5. Povprečne količine onesnažil mg/kg v oknih glede na uporabljeno vrsto površinske zaščite in pozicijo odvzetega vzorca. V rdeče obarvanih celicah so vrednosti s preseženo mejno vrednostjo po uredbi Ur. l. RS, 96/2014.
Table 5. Average amounts of contaminants mg / kg in windows according to the type of surface protection used and the position of the sample taken. In the red-coloured cells are values that exceed the limit value according to the Ur regulation Ur. l. RS, 96/2014.

Površinska zaščita / Surface treatment	Pozicija v oknu / Position in window	Anorganska onesnažila / Inorganic pollutants [mg/kg]					
		Cu	Cr	Cl	Fe	Zn	Pb
debeloslojna lazura / high build stain	N1	8	4	379	330	38	24
	N2	2	4	142	62	14	6
	N3	3	3	130	76	9	5
	SR	3	5	212	47	42	7
	Z1	27	4	451	192	74	15
	Z2	7	3	184	35	7	3
	Z3	45	3	222	119	6	10
pokrivni premaz / opaque paint	N1	97	47	469	275	2004	146
	N2	31	15	271	103	412	30
	N3	20	23	239	94	803	39
	SR	18	15	206	40	492	24
	Z1	97	49	295	168	1452	104
	Z2	20	15	207	89	370	26
	Z3	18	11	185	54	260	34
transparentni premaz / low build stain	N1	17	5	243	424	106	64
	N2	7	4	186	146	42	25
	N3	15	5	215	187	48	24
	SR	2	4	212	68	18	8
	Z1	24	6	289	399	96	71
	Z2	5	4	206	99	38	13
	Z3	8	4	244	106	51	20

spojine. Baker med impregnacijo namreč les obarva nekoliko zelenkasto (Humar & Lesar, 2009), kar pa za okna ni zaželeno.

Kot smo že omenili, je glede na pozicijo odvzetega vzorca v profilu oken večina vzorcev s presežno mejno vrednostjo tistih z večjim deležem površinskega premaza. Pri ostalih vzorcih pa so vrednosti onesnažil bistveno nižje. Pri pokrivni in tankoslojni lazuri se je še izkazalo, da imajo vzorci na zunanji strani oken (Z1) še nekoliko višje vrednosti kot vzorci na notranji strani (N1). Vzrok za višje vrednosti na zunanji strani je obnavljanje premaza. Nekateri vzorci odsluženih oken z debeloslojno lazuro so imeli na zunanji strani že močno poškodovan površinski sloj. Površinski sloj se je luščil od podlage, zato je bil delež barve v analiziranem vzorcu nižji kot na notranji strani, kjer je bila barva še nepoškodovana.

4 ZAKLJUČEK

4 CONCLUSIONS

Odslužena okna so ustrezno klasificirana kot nevaren odpadki po Uredbi o predelavi nenevarnih odpadkov v trdo gorivo. Vendar pa so onesnažila zgolj na površini, kar pomeni, da bi lahko les odsluženih oken uporabili za proizvodnjo novih oken ali pa drugih lesenih izdelkov. Predhodno pa bi bilo potrebno odstraniti površinski sloj. Menimo, da je najprimernejši način za odstranjevanje površinskega sloja skobljanje, žaganje ali morda tudi peskanje. Odstranjen material je potrebno odvajati ločeno od preostalih lesnih ostankov v proizvodnji, saj odstranjen del lahko vsebuje visoke koncentracije anorganskih onesnažil.

Prerezi profilov lesenih oken so relativno majhni, zato iz odsluženih lesenih oken lahko pridobimo manjše količine čistega lesa. To je mogoče trenutno ekonomsko gledano še neupravičeno, vendar pa bo v prihodnosti ob pomanjkanju svežega lesa tudi to ekonomsko upravičeno.

5 POVZETEK

5 SUMMARY

Developing the circular economy is one of the key goals of modern societies both in Slovenia and Europe in general, with a strong emphasis on waste reduction and resource efficiency (EC, 2014). The

use of wood in cascades is important to reach this goal. Nowadays most recycled wood (around 80%) is used for combustion. However, the literature shows that 45% of wood used in buildings can be used for recovery or recycling, such as old wooden windows. However, according to regulations old used windows can be used only for combustion, because they are treated with biocides and surface coatings, although such pollutants are concentrated only on the surface. The aims of our research were to characterize the wood of used windows, as obtained from different periods and with different surface coatings, and to analyse it according to different criteria regarding the content of inorganic pollutants. The main purpose was also to determine the depth where the concentration of inorganic pollutants fell under the limit value so that this wood could be used for recycling or recovery. At first, all non-wood materials were removed from the window profiles. Afterwards, the profiles were cut into 5 mm thick slides, to measure how deep into the wood the inorganic contaminants had penetrated. The wood was analysed with an X-ray fluorescent spectrometer, and the proportions of individual inorganic pollutants were determined (Cr, Cu, Cl, Fe, Zn, Pb). The amounts of contaminants varied depending on the type of window and surface coating, most contaminants are in the surface layer to a depth of 5 mm, while the middle part of the profile is not contaminated. Higher concentrations of inorganic pollutants were determined in older windows. The main message of the present research is that wood from old windows can be used for recovery or recycling if the contaminated surfaces are first removed.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGMENT

Prispevek je rezultat več med seboj povezanih projektov, ki jih je sofinancirala Agencija za raziskovalno dejavnost RS: 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) in Projekta Woolf-OP20.03520, ki poteka v okviru programa Razvoj verig vrednosti v okviru razpisov Strategije pametne specializacije. Za tehnično pomoč pri pripravi in analizi vzorcev se najlepše zahvaljujemo študentu Blažu Dolinarju.

VIRI

REFERENCES

- Altholzverordnung (2002). Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung - AltholzV). 1–16.
- CEN/TS 14961 (2005). Solid biofuels - Fuel specifications and classes.
- EPF Industry standard (2014). The use of recycled wood wood- based panels. (14.8.2020). <https://europanel.org/wp-content/uploads/2018/09/EPF-Standard-for-panels-from-recycled-wood.pdf>
- De Meijer, M. (2004). A review of interfacial aspects in wood coatings: wetting, surface energy, substrate penetration and adhesion. COST E18, High Performance Wood Coating. Final Seminar, January 2005, 1–16.
- Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Towards a circular economy: a zero waste programme for Europe. COM/2014/0398 final, 1 (2014). DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- CEN/TS 14961 (2005). Solid biofuels - Fuel specifications and classes.
- Höglmeier, K., Weber-Blaschke, G., & Richter, K. (2013). Potentials for cascading of recovered wood from building deconstruction - A case study for south-east Germany. Resources, Conservation and Recycling, 78, 81–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.07.004>
- Humar, M. (2010). Inorganic pollutants in recovered wood from Slovenia and boards made of disintegrated wood. The Open Environmental Engineering Journal, 3, 1–6.
- Humar, M., & Lesar, B. (2009). Einfluss der Eintauchdauer auf die Aufnahme von Schuttmittellösungen, die Adsorption, die Eindringung und die Fixierung von Kupferethanolamin basierten Holzschutzmitteln. European Journal of Wood and Wood Products, 67(3), 265–270. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-009-0317-1>
- Humar, M., & Lesar, B. (2016). Odslužen les – surovinski vir z velikim potencialom. Gozdarski Vestnik, 56(045), 1–12.
- Mantau, U., Saal, U., Prins, K., Steierer, F., Lindner, M., Verkerk, H., Eggers, J., Leek, N., Oldenburger, J., Asikainen, A., & Anttila, P. (2010). EUwood - Real potential for changes in growth and use of EU forests. Final report. EUwood, June, 106p.
- Mantau, U., Weimar, H., & Tobias, K. (2012). Standorte der Holzwirtschaft - Holzrohstoffmonitoring. Altholz im Entsorgungsmarkt – Aufkommens- und Vertriebsstruktur 2010.
- Peeters, M., & Eliantonio, M. (2020). Research handbook on EU environmental law. <https://www.elgaronline.com/view/edcoll/9781788970662/9781788970662.xml>
- Risse, M., Weber-Blaschke, G., & Richter, K. (2017). Resource efficiency of multifunctional wood cascade chains using LCA and exergy analysis, exemplified by a case study for Germany. Resources, Conservation and Recycling, 126 (November 2016), 141–152. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.045>
- Risse, M., Weber-Blaschke, G., & Richter, K. (2019). Eco-efficiency analysis of recycling recovered solid wood from construction into laminated timber products. Science of the Total Environment, 661, 107–119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.117>
- Stegne, V. (2015). Stavbno pohištvo. Srednja Lesarska šola Maribor.
- Ugovšek, A. (2017). ReWin - lesena okna iz odsluženega lesa - M Sora. <https://www.m-sora.si/si/novice/2017/10/182-ReWin-lesena-okna-iz-odsluzenega-lesa>
- Ur. l. RS, 96/2014 (2014). <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED6504>

DOLOČANJE STATIČNEGA IN DINAMIČNEGA MODULA
ELASTIČNOSTI BUKOVE VEZANE PLOŠČEDETERMINATION OF DYNAMIC AND STATIC MODULUS
OF ELASTICITY OF BEECH PLYWOODMiran Merhar^{1*}

UDK 630*862:539.32

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Prispelo / Received: 13. 11. 2020

Sprejeto / Accepted: 1. 12. 2020

Izvleček / Abstract

Izvleček: V raziskavi smo primerjali vrednosti dinamičnega in statičnega modula elastičnosti 7- in 11-slojne vezane plošče z različnimi kombinacijami usmeritve tkiva posameznih slojev furnirjev. Dinamični modul smo določili iz lastnih frekvenc prvega in drugega nihajnega načina nihanja, kjer smo uporabili Bernoulli-Eulerjevo enačbo, statični modul pa s 4-točkovnim upogibnim testom. Rezultati so pokazali, da ima vezana plošča največji modul elastičnosti pri usmeritvi tkiva zunanjskega sloja 0°, nato pa z naraščanjem kota modul pada. Dinamični modul je od statičnega v povprečju za 12 % večji pri 7-slojnih ploščah in za 14 % pri 11-slojnih ploščah. Dinamični modul, določen iz druge lastne frekvence, je v primerih, kjer ni vpliva striga, enak modulu iz prve lastne frekvence, ko pa se pojavi vpliv striga, se modul zniža. Iz omenjene raziskave lahko potrdimo, da sta tako statični kot tudi dinamični način določanja modula elastičnosti vzorcev vezane plošče ustrezna, vendar pa je treba pri dinamičnem načinu preveriti vpliv striga.

Gljučne besede: vezana plošča, bukev, modul elastičnosti, nihanje, statični test, strig

Abstract: The study compared the values of the dynamic and static modulus of elasticity of 7- and 11-layer plywood with different combinations of the grain orientation of individual veneer layers. The dynamic modulus of elasticity was determined from the natural frequencies of the first and second vibration modes using the Bernoulli-Euler equation, and the static modulus was determined using the 4-point bending test. The results showed that the plywood has the highest modulus of elasticity at the orientation of the wood grain of the outer layer 0°, and that the modulus decreases with increasing angle. The dynamic modulus is on average 12% higher than the static modulus for 7-layer boards and 14% higher for 11-layer boards. The dynamic modulus determined from the second natural frequency is equal to the modulus determined from the first natural frequency when there is no shear influence, but when shear influence occurs the value of the modulus decreases. From the above mentioned investigations it can be confirmed that both static and dynamic methods are suitable for determining the modulus of elasticity of plywood samples, but it is necessary to check the shear influence in the dynamic method.

Keywords: plywood, beech, modulus of elasticity, vibration, static test, shear

1 UVOD**1 INTRODUCTION**

Vezana plošča je danes razširjen material v gradbeni in pohištveni industriji. Običajno je narejena iz luščenega furnirja različnih drevesnih vrst, kjer je v notranjih plasteh plošče furnir slabše kvalitete, na zunanjih vidnih pa boljše. Za uporabo vezane plošče v izdelkih, kjer so zunanji sloji vidni, se lahko na zunanjih slojih uporabi tudi plemeniti furnir.

Les ima izrazito anizotropne lastnosti, ki jih lahko v določenih primerih, ko usmeritev tkiva v vzdolžni, radialni in tangencialni smeri sovpada s koordinatnim sistemom vzorca, smatramo kot ortotropne. V primeru bukovine (*Fagus sylvatica*) je tako razmerje modulov elastičnosti med tangencialno, radialno in vzdolžno smerjo 1:2:12 (Kollmann & Côté, 1975), v primeru smreke (*Picea abies*) pa celo 1:1,7:40. Ker pa je vezana plošča sestavljena iz slojev furnirja z različnimi usmeritvami tkiva, lahko omenjena razmerja na nivoju plošče močno zmanjšamo. Na mehanske lastnosti vezane plošče je možno vplivati z mehanskimi lastnostmi uporabljenega lesa (Wilczyński & Warmbier, 2012) oz. z uporabljenega drevesno vrsto (Kallakas et al., 2020),

¹ Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Rožna dolina, Cesta VIII/34, 1000 Ljubljana, SLO

* e-pošta: miran.merhar@bf.uni-lj.si; telefon: 01-320-3629

številom slojev, kot tudi z usmeritvami tkiva posameznih slojev ter tehnološkim postopkom izdelave plošče (Bal, 2016; Šega & Šernek, 2018; Biadała et al., 2020). Na togost vezane plošče pa lahko vplivamo tudi z uporabo umetnih vlaken (Bal, 2014; Sikora et al., 2019; Svoboda et al., 2019).

Ker na mehanske lastnosti vezane plošče vplivamo na različne načine, so se z določanjem mehanskih lastnosti ukvarjali že številni avtorji. Nekateri so določali module elastičnosti s statičnimi testi, kjer so primerjali teoretično izračunane vrednosti z izmerjenimi (Wilczyński & Warmbier, 2012), drugi pa preučevali vpliv dimenzije preizkušanca na natančnost izmerjenega modula elastičnosti (Yoshihara, 2012a). Dinamične metode so bile uporabljene tudi za določanje modula elastičnosti gradbenih sten iz vezanega lesa v naravni velikosti (Guan et al., 2015; Guan et al., 2019).

Med metodami za določanje lastnosti lesa je zaradi enostavnosti najbolj razširjen 3- in 4- točkovni upogibni in torzijski test plošč (Brancheriau et al., 2002; Krüger & Wagenführ, 2020) ter dinamične metode, kjer na podlagi izmerjenih lastnih frekvenc upogibnega, torzijskega in vzdolžnega nihanja določimo module elastičnosti in strižne module. Pri upogibnem nihanju je lahko vzorec vpet konzolno (Hoffmann & Wertheimer, 2000; Merhar & Bučar, 2008; Roohnia, 2014), kjer je potrebno upoštevati togost vpetja, ali pa ima prosta oba konca (Haines et al., 1996; Yoshihara, 2012b; Gorišek et al., 2018; Merhar & Humar, 2020). Pri slednjem lažje zadostimo robnim pogojem, da sta strig in moment na obeh prostih koncih enaka nič. Tako pri konzolnem vpetju kot pri prostih koncih pa se lahko pri razmerju med dolžino in debelino vzorca, ki je manjša od 20, prične pojavljati vpliv striga (Heaton, 1958; Huang, 1960; Chui & Smith, 1990; Ip & Tse, 2001).

V literaturi zasledimo večinoma raziskave o vezanih ploščah z medsebojno pravokotnimi usmeritvami posameznih slojev, medtem ko raziskav, kjer bi imele plošče orientirane posamezne sloje pod koti, manjšimi od 90°, v literaturi ni zaslediti. Prednost takšnih plošč je v tem, da v primerjavi s ploščami, ki imajo plasti usmerjene pravokotno eno na drugo, modul elastičnosti pada počasneje s povečevanjem kota med orientacijo tkiva zunanega sloja plošče in osjo vzorca. Namen raziskave je tako izdelati 7- in 11-slojne veza-

ne plošče z različnimi usmeritvami tkiva posameznih slojev, iz katerih bomo naredili preizkušance z različnimi usmeritvami zunanega sloja tkiva. Preizkušancem bomo določili module elastičnosti z dinamičnim in statičnim testom. Rezultate posameznih testov bomo medsebojno primerjali in tako določili morebitna odstopanja vrednosti, dobljena z različnimi testi, kot tudi uporabnost obeh metod pri določanju modula elastičnosti vzorcev, sestavljenih iz slojev furnirja z različnimi usmeritvami tkiva.

2 MATERIAL IN METODE

2 MATERIAL AND METHODS

2.1 PRIPRAVA VZORCEV

2.1 PREPARATION OF SPECIMENS

Za potrebe eksperimenta smo kupili po naročilu narejen bukov luščen furnir (*Fagus sylvatica*) s tangencialno strukturo in nominalne debeline 1,5 mm. Furnir je bil narejen iz enega hloda brez vizualnih napak z enakomernim letnim prirastkom. Liste furnirja velikosti 1400 mm x 600 mm smo najprej uravnovesili v laboratoriju pri konstantni temperaturi 22 °C in relativni zračni vlažnosti 45 % do konstantne ravnovesne vlažnosti lesa 6,7 %. Po uravnovešanju smo izbrali furnirje brez vizualnih napak s čim bolj homogeno teksturo ter jih obrezali na dimenzije 600 mm x 600 mm.

Iz izbranih furnirjev smo izdelali 7- in 11-slojne vezane plošče z različnimi usmeritvami posameznih slojev furnirja kot prikazuje preglednica 1. Za izdelavo plošč smo uporabili melamin-urea-formaldehidno lepilo Meldur H97, ki smo mu dodali 1 % katalizatorja NH_4Cl ter 5 % polnila (ržena moka) za zvišanje viskoznosti. Zmes smo nato 15 minut mešali z električnim mešalnikom, dokler nismo dobili homogene mešanice. Lepilo smo nanašali z valjčkom, količina nanosa je znašala 180 g/m². Sestavljene plošče smo nato stiskali pri temperaturi 130 °C in tlakom stiskanja 1,6 MPa, s časom stiskanja za 7-slojno ploščo 10 minut, za 11-slojno ploščo pa 13 minut. Po stiskanju smo plošče zložili eno na drugo, jih obtežili in pustili en teden, da so se uravnovesile. Po uravnovešanju smo plošče obrezali na dimenzijo 550 mm x 550 mm in izmerili njihove debeline. 7-slojne plošče so imele debelino 9,9 mm, 11-slojne pa 15,6 mm.

Preglednica 1. Orientacija posameznih slojev izdelane vezane plošče.

Table 1. Grain orientations of the individual layers of the produced plywood.

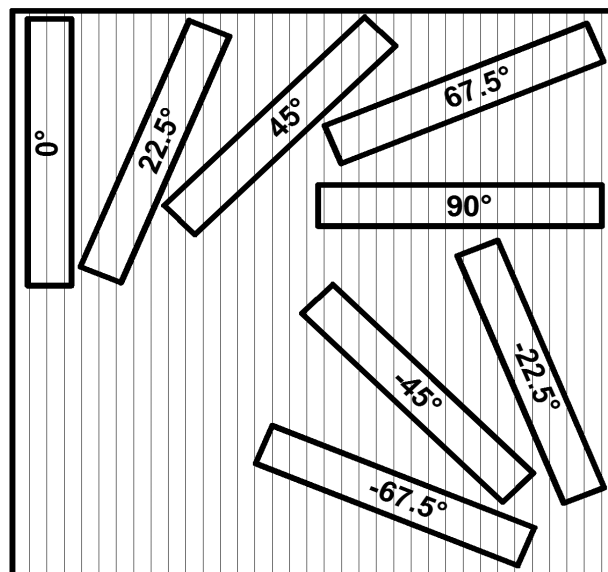
Sloj / Ply no.	7 slojev / layers		11 slojev / layers	
	7A (°)	7P (°)	11A (°)	11P (°)
1	0	0	0	0
2	45	90	30	90
3	-45	0	-30	0
4	90	90	60	90
5	-45	0	-60	0
6	45	90	90	90
7	0	0	-60	0
8	-	-	60	90
9	-	-	-30	0
10	-	-	30	90
11	-	-	0	0

Standard za določanje modula elastičnosti z upogibnim testom, ki ga bomo opisali kasneje, določa, da je razdalja med podporama 20-kratnik debeline vzorca. V našem primeru smo se tako odločili, da bomo naredili vzorce z razmerjem dolžine/debeline, ki bo imelo vrednost 27. Iz 7-slojnih plošč smo nato izrezali vzorce dimenzije 270 mm x 40 mm, iz 11-slojnih plošč pa vzorce dimenzije 410 mm x 40 mm. Iz 7-slojnih plošč z oznakami 7A in 11-slojnih z oznakami 11A smo izrezali vzorce pod koti v razmiku 22,5°, in sicer 0°, 22,5°, 45°, 67,5°, 90°, -22,5°, -45° in -67,5° (slika1), iz plošč 7P in 11P pa zaradi simetrije samo pod koti 0°, 22,5°, 45°, 67,5° in 90°, kjer kot označuje orientacijo prvega sloja furnirja glede na koordinatno os vzorca (x-y-z) (slika 2). Za vsako kombinacijo smo naredili po dva vzorca ob predvidevanju, da med njima ne bi smelo biti večjih odstopanj, saj so bile vezane plošče narejene iz furnirja z enakomernimi mehanskimi lastnostmi. Če bi prišlo do večjih odstopanj modulov elastičnosti, bi naredili dodatne vzorce.

2.2 DOLOČANJE DINAMIČNEGA MODULA ELASTIČNOSTI

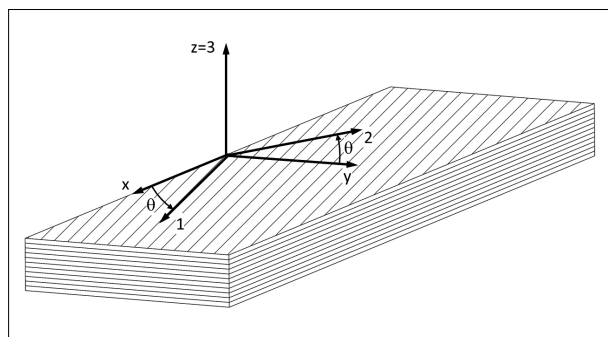
2.2 DETERMINATION OF DYNAMIC MODULUS OF ELASTICITY

Module elastičnosti vzorcev smo določili na dva načina. Prvi je bil na osnovi lastne frekvence prostega nihanja vzorca, drugi pa na osnovi podajnosti statično obremenjenega vzorca.



Slika 1. Načrt izreza vzorcev iz 7-slojne vezane plošče tipa A. Vrednost kota označuje usmerjenost prvega sloja furnirja glede na koordinatno os vzorca.

Figure 1. Cutting plan for 7-ply plywood type A. The angle value specifies the orientation of the first veneer layer with respect to the coordinate axis of the specimen.



Slika 2. Vezana plošča s koordinatnim sistemom vzorca (x-y-z) in koordinatnim sistemom glede na usmerjenost tkiva (1-2-3).

Figure 2. Plywood with specimen coordinate system (x-y-z) together with grain orientation coordinate system (1-2-3).

Dinamični modul elastičnosti smo določili na osnovi Bernoulli-Eulerjeve diferencialne enačbe, ki opisuje prečno nihanje vzorca (Thomson, 1986; Tongue, 1996):

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = -c^2 \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} \quad 1$$

kjer je z produkt prostorsko $u(x)$ in časovno odvisne funkcije $q(t)$

$$z = u(x)q(t) \quad 2$$

c pa

$$c = \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad 3$$

ρ je gostota materiala, A prečni prerez vzorca, E modul elastičnosti in I vztrajnostni moment prereza. Če vstavimo enačbo 2 v enačbo 1 in upoštevamo robne pogoje prostega nihanja vzorca na obeh koncih, da sta strig in moment enaka nič,

$$u''(0) = 0, u''(L) = 0$$

$$u'''(0) = 0, u'''(L) = 0 \quad 4$$

dobimo z upoštevanjem gornjih pogojev frekvenčno enačbo za prosto nihanje:

$$\cos(\eta L)\cos(\eta L) = 1 \quad 5$$

kjer je

$$\eta = \sqrt{\frac{\omega}{c}} \quad 6$$

prve tri rešitve enačbe 5 pa so:

$$\eta_1 L = 4,73, \eta_2 L = 7,853, \eta_3 L = 10,996 \quad 7$$

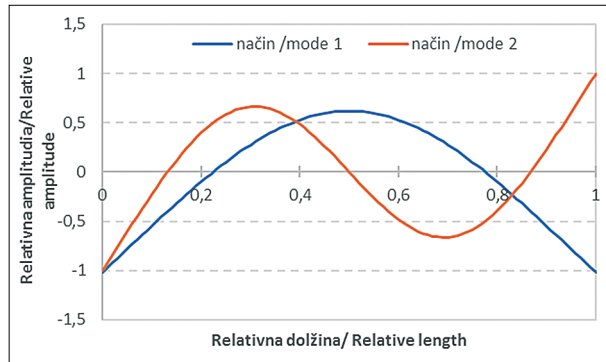
Če zapišemo funkcijo $u(x)$, ki smo jo dobili pri reševanju enačbe 1 in opisuje prostorsko odvisno nihanje vzorca:

$$z_j(x) = C_j \left[\sin\left(\frac{\eta_j L}{L}x\right) + \sinh\left(\frac{\eta_j L}{L}x\right) + D \left(\cos\left(\frac{\eta_j L}{L}x\right) + \cosh\left(\frac{\eta_j L}{L}x\right) \right) \right] \quad 8$$

$$D = \frac{\sinh(\eta_j L) - \sin(\eta_j L)}{\cos(\eta_j L) - \cosh(\eta_j L)}$$

kjer je C_j konstanta, ki jo določimo iz začetnih pogojev.

Če upoštevamo prvo in drugo rešitev frekvenčne enačbe (enačba 7), dobimo prostorsko odvisno obliko nihanja prostega vzorca za prvi in drugi nihajni način, kot je prikazano na sliki 3.



Slika 3. Oblika upogibnega nihanja prosto vpetega vzorca v prvih dveh nihajnih načinih.

Figure 3. The shape of the bending vibration of the free-free specimen in the first two vibration modes.

Iz slike 3 je razvidno, da ima prosti vzorec prvega nihajnega načina vozlišče na razdalji malo več kot 0,2 L ter malo manj kot 0,8 L. Natančno razdaljo poiščemo iz enačbe 8, tako da poiščemo rešitev enačbe:

$$z(x) = 0 \quad 9$$

ki znaša $x_1 = 0,22 L$ ter $x_2 = 0,78 L$ za prvi nihajni način, ter $x_1 = 0,13 L$ in $x_2 = 0,87 L$ za drugi nihajni način. Če pri reševanju enačbe 1 upoštevamo še:

$$\omega = c\eta^2 \quad 10$$

ter enačbo 6, lahko zapišemo:

$$\omega_j = \eta_j^2 c = \frac{(\eta_j L)^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad 11$$

oziroma enačbo za modul elastičnosti

$$E = \frac{\omega_j^2 L^4 \rho A}{(\eta_j L)^4 I} = \frac{(2\pi v_j)^2 L^4 \rho A}{(\eta_j L)^4 I} \quad 12$$

kjer je v_j lastna frekvenca j -tega načina nihanja.

Za določanje modula elastičnosti smo uporabili prvo in drugo lastno frekvenco nihanja vzorca. V ta namen smo vzorce podprli na lokaciji vozlišč nihanja, ki so se za prvi nihajni način nahajale na 0,22 L ter 0,78 L, za drugi nihajni način pa na 0,13 L in 0,87 L. Vzorce smo nato vzbudili s kladivom, tako da so prosto prečno nihali. Časovni posnetek nihanja smo posneli z mikrofonom Bruel & Kjaer Tip 4939, merilno kartico NI USB 6361 ter programom LabVIEW proizvajalca National Instruments, kjer je frekvenca vzorčenja znašala 100 kHz. Iz časovnega posnetka smo nato s hitro Fourierjevo transformacijo (FFT) dobili frekvenčni spekter nihanja, iz katerega smo nato določili prvo in drugo frekvenco prečnega nihanja vzorca. Modul elastičnosti smo nato izračunali s pomočjo enačbe 12.

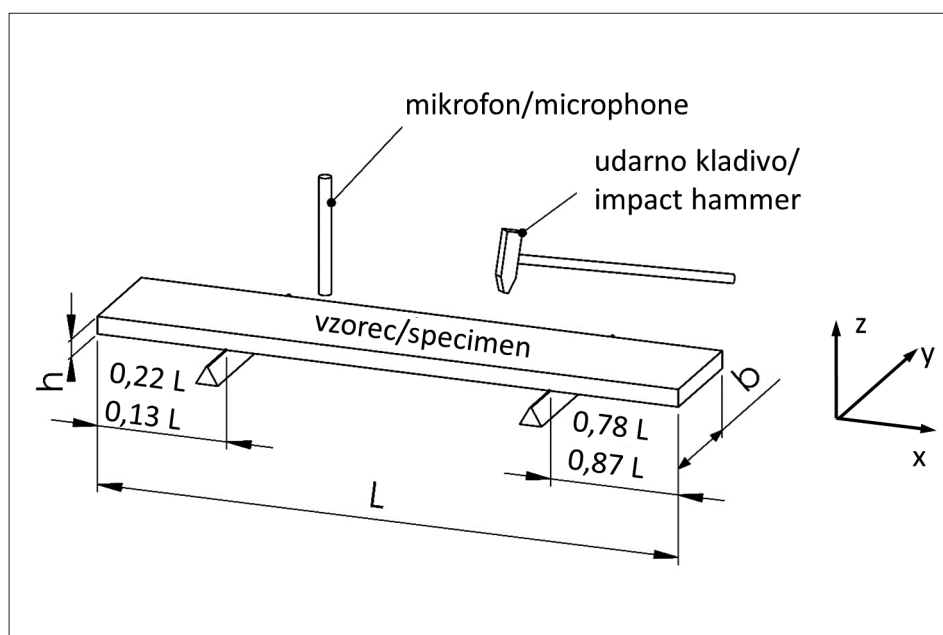
2.3 DOLOČANJE STATIČNEGA MODULA ELASTIČNOSTI

2.3 DETERMINATION OF STATIC MODULUS OF ELASTICITY

Vzorcem smo določili module elastičnosti tudi iz statičnega testa s 4-točkovnim upogibnim testom po standardu EN408-2010 (SIST, 2010). Razdalja med podporami je znašala pri 7-slojnih vzorcih 178 mm, pri 11-slojnih pa 276 mm, medtem ko je bila razdalja med obremenitvama pri 7-slojnih vzorcih 58 mm, pri 11-slojnih pa 90 mm. Hitrost pomika je znašala 1,8 mm/min za 7-slojne vzorce, ter 2,7 mm/min za 11-slojne vzorce. Vzorce smo obremenili do porušitve, nato pa v linearnem območju med 20 % in 30 % maksimalne sile določili modul elastičnosti po enačbi:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{4bh^3 \left(\frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} \right)} \quad 13$$

kjer sta F_1 in F_2 sili pri upogibu w_1 in w_2 , b in h sta širina in debelina vzorca, l razdalja med podporama, a pa razdalja med podporo in mestom obremenitve.



Slika 4. Eksperimentalni sistem za določanje dinamičnega modula elastičnosti.

Figure 4. Experimental system for determination of dynamic modulus of elasticity.

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

3 RESULTS AND DISCUSSION

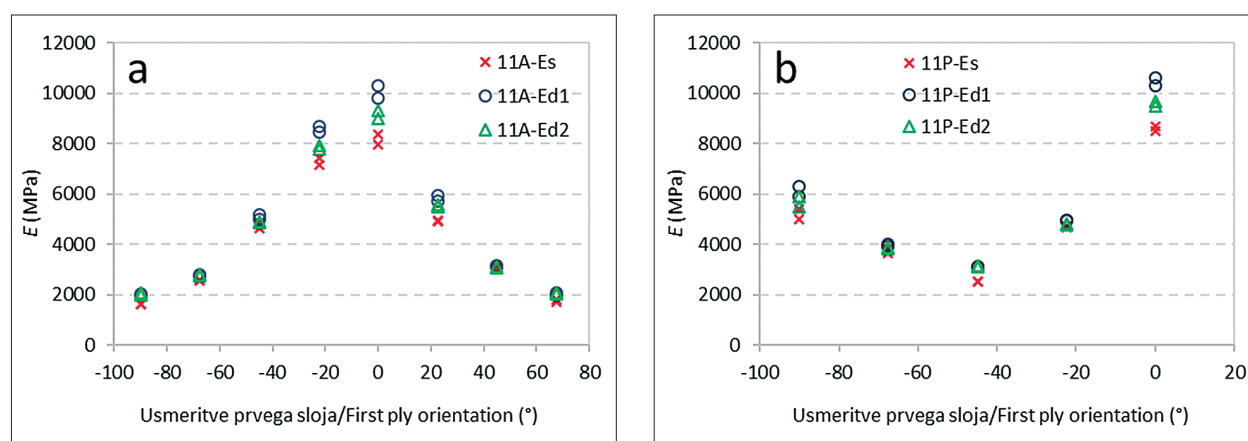
Na sliki 5 so za 11-slojne vzorce prikazani statični ter dinamični moduli elastičnosti, določeni iz lastnih frekvenc prvega in drugega nihajnega načina. Dinamični moduli so pri vseh kombinacijah usmeritve tkiva večji od statičnih, pri obeh pa se vrednosti za oba vzorca z enakimi kombinacijami usmeritve slojev ne razlikujeta bistveno, kar potrjuje našo predpostavko, da zadostujeta po dva vzorca za vsako kombinacijo, še zlasti, ker so plošče narejene iz furnirjev s podobnimi lastnostmi. Največje vrednosti modulov imajo vzorci z usmeritvijo zunanjega sloja furnirja 0° , saj ima zunanji sloj z vzdolžnim modulom največji vpliv pri upogibnih deformacijah. Pri tej usmeritvi znaša povprečni dinamični modul, določen iz lastne frekvence prvega načina nihanja, 10040 MPa , iz drugega 9159 MPa , statični pa 8159 MPa . S povečevanjem kota usmeritve moduli padajo, tako pri vzorcih tipa A kot tudi tipa P, kjer pa se modul pri slednjih zopet poveča, ko se usmeritev zunanjskega sloja približuje -90° . Moduli, določeni iz lastne frekvence drugega nihajnega načina, so v nekaterih primerih rahlo manjši od modulov, določenih iz lastne frekvence prvega nihajnega načina, kar kaže na povečan vpliv striga.

Ker se vrednosti med dinamičnimi in statičnimi moduli zelo malo razlikujejo, smo izračunali njihovo

medsebojna razmerja, ki so prikazana na sliki 6. Razmerja med povprečnimi dinamičnimi moduli iz prvega nihajnega načina in statičnimi moduli nihajo med 1,02 in 1,23 oz. v povprečju 1,14. Višje vrednosti dinamičnih modulov so skladne z literaturo, kjer avtorji navajajo podobne ugotovitve (Gorišek et al., 2018).

Na sliki 6 so prikazana tudi razmerja med dinamičnim modulom iz drugega in prvega nihajnega načina. Modula sta pri vzorcih, narejenih iz plošče tipa A in usmeritvah prvega sloja tkiva -90° in $-67,5^\circ$, skoraj enaka, saj razmerji znašata 1,02 in 1,01, nato pa se prične razlika povečevati, kar je razvidno iz padanja razmerja vse do vrednosti 0,9 pri kotu 0° . S povečevanjem kota pa razmerje prične zopet rasti vse do vrednosti 1,01, ki jo doseže pri usmeritvi tkiva $67,5^\circ$. Pri vzorcih, narejenih iz plošče tipa P, pa je razmerje pri kotu -90° najmanjše in znaša 0,93, nato narašča do 1,01 pri kotu -45° , potem pa zopet pada do vrednosti 0,92 pri usmeritvi tkiva 0° .

Vzrok nihanja razmerja med dinamičnim modulom elastičnosti iz druge in prve lastne frekvence ter odstopanja od vrednosti 1 leži v Bernoulli-Eulerjevi enačbi (enačba 1). Omenjena enačba namreč ne upošteva vpliva striga na lastno frekvenco prečnega nihanja vzorca, kjer se velikost vpliva spreminja z razmerjem dolžine in debeline vzorca L/h , razmerjem modula elastičnosti v vzdolžni sme-



Slika 5. Moduli elastičnosti za 11-slojno vezano ploščo pri različnih usmeritvah prvega sloja, določeni iz statične (E_s) in dinamične analize: E_{d1} – moduli iz frekvence prvega nihajnega načina, E_{d2} – moduli iz frekvence drugega nihajnega načina. a) vzorci, narejeni iz plošče z oznako A. b) vzorci, narejeni iz plošče z oznako P.

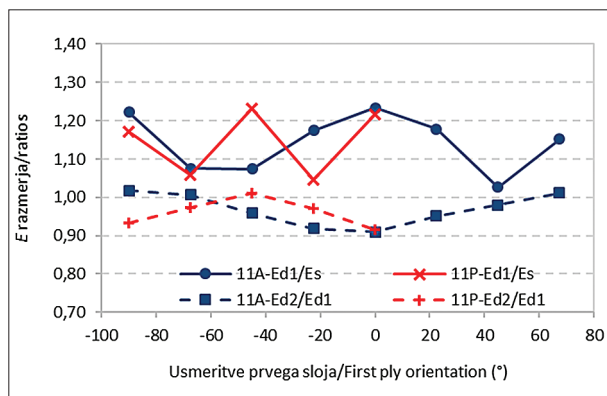
Figure 5. Modulus of elasticity for 11-layer samples for different combinations of layer orientations from static (E_s) and dynamic tests: E_{d1} - modulus of elasticity determined from natural frequency of the first bending mode, E_{d2} - modulus of elasticity determined from natural frequency of the second bending mode. a) Samples made from plywood type A. b) Samples made from plywood type P.

ri vzorca in strižnim modulom v ravnini nihanja E_x/G_{xz} ter načinom lastnega nihanja vzorca. Tako se pri razmerju L/h , manjšem od 20 ter E/G večjem od 10 (Brancheriau & Bailleres, 2002; Brancheriau, 2006), vpliv striga na lastne frekvence prične močno pove-

čevati in se še dodatno poveča pri višjih nihajnih načinih lastnega nihanja, kaže pa se v večji podajnosti vzorca oz. posledično v nižjih lastnih frekvencah. V primeru neupoštevanja vpliva striga lahko tako izračunamo module elastičnosti, ki so bistveno manjši od dejanskih.

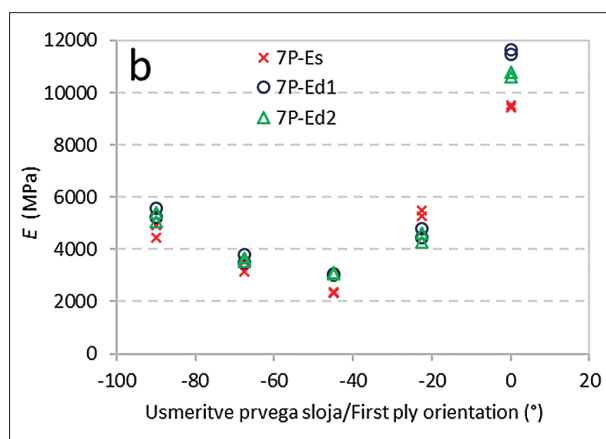
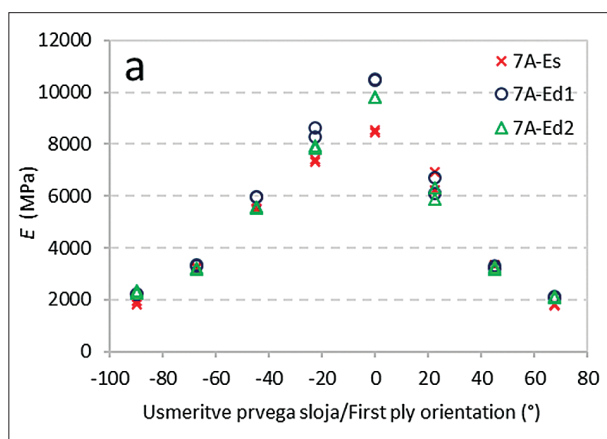
V našem primeru je razmerje L/h večje od 20 in znaša 26,3, vendar se vpliv striga kljub temu pojavi pri višjih nihajnih načinih in večjem razmerju E/G , kot je to v primeru vzorcev tipa A in usmeritvijo tkiva zunanjega sloja 0° . Pri tej vrednosti je izmerjen modul elastičnosti največji, s tem pa je najvišje tudi razmerje E/G in največji vpliv striga. Vpliv razmerja E/G je tako lepo viden iz razmerja dinamičnih modulov, ki ima najnižje vrednosti pri usmeritvi tkiva zunanjega sloja 0° in znaša 0,91, kjer je tudi modul največji, nato pa vpliv pada, vrednosti razmerij modulov pa se zopet približujejo 1.

Podobno nihajo moduli pri 7-slojnih vzorcih, kar prikazuje slika 7, njihova razmerja pa slika 8. Dinamični moduli so večji od statičnih, njihova razmerja nihajo med 0,97 pa do 1,23, oz. v povprečju 1,10 za vzorce tipa A, ter med 0,86 do 1,22, oz. v povprečju 1,12 za vzorce tipa P. Ravno tako so razmerja med dinamičnim modulom iz druge in modulom iz prve lastne frekvence najvišja pri najnižjih moduli elastičnosti, oz. najnižja pri najvišjih moduli elastičnosti.



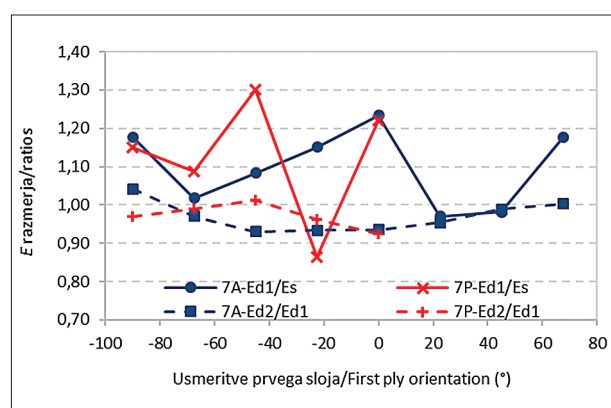
Slika 6. Razmerja med povprečnimi vrednostmi dinamičnega in statičnega modula elastičnosti (E_{d1}/E_s), ter razmerja med dinamičnim modulom iz druge in prve lastne frekvence (E_{d2}/E_{d1}) za 11-slojne vzorce tipa A (11A) in tipa P (11P).

Figure 6. Relationships between mean dynamic and static (E_{d1}/E_s) modulus of elasticity and relationships between mean dynamic modulus from second and first natural frequency (E_{d2}/E_{d1}) for 11-layer samples of type A (11A) and type P (11P).



Slika 7. Moduli elastičnosti za 7-slojno vezano ploščo pri različnih usmeritvah prvega sloja, določeni iz statične (E_s) in dinamične analize: E_{d1} – moduli iz frekvence prvega nihajnega načina, E_{d2} – moduli iz frekvence drugega nihajnega načina. a) vzorci, narejeni iz plošče z oznako A. b) vzorci, narejeni iz plošče z oznako P

Figure 7. Modulus of elasticity for 11-layer samples for different combinations of layer orientations from static (E_s) and dynamic tests: E_{d1} - modulus of elasticity determined from natural frequency of the first bending mode, E_{d2} - modulus of elasticity determined from natural frequency of the second bending mode. a) Samples made from plywood type A. b) Samples made from plywood type P.



Slika 8. Razmerja med povprečnimi vrednostmi dinamičnega in statičnega modula elastičnosti (E_{d1}/E_s) ter razmerja med dinamičnim modulom iz druge in prve lastne frekvence (E_{d2}/E_{d1}) za 7-slojne vzorce tipa A (7A) in tipa P (7P).

Figure 8. Relationships between mean dynamic and static (E_{d1}/E_s) modulus of elasticity and between mean dynamic modulus from second and first natural frequency (E_{d2}/E_{d1}) for 7-layer samples of type A (7A) and type P (7P).

Iz razmerij dinamičnih modulov iz drugega in prvega nihajnega načina lahko sklepamo na natančnost določitve dinamičnega modula iz lastne frekvence prvega nihajnega načina. V primeru, da je razmerje enako 1, pomeni, da je dinamičen modul elastičnosti določen iz lastne frekvence prvega načina enak modulu, določenemu iz lastne frekvence drugega načina, s tem pa lahko potrdimo, da so določeni moduli enaki dejanskim. V nasprotnem primeru, ko je razmerje manjše od 1, pa pomeni, da se je pojavil vpliv striga. Ker je bilo pri vzorcih 11A razmerje pri usmeritvi zunanjega tkiva -90° , $-67,5^\circ$ in $67,5^\circ$ praktično enako 1, nato pa se je razmerje pričelo zmanjševati s povečevanjem modula elastičnosti in s tem tudi E/G razmerja, lahko zatrdimo, da je zmanjševanje razmerij modulov posledica povečevanja vpliva striga. Tako lahko z gotovostjo trdimo, da je dinamični modul, določen iz druge lastne frekvence prečnega nihanja vzorca, manjši od dejanskega zaradi vpliva striga. Poraja pa se vprašanje glede vpliva striga na modul, določenega iz prve lastne frekvence, saj zmanjševanje razmerja modulov pomeni, da se vpliv striga povečuje z večanjem E/G kot tudi z načinom prostega nihanja vzorca, še vedno pa ne moremo trditi, kolikšen je vpliv pri prvem nihajnem načinu. Če bi želeli dolo-

čiti vpliv striga še na prvi način in s tem na njegovo lastno frekvenco oz. dinamični modul, bi bilo potrebno namesto Bernoulli-Eulerjeve diferencialne enačbe upoštevati Timoshenkovo, ki pri prečnem nihanju upošteva tudi vpliv striga (Brancheriau & Bailleres, 2002; Merhar & Humar, 2020).

4 ZAKLJUČKI

4 CONCLUSIONS

Iz opravljene raziskave lahko potrdimo, da sta tako dinamični kot statični način določanja modulov elastičnosti primerna za določanje elastičnih lastnosti vzorcev iz vezane plošče s poljubnimi kombinacijami usmeritev tkiva posameznih slojev furnirja. Vrednosti dinamičnih modulov, določenih iz lastnih frekvenc prvega nihajnega načina so večje od statičnih modulov pri 7-slojnih ploščah v povprečju za 12 % in pri 11-slojnih za 14 %. S primerjanjem dinamičnih modulov, določenih iz prve in iz druge lastne frekvence, lahko potrdimo točnost obeh modulov, ko je njuno razmerje enako 1. V nasprotnem primeru, ko je razmerje med modulom iz druge lastne frekvence in modulom iz prve manjše od 1, pa točnosti modulov ne moremo potrditi, saj se pojavi vpliv striga, ki pa se z višanjem načina nihanja samo še povečuje. Vpliv se kaže v lastni frekvenci, ki je nižja, kot bi bila, če ne bi bilo vpliva striga, posledično pa je nižji tudi modul elastičnosti, če za izračun uporabimo Bernoulli-Eulerjevo enačbo, ki vpliva striga ne upošteva. V takšnih primerih bi bila bolj smiselna uporaba Timoshenkove enačbe (Brancheriau & Bailleres, 2002; Merhar & Humar, 2020), ki upošteva vpliv striga na prečno nihanje vzorca.

5 POVZETEK

5 SUMMARY

Plywood is now a widely used material in the construction and furniture industries. It is usually produced from peeled veneers of various tree species, with the veneers being of inferior quality in the inner layers of the board and better in the outer, visible layers. Wood has pronounced anisotropic properties, which can be considered orthotropic in certain cases, if the orientation of the grain in the longitudinal, radial and tangential directions coincides with the coordinate system of the sample. However, since plywood consists of veneer layers

with different grain orientations, high anisotropy can be greatly reduced at the level of the plywood. The mechanical properties of the plywood can thus be influenced by the mechanical properties of the wood or tree species used, the number of layers as well as the grain orientations of the individual layers and the technological production process in panel manufacture. In the literature there are mainly studies on plywood with mutually perpendicular orientations of individual layers, while studies where the boards would have oriented individual layers at angles of less than 90° are much rarer. The advantage of such boards is that, compared to boards with mutually perpendicular orientations of the layers, the modulus of elasticity decreases more slowly with increasing angle between the grain orientation of the outer layer of the board and the axis of the sample.

In the study, beech peeled veneer (*Fagus sylvatica*) with a tangential structure and a nominal thickness of 1.5 mm was used to produce 7- and 11-ply plywood boards with different grain orientations of the individual layers. The boards were produced from conditioned beech veneer with an equilibrium moisture content of 6.7%. Selected veneers were used to produce panels with different orientations of the individual veneer layers, as shown in Table 1. The melamine-urea-formaldehyde adhesive Meldur H97 was used to produce the boards, to which 1% NH_4Cl catalyst and 5% filler (rye flour) were added to increase the viscosity. The mixture was then stirred with an electric mixer for 15 minutes until a homogeneous mixture was achieved. The adhesive was applied with a roller with the application of 180 g/m². The plywood was then compressed at a temperature of 130°C and a compression pressure of 1.6 MPa. The pressing time was 10 and 13 minutes for the 7-layer and 11-layer boards, respectively. After pressing, the plates were stacked on top of each other and conditioned for 1 week. The 7-layer plates were 9.9 mm thick and the 11-layer plates were 15.6 mm thick.

From boards with different grain orientations of individual veneer layers, 40 mm wide and 270 mm and 410 mm long samples were cut from the boards for the 7- and 11-layer boards, respectively. The samples from the 7A and 11A plates were cut at an angle difference of 22.5°, namely 0°, 22.5°, 45°, 67.5°, 90°, -22.5°, -45° and -67.5°, (Figure 1)

and the samples from the 7P and 11P boards were cut only at the angles of 0°, 22.5°, 45°, 67.5° and 90° due to symmetry (Figure 2).

The modulus of elasticity was determined in two ways. The first was based on the natural frequencies of the first and second transverse vibration mode using the Bernoulli-Euler equation. The samples were supported at the location of the nodes, which was 0.22 L and 0.78 L for the first mode and 0.13 L and 0.87 L for the second mode (Figure 3). The samples were then excited with a hammer so that they could vibrate freely (Figure 4). The vibration was recorded with a Bruel & Kjaer Type 4939 microphone, an NI USB 6361 data acquisition card and National Instruments' LabVIEW program with a sampling frequency of 100 kHz. The frequency spectrum of the vibration was then obtained from the time records by Fast Fourier Transform (FFT), from which the frequencies of the first- and second transverse vibration modes of the sample were determined (Equation 12).

The second method of determination was a static 4-point bending test according to EN408-2010, in which the distance between the supports for 7- and 11-layer specimens was 178 and 276 mm, respectively, and the distance between the loads was 58 and 90 mm, respectively. The loading rate was 1.8 mm/min for 7-layer specimens and 2.7 mm/min for 11-layer specimens. The specimens were loaded until failure, and then the Young's modulus was determined according to Equation 9 in the linear range between 20% and 30% of maximal force (Equation 13).

The dynamic moduli are larger than the static ones in all combinations of grain orientation. Specimens with a veneer outer layer orientation of 0° have the highest modulus values, since the outer layer with a longitudinal modulus has the greatest influence on flexural stiffness. For this orientation, the mean dynamic modulus determined from the natural frequency of the first and second vibration modes is 10040 MPa and 9159 MPa, respectively, and the static modulus is 8159 MPa (Figure 5). With increasing orientation angle, the modulus decreases for both type A and type P specimens and increases again for the latter when the orientation of the outer layer approaches -90°.

The dynamic moduli of both frequencies are almost identical in the samples of the type A plate

at the orientations of the first grain layer -90° and -67.5° , as their ratio is 1.02 and 1.01, respectively (Figure 6), and then the difference begins to increase, which is shown by the decrease of the ratio to a value of 0.9 at an angle of 0° . As the angle increases, the ratio begins to grow again, up to a value of 1.01, which is reached at a grain orientation of 67.5° . For specimens made from type P plates, the ratio is smallest at an angle of -90° and is 0.93, then increases to 1.01 at -45° and decreases to 0.92 at 0° grain orientation.

The ratio of the dynamic moduli changes due to the influence of shear, which is not considered in the Bernoulli-Euler equation. The influence of the shear starts to increase considerably at a L/h (length/thickness) ratio of less than 20 and an E/G of more than 10, which is further increased by higher vibration modes. For plates with 11 layers, the L/h ratio is greater than 20 and is 26.3, but the shear effect still occurs at higher vibration modes and a higher E/G ratio, as in the case of type A samples and a grain orientation of the outer layer of 0° . At this value, the measured modulus of elasticity is highest, and thus the E/G ratio and its influence is also highest. The influence of the E/G ratio is therefore clearly visible in the dynamic modulus ratio, which has the lowest values at a grain orientation of the outer layer of 0° and is 0.91, where the modulus is also highest. Then the influence decreases and the value of the modulus ratio approaches 1. A similar situation is given for samples with 7 layers (Figures 7 and 8).

From the ratios of the dynamic moduli from the second and first vibration modes we can confirm the accuracy of the determination of the dynamic modulus from the natural frequency of the first vibration mode. If the ratio is equal to 1, it means that the dynamic modulus of elasticity determined from the natural frequency of the first vibration mode is equal to the modulus determined from the natural frequency of the second vibration mode, and thus we can confirm that the moduli are equal to the actual moduli. Otherwise, if the ratio is less than 1, it means that the influence of shear has occurred, and thus the accuracy of a given modulus of elasticity is questionable. In the latter case, it is more appropriate to use the Tymoshenko equation, which also takes into account the influence of shear.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGEMENT

Zahvala gre Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije za finančno podporo v okviru programske skupine P2-0182, Dominiku Kodermanu za pomoč pri pripravi vzorcev ter Bogdanu Šegi za nasvete pri pripravi vezanih plošč.

VIRI

REFERENCES

- Bal, B. C. (2014). Some physical and mechanical properties of reinforced laminated veneer lumber. *Construction and Building Materials*, 68, 120-126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.042>
- Bal, B. C. (2016). Some technological properties of laminated veneer lumber produced with fast-growing poplar and eucalyptus. *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, 18(3), 413-424. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000037>
- Biadala, T., Czarnecki, R., & Dukarska, D. (2020). Water resistant plywood of increased elasticity produced from European wood species. *Wood Research*, 65(1), 111-123.
- Brancheriau, L. (2006). Influence of cross section dimensions on Timoshenko's shear factor - Application to wooden beams in free-free flexural vibration. *Annals of Forest Science*, 63(3), 319-321. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:2006011>
- Brancheriau, L., & Bailleres, H. (2002). Natural vibration analysis of clear wooden beams: A theoretical review. *Wood Science and Technology*, 36(4), 347-365. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-002-0143-7>
- Brancheriau, L., Bailleres, H., & Guitard, D. (2002). Comparison between modulus of elasticity values calculated using 3 and 4 point bending tests on wooden samples. *Wood Science and Technology*, 36(5), 367-383. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-002-0147-3>
- Chui, Y. H., & Smith, I. (1990). Influence of rotatory inertia, shear deformation and support condition on natural frequencies of wooden beams. *Wood Science and Technology*, 24(3), 233-245. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01153557>
- Gorišek, Ž., Plavčak, D., Straže, A., & Merela, M. (2018). Tehnološke lastnosti in uporabnost lesa velikega pajesena v primerjavi z lesom velikega jesena/ Technological properties and usability of chinese sumac wood in comparison with ash wood. *Les/Wood*, 67(2), 29-44. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2018.v67n02a03>
- Guan, C., Liu, J., Zhang, H., Wang, X., & Zhou, L. (2019). Evaluation of modulus of elasticity and modulus of rupture of full-size wood composite panels supported on two nodal-lines using a vibration technique. *Construction and Building Materials*, 218, 64-72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.086>
- Guan, C., Zhang, H., Zhou, L., & Wang, X. (2015). Dynamic determination of modulus of elasticity of full-size wood composite panels using a vibration method. *Construction and Building*

- Materials, 100, 201-206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.008>
- Haines, D. W., Leban, J. M., & Herbé, C. (1996). Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. *Wood Science and Technology*, 30(4), 253-263. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf00229348>
- Hearmon, R. F. S. (1958). The influence of shear and rotatory inertia on the free flexural vibration of wooden beams. *British Journal of Applied Physics*, 9(10), 381-388. DOI: <https://doi.org/10.1088/0508-3443/9/10/301>
- Hoffmann, J. A., & Wertheimer, T. (2000). Cantilever beam vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 229(5), 1269-1276. DOI: <https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2572>
- Huang, T. C. (1960). The effect of rotatory inertia and of shear deformation on the frequency and normal mode equations of uniform beams with simple end conditions. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, 28(4), 579-584. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3641787>
- Ip, K. H., & Tse, P. C. (2001). Determination of dynamic flexural and shear moduli of thick composite beams using natural frequencies. *Journal of Composite Materials*, 35(17), 1553-1569. DOI: <https://doi.org/10.1106/U0FU-9BR5-JNTG-B57R>
- Kallakas, H., Rohumaa, A., Vahermets, H., & Kers, J. (2020). Effect of different hardwood species and lay-up schemes on the mechanical properties of plywood. *Forests*, 11(6), 1-13. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11060649>
- Kollmann, F. F. P., & Côte, W. A. (1975). *Principles of wood science and technology*. Solid Wood. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Krüger, R., & Wagenführ, A. (2020). Comparison of methods for determining shear modulus of wood. *European Journal of Wood and Wood Products*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01565-2>
- Merhar, M., & Bučar, B. (2008). Determination of correction coefficient for dynamic modulus of elasticity obtained by analysing the frequency response of a clamped cantilever specimen. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 66(3), 233-235. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-007-0219-z>
- Merhar, M., & Humar, M. (2020). The influence of wood modification on transfer function of a violin bridge. *Drvna Industrija*, 71(2), 163-169. DOI: <https://doi.org/10.5552/drind.2020.1966>
- Roohnia, M. (2014). An estimation of dynamic modulus of elasticity in cantilever flexural timber beams. *Drvna Industrija*, 65(1), 3-10. DOI: <https://doi.org/10.5552/drind.2014.1229>
- Sikora, A., Svoboda, T., Zaborsky, V., & Gaffova, Z. (2019). Effect of selected factors on the bending deflection at the limit of proportionality and at the modulus of rupture in laminated veneer lumber. *Forests*, 10(5), 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10050401>
- SIST (2010). Timber structures - Structural timber and glued laminated timber- Determination of some physical and mechanical properties. In *SIST EN 408:2010*
- Svoboda, T., Sikora, A., Zaborsky, V., & Gaffova, Z. (2019). Laminated veneer lumber with non-wood components and the effects of selected factors on its bendability. *Forests*, 10(6), 17. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10060470>
- Šega, B., & Šernek, M. (2018). Križno lamelirani les – lastnosti in zahteve / Cross-laminated timber – characteristics and requirements. *Les/Wood*, 67(2), 33-42. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2018.v67n02a05>
- Thomson, W. T. (1986). *Theory of vibration with application* (2nd ed.). London ; Sydney: G. Allen & Unwin.
- Tongue, B. H. (1996). *Principles of vibration*. New York ; Oxford: Oxford University Press.
- Wilczyński, M., & Warmbier, K. (2012). Elastic moduli of veneers in pine and beech plywood. *Drewno*, 188, 47-56.
- Yoshihara, H. (2012a). Influence of the specimen depth to length ratio and lamination construction on Young's modulus and in-plane shear modulus of plywood measured by flexural vibration. *BioResources*, 7(1), 1337-1351.
- Yoshihara, H. (2012b). Off-axis Young's modulus and off-axis shear modulus of wood measured by flexural vibration tests. *Holzforschung*, 66(2), 207-213. DOI: <https://doi.org/10.1515/HF.2011.118>



OPTIMIZACIJA CNC TEHNOLOGIJE PRI IZDELAVI UMETNIŠKEGA IZDELKA

OPTIMIZATION OF CNC TECHNOLOGY IN THE MANUFACTURING PROCESS OF AN ARTISTIC PRODUCT

Katarina Remic¹, Miran Merhar^{1*}

UDK 674.057:004.896

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Prispelo / Received: 30. 10. 2020

Sprejeto / Accepted: 20. 11. 2020

Izvleček / Abstract

Izvleček: V delu smo izvedli analizo optimizacije procesa obdelave umetniškega lesenega izdelka (okvir ogledala) na 3-osnem CNC stroju. Iz grafične slike smo najprej v programu ArtCAM izdelali 3D model, triangulirali njegovo površino in ustvarili STL datoteko. To smo naložili v program SolidWorks, kjer smo z njegovim dodatkom SolidCAM določili parametre obdelave. Grobo obdelavo smo določili z operacijami HSR (high speed roughing), fino pa s HSM (high speed machining). Posamezne operacije smo primerjali in ugotovili, da bi najkrajši čas obdelave pri najboljši kvaliteti dobili pri izbiri HSR operacij »Contour Roughing« nato »Rest Roughing« ter HSM operacije »3D Constant Step Over«, znašal pa bi 4 ure in 1 minuto. Izdelano kodo smo preverili s simulacijo izdelave ter na koncu izdelali G kodo za naš izdelek.

Ključne besede: CNC, les, pohištvo, rezkanje, SolidCAM, SolidWorks

Abstract: The work analyses the optimisation of the manufacturing process of an artistic wooden product (mirror frame) with a 3-axis CNC machine. The 3D model was first made in ArtCAM, from where the STL file was later uploaded to SolidWorks. The parameters for the HSR (high-speed roughing), and HSM (high-speed machining) operations were determined in SolidCAM. The findings show that a combination of operations from HSR and HSM are the best choice, considering the shape of the model and the capabilities of the machine, as the best ratio between the quality of the surface and the time needed for the operation is provided by these. Operations differ with regard to the tool path and parameters that can be adjusted. The operations were compared and the best results are achieved when the HSR operations "Contour Roughing" and then "Rest Roughing" are used and when the HSM operation "3D Constant Step Over" is used, where the machining time amounted 4 hours and 1 minute. Finally the G code was made for our product.

Keywords: CNC, wood, furniture, milling, SolidCAM, SolidWorks

1 UVOD**1 INTRODUCTION**

Rezbarjeno pohištvo je bilo skozi stoletja simbol spretnosti izdelovalca (Auslander, 1998), kvaliteta površine pa je bila odvisna tudi od uporabljene drevesne vrste (Merhar et al., 2020). Takšnih mojstrov danes skoraj ni več, po drugi strani pa ročno rezbarjenje zahteva ogromno časa. Pojavila se je polavtomatizirana rešitev: rezkanje na CNC (Computer Numerical Controlled) stroju. Večosni računalniško krmiljeni (CNC) stroji omogočajo izdelavo podobnih umetniških izdelkov in stilskega pohištva, za svoje delovanje pa potrebujejo G-kodo. To lahko generiramo s CAM (Computer Aided Manufacturing) programsko opremo, pri čemer določimo obdelovalne operacije, tako da je izdelava

čim bolj optimalna, kvaliteta obdelane površine pa čim boljša (Koleda et al., 2019; Merhar et al., 2019; Jovanović et al., 2020). Operacije se razlikujejo glede na vrsto in zahtevnost izdelka. Z izbiro pravih operacij ustvarimo primerno G-kodo, stroj pa nam izdela lep, kakovosten izdelek (Balič & Pahole, 2008). Problem se lahko pojavi, kadar nimamo na voljo ustreznega oz. primerne računalniškega modela ali pa je ta neustrezne kvalitete. Zato je potrebno skrbno pripraviti računalniški model izdelka, ki ga želimo izdelati.

Stereolitografirane datoteke (STL) so bile razvite z namenom olajšanja hitre izdelave prototipov in so kmalu postale aktualne v modeliranju (Rypl & Bittnar, 2006). STL modeli predstavljajo triangulirano površino oz. mejo telesa. Algoritmi, ki ustvarijo trikotnike, so zelo natančni, vendar pa nastali model ni geometrijsko identičen izhodišču. Površina namreč ni sestavljena iz krivin in kompleksnih geometrijskih oblik, ampak iz ogromno

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

* e-pošta: miran.merhar@bf.uni-lj.si

majhnih trikotnikov. Pogosto se takšna triangulacija uporablja pri metodi končnih elementov, pri tem reguliramo in spremljamo kakovost trikotnikov tako, da upoštevamo dolžino stranic trikotnika. Zahtevana kvaliteta je odvisna od primera do primera (Béchet et al., 2002). Velikokrat se zgodi, da je površina izdelana iz prevelikih trikotnikov, ki so najbolj problematični, saj ne zagotavljajo zadostne kakovosti površine. V takšnih primerih je potrebno »glajenje« oziroma manjšanje trikotnikov. Površina se razdeli na manjše interpolirane podenote, kar imenujemo »Butterfly scheme«. V zadnji fazi rekonstrukcije se generira mreža (»mesh«), ki jo sestavljajo občutno manjši trikotniki (Rypl & Bittnar, 2006).

Nadgradnja programa SolidWorks je mogoča z dodatkom SolidCAM, ki je namenjen načrtovanju strojniške obdelave ter izdelavi G kode. Glede na model, ki ga želimo obdelati, izberemo stroj, poti obdelave in vrsto rezkalnega orodja. Program ponuja različne možnosti obdelave z različnimi oblikami orodij (Face Mill, Bull Nose Mill, End Mill, Lollipop Mill, Ball Nose Mill, Taper Mill, Slot Mill ...). Pri obdelavi STL modelov se uporabljajo operacije »iMachining«, ki avtomatizirano ustvarja poti gibanja orodja, da dosežemo čim večjo učinkovitost obdelave. iMachining zajema operaciji HSR (High Speed Roughing) in HSM (High Speed Milling) za 3-osne CNC stroje in strategije za 5-osne CNC stroje. Pred začetkom moramo definirati geometrijo (tridimenzionalen model, ki ga želimo obdelati), orodje (ustvarimo in shranimo lahko poljubno število orodij, ki jim določimo parametre), omejitve (meja rezkanja), prehode (globina odvzema), način prehajanja in gibanja orodja ter dodatne specifikacije, ki so vezane na vrsto izbrane operacije (SolidCAM, 2015).

Namen raziskave je preučiti tehnološke postopke obdelave stilskega okvirja ogledala ter izdelati tridimenzionalen (3D) računalniški model, zanj izbrati primerne operacije oz. kombinacije operacij ter generirati G-kodo, s katero bi lahko izdelali naš izdelek tudi na CNC stroju. Še posebej smo se osredotočili na izdelavo ustreznega računalniškega modela izdelka ter izbiro pravih operacij, kar nam je služilo kot osnova za izdelavo G kode.

2 MATERIAL IN METODE

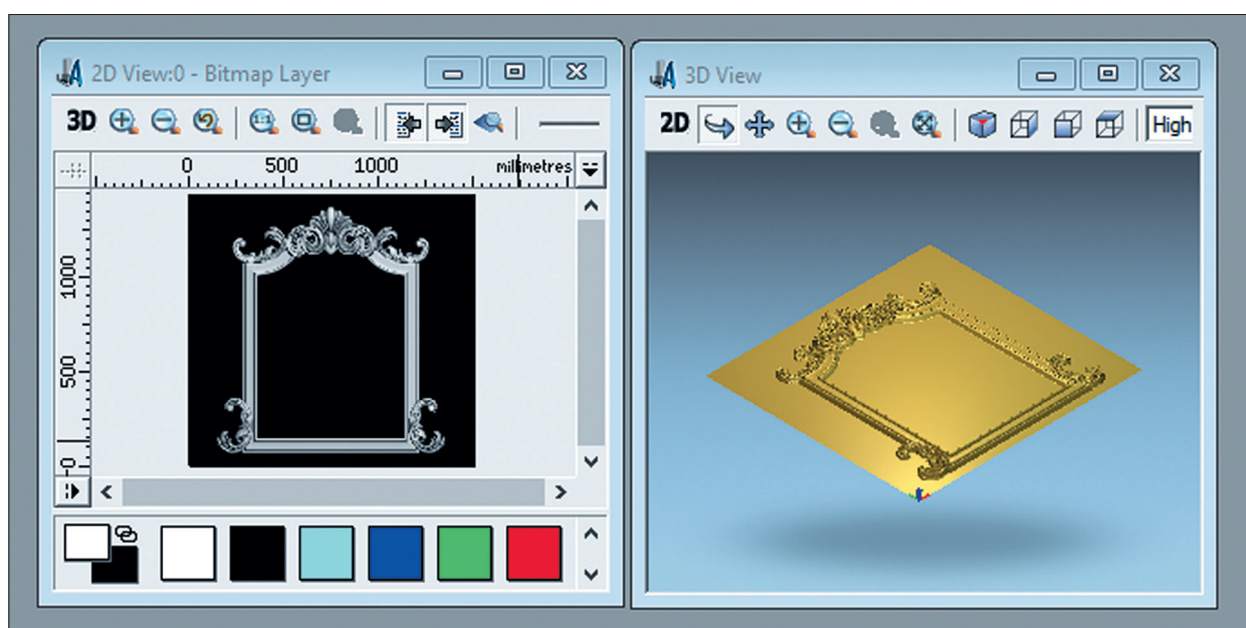
2 MATERIALS AND METHODS

Izhodiščno sliko stilskega okvirja ogledala, ki je bila HD (High Definition) resolucije, smo odprli v programu Adobe Photoshop CC, in najprej dodali »Layer« črne barve, mu izbrisali »Layer Mask« in ga hierarhično umestili pod izhodiščno sliko. Nato smo z orodjem »Quick Selection Tool« natančno označili ozadje in pazili, da pri tem ne označimo delov okvirja. Izbrali smo »Select Inverse« in nato pravilnost označenega dela preverili s ukazom »Quick Mask«. Program ArtCAM globine modela določa po sistemu barv. Ker črna barva predstavlja globino 0 mm, smo morali ozadju spremeniti barvo v enotno, črno. Ko smo bili z natančnostjo izbire zadovoljni, smo z ukazom »Select and Mask« odstranili ozadje, pri tem pa smo za željeno izhodišče izbrali »Layer« črne barve, ki smo ga predhodno ustvarili. Dobili smo barvni model na črnem ozadju, zato smo v zavihku »Image« izbrali podkategorijo »Mode« in sliko iz RGB (red, green, blue) barvne palete spremenili v »Grayscale«.

2.1 OBLIKOVANJE STL MODELA

2.1 STL MODELING

Urejeno sliko smo naložili v program ArtCAM (ArtCAM). Izbrali smo novo datoteko in sicer možnost »From Image File«. Izbrali smo možnost metode določevanja »Image Size« in določili širino 1500 mm, višino pa je program glede na razmerje stranic izračunal sam (1428,5 mm). Ker smo imeli na sliki okoli modela še nekaj ozadja, je to pomenilo, da bo model nekoliko manjših dimenzij od tistih, ki smo jih določili. Že na začetku smo določili maksimalno višino, ki je bila 35 mm. Program nam je po potrditvi dimenzij odprl dva okna, enega z dvodimenzionalno sliko in enega z izhodiščem za 3D model (slika 1). 2D sliko bi lahko še urejali v programu ArtCAM, vendar to ni bilo potrebno, saj smo vse opravili že v Photoshopu. Naš model je bil že v začetku razmeroma dobre kvalitete, vendar je bila za izdelavo primernih trikotnikov površina pregroba. V orodjarni v razdelku »Relief tools« smo zato izbrali operacijo »Smooth Relief«, s katero smo zgladili površino. Optimalno gladkost geometrije smo dosegli s štiri-mi prehodi glajenja. Nato smo, prav tako v razdelku »Relief Tools«, izbrali operacijo »Create Triangle Mesh«. Za parametre triangulacije smo določili toleranco 0,01 mm in izbrali možnost izdelave modela



Slika 1. 2D slika in osnutek 3D modela v programu ArtCAM

Figure 1. 2D picture and 3D model draft in ArtCAM



Slika 2. Končan STL model

Figure 2. Final STL model

z ravno hrbtno površino (»Close With A Flat Plane«) ter z ukazom »Create Triangles« izdelali triangulirano površino. Dobljeno geometrijo, ki je bila sestavljena iz 221656 trikotnikov, smo shranili kot »Binary STL File« in jo izvozili kot STL model (slika 2).

2.2 PROGRAMIRANJE IN OPERACIJA HSR

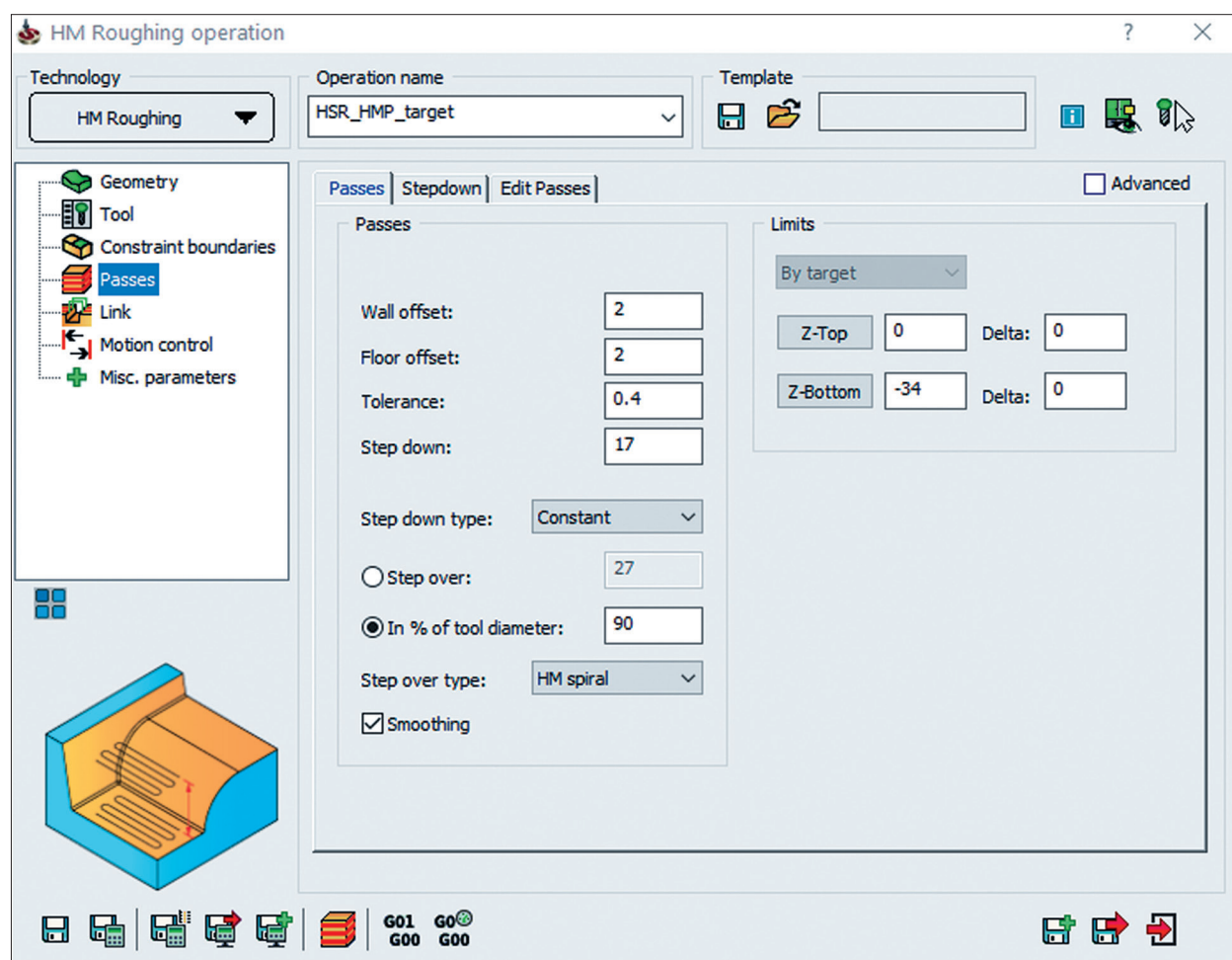
2.2 PROGRAMMING AND HSR OPERATION

V programu SolidWorks smo izdelali surovec. Naš STL model je imel dimenzije 1257 mm x 1347,5 mm x 33,5 mm, surovec smo izdelali z nekaj milimetri nadmere. V programu SolidCAM smo uporabili ukaz »New Milling STL« in naložili našo STL datoteko. Izbrali smo CNC obdelovalni stroj in sicer 3-osni FANUC. Koordinatni sistem smo za začetek določili pravokotno na površino z ukazom »Normal to Current View«. Določili smo surovec (»Stock«), katerega dimenzije smo določili glede na dimenzije modela z ukazom »Take Model Dimensions«. Nato smo z ukazom »Insert Components« naložili prej ustvarjen surovec, ki smo ga z ukazi »Mate« poravnali tako, da smo popolnoma prekrili STL model. Ponovno smo izbrali surovec (»Stock«), tokrat smo za način določevanja izbrali možnost »3D Model« in nato kot CAD model izbrali surovec, ki smo ga naložili. Popravili smo koordinatni sistem, tako da smo za način določevanja izbrali možnost s tremi točkami in označili tri kote surovca, da je bil koordinatni sistem postavljen v spodnji levi kot. Začeli smo z operacijo HSR, kjer smo surovec grobo obdelali. Z ukazoma »Add Milling Operation« in nato »3D HSR« smo izbrali tip obdelave. HSR ima več možnosti obdelave, zato smo izbrali vrsto tehnološkega procesa. Kot prvo varianto smo preverili

»HM Roughing«. Izbrali smo že prej oblikovan koordinatni sistem »MAC 1 (1-Position)«, za tarčo obdelave pa smo izbrali STL model. Izbrali smo rezkar tipa »END MILL« s premerom 30 mm, maksimalno globino rezkanja 38 mm in podajno hitrostjo 2500 mm/min. Omogočili smo funkcijo samodejnega izračuna dolžine orodja (»Calculate minimum tool length«). Ročno smo nastavili omejitve, tako da smo izbrali zgornji zunanji in zgornji notranji rob surovca, »Boundary – Tool Relation« pa smo določili kot »External«. V prehodih (»Passes«) smo določili rezkanje z nadmero 2 mm od stene in tal modela s toleranco 0,4 mm. Korak odzemanja materiala po globini smo izbrali 17 mm, tip odzemanja materiala po globini pa je bil »Constant«. Prehode orodja po širini smo določili kot premik za 90 % premera rezkarja, način prehodov pa smo izbrali »Cavity« (slika 3).

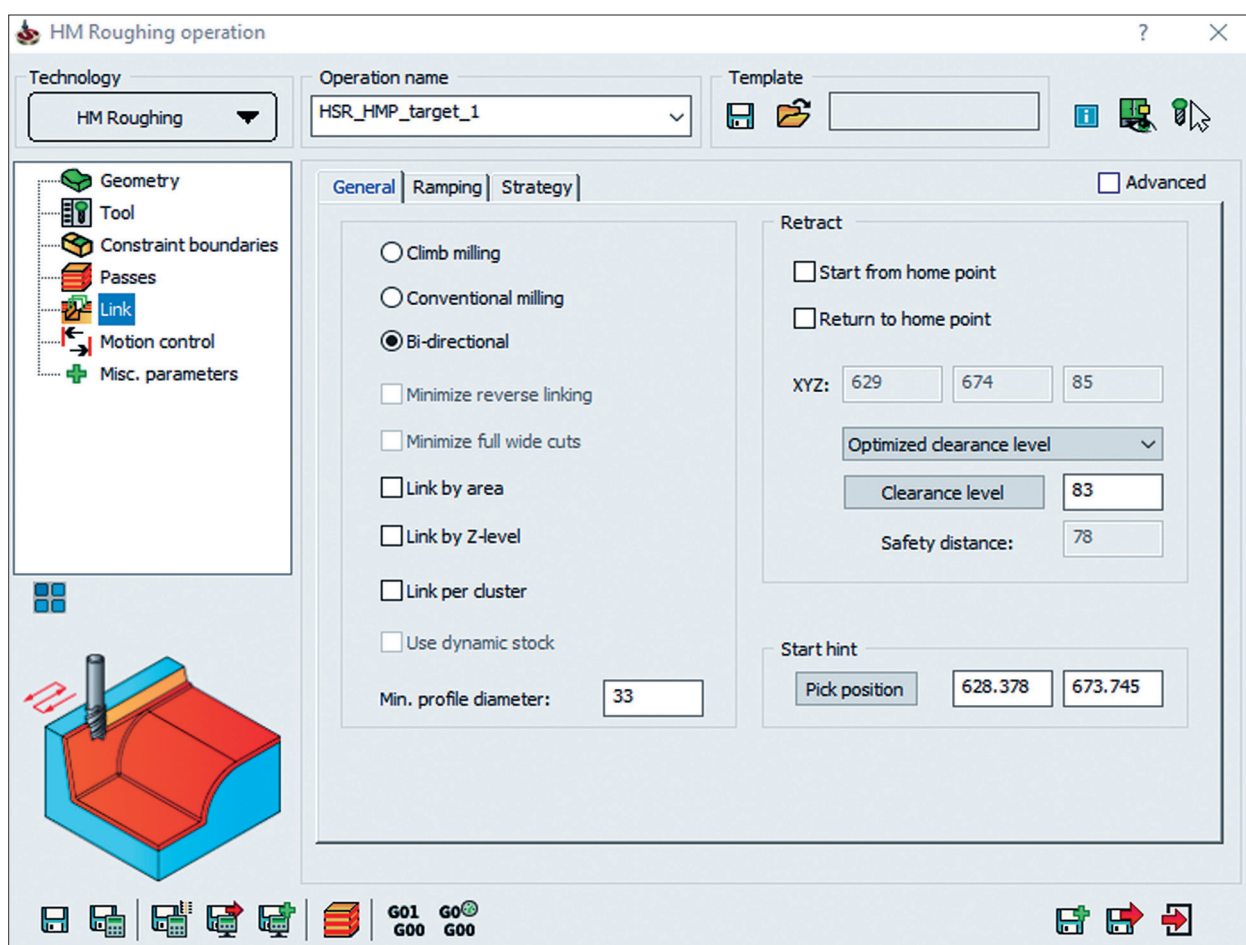
Za zgornjo smo izbrali 0 mm, za spodnjo mejo operacije pa -34 mm. V razdelku »Stepdown« smo izbrali možnost »Optimize Z level« in določili, da je zadnji nivo posnemanja debeline 0 mm. Pri izbiri poti (»Link«) smo se odločili za »Bi-directional«, saj bo tako rezkar obdeloval v obe smeri gibanja. Minimalni premer profila za rezkanje je bil določen avtomatsko (33 mm). Kot način posnemanja materiala smo izbrali »Plunge ramping«, kjer se rezkar postopoma ugreza (slika 4).

Z ukazom »Save and Calculate« smo operacijo shranili in hkrati preverili, pravilnost nastavitvev. V nasprotnem primeru bi nam program javil napako. Program nam izriše potek poti (slika 5). Ustreznost parametrov smo nato preverili še s simulacijo operacije v načinu »Solid Verify«. Ker smo želeli najti najbolj optimalno operacijo, smo preverili še ostale možnosti, ki nam jih ponuja program SolidCAM. Pa-



Slika 3. Parametri »Passes« pri operaciji »HM Roughing«

Figure 3. »HM Roughing« operation »Passes« parameters

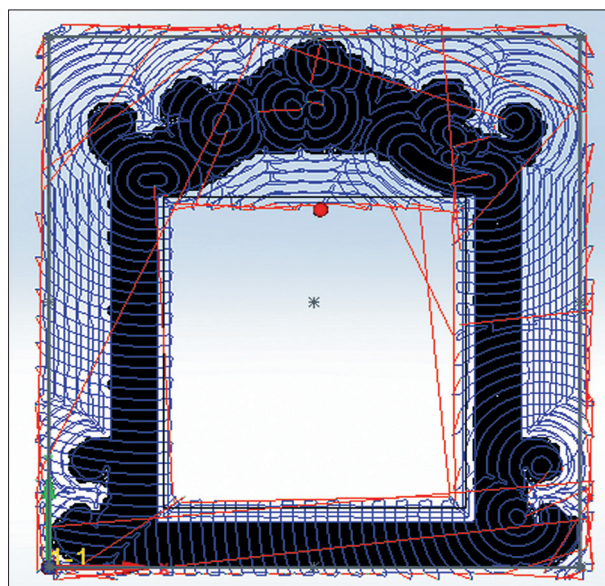


Slika 4. Parametri „Link“ pri operaciji »HM Roughing«

Figure 4. “HM Roughing” operation “Link” parameters

parametri in nastavitve geometrije, orodja in omejitev so ostali enaki. Korake globine odvzema in odmike orodja po širini pa smo določili čim bolj primerljivo. Preverili smo še operaciji »Contour Roughing« in »Hatch Roughing«.

Izhodišče za naslednjo operacijo je predstavljala operacija »Contour Roughing«. Z desnim klikom na to operacijo v drevesu se nam odprejo možnosti, izbrali smo »Add Milling Operation« in nato »3D HSR«. Želeli smo grobo odstraniti še preostali material, ki ga z večjim rezkarjem nismo mogli, zato smo za tip obdelave izbrali »Rest Roughing«. Geometrija je bila izbrana že od prejšnje operacije. Izbrali smo rezkar tipa »BALL NOSE MILL« s premerom 12 mm, maksimalno globino odvzema 24 mm in podajno hitrostjo 3000 mm/min. Omogočili smo funkcijo »Calculate minimum tool length«. Za omejitve (»Constraint boundaries«) smo omogočili avtomatsko izbiranje. V prehodih smo določili ko-



Slika 5. Izrisana pot orodja pri operaciji »HM Roughing«

Figure 5. “HM Roughing” operation tool path

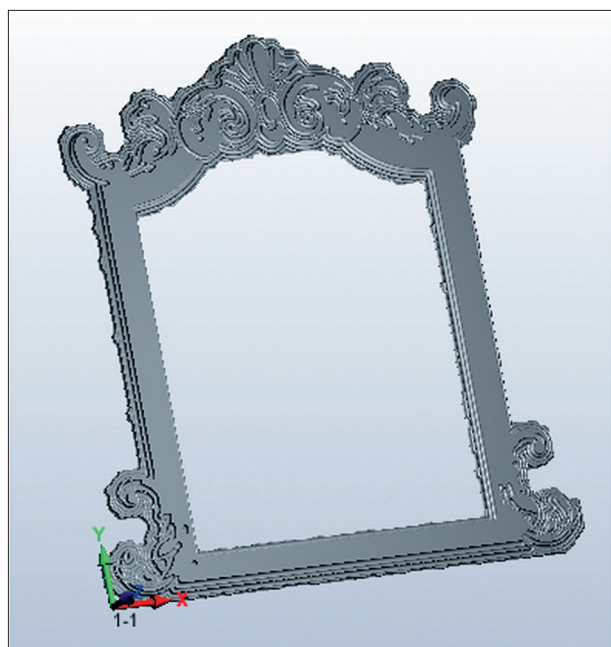
rak odzemanja materiala po globini (12 mm) in izbrali, da rezkamo z nadmero 2 mm od stene in tal ter toleranco 0,4 mm. Minimalni pomik orodja po širini smo določili kot 6,5 mm, maksimalni pomik pa smo omogočili in je znašal 11,7 mm. Omejitve »Z-Top« in »Z-Bottom« smo določili glede na zgornji in spodnji rob surovca. V zavihku »Adaptive step down« smo določili avtomatsko dodajanje prehodov kot »None« in omogočili optimiziranje nivoja po globini, pri tem smo za zadnji nivo odstranjevanja materiala izbrali 2 mm. Pot orodja smo izbrali kot »Bi-directional«, pri tem je bil minimalni premer profila za posnemanje materiala 0 mm. V zavihku »Ramping« smo izbrali način »Plunge ramping«. Za kontrolo operacije smo po shranjevanju z ukazom »Save and Calculate« izvedli simulacijo s »Solid Verify« (slika 6).

2.3 OPERACIJA HSM

2.3 HSM OPERATION

Bolj natančno in fino smo naš model obdelali z izbiro operacije »3D HSM«. Z desnim klikom na operacijo »Rest Machining«, ki je izpisana v drevesu operacij, se nam odpre možnost »Add Milling Operation«, izbrali smo »3D HSM«. Najprej smo

preverili tip operacije »Constant Z Machining«, kjer orodje v enakih korakih odvzema material po globini. Geometrija rezkanja je bila izbrana že od prej, prav tako koordinatni sistem. Izbrali smo isti rezkar kot pri operaciji »Rest Roughing« ter omogočili možnost »Calculate minimum tool length«. Meje obdelave smo določili z avtomatskim generiranjem (»Created automatically«) glede na ciljno geometrijo, »Boundary – Tool Relation« pa smo določili kot »External«. V prehodih smo določili, da rezkamo z nadmero 0,5 mm od tal in od stene, saj smo predpostavili, da bo po končani obdelavi potrebno še ročno brušenje in smo želeli ohraniti debelino. Hkrati smo dosegli manj izrazit relief, ki prikrije morebitna odstopanja, ki bi lahko nastala pri triangulaciji. Korak odvzema po globini je bil 1,5 mm, omogočili smo funkciji »Smoothing« in »Detect flat areas«. »Z-top« in »Z-bottom« sta bila določena glede na najvišjo in najnižjo točko surovca. Izbrali smo možnost avtomatskega dodajanja prehodov (»Automatically insert extra passes«), z natančnostjo 0,1 mm in pomikom orodja po širini 1,5 mm. Omogočili smo funkcijo »Optimize Z level« in določili debelino zadnjega prehoda 0 mm. Najmanjši odvzem materiala po debelini smo določili kot 0,5 mm. Smer odvze-



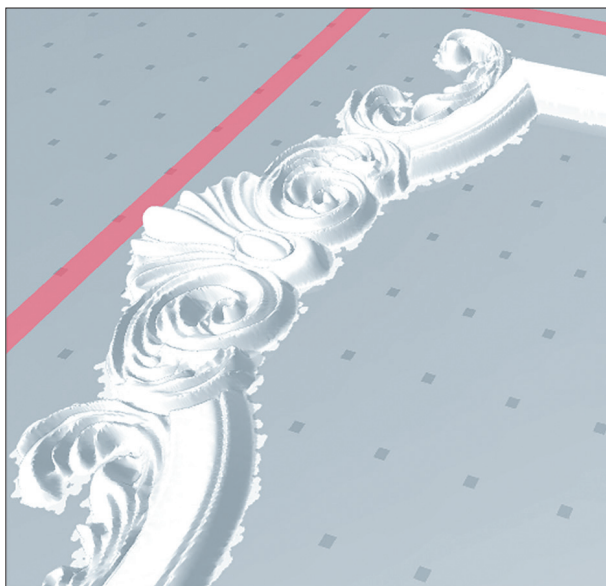
Slika 6. Surovec po »Solid Verify« simulaciji operacije »Rest Roughing«

Figure 6. Workpiece after »Solid Verify« simulation for »Rest Roughing« operation



Slika 7. Surovec po operaciji »Constant Z Machining«

Figure 7. Workpiece after »Constant Z Machining« operation



Slika 8. Tekstura STL modela pri enem prehodu glajenja
Figure 8. The texture of the STL model after one smoothing pass



Slika 9. Tekstura STL modela pri desetih prehodih glajenja
Figure 9. The texture of the STL model after ten smoothing passes

manja smo definirali kot »Bi-directional«. Za strategijo smo določili posnemanje »Profile ramping«. Največji kot za posnemanje smo določili 10°, najmanjši premer posnemanja pa 0,01 mm. Operacijo smo shranili z ukazom »Save and Calculate«. Kvaliteto operacije smo preverili s »Solid Verify« simulacijo, ki nam je pokazala izgled in gladkost končne površine (slika 7). Pri enakih oziroma primerljivih parametrih smo preverili še operacije »Hybrid Constant Z«, »Helical Machining«, »Linear Machining«, »Radial Machining«, »Spiral Machining«, »Morphed Machining«, »3D Constant Step Over«, »3D Corner Offset«, »Offset Cutting« in »Parallel Pencil Milling«.

2.4 VPLIV STL MODELA

2.4 EFFECT OF THE STL MODEL

Preden smo pričeli s primerjavo operacij, smo morali izdelati primerno STL datoteko. Pozorni smo morali biti, da smo površino predhodno dovolj zgladili. Tako smo zagotovili, da trikotniki, ki so nastali pri triangulaciji površine, niso bili preveliki. V primeru prevelikih trikotnikov bi bila geometrija površine našega okvirja neustrezna. Gladkost smo zagotovili s štirimi prehodi glajenja v programu ArtCAM. Pri manj prehodih bi bila površina bodičasta, pri več prehodih pa bi površina postala preveč ploščata,

relief pa bi bil plitek. Če bi model zgladili samo z enim prehodom, bi bila površina pregroba (slika 8) in tekstura preveč izrazita. Če pa bi model zgladili z 10 prehodi, bi bila tekstura preveč zabrisana (slika 9). Čeprav bi imeli več trikotnikov (237236), nam v tem primeru to ne bi omogočilo bolj kvalitetnega izdelka.

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

3 RESULTS AND DISCUSSION

Optimizacijo CNC tehnologije pri izdelavi umetniškega izdelka smo izvedli s primerjavo različnih vrst operacij in poiskali takšno kombinacijo le-teh, da je bilo razmerje med kakovostjo in časom izdelave najboljši, saj v praksi CNC stroja ne moremo obremeniti za več dni za izdelavo enega samega izdelka.

Pri grobi obdelavi smo spremljali različne kakovosti površin pri različnih variantah operacije HSR. Upoštevati smo morali omejitve uporabljenega rezkarja. Izbrali smo rezkar z relativno velikim premerom, da nam groba obdelava ne bi vzela preveč časa, zaradi česar v prvi operaciji nismo mogli globo porezkati reliefa našega modela. To je pomenilo, da smo po končani prvi operaciji HSR morali dodati še operacijo »Rest

Roughing». Hkrati rezkarja nismo želeli preveč obremeniti, zato odvečnega materiala v prvi HSR operaciji nismo odstranili v enem prehodu ampak v dveh (pomik orodja po globini smo izbrali 17 mm, po širini pa 27 mm). Med seboj smo primerjali operacije »HM Roughing«, »Contour Roughing« in »Hatch Roughing«. Izpustili smo operacijo »Hybrid Ryb Roughing«, saj je namenjena zelo specifični operaciji (rezkanje tankih sten). Na tej točki obdelave kakovost površine za nas ni bila ključnega pomena, osredotočili smo se na hitrost obdelave. Pri primerljivih parametrih smo primerjali potrebne čase za izvedbo. Izbrana podajna hitrost je bila 2500 mm/min, če bi izbrali npr. 1000 mm/min, bi bil čas obdelave daljši. Želeni rezultat smo najhitreje dosegli z operacijo »Contour Roughing« (preglednica 1), zato smo jo izbrali kot ustrezno in na podlagi te operacije izvajali nadaljnje.

Preglednica 1. Časi trajanja prve operacije HSR rezkanja pri primerljivih parametrih

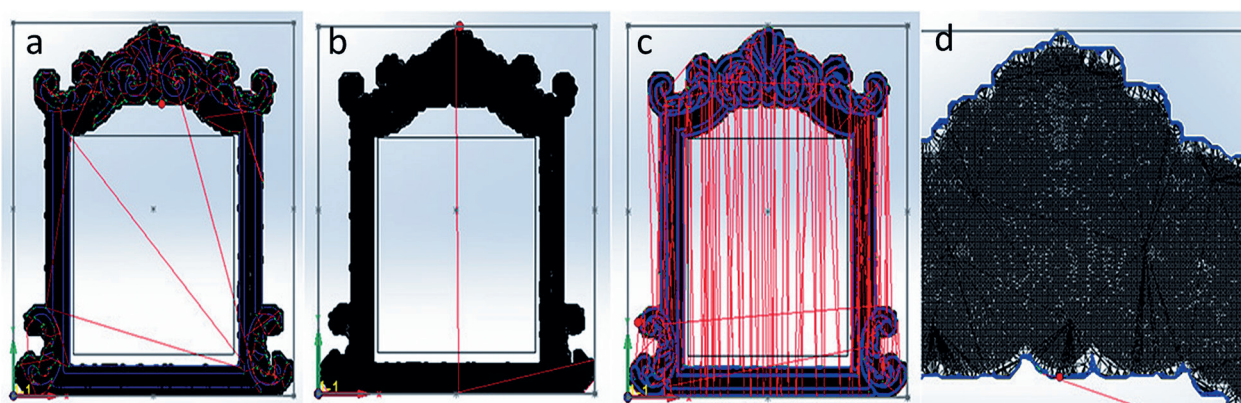
Table 1. Times needed for the first HSR milling operation with comparable parameters

Vrsta operacije	Čas trajanja operacije [h:min:s]
HM Roughing	0:51:46
Contour Roughing	0:28:22
Hatch Roughing	0:37:45

Z operacijo »Rest Roughing« smo nato grobo porzekali še preostali odvečen material, kar nam je v nadaljnjih operacijah (HSM) skrajšalo čas. Izbrali smo manjši rezkar s premerom 12 mm, da smo lahko grobo obdelali tudi detajle. Pomik orodja po globini smo izbrali 12 mm, po širini pa smo določili minimalni pomik (6,5 mm) in maksimalni pomik (11,7 mm). Ker je bil odvzem materiala manjši kot pri prejšnji operaciji, smo določili večjo podajno hitrost (3000 mm/min). Operacija »Rest Roughing« bi bila izvedena v 28 minutah in 51 sekundah.

Pri fini obdelavi (operacija HSM) smo uporabili isti rezkar kot pri operaciji »Rest Roughing«. Zaradi oblike rezkarja (»BALL NOSE MILL«) smo lahko dosegli večjo gladkost površine in manj izrazite raze, pod pogojem da je bil pomik orodja po globini dovolj majhen. Pri vseh variantah HSM operacije smo uporabili primerljive parametre: pomik orodja po globini in širini je bil 1,5 mm, smer rezkanja pa »Bi-directional«. Zaradi neustreznosti smo že vnaprej izločili nekaj vrst operacij, pri katerih pot orodja ni pokrivala celotne površine našega modela (slika 10). Izločili smo operacije: »Boundary Machining«, »Horizontal Machining«, »Pencil Milling« in »Rest Machining«.

Ker smo želeli najti najbolj optimalno operacijo, smo morali upoštevati tako čas, potreben za izvedbo kot končno kvaliteto površine. V preglednici 2 lahko vidimo čase, potrebne za izvedbo posameznih operacij HSM. Da bi bili časovno učinkoviti, smo izločili vse operacije, ki bi za izvedbo potrebovale več kot 3 ure in pol. Tako smo izločili »Constant



Slika 10. Poti orodja pri operacijah. a) »Rest Machining«, b) »Boundary Machining«, c) »Pencil Milling« in d) »Horizontal Machining«

Figure 10. Tool paths for "Rest Machining", "Boundary Machining", "Pencil Milling" and "Horizontal Machining" operations

Z Machining«, »Helical Machining«, »Radial Machining«, »Morphed Machining«, »3D Corner Offset« in »Parallel Pencil Milling«.

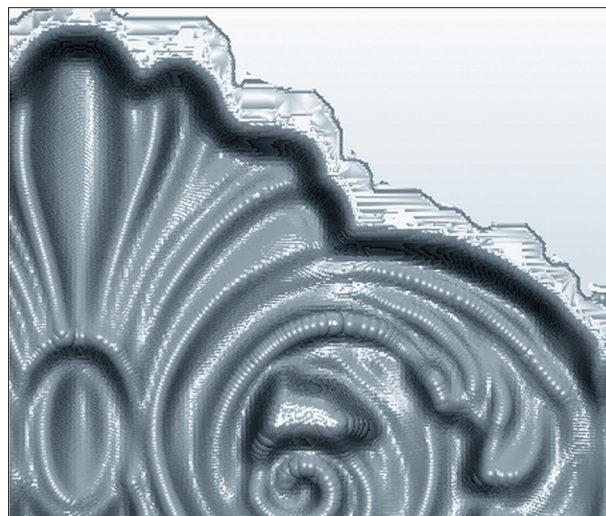
Preglednica 2. Časi trajanja prve operacije HSM rezanja pri primerljivih parametrih

Table 2. Times needed for the first HSM milling operation with comparable parameters

Vrsta operacije	Čas trajanja operacije [h:min:s]
Constant Z Machining	3:33:25
Hybrid Constant Z	3:07:44
Helical Machining	3:40:54
Linear Machining	2:43:40
Radial Machining	4:43:52
Spiral Machining	2:36:17
Morphed Machining	4:35:51
3D Constant Step Over	3:04:18
3D Corner Offset	3:30:22
Offset Cutting	2:54:45
Parallel Pencil Milling	3:30:22

Nato smo med seboj primerjali kakovost površine pri preostalih operacijah. To so bile: »Linear Machining«, »Spiral Machining«, »Hybrid Constant Z«, »Offset Cutting« in »3D Constant Step Over«. Pri operacijah »Linear Machining«, »Spiral Machining« in »Offset Cutting« so prehodi orodja enakomerni in ni opaziti, da bi orodje kje zašlo globlje v surovec. Vendar pa so zaradi načina gibanja/poti orodja, raze vidne in moteče, saj ne potekajo vzporedno z geometrijo našega modela, zato smo te operacije izločili.

Pri operaciji »Hybrid Constant Z« so bili nekateri prehodi orodja po krivinah prekinjeni, zato smo opazili dele površine, ki niso bili dovolj enakomerni. Raze tečejo v smeri geometrije modela in niso moteče. Operacija »3D Constant Step Over« nam je dala najboljše rezultate. Površina je enakomerno obdelana (nekoliko slabše kot pri »Linear Machining«, vendar občutno bolj kot pri »Hybrid Constant Z«). Raze so neizrazite, delno vzporedne z geometrijo modela (slika 11). Pri izbiri operacij »Contour Roughing«, »Rest Roughing« in »3D Constant Step Over« bi za izdelavo našega modela potrebovali 4 ure 1 minuto in 31 sekund. Po izboru operacije smo z desnim klikom na »Operations« v drevesu izbrali »GCode All« in nato »Generate« ter izdelali G kodo za naš program.



Slika 11. Smer in izrazitost raz na surovcu po operaciji »3D Constant Step Over«

Figure 11. Course and distinctness of scratches on workpiece after "3D Constant Step Over" operation

4 ZAKLJUČKI

4 CONCLUSIONS

V raziskovalnem delu smo prikazali izdelavo programa za obdelavo umetniškega izdelka (okvirja za ogledalo) na 3-osnem CNC stroju. Model smo ustvarili iz dvodimenzionalne slike, ga pretvorili v 3D obliko in površino triangulirali, da smo dobili STL model, ki je služil kot definicija geometrije površine za obdelavo na CNC stroju. Dosegli smo cilj optimizacije, ki sta nam ga omogočili zelo hitri a za uporabnika enostavni operaciji HSR in HSM. Do napak lahko pride zaradi nepravilno določenih mej obdelovanja, v tem primeru bi rezkar zašel v telo izdelka in ga poškodoval ali pa bi določen del izdelka ostal neobdelan.

Celoten proces obdelave je dokaj zamuden, saj bi z uporabo naše G-kode potrebovali 4 ure 1 minuto in 31 sekund, da bi dobili želen izdelek. V praksi je kljub natančni izdelavi in majhnemu koraku odvzema potrebno še ročno brušenje raz. Kakovost končnega izdelka bi lahko izboljšali z uporabo manjšega koraka odvzema in rezkarjev z manjšim premerom, s čimer bi dosegli večjo gladkost površine, vendar pa bi to bistveno podaljšalo čas izdelave. Naš program je bil ustvarjen za 3-osni stroj, če bi okvir izdelovali na 5-osnem, bi bil izdelek končan hitreje.

5 POVZETEK

5 SUMMARY

The work carried out in this study determined the optimal milling operation for manufacturing an artistic product (mirror frame) in a CNC machine. The basic picture was opened in Adobe Photoshop CC and masked, so a black background was achieved, then the "Grayscale" filter was applied. The picture was then uploaded to the ArtCAM where the dimensions were determined. The model that was automatically created needed some smoothing. When the optimal texture was achieved, an STL model was created with the "Create Triangle Mesh" operation. The final number of triangles in the STL model was 221,656.

The STL model was later uploaded to SolidCAM, as was the workpiece that was created beforehand in SolidWorks. Both the model and workpiece were aligned and positioned in a coordinate system. With the commands "Add Milling Operation" and "3D HSR" the type of processing was chosen. "HM Roughing" was the first operation whose adequacy was checked. The parameters for the operation were similar if not equal. The chosen "End Mill" had a diameter of 30 mm, maximal milling depth 38 mm and feed 2500 mm/min. The "Boundary-Tool Relation" was set at "External", in the "Passes" section milling was set with an offset of 2 mm and tolerance of 0.4 mm. The milling depth was 17 mm and milling type was "Constant". The tool step was selected as 90% the length of the diameter. The upper boundary was at 0 mm and the lower boundary at -34 mm. "Link" was set as "Bi-directional", allowing the tool to mill in both ways. The minimal milling diameter was chosen automatically. Stepdown was set as "Plunge Ramping". The operations "Contour Roughing" and "Hatch Roughing" were also checked, and the former was the optimal one. The HSR group of operations also offers a special "Rest Roughing" operation which was used to roughly remove more excess material.

The HSR operations were followed with HSM operations. A smaller tool was used (a ball nose mill with diameter 12 mm). The first operation tested from the group was "Constant Z Machining". The offset was chosen to be 0.5 mm, because the final product is going to need manual polishing. The step down was 1.5 mm, and the function "Smoothing" was enabled. Minimal step down was set to 0.5 mm,

and the direction of milling was set to "Bi-directional". Step over was set to 1.5 mm. Using similar parameters other operations were tested ("Hybrid Constant Z", "Helical Machining", "Linear Machining", "Radial Machining", "Spiral Machining", "Morphed Machining", "3D Constant Step Over", "3D Corner Offset", "Offset Cutting" and "Parallel Pencil Milling"). Every operation was checked with a "Solid Verify" simulation, where the estimated quality of the final product and time needed for the operation were found.

Some operations were left out, as they are very specific and unsuitable for our model. In the HSR operation group the optimal one turned out to be "Contour Roughing", as it was the fastest, needing just 28 minutes and 22 seconds. The "Rest Roughing" operation needed 28 minutes and 51 seconds. When the HSM operations were evaluated, both the time needed and final quality were taken into consideration. The operations that needed more than 3 hours and 30 minutes to perform were evaluated first, and the rest of them were evaluated by the look of the surface. The optimal one was "3D Constant Step Over". All three chosen operations together ("Contour Roughing", "Rest Roughing" and "3D Constant Step Over") were finished in 4 hours 1 minute and 31 seconds. Finally the G code was generated for our program.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGEMENTS

Raziskava je bila opravljena v okviru diplomskega dela za zaključek Univerzitetnega študija Lesarstva – 1. stopnja. Delo je bilo opravljeno na Katedri za mehanske obdelovalne tehnologije lesa, Oddelka za lesarstvo, Biotehniške fakultete, Univerze v Ljubljani.

VIRI

REFERENCES

- ArtCAM. Delcam launches new ArtCAM Pro software for artistic CAD/CAM. Retrieved from http://www.delcam.com.tw/artcam/news/press_article0bd7.html?releaseld=440
- Auslander, L. (1998). *Taste and Power: Furnishing Modern France*: University of California Press.
- Balič, J., & Pahole, I. (2008). *Proizvodne tehnologije*. Maribor: Fakulteta za strojništvo.

- Béchet, E., Cuilliere, J. C., & Trochu, F. (2002). Generation of a finite element MESH from stereolithography (STL) files. *CAD Computer Aided Design*, 34(1), 1-17. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(00\)00146-9](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(00)00146-9)
- Jovanović, J., Smajić, S., & Beljo Lučić, R. (2020). Influence of different machining on the surface roughness of beech wood samples. Paper presented at the Sustainability of Forest-Based Industries in the Global Economy - Proceedings of Scientific Papers.
- Koleda, P., Barčík, Š., Svoreň, J., Naščák, L., & Dobrík, A. (2019). Influence of cutting wedge treatment on cutting power, machined surface quality, and cutting edge wear when plane milling oak wood. *BioResources*, 14(4), 9271-9286. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.14.4.9271-9286>
- Merhar, M., Bucar, D. G., & Merela, M. (2020). Machinability Research of the Most Common Invasive Tree Species in Slovenia. *Forests*, 11(7).
- Merhar, M., Šega, B., & Gornik, B. D. (2019). The influence of thermal modification on the machining properties of beech wood. *Les/Wood*, 68, 15-24. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2019.v68n01a02>
- Rypl, D., & Bittnar, Z. (2006). Generation of computational surface meshes of STL models. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 192(1), 148-151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cam.2005.04.054>
- SolidCAM (2015). SolidCAM 2015 HSR/HSM Module User Guide: SolidCAM.



PLASMA TREATMENT OF SPRUCE WOOD CHANGES ITS DIELECTRIC PROPERTIES

OBDELAVA SMREKOVEGA LESA S PLAZMO SPREMENI NJEVOE DIELEKTRIČNE LASTNOSTI

Sebastian Dahle^{1*}, Jure Žigon¹, Marko Petrič¹, Mirko Kariž¹

UDK 630*829.9:538.956

Original scientific article / Izvirni znanstveni članek

Received / Prispelo: 5. 10. 2020

Accepted / Sprejeto: 10. 11. 2020

Abstract / Izvleček

Abstract: The effects of dielectric barrier discharge (DBD) plasma treatment on the dielectric properties of Norway spruce wood (*Picea abies* (L.) Karst.) were investigated using dielectric analysis. Dielectric constant (i.e. permittivity) and loss coefficient were determined at various frequencies. The resulting changes on lamellae specimens of different thicknesses were compared with the change in mass and moisture content. A significant influence of the plasma was found, leading to an increase of the dielectric constant by about 2%, and a decrease of sample mass directly after the plasma treatment by approx. 14%, whereas a reduction in moisture content by only about 0.6% and a corresponding change in loss coefficient were detected. Overall, the mechanisms of the observed changes remain unclear and seem mainly uncorrelated with the hitherto known chemical changes in wood surfaces caused by similar plasma discharges.

Keywords: wood, Norway spruce = *Picea abies*, plasma, dielectric constant, moisture content

Izvleček: Vpliv obdelave z dielektrično barierno razelektritveno (DBD) plazmo na dielektrične lastnosti smrekovega lesa (*Picea abies* (L.) Karst.) smo raziskovali z dielektrično analizo. Pri različnih frekvencah smo določili dielektrično konstanto in faktor dielektričnih izgub. Nastale spremembe na vzorcih lamel različnih debelin smo primerjali s spremembo mase in vlažnosti. Ugotovljen je bil pomemben vpliv obdelave s plazmo, kar je povzročilo povečanje dielektrične konstante za približno 2 % in zmanjšano maso vzorca neposredno po plazemski obdelavi, medtem ko je bilo zaznано zmanjšanje vlažnosti za približno 0,6 % in ustrezno povečanje tangensa izgubnega kota. Na splošno mehanizmi opaženih sprememb ostajajo nejasni in se zdijo v glavnem nepovezani z do zdaj znanimi kemičnimi spremembami na površinah lesa, ki jih povzročajo podobne plazemske razelektritve.

Ključne besede: les, navadna smreka = *Picea abies*, plazma, dielektrična konstanta, vlažnost

1 INTRODUCTION

Plasma treatments are a good tool to modify the surface of wood-based materials and tailor them towards various applications, such as improving their compatibility with a given coating (Žigon et al., 2018; Altgen et al., 2019). The plasma has effects on the treated surfaces through various physical and chemical processes (Wolkenhauer et al., 2008; Altgen et al., 2015), thereby modifying the surface free energy (Blanchard et al., 2009), etching the surfaces (Jamali & Evans, 2011) or activating them (Žigon et al., 2019a). This also improves penetration and adhesion of the coatings, as well as the final properties of the formed surface system (Dam,

2017; Liston et al., 1993; Wolkenhauer et al., 2009; Wolf & Sparavigna, 2010; De Cademartori et al., 2016; Perisse et al., 2017; Reinprecht et al., 2018).

Král et al. (2015) found that the depth of the chemical modification by a non-thermal plasma is in the order of 100 nm inside the wood substrate. However, the depth of influence of plasma treatments might be deeper than shown by chemical modification of the solid material. Haase and co-workers (2019) found an etching of pits, which increased the substrates' porosity and thus enhanced the penetration of liquids applied after plasma treatment. Moreover, Wascher et al. (2014) proposed a possible treatment inside vessels, which changes the properties inside the material. This would include the overall effective or inner surface of the wood samples.

Non-thermal plasmas are capable of increasing the evaporation rates of liquids, including water

¹ University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, Slovenia

* e-mail: sebastian.dahle@bf.uni-lj.si

(c.f. Gamaleev et al., 2019), which would affect the mechanical, electrical, and dielectric properties of a wooden specimen. This also applies to wooden workpieces, as previously shown on a wet beech substrate after 1 minute of localised DBD plasma treatment (Figure 1). The plasma-treated spot on the specimen's surface is significantly drier, and thus its colour stands out from the rest of the still wet surface.

The impact of plasma treatments for utilisation in gluing and coating applications is thus more complex than often assumed. Introducing a gradient of the moisture content will likely change the wetting, drying and curing of coatings and glues. Moreover, both, moisture content and dielectric properties are determining factors during most plasma treatments, which influence the electric fields and thus affect factors such as the transfer of energy, the gas temperatures, and the rates of plasma-chemical reactions.

The dielectric properties of a non-conducting material describe the interaction of the material with electric fields. The main interactions are the absorption and storage of electric potential energy in the form of polarisation within the dielectric

material (dielectric constant ϵ' , c.f. eq. 1), and the dissipation or loss of part of this energy when the electric field is removed (loss coefficient δ , aka loss tangent, c.f. eq. 2) (James, 1975). The dielectric constant is the ratio of the capacitance formed by two metal plates with a material between them, to the capacitance of the same plates with air (or a vacuum) between them.

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

$$\tan\delta = \epsilon'' / \epsilon' \quad (2)$$

In order to properly distinguish between electrical and dielectric properties, and to determine the frequency dependence, a combined inductance, capacitance and resistance (LCR) metre is used (Nikolova et al., 2018). Several factors affect the dielectric constant of wood, from the moisture content, density, and wood orientation (longitudinal, radial, tangential), to temperature and salinity (Torgovnikov, 1993; Sikder et al., 2009).

This is highlighted in Norimoto's 1976 overview on the dielectric properties of various wood

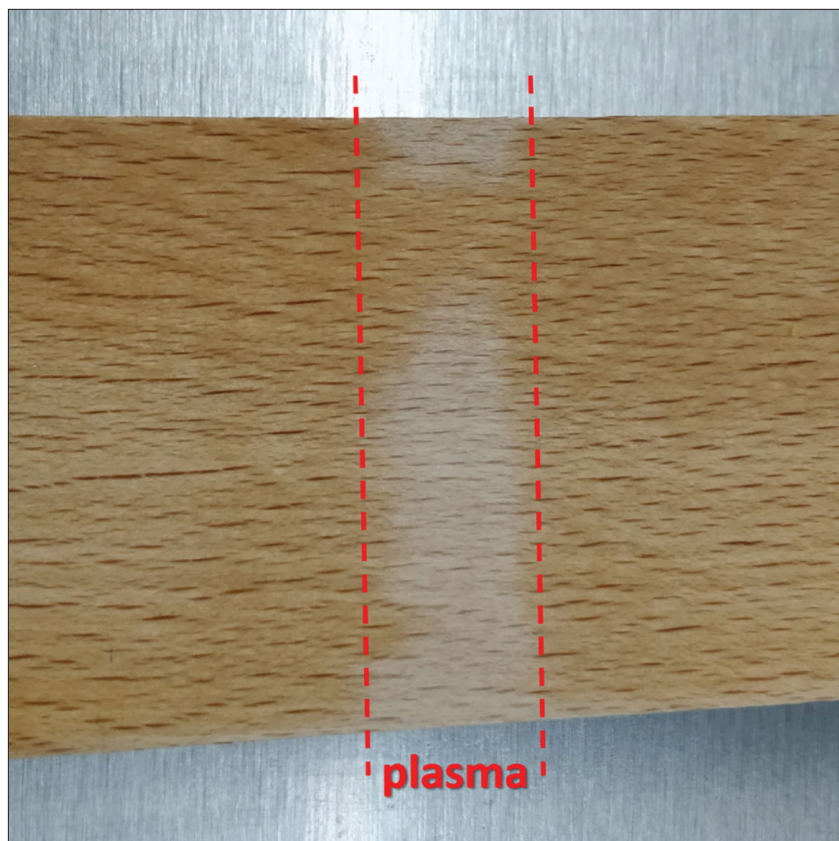


Figure 1. Wet beech substrate after 1 minute of localised DBD plasma treatment; the plasma-treated part of the surface (middle of the figure) standing out as being significantly drier than the rest of the specimen.

Slika 1. Moker substrat iz bukovine po 1 minuti lokalizirane obdelave z DBD plazmo; s plazmo obdelani del površine (sredina slike) izstopa kot bistveno bolj suh od preostalega vzorca.

species and lignocellulosic materials, and their dependence on temperature and moisture content. In relation to various microwave treatment and computer tomography applications, the local dielectric function inside the wood material is an important factor (c.f. Boero et al., 2018), giving rise to various models and generalised descriptions of the dielectric properties of wood (Daian et al., 2006).

In this study, we investigate the change in dielectric properties in spruce induced by an air plasma treatment. Further, mass and moisture content measurements are presented in order to discuss possible mechanisms. We hope to improve the understanding of these processes that determine the outcomes of plasma treatments for wood-based substrates.

1 UVOD

Obdelava s plazmo predstavlja dobro orodje za spreminjanje lastnosti površin materialov na osnovi lesa in njihovo prilagajanje različnim aplikacijam, npr. za izboljšanje njihove združljivosti s premazi (Žigon et al., 2018; Altgen et al., 2019). Plazma vpliva na obdelane površine s fizikalnimi in kemijskimi procesi na površinah obdelovancev (Wolkenhauer et al., 2008; Altgen et al., 2015), s čimer spreminja prosto energijo površin (Blanchard et al., 2009), jedka (Jamali & Evans, 2011) ali aktivira površine (Žigon et al., 2019a). To izboljša tudi prodiranje in oprijem premazov ter končne lastnosti površinskega sistema (Dam, 2017; Liston et al., 1993; Wolkenhauer et al., 2009; Wolf & Sparavigna, 2010; De Cademartori et al., 2016; Perisse et al., 2017; Reinprecht et al., 2018).

Král et al. (2015) so ugotovili globino kemijske modifikacije z netermično plazmo 100 nm znotraj lesnega substrata. Globina vpliva plazemske obdelave pa je lahko globlja kot pokaže kemijska analiza modifikacije trdnega materiala. Haase et al. (2019) so ugotovili jedkanje pikenjskih odprtin, kar je povečalo poroznost lesne strukture in s tem povečalo prodiranje tekočin, nanosenih po plazemski obdelavi.

Nadalje, Wascher et al. (2014) navajajo možno obdelavo znotraj celičnih lumnov in s tem spreminjanje lastnosti v poroznem materialu. To vključuje celotno specifično površino znotraj vzorcev lesa.

Netermične plazme povečajo hitrost izhlape-

vanja tekočin, vključno z vodo (Gamaleev et al., 2019), kar vpliva na mehanske, električne in dielektrične lastnosti lesnega vzorca. To pokaže tudi izpostavitve mokrega bukovega substrata lokalizirani obdelavi z DBD plazmo za 1 minuto (slika 1). Mesto na površini vzorca, obdelano s plazmo, je znatno osušeno, zato njegova barva izstopa v primerjavi s preostalo površino.

Vpliv plazemske obdelave na uporabo pri lepljenju in premazovanju je bolj zapleten, kot se pogosto domneva. Gradient vlažnosti bo verjetno spremenil omočitev, sušenje in utrjevanje premazov in lepil. Poleg tega sta vlažnost in dielektrične lastnosti odločilna dejavnika pri večini plazemskih obdelav, ki vplivajo na električna polja in tako vplivajo na prenos energije, temperaturo plinov in hitrosti plazemskih kemijskih reakcij.

Dielektrične lastnosti neprevodnega materiala opisujejo interakcijo materiala z električnimi polji. Glavni interakciji sta absorpcija in shranjevanje električne potencialne energije v obliki polarizacije znotraj dielektričnega materiala (dielektrična konstanta ϵ' , glej enačbo 1) in odvajanje ali izguba dela te energije ob odstranitvi električnega polja (faktor dielektričnih izgub δ , tudi tangens izgubnega kota, glej enačbo 2) (James, 1975). Dielektrična konstanta je razmerje med kapacitivnostjo, ki jo tvorita dve kovinski plošči z materialom med njima, in kapacitivnostjo enakih plošč z zrakom (ali vakuumom) med njima. Za pravilno razlikovanje med električnimi in dielektričnimi lastnostmi in za določitev frekvenčne odvisnosti se uporablja kombinirani merilnik induktivnosti, kapacitivnosti in upornosti (LCR) (Nikolova et al., 2018). Na dielektrično konstanto lesa vpliva več dejavnikov, kot so vlažnost, gostota, orientacija lesa (vzdolžno, radialno, tangencialno), temperatura in vsebnost soli (Torgovnikov, 1993; Sikder et al., 2009).

To je prikazano in razloženo v Norimotovem pregledu iz leta 1976 o dielektričnih lastnostih različnih vrst lesa in lignoceluloznih materialov ter njihovi odvisnosti od temperature in vsebnosti vlage. V zvezi z različnimi aplikacijami za mikrovalovno obdelavo in računalniško tomografijo je lokalna dielektrična funkcija znotraj lesnega materiala pomemben dejavnik (Boero et al., 2018), kar je povzročilo razvoj različnih modelov in opisov dielektričnih lastnosti lesa (Daian et al., 2006).

V tej študiji smo raziskovali spremembe dielektričnih lastnosti lesa smreke, ki jih povzroči obdelava z zračno plazmo. Nadalje so predstavljene meritve mase in vlažnosti z namenom razprave o možnih mehanizmi. Na ta način bi lahko izboljšali razumevanje procesov, ki določajo rezultate plazemske obdelave lesnih substratov.

2 MATERIALS AND METHODS

2 MATERIALI IN METODE

2.1 PLASMA TREATMENT PROCESS

The surface of each individual sample was treated with a dielectric barrier discharge (DBD) device (also known as a direct Cold Atmospheric Plasma, diCAP) that generates a non-thermal plasma in air at atmospheric pressure (Rehn & Viöl, 2003; Altgen et al., 2016; Žigon et al., 2019b) in a setup as depicted in Figure 2. The parameters of an alternating high voltage (frequency 5 kHz, 15 kV peak voltage) were regulated via a high voltage generator (c.f. Žigon et al., 2019a, b). Plasma was ignited between the surface of the treated specimen (moving rate $3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) and a tubular ceramic hose (Al_2O_3 , thickness 2.5 mm) with a round brass electrode with a diameter of 15 mm. The distance between the dielectric and the surface of the specimen was set to 1 mm. All samples were treated individually to reduce holding times between treatment and subsequent measurements.

2.1 POSTOPEK OBDELAVE S PLAZMO

Površina vsakega posameznega vzorca je bila obdelana z dielektrično barierno razelektritveno plazmo (DBD) (znano tudi kot neposredna hladna atmosferska plazma, diCAP), ki v zraku ustvarja netermično plazmo pri atmosferskem tlaku (Rehn & Viöl, 2003; Altgen et al., 2016; Žigon et al., 2019b) in katere shema je prikazana na sliki 2. Parametri izmenične visoke napetosti (frekvenca 5 kHz, 15 kV najvišja napetost) so bili regulirani prek visokonapetostnega generatorja (Žigon et al., 2019a, b). Plazma se je ustvarila med površino obdelovanca (hitrost gibanja 3 mm s^{-1}) in keramično cevjo (Al_2O_3 , debelina 2,5 mm) z okroglo medeninasto elektrodo s premerom 15 mm v notranjosti. Razdalja med dielektrikom in površino obdelovanca je bila nastavljena na 1 mm. Vse vzorce smo obdelali posamično, da smo skrajšali čas med obdelavo in naslednjimi meritvami.

2.2 DIELECTRIC MEASUREMENTS

Dielectric analysis (DEA) involves measuring changes of the dielectric properties of the material by using an impedance analyser over many orders of magnitude of frequency. Dielectric measurements are carried out by measuring the voltage and current between a pair of electrodes in order to determine the conductance and capacitance of the material placed between the electrodes (Šernek & Kamke, 2007). From these measurements the dielectric constant and loss coefficient can be determined.

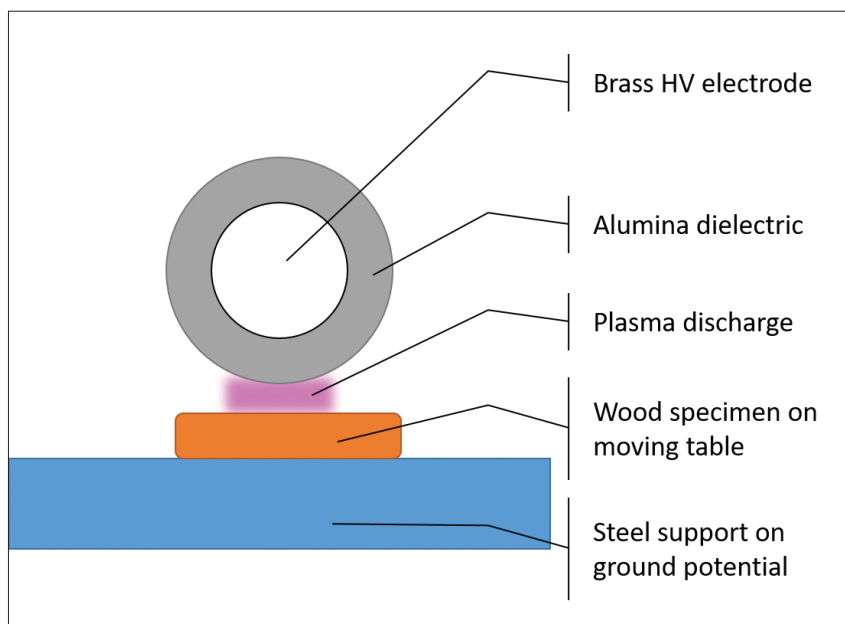


Figure 2. Schematic representation of the used plasma setup.
Slika 2. Shematski prikaz uporabljenih naprav s plazmo.

Radial cut lamellas with thicknesses of 3 mm and 5 mm were cut with a laser from spruce (*Picea abies* (L.) Karst.), producing five wooden discs for each thickness, each with a diameter of 55 mm. Discs edges were sanded to remove the charred material, which could affect the measurements. The residual moisture content of the discs amounted to approx. 9.4%.

The wooden discs were weighed before measuring the initial dielectric properties, immediately after conducting the plasma treatment described in 2.1, and before each measuring of the dielectric properties. Dielectric measurements were conducted immediately after plasma treatment and 24 and 48 hours after.

Measurements of dielectric properties were carried out at room temperature using an Agilent 4285A LCR metre together with an Agilent 16451B Dielectric Test Fixture. The dielectric properties were determined within a frequency range of 79 kHz to 25 MHz. A measuring method with an air gap of 1 mm between the upper electrode and samples was used to measure the dielectric properties without the influence of the samples' conductivity.

The resulting data were averaged from measurements of all equal samples before determining the dielectric constant and loss coefficient of wood, following Šernek and Kamke (2007).

2.2 DIELEKTRIČNE MERITVE

Dielektrična analiza (DEA) vključuje merjenje sprememb dielektričnih lastnosti materiala pri različnih frekvencah z uporabo impedančnega analizatorja. Dielektrične meritve se izvajajo z merjenjem napetosti in toka med parom elektrod, s čimer se ugotovi prevodnost in kapacitivnost materiala, nameščenega med elektrodama (Šernek & Kamke, 2007). Iz teh meritev lahko določimo dielektrično konstanto in faktor dielektričnih izgub.

Iz vsake smrekove (*Picea abies* (L.) Karst.) lamele debelin 3 in 5 mm z radialno orientacijo lesnih vlaken smo z laserjem izrezali po pet lesenih diskov s premerom 55 mm. Robove diskov smo pobrusili, da smo odstranili zgleneli material, ki bi lahko vplival na meritve. Vlažnost diskov je bila približno 9,4 %.

Lesene diske smo stekali pred začetnim merjenjem dielektričnih lastnosti, tik po obdelavi s plazmo (postopek opisan v točki 2.1) ter pred vsakim

merjenjem dielektričnih lastnosti. Dielektrične lastnosti smo merili takoj po obdelavi s plazmo ter po 24 in 48 urah po obdelavi.

Meritve dielektričnih lastnosti smo izvedli pri sobni temperaturi z uporabo merilnika LCR Agilent 4285A skupaj z napravo za merjenje dielektričnih lastnosti trdih snovi Agilent 16451B. Dielektrične lastnosti so bile določene v frekvenčnem območju od 79 kHz do 25 MHz. Za merjenje dielektričnih lastnosti brez vpliva prevodnosti vzorcev je bila uporabljena metoda z zračno režo 1 mm med zgornjo elektrodo in vzorcem.

Nastali podatki so bili iz meritev vseh enakih vzorcev povprečeni pred določitvijo dielektrične konstante in tangensa izgubnega kota lesa na način, kot sta ga opisala Šernek in Kamke (2007).

2.3 MOISTURE CONTENT AND MASS CHANGE

The impact of the plasma treatment on the moisture content and mass change coinciding with that were determined on spruce radial cut lamellas sized 50 mm × 35 mm × 3.1 mm. Moisture contents were measured using a Gann Hydromette M 4050 with a ram-in electrode M18, set to the manufacturer's parameters for spruce wood. The mass change during plasma treatments were measured using a Mettler Toledo PB1502 scale. Video recordings of the treatment showing the sample and the display of the scale were analysed frame by frame to yield two values per second (full recording available together with all the raw data).

2.3 SPREMEMBA VSEBNOSTI VLAGE IN MASE

Vpliv obdelave s plazmo na vlažnost in sorazmerno spremembo mase smo določili na smrekovih radialno rezanih lamelah velikosti 50 mm × 35 mm × 3,1 mm. Lesno vlažnost smo izmerili z vlagomerom Gann Hydromette M 4050 z vstavljenjo elektrodo M18, nastavljeno na proizvajalčeve parametre za smrekov les. Sprememba mase med obdelavo s plazmo je bila izmerjena s tehtnico Mettler Toledo PB1502. Iz posnetkov obdelave s plazmo, ki prikazujejo vzorce in merilo, smo zajeli po dve meritvi vrednosti na sekundo (na voljo celotno snemanje skupaj z vsemi neobdelanimi podatki).

3 RESULTS AND DISCUSSION

In Figure 3, the dielectric properties in the range from 0 to 25 MHz for spruce disks with a thickness of 3 mm are shown before plasma treatment (blue line), directly after plasma treatment (pink line), 24 hours after plasma treatment (grey line) and 48 hours after plasma treatment (yellow line). Directly after the plasma treatment, the dielectric constant was increased by about 2%, which is contrary to expectations with regard to drying processes. As the moisture content decreases and volatile organic compounds evaporate from the specimen the dielectric constant should decrease, because of the higher dielectric constant of the evaporated compounds as compared to the residual material (c.f. Norimoto & Yamada, 1972; James, 1975; Torgovnikov, 1993). The effect does remediate over time, as can be clearly

seen from measurements after 24 and 48 hours. However, the remediation appears to differ over the frequency range, being particularly faster in the range above 20 MHz, whereas a larger dielectric constant is retained particularly below 5 MHz, even after 48 hours.

Based on the measured change in dielectric constant, it is possible to try and estimate the depth of the effect imposed by the plasma treatment by assuming distinct values of the base dielectric constant ϵ_1 over a thickness of d_1 inside the sample, as well as a dielectric constant ϵ_2 in a layer of thickness d_2 , which was changed by the plasma within no more than one order of magnitude. The setup is effectively represented by a series of planar capacitors with cross-sectional area A of capacitance C (see eq. 3), yielding a total external capacitance of C_{tot} (see eq. 4).

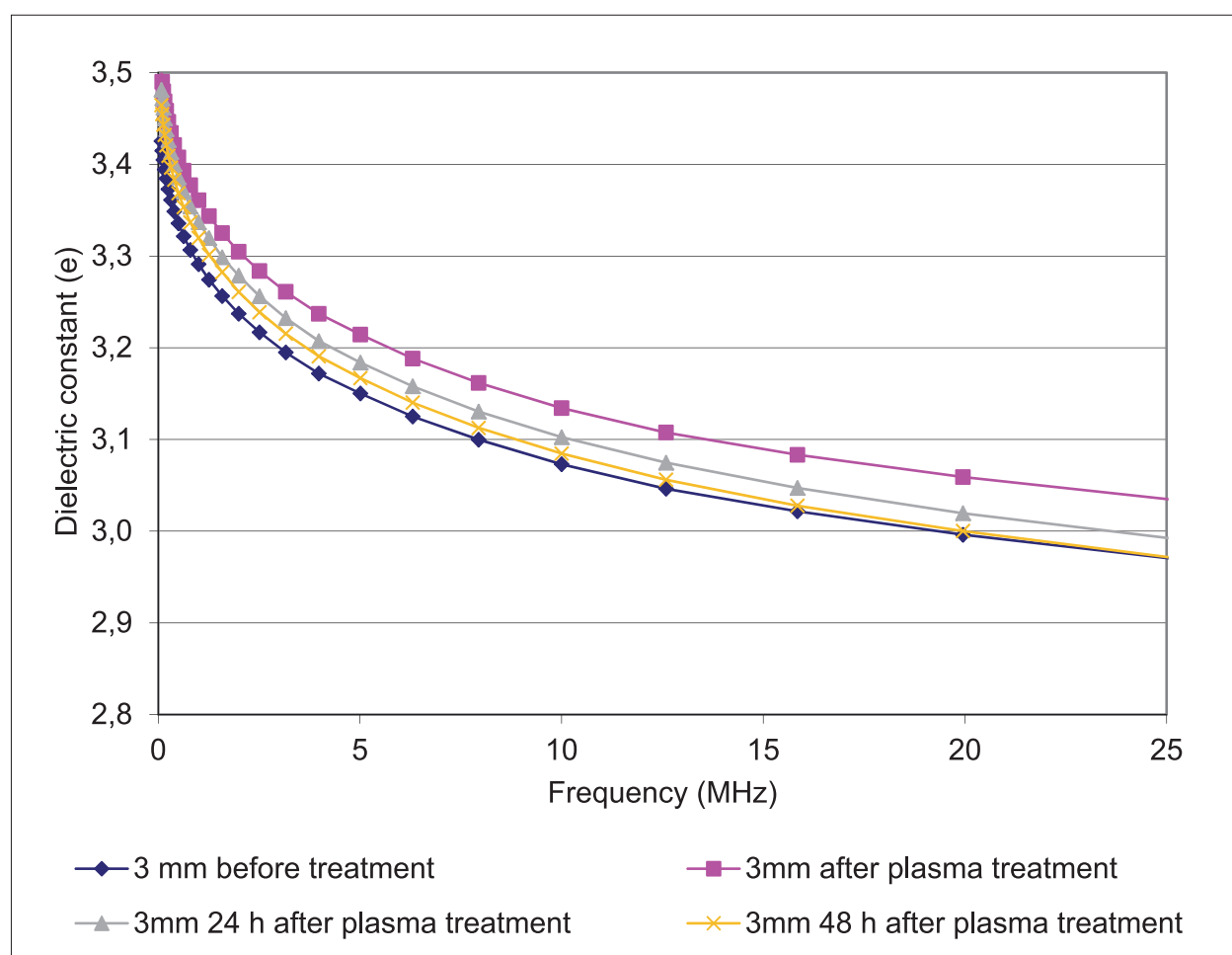


Figure 3. Dielectric constant of spruce discs, thickness 3 mm

Slika 3. Dielektrična konstanta smrekovih diskov debeline 3 mm

$$C = \varepsilon A / d \quad (3)$$

$$C_{tot}^{-1} = C_1^{-1} + C_2^{-1} \quad (4)$$

Simple transformations of equations 3 and 4 for an initial dielectric constant ε , a measured change by 2% and a maximum local change of a factor of 10, yield the relative thicknesses of the unmodified bulk d_{bulk} and the modified layer d_{mod} as given by eq. 5, which can be simplified into eq. 6. This amounts to a modified layer thickness d_{mod} of 2.2% of the remaining unmodified bulk d_{bulk} , i.e. 66 μm modification depth within the 3 mm lamellae. It should be noted that these figures overestimate typical changes in the dielectric constant imposed by chemical modifications in wood, thus likely underestimating the actual modification depth by a significant factor.

Figure 4 shows measurements of the dielectric constant in the range from 0 to 25 MHz for spruce disks with a thickness of 5 mm. Data are shown for the specimen before plasma treatment (blue line), directly after plasma treatment (pink line), 24 hours after plasma treatment (grey line), and 48 hours after plasma treatment (yellow line). In contrast to the 3 mm disks, the volume dielectric constant for the 5 mm disks does not show a significant change due to the plasma treatment, but a slight decrease in the region above 20 MHz is notable 24 hour after the treatment. This difference between 3 mm and 5 mm thick disks indicates the limited depth of the plasma treatment's effect. Since the effect is still well pronounced with the integrated dielectric properties of 3 mm thick specimens, but barely visible at all at 5 mm thick specimens, the impact

$$(d_{bulk} + d_{mod}) / (1.02 \cdot \varepsilon) = [d_{bulk} / \varepsilon] + [d_{mod} / (10 \cdot \varepsilon)] \quad (5)$$

$$d_{mod} = [0.2 / 8.98] \cdot d_{bulk} \quad (6)$$

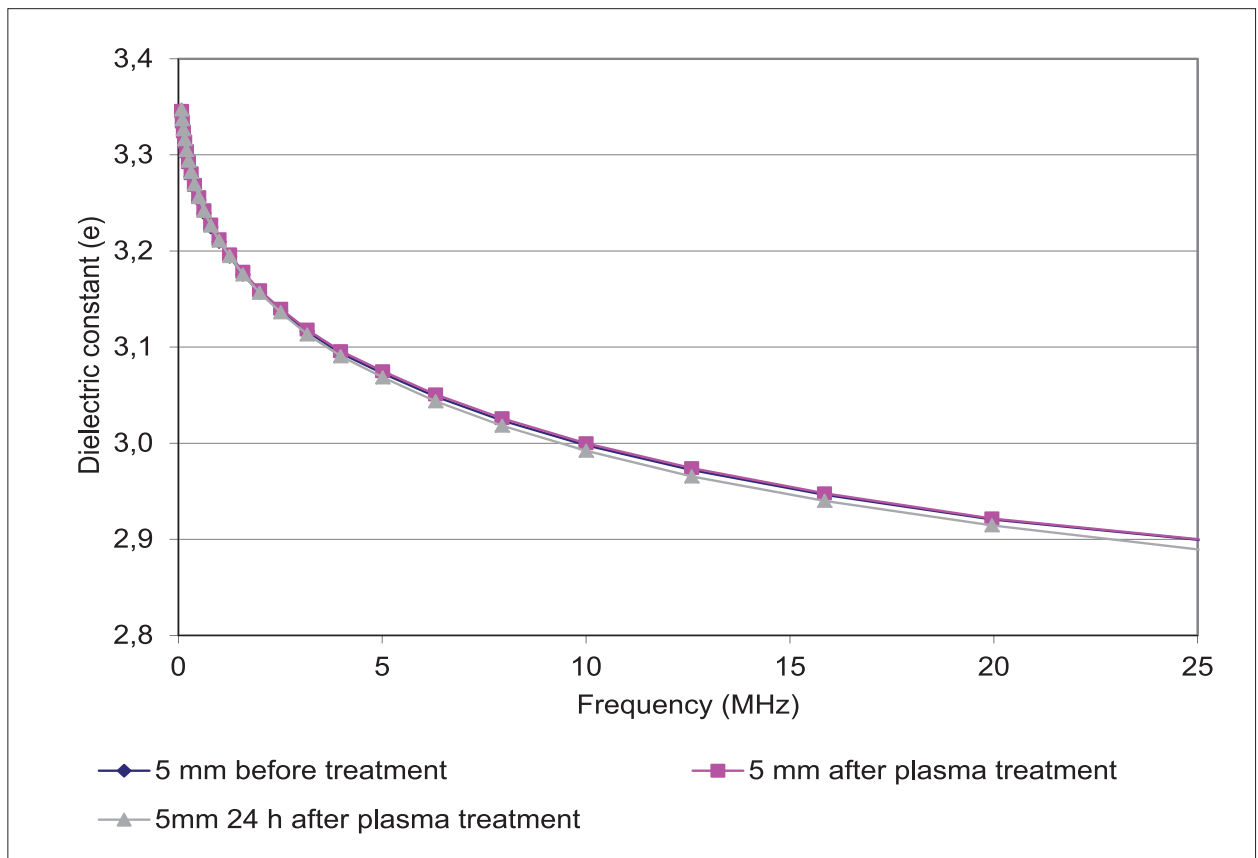


Figure 4. Dielectric constant of spruce discs, thickness 5 mm

Slika 4. Dielektrična konstanta smrekovih diskov debeline 5 mm

of the plasma treatment on the dielectric properties seems to be in the area near the surface. The method used for measuring dielectric properties shows the average dielectric constant through the sample.

Figure 5 presents the loss coefficients for 3 mm spruce discs before plasma treatment (blue line), directly after plasma treatment (pink line) and 24 hours after plasma treatment (grey line). The lowest loss coefficients in the entire frequency range are represented by the untreated substrates; however, the increase in losses appears insignificant against natural variations of the material. The changes in dielectric permittivity (c.f. fig. 3) are thus not reflected in an increased absorption of energy out of alternating electrical fields. Since both the dielectric permittivity and the loss coefficient are typically most effected by changing moisture contents at frequencies below 100 kHz, the loss coefficient even more so than the dielectric constant (c.f. James, 1975), it seems unlikely that these effects are caused merely by an enhanced evaporation of volatile compounds from the surface, which is known to appear during plasma treatments (Altgen et al., 2015, 2016).

In order to investigate possible causes for the changes in dielectric constant and loss coefficient, the mass change of a 50 mm × 35 mm × 3.1 mm spruce lamella was observed throughout and after the plasma treatment process. An evaluation of the mass change over 120 s after being exposed to plasma relative to the weight before the plasma treatment is given in the dataset (see supplemental material and raw data).

Figure 6 shows a comparison between the mass and corresponding moisture content of a specimen before and after plasma treatment, as well as the relative change of both properties. The effect of

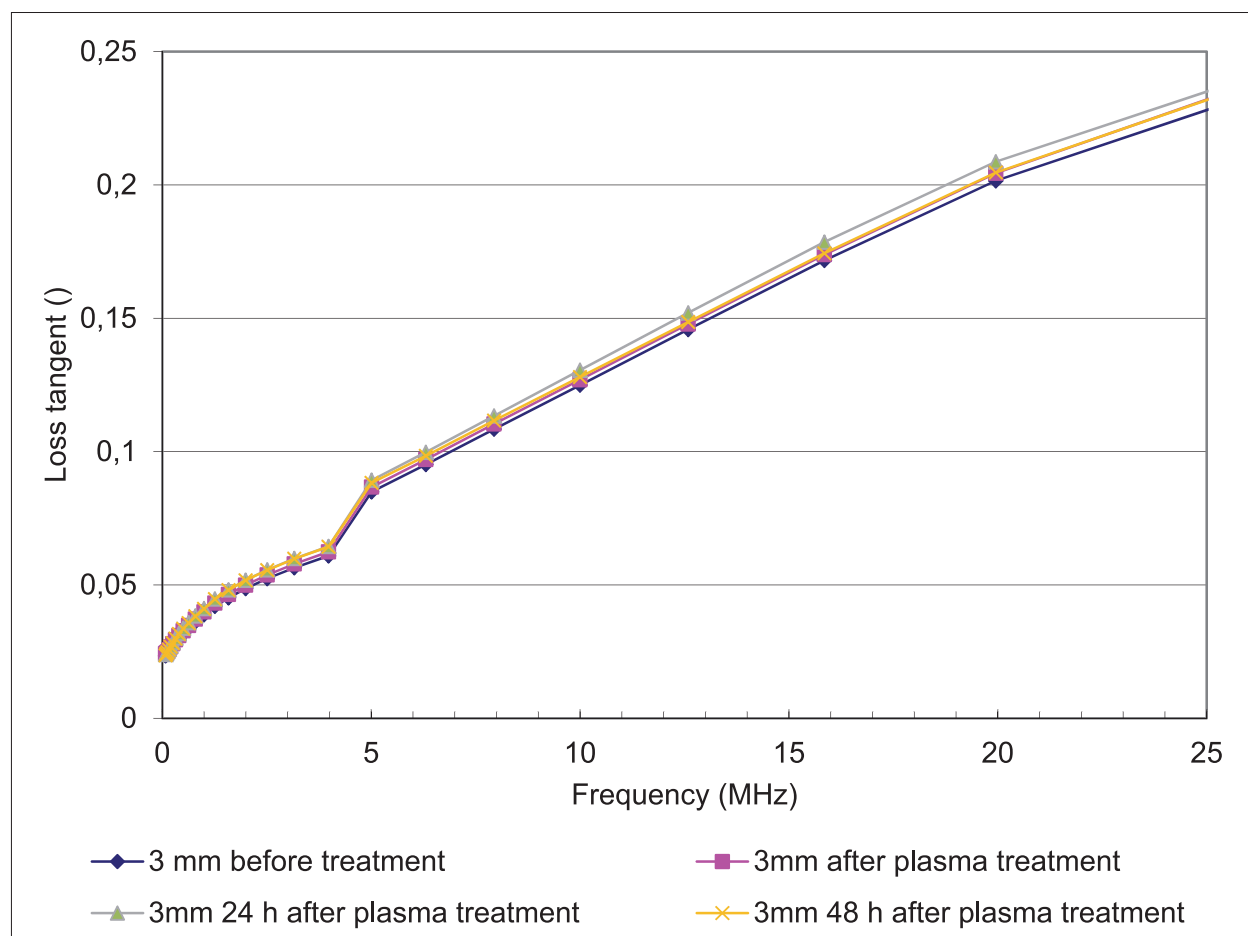


Figure 5. Loss coefficient of spruce discs, thickness 3 mm

Slika 5. Faktor dielektričnih izgub smrekovih diskov debeline 3 mm

enhanced evaporation, removal of small volatile organic compounds and the decrease of moisture content within the part of the wood near the surface is known in the literature (c.f. Altgen et al., 2015, 2016), and the measured moisture reduction of 0.6% correlates well with current knowledge. However, a monitoring of the weight throughout the plasma treatment revealed a stronger reduction than expected. During the plasma treatment, electrostatic interactions rendered the measured weights invalid; the differential weights shown in fig. 6 were thus taken only after the specimen had been removed from the gap underneath the plasma electrode. The strongly reduced weight after the plasma treatment, amounting to approx. 86% of the initial weight slowly rose again over two min-

utes to approx. 88% of the initial weight. Despite strong variations (due to the airflow in the laboratory), the tendency is clearly visible and the extent of the physical weight loss well exceeds all expectations from measurements on changes in chemical composition from earlier publications. A further investigation the impact of plasma on wood samples in terms of weight change would be worthwhile to better understand the underlying processes and improve the statistics of the measurements.

The influence of plasma treatments on the chemistry of wood substrates is typically considered to be on the order of magnitude of 1 μm (Král et al., 2015). However, it has been suggested that the plasma might be ignited somewhat deeper in the wood material (Wascher et al., 2014), which is

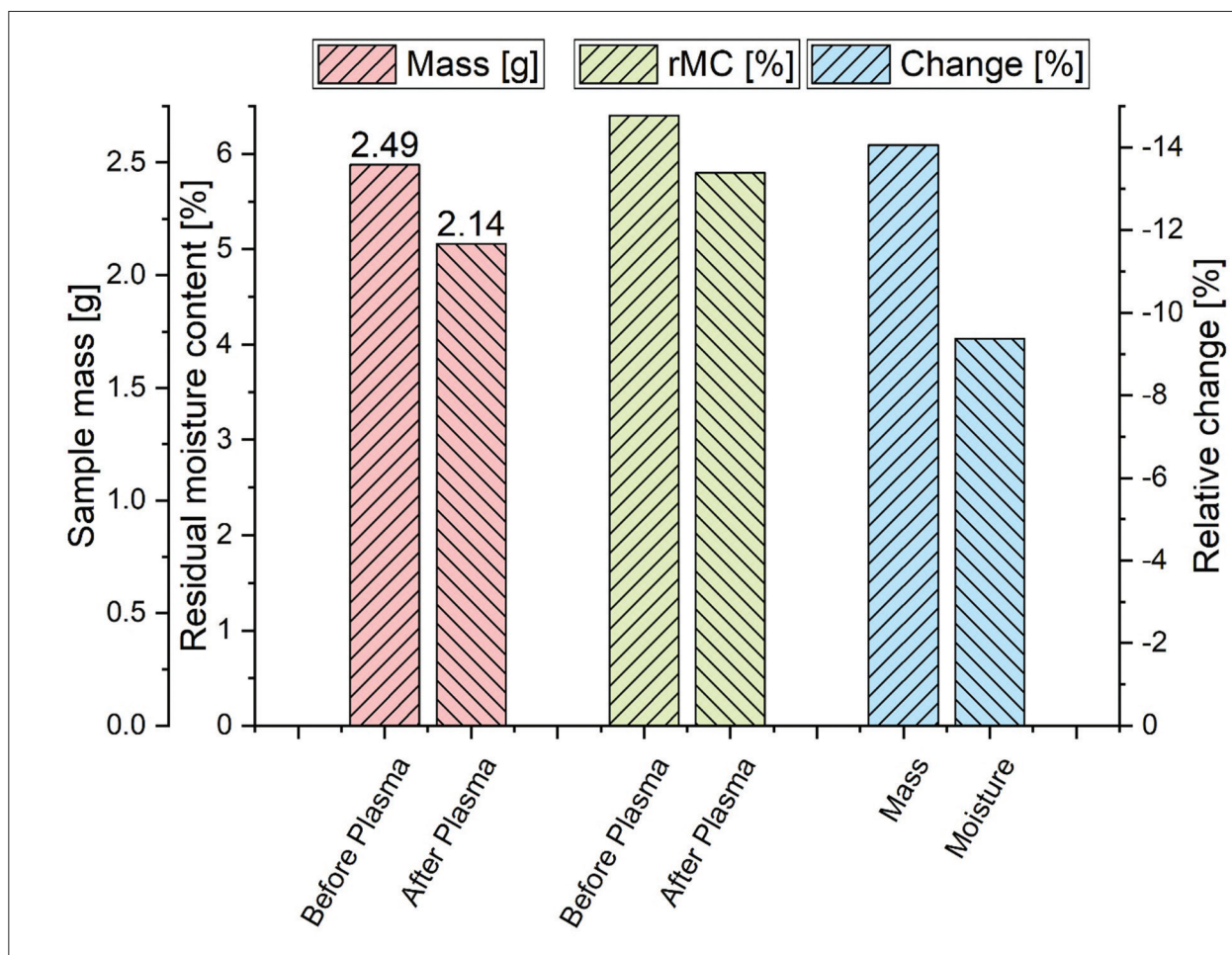


Figure 6. Mass and residual moisture content (rMC) of a spruce lamella with a thickness of 3 mm before and after plasma treatment, as well as the relative changes of mass and rMC

Slika 6. Masa in vlažnost smrekove lamele debeline 3 mm pred obdelavo s plazmo in po njej ter relativne spremembe mase in vlažnosti.

in line with the measured change in moisture content. Moreover, the observed change in dielectric permittivity, particularly for the 3 mm thick lamellae, clearly requires a deeper influence throughout a large part of the specimen, which corresponds well to the observed weight loss after plasma treatment. From both the known chemical effects and the measured change in moisture content, it is clear that the weight loss and change in dielectric permittivity must include other driving mechanisms. This deduction is further supported by the frequency-dependent change in dielectric parameter and the change in dielectric loss coefficient relative to this. It is worth noting, however, that residual charge might still have a minor influence on the measured weight, and that the absolute values of residual moisture content (rMC), as measured via an electric moisture metre, do differ from the average 9.4 % rMC determined through mass change during oven drying. Therefore, further studies are required to illuminate the processes causing these observations.

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

Na sliki 3 so prikazane dielektrične lastnosti v območju meritev od 0 do 25 MHz za smrekove diske debeline 3 mm pred obdelavo s plazmo (modra krivulja), neposredno po obdelavi s plazmo (rožnata krivulja), 24 ur po obdelavi s plazmo (siva krivulja) in 48 ur po obdelavi s plazmo (rumena krivulja). Neposredno po obdelavi s plazmo se je dielektrična konstanta povečala za približno 2 %, kar je v nasprotju s pričakovanji v povezavi s sušenjem. Ko se vlažnost lesa zmanjšuje in hlapne organske spojine iz vzorca izhlapijo, se mora zmanjšati tudi dielektrična konstanta zaradi večje dielektrične konstante uparjenih spojin v primerjavi s preostalim materialom (Norimoto & Yamada, 1972; James, 1975; Torgovnikov, 1993). Učinek se sčasoma zmanjša, kot je razvidno iz meritev po 24 in 48 urah. Vendar se zdi, da se znižanje razlikuje glede na frekvenco meritve, saj je hitrejše v območju nad 20 MHz, medtem ko se večja dielektrična konstanta še ohranja pod 5 MHz.

Na podlagi izmerjene spremembe dielektrične konstante je mogoče poskusiti oceniti globino učinka, ki ga povzroči plazemska obdelava, tako da predpostavimo različne vrednosti osnovne di-

električne konstante ϵ_1 pri debelini sloja d_1 znotraj vzorca in dielektrične konstante ϵ_2 v plasti debeline d_2 , ki jo je plazma spremenila za največ 1-kratnik vrednosti. Princip lahko učinkovito predstavimo z zaporedjem ploščatih kondenzatorjev s prerezom A in kapacitivnostjo C (glej enačbo 3), kar daje skupno zunanjo kapacitivnost C_{tot} (glej enačbo 4).

Preproste transformacije enačb 3 in 4 za začetno dielektrično konstanto ϵ pred obdelavo s plazmo, izmerjena sprememba dielektrične konstante za 2% in največja lokalna sprememba za faktor 10 dajejo relativno debelino nespremenjenega materiala d_{bulk} in spremenjene plasti d_{mod} , kot je podano z enačbo 5, ki jo je mogoče poenostaviti v enačbo 6. Od tod se lahko izračuna spremenjeno debelino plasti d_{mod} , ki znaša 2,2 % materiala, kar absolutno pomeni globino modifikacije 66 μm v 3 mm debelih lamelah. Opozoriti je treba, da je ta ocena pretirana glede na tipične spremembe dielektrične konstante, ki izhajajo iz pričakovanih kemičnih sprememb v lesu, in tako verjetno podcenjujejo dejansko globino modifikacije.

Slika 4 prikazuje meritve dielektrične konstante v območju od 0 do 25 MHz za smrekove diske debeline 5 mm. Podatki so prikazani za vzorec pred obdelavo s plazmo (modra krivulja), neposredno po obdelavi s plazmo (rožnata krivulja), 24 ur po obdelavi s plazmo (siva krivulja) in 48 ur po obdelavi s plazmo (rumena krivulja). V nasprotju z diski debeline 3 mm dielektrična konstanta diskov z debelino 5 mm ne kaže bistvene spremembe zaradi obdelave s plazmo, le rahlo zmanjšanje v območju nad 20 MHz je opazno 24 ur po obdelavi s plazmo. To kaže na omejeno globino učinka plazemske obdelave, ki je vedno dobro izražena s spremenjenimi dielektričnimi lastnostmi vzorcev debeline 3 mm, vendar pri vzorcih debeline 5 mm komaj vidna. Uporabljena metoda merjenja dielektrične vrednosti namreč meri povprečno vrednost na merjenem vzorcu.

Slika 5 prikazuje faktor dielektričnih izgub za smrekove diske debeline 3 mm pred obdelavo s plazmo (modra krivulja), neposredno po obdelavi s plazmo (rožnata krivulja), 24 ur po obdelavi s plazmo (siva krivulja) in 48 ur po obdelavi s plazmo (rumena krivulja). Najnižji faktor dielektričnih izgub v celotnem frekvenčnem območju je bil zaznan pri neobdelanih preizkušancih, povečanje izgub pa se zdi neznatno glede na naravno variabilnost lesa. Spremembe dielektrične konstante (glej sliko 3) se tako ne odražajo v povečani absorpciji energije iz izmenič-

nih električnih polj. Ker na dielektričnost in faktor dielektričnih izgub običajno največ vpliva spreminjanje vlažnosti lesa pri frekvencah pod 100 kHz, na faktor dielektričnih izgub celo bolj kot na dielektrično konstanto (James, 1975), se ne zdi zelo verjetno, da so ti učinki posledica zgolj povečanega izhlapevanja hlapnih spojin s površine, za katero je znano, da se pojavlja med obdelavo s plazmo (Altgen et al., 2015, 2016).

Da bi raziskali možne vzroke za spremembo dielektrične konstante in faktorja dielektričnih izgub, je bila sprememba mase smrekove lamele 50 mm × 35 mm × 3,1 mm izmerjena med postopkom plazemske obdelave in po njej. V naboru podatkov je podana ocena spremembe mase v 120 s po izpostavitvi plazmi glede na maso pred obdelavo s plazmo (prikazano v dodatnih neobdelanih podatkih).

Slika 6 prikazuje primerjavo mase smrekove lamele in njene ustrezne vsebnosti vlage v vzorcu pred in po obdelavi s plazmo ter relativno spremembo obeh lastnosti. Vpliv povečanega izhlapevanja, odstranjevanja majhnih hlapnih organskih spojin in padanja vlažnosti v površinskem delu lesa je znan v literaturi (prim. Altgen et al., 2015, 2016), izmerjeno zmanjšanje za 0,6 % pa pričakovano. Vendar je spremljanje spremembe mase s plazemsko obdelavo pokazalo močnejše zmanjšanje, kot je bilo pričakovano. Med obdelavo s plazmo so elektrostatske interakcije povzročile, da so bile izmerjene mase nepravilne, zato so na sliki 6 prikazane meritve od trenutka, ko se vzorec odstrani iz reže pod plazemsko elektrodo. Močno zmanjšana masa po plazemski obdelavi (približno 86 % začetne mase) se je v dveh minutah počasi spet dvignila na približno 88 % začetne mase. Kljub velikim nihanjem v meritvah mase (zaradi gibanja zraka v laboratoriju z vzgonskimi učinki) je tendenca jasno vidna in obseg izgube mase močno presega vsa pričakovanja glede na navedene spremembe kemijske sestave iz prej omenjenih publikacij. Potrebno je nadaljevanje raziskovanja vpliva plazme na vzorce lesa glede na spreminjanje njihove mase, da bi bolje razumeli osnovne procese in izboljšali zanesljivost meritev.

Vpliv obdelave s plazmo na kemijske lastnosti lesnega substrata je zabeležen do globine reda velikosti 1 μm (Král et al., 2015). Poleg tega smo predvidevali, da se plazma lahko pojavi tudi nekoliko globlje znotraj lesenega materiala, npr. v odprtih porah (Wascher et al., 2014). To potrjuje tudi razmeroma močno spremenjena izmerjena vlažnost lesa in go-

vori o globini učinka bistveno pod 1 μm debelim površinskim slojem, čeprav tega v predhodnih raziskavah s FTIR spektroskopijo ni bilo mogoče potrditi. Vpliv plazme na opaženo spremembo dielektrične konstante pa je očiten zlasti pri 3 mm debelih lamelah, kar dobro ustreza ugotovljeni izgubi mase po obdelavi s plazmo. Iz znanih kemijskih učinkov in izmerjene spremembe vlažnosti lesa je razvidno, da morata izguba mase in sprememba dielektričnih lastnosti vključevati tudi druge vzroke. Takšno sklepanje je podprto s frekvenčno odvisno spremembo dielektričnih parametrov in relativno spremembo tangensa izgubnega kota. Vendar je treba omeniti, da bi lahko imeli morebiti preostali električni naboji še vedno manjši vpliv na izmerjeno težo ter da se absolutne vrednosti vlažnosti, izmerjene z električnim merilnikom vlage, razlikujejo od povprečnih 9,4 % vlažnosti, določenih s spremembo mase med sušenjem v sušilniku. Za razjasnitev teh procesov in opazovanj pa so potrebne nadaljnje študije.

4 SUMMARY

- Distinct rise in dielectric permittivity after plasma treatment, particularly on thinner lamellae and towards higher frequencies well above 1 MHz, but negligible change of loss coefficient.
- Minor reduction of residual moisture content, but strong weight reduction in plasma-treated wood lamella.
- Dielectric properties are affected by plasma treatment much deeper within the bulk material than has previously been reported for the maximum depth of chemical modifications by plasma treatments.

4 POVZETEK

- Izrazit dvig dielektrične konstante po obdelavi s plazmo, zlasti pri tanjših vzorcih in višjih frekvencah precej nad 1 MHz, vendar zanemarljiva sprememba tangensa izgubnega kota.
- Majhno zmanjšanje lesne vlažnosti, vendar močno zmanjšanje mase pri leseni lameli, obdelani s plazmo.
- Obdelava s plazmo vpliva na dielektrične lastnosti veliko globlje v materialu, kot so doslej poročali glede največje globine kemičnih modifikacij pri obdelavi lesa s plazmo.

Acknowledgements:

The authors acknowledge the provision of the moisture meter by the group of Prof. Dr. Ž. Gorišek.

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 745936.

The authors acknowledge further financial support from the Slovenian Research Agency (research program funding No. P4-0015, "Wood and lignocellulosic composites").

Zahvala:

Avtorji se zahvaljujemo skupini prof. dr. Ž. Goriška, da je omogočila uporabo merilnika lesne vlažnosti.

Ta projekt je prejel sredstva iz raziskovalnega in inovacijskega programa Evropske unije Obzorje 2020 v okviru pogodbe št. 745936.

Avtorji se zahvaljujemo za finančno podporo Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (financiranje raziskovalnega programa št. P4-0015, "Les in lignocelulozni kompoziti").

Supplemental information and raw data:

Supplemental material and all raw data can be accessed openly via the author's institutional repository at <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=121368>, and cited as Dahle et al. (2020).

Dodatne informacije in neobdelani podatki:

Dodatni material in vsi osnovni podatki, ki so na voljo v odprtem dostopu prek avtorjevega institucionalnega repozitorija na spletni strani <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=121368>, naj bodo citirani Dahle et al. (2020).

REFERENCES

LITERATURA

- Altgen, D., Bellmann, M., Wascher, R., Viöl, W., & Mai, C. (2015). Enhancing mechanical properties of particleboards using plasma treated wood particles. *Eur. J. Wood Prod.*, 73: 219-223.
- Altgen, D., Avramidis, G., Viöl, W., & Mai, C. (2016). The effect of air plasma treatment at atmospheric pressure on thermally modified wood surfaces. *Wood Sci. Technol.*, 50:1227-1241.
- Altgen, D., Grigsby, W., Altgen, M., Rautkari, L., & Mai, C. (2019). Analyzing the UF resin distribution in particleboards by confocal laser microscopy. *Composites, Part A*, 125:105529.
- Bardak, S., Sari, B., Nemli, G., Kirci, H., & Baharoğlu, M. (2011). The effect of décor paper properties and adhesive type on some properties of particleboard. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 31:412-415.
- Blanchard, V., Blanchet, P., & Riedl, B. (2009). Surface energy modification by radiofrequency inductive and capacitive plasmas at low pressures in sugar maple: An exploratory study. *Wood and Fiber Science*, 41(3):245-254.
- Boero, F., Fedeli, A., Lamini, M., Maffongelli, M., Monleone, R., Pastorino, M., Randazzo, A., Salvadè, A., & Sansalone, A. (2018). Microwave tomography for the inspection of wood materials: Imaging system and experimental results. *IEEE Trans. Microw. Theory*, 66(7):3497-3510.
- Dahle, S., Žigon, J., Petrič, M., & Kariž, M. (2020). Plasma treatment of spruce wood changes its dielectric properties: research data underlying the article. (10. 11. 2020). Retrieved from <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=121368>
- Daian, G., Taube, A., Birnboim, A., Daian, M., & Shramkov, Y. (2006). Modeling the dielectric properties of wood. *Wood Sci. Technol*, 40:237-246. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-005-0060-7>
- Dam, T. N. (2017). Environmental enhancing adhesion properties of Wood-Plastic Composites by plasma at atmospheric pressure. 2017 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), 652-655. ISBN: 978-1-5386-3422-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSSE.2017.8030956>
- De Cademartori, P. H. G., Carvalho, A. R., Marangoni, P. R. D., Berton, M. A. C., Blanchet, P., Muniz, G. I. B., & Magalhães, W. L. E. (2016). Adhesion performance and film formation of acrylic emulsion coating on medium density fiberboard treated with Ar plasma. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 70:322-328.
- Gamaleev, V., Iwata, N., Hori, M., Hiramatsu, M., & Ito, M. (2019). Direct Treatment of Liquids using low-current arc in ambient air for biomedical applications. *Appl. Sci.*, 9(17):3505. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9173505>
- Haase, J. G., Leung, L. H., & Evans, P. D. (2019). Plasma pre-treatments to improve the weather resistance of polyurethane coatings on black spruce wood. *Coatings*, 9(1):8.
- Istek, A., Aydemir, D., & Aksu, S. (2010). The effect of décor paper and resin type on the physical, mechanical, and surface quality properties of particleboards coated with impregnated décor papers. *BioResources*, 5(2):1074-1083.
- Jamali, A., & Evans, P. D. (2011). Etching of wood surfaces by glow discharge plasma. *Wood Science and Technology*, 45:169-182.
- James, W. L. (1975). Dielectric properties of wood and hardboard: variation with temperature, frequency, moisture content, and grain orientation (Vol. 245). Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Keskin, H., & Tekin, A. (2011). Abrasion resistances of cellulosic, synthetic, polyurethane, waterborne and acidhardening varnishes used woods. *Constr. Build. Mater.*, 25:638-643.
- Kranbuehl DE (1997). In: Dielectric spectroscopy of polymeric materials: fundamentals and applications, ACS, 1997. p. 303.

- Král, P., Ráhel, J., Stupavská, M., Šrajcar, J., Klímek, P., Mishra, K.P., & Wimmer, R. (2015). XPS depth profile of plasma-activated surface of beech wood (*Fagus sylvatica*) and its impact on polyvinyl acetate tensile shear bond strength. *Wood Sci. Technol.*, 49:319-330.
- Liston, E. M., Martinu, L., & Wertheimer, M. R. (1993). Plasma surface modification of polymers for improved adhesion: a critical review. *J. Adhes. Sci. Technol.*, 7(10):1091-1127.
- Nikolova, B. M., Nikolov, G. T., Gieva, E. E., & Ruskova, I. N. (2018). Dielectric Properties Measurement of Flexible Substrates. *Proc. XXVII International Scientific Conference Electronics - ET2018*, September 13 - 15, 2018, Sozopol, Bulgaria.
- Norimoto, M., & Yamada, T. (1972). Dielectric Properties of Wood VI: On the Dielectric Properties of the chemical constituents of wood and the dielectric anisotropy of wood. *Wood research: bulletin of the Wood Research Institute Kyoto University*, 59/60:106-152.
- Norimoto, M. (1976). Dielectric properties of wood. *Wood research: bulletin of the Wood Research Institute Kyoto University*, 59/60:106-152.
- Nemli, G., & Hiziroglu, S. (2009). Effect of press parameters on scratch and abrasion resistance of overlaid particleboard panels. *J. Compos. Mater.*, 43(13):1413-1420.
- Perisse, F., Menecier, S., Duffour, E., Vacher, D., Monier, G., Destrebecq, J.-F., Czarniak, P., Górski, J., & Wilkowski, J. (2017). MDF treatment with a Dielectric Barrier Discharge (DBD) torch. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 79:18-22.
- Rehn, P., & Viöl, W. (2003). Dielectric barrier discharge treatments at atmospheric pressure for wood surface modification. *Holz Roh- Werkst.*, 61:145-150.
- Reinprecht, L., Tiño, R., & Šomšák, M. (2018). Adhesion of coatings to plasma modified wood at accelerated weathering. In: *European Conference on Wood Modification 2018 (ECWM9)*, Arnhem, The Netherlands (On-line Proceedings). Ed. Creemers, J., Houben, T., Tjeerdsma, B., Militz, H., Junge, B., Gootjes, J., 205-209.
- Rolleri, A., & Roffael, E. (2010). Influence of the surface roughness of particleboards and their performance towards coating. *Maderas ciencia y tecnologia*, 12(2):143-148.
- Šernek, M., & Kamke, F. A. (2007). Application of dielectric analysis for monitoring the cure process of phenol formaldehyde adhesive. *International Journal of adhesion and adhesives*, 27(7), 562-567.
- Sikder, S. S., Uddin, K. A., Rahman, M. M., & Bhuiyan, A. H. (2009). Effect of salinity on dynamic dielectric properties of Sundori wood of Bangladesh. *Bangladesh J. Phys.*, 7-8:55-61.
- Torgovnikov, G. I. (1993). Dielectric properties of wood-based materials. In *Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials*, (pp. 135-159). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Veigel, S., Grüll, G., Pinkl, S., Obersiebzig, M., Müller, U., & Gindl-Altmutter, W. (2014). Improving the mechanical resistance of waterborne wood coatings by adding cellulose nanofibers. *React. Funct. Polym.*, 85:214-220.
- Wascher, R., Avramidis, G., Vetter, U., Damm, R., Peters, F., Militz, M., & Viöl, W. (2014). Plasma induced effects within the bulk material of wood veneers. *Surface & Coatings Technology*, 259:62-67.
- Wolf, R., & Sparavigna, A. C. (2010). Role of plasma surface treatments on wetting and adhesion. *Engineering*, 2:397-402.
- Wolkenhauer, A., Militz, H., & Viöl, W. (2008). Increased PVA-glue adhesion on particle board and fibre board by plasma treatment. *Holz Roh- Werkst.*, 66:143-145.
- Wolkenhauer, A., Avramidis, G., Hauswald, E., Loose, S., Viöl, W., & Militz, H. (2009). Investigations on the drying behaviour of adhesives on plasma-treated wood materials. *Wood Res.*, 54(1):59-66.
- Žigon, J., Petrič, M., & Dahle, S. (2018). Dielectric barrier discharge (DBD) plasma pretreatment of lignocellulosic materials in air at atmospheric pressure for their improved wettability: a literature review. *Holzforschung*, 72(11):972-911.
- Žigon, J., Petrič, M., & Dahle, S. (2019a). Artificially aged spruce and beech wood surfaces reactivated using FE-DBD atmospheric plasma. *Holzforschung*, 73(12), 1069-1081.
- Žigon, J., Zaplotnik, R., Ayata, Ü., Petrič, M., & Dahle, S. (2019b). The influence of artificial weathering and treatment with FE-DBD plasma in atmospheric conditions on wettability of wood surfaces. 3. Niedersächsisches Symposium Materialtechnik, Clausthal, 14. bis 15. Februar 2019. Tagungsband 3. Niedersächsisches Symposium Materialtechnik 7:559.



RAZVOJ TRDNOSTI POLIVINILACETATNEGA LEPILENEGA SPOJA PRI LEPLJENJU FURNIRJA

DEVELOPMENT OF POLYVINYL ACETATE ADHESIVE BOND STRENGTH WHEN GLUING VENEER

Toni Šauperl¹, Jaša Saražin¹, Milan Šernek^{1*}

UDK 630*824.839

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Prispelo / Received: 27. 10. 2020

Sprejeto / Accepted: 10. 11. 2020

Izvleček / Abstract

Izvleček: V prispevku je predstavljen razvoj strižne trdnosti dveh polivinilacetatnih (PVAc) lepil: Mekol D3 in Mekol SPECIAL pri lepljenju furnirja v odvisnosti od časa stiskanja. Poleg testiranja trdnosti lepilnega spoja po vročem stiskanju smo proučevali tudi vpliv hlajenja na končno trdnost PVAc lepilnega spoja. Graditev strižne trdnosti PVAc lepilnega spoja med vročim stiskanjem smo ugotavljali s pomočjo sistema za avtomatizirano vrednotenje zlepljenosti (ABES). Temperatura stiskanja je bila konstantna in je znašala 80 °C medtem, ko smo čas stiskanja povečevali od 30 do 300 sekund s 30-sekundnimi intervali. Vpliv hlajenja na končno trdnost PVAc lepilnega spoja smo ugotavljali po 5-sekundnem in 30-sekundnem hlajenju. Na podlagi raziskave smo ugotovili, da je strižna trdnost PVAc lepilnih spojev naraščala s časom stiskanja in se je po določenem času približala konstantni vrednosti. Ugotovili smo značilne razlike v trdnosti spojev, zlepljenjih z Mekol D3 in Mekol SPECIAL ter statistično značilen vpliv hlajenja na trdnost lepilnih spojev.

Gljučne besede: ABES, furnir, lepilni spoj, PVAc, strižna trdnost, temperatura

Abstract: This article presents the development of the shear strength of two polyvinyl acetate (PVAc) adhesives: Mekol D3 and Mekol SPECIAL when bonding veneer depending on pressing time. Besides testing the strength of the adhesive bond after hot pressing, we also investigated the effect of cooling on the final strength of PVAc adhesive bonds. The shear strength development of the PVAc adhesive bond during hot pressing was determined using an Automated Bonding Evaluation System (ABES). The pressing temperature was constant and was 80 °C, while the pressing time was extended from 30 to 300 seconds in 30-second intervals. The effect of cooling on the final strength of the PVAc adhesive bond was determined after cooling times of 5 and 30 seconds. Based on the investigations, we found that the shear strength of PVAc adhesive bonds increased with the pressing time and approached a constant value after a certain time. We found significant differences in the strength of adhesive bonds glued with Mekol D3 and Mekol SPECIAL and a statistically significant effect of cooling on the strength of the adhesive bonds.

Keywords: ABES, veneer, adhesive bond, PVAc, shear strength, temperature

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Najpogosteje uporabljena lepila za oplemenitenje oziroma oblaganje lesnih plošč s furnirjem so iz skupine urea-formaldehidnih (UF) in polivinilacetatnih (PVAc) lepil. UF lepila utrjujejo hitro in zagotavljajo kvalitetne spoje, vendar vsebujejo formaldehid, ki je škodljiv za uporabnike in okolje. Zamenjamo jih lahko s PVAc lepili, ki niso škodljiva za zdravje in okolje, vendar utrjujejo nekoliko počasneje. Ker so PVAc lepila termoplastna oziroma

plastomerna, lahko izpostavitve lepljencev višjim temperaturam povzroči lezenje, mehčanje in popuščanje lepilnih spojev (Resnik, 1997). Običajna PVAc lepila so najpogosteje uporabljena za nekonstrukcijsko lepljenje lesa in drugih poroznih materialov, kjer lepilni spoji niso neposredno izpostavljeni zunanjim vremenskim dejavnikom. Z dopolnjevanjem osnovne recepture lepilnih mešanic s pomočjo različnih dodatkov lahko pripravimo tudi PVAc lepila, ki so odpornejša na vodo, vlago in povišano temperaturo (Šernek & Kutnar, 2008).

Za nastanek kvalitetnih lepilnih vezi je izredno pomembno zagotavljanje ustrezne hitrosti utrjevanja lepila ter s tem povezanega zadostnega časa stiskanja lepljencev. Prav tako je pomembno pozna-

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

* e-pošta: milan.sernek@bf.uni-lj.si

vanje vpliva temperature na lastnosti že utrjenega lepilnega spoja (EN 14257, 2006). Zato je potrebno celoten proces utrjevanja lepilnega spoja med lepljenjem ustrezno nadzorovati in regulirati, da dosežemo ustrezno končno trdnost lepilnega spoja (Thoemen et al., 2010).

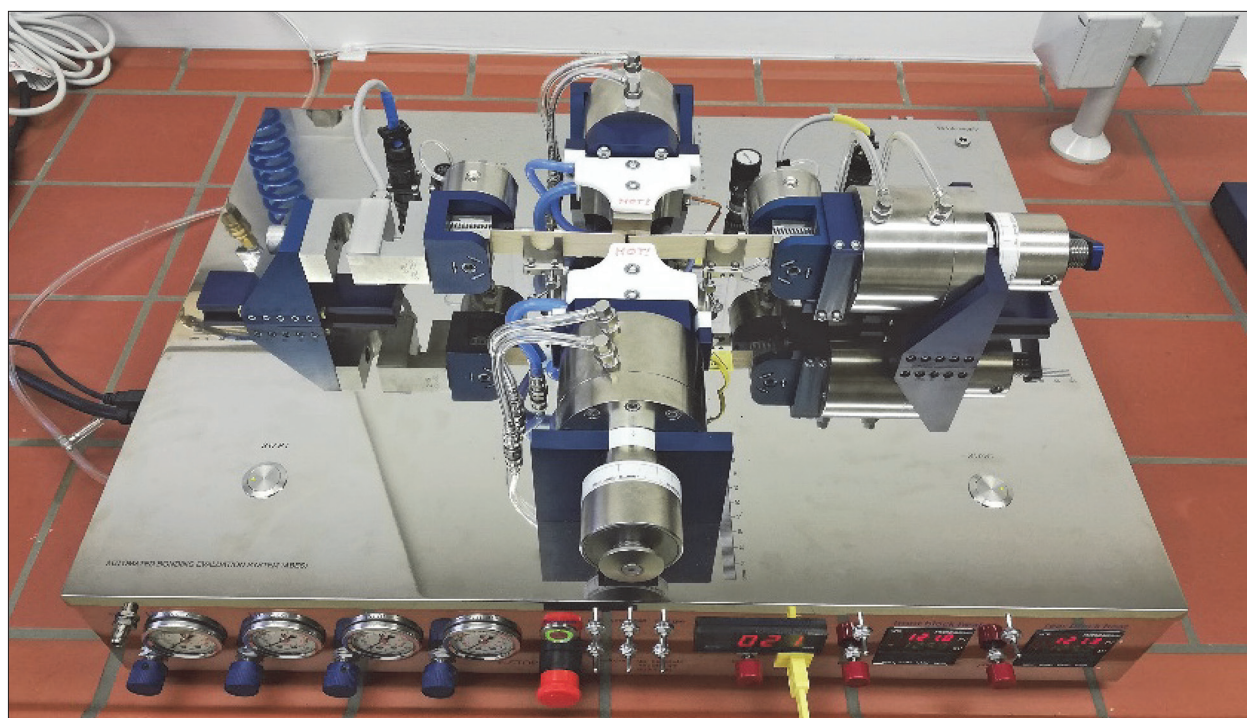
Za proučevanje graditve trdnosti lepilnega spoja v odvisnosti od časa stiskanja in vpliva hlajenja na trdnost spoja je zelo primerna metoda za spremljanje dinamike graditve trdnosti lepilnega spoja oziroma sistem za avtomatizirano vrednotenje zlepljenosti (ABES – an. Automated Bonding Evaluation System). Naprava ABES (slika 1) omogoča proučevanje strižne trdnosti lepilnega spoja pri lepljenju lesa in različnih drugih materialov, pod natančno nadzorovanimi dejavniki: temperaturo, časom in tlakom stiskanja (Humphrey, 1993, 2014). Velika prednost te raziskovalne opreme je, da lahko z njo natančno nadzorujemo in določamo parametre stiskanja, ki odločilno vplivajo na razvijanje trdnosti lepilnih spojev. Najvplivnejši spremenljivki, pri katerih se formirajo novonastale vezi v lepilu, sta temperatura in čas stiskanja.

Utrjevanje lepila lahko pojasnimo kot proces, v katerem se lepilo pri določenih pogojih iz tekoče

oblike spremeni v trdno. Utrjeni lepilni spoji predstavljajo povezavo med posameznimi elementi v lepljencu in celotnemu izdelku dajejo končno trdnost. Trdnost lepilnega spoja je odvisna od različnih dejavnikov: vrste uporabljenega lepila, temperature in časa stiskanja, dodatkov, časa hlajenja lepilnega spoja, idr. (Šauperl, 2020). Na strižno trdnost odločilno vpliva tudi vlažnost lesa pri lepljenju. Preizkušanci, lepljeni iz furnirja z nižjo vlažnostjo, so dosegali višje strižne trdnosti UF lepilnega spoja. Pri furnirjih z višjimi vlažnostmi (11,0 % in 13,1 %) se je strižna trdnost lepilnega spoja zmanjšala skoraj za petino (Šernek, 1999).

Za proučevanje utrjevanja lepilnega spoja se poleg ABES uporabljajo tudi druge metode, kot so npr. termomehanska analiza (Termomechanical Analysis – TMA), dielektrična analiza (Dielectric Analysis – DEA) in dinamična mehanska analiza (Dynamic Mechanical Analysis – DMA). Primerljiva metoda, ki se pogosto uporablja za proučevanje trdnosti lepilnega spoja, je tudi dinamika graditve strižne trdnosti (DGST), ki je prirejena po metodologiji ABES.

Trdnost lepilnega spoja je bila s pomočjo ABES in drugih primerljivih metod proučevana v številnih predhodnih raziskavah z različnimi lepili in na



Slika 1. ABES - Sistem za avtomatizirano vrednotenje zlepljenosti

Figure 1. ABES - Automated Bonding Evaluation System

različnih substratih. Lepljenje različnih lignoceluloznih materialov med seboj je preizkušal Martins s sodelavci (2013). V nekaj raziskavah so za lepljenje uporabili furnir in proučevali graditev trdnosti UF lepilnega spoja pri različnih temperaturah stiskanja, deležih dodanega katalizatorja in različnih stopnjah hlajenja po stiskanju. Višje temperature stiskanja in večji deleži dodanega katalizatorja so pospešili utrjevanje UF lepilnega spoja (Kunc, 2009; Costa et al., 2013). Pirc (2019) je ugotovil, da hlajenje vročega lepilnega spoja ni bistveno vplivalo na končno trdnost UF lepilnega spoja. Jošt in Šernek (2009) sta v raziskavi ugotovila, da je bila graditev fenol-formaldehidnega (FF) lepilnega spoja odvisna predvsem od časa stiskanja in sestave FF lepila.

Cilj raziskave je bil ugotoviti razvoj trdnosti lepilnega spoja pri lepljenju furnirjev z dvema različnima PVAc lepiloma. Ugotavljali smo graditev strižne trdnosti PVAc lepilnega spoja pri različnih časih stiskanja in konstantni temperaturi 80 °C. Ker so PVAc lepila plastomerna, smo ugotavljali tudi vpliv temperature oziroma hlajenja po vročem stiskanju na končno trdnost lepilnega spoja.

2 MATERIALI IN METODE

2 MATERIALS AND METHODS

Preizkušanci so bili izdelani skladno s standardom ASTM D7998 (2019) za testiranje z napravo ABES. En strižni preizkušanec sta sestavljala dva lističa bukovega (*Fagus sylvatica* L.) furnirja debeline 0,84 mm. Dolžina posameznega furnirja je znašala 117 mm, širina pa 20 mm. Pripravili smo jih na napravi za rezanje furnirskih lističev za testiranje z ABES, ki omogoča natančno rezanje in s tem zagotovi predpisano površino lepilnega spoja (100 mm²). ABES s fiksno postavitvijo vpenjalnih čeljusti natančno definira zmeraj enako preklapno površino preizkušanc

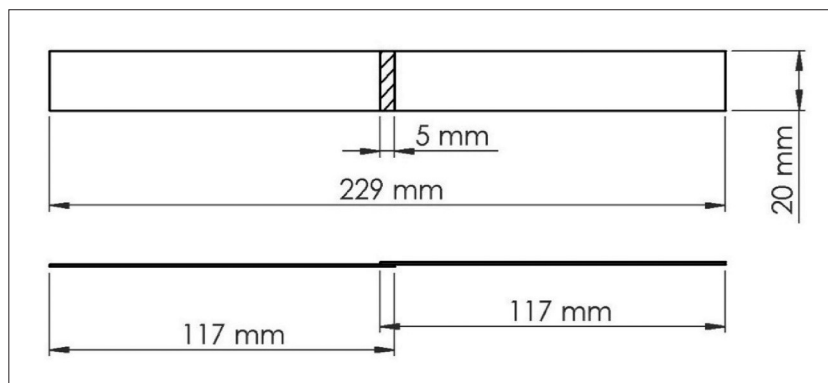
cev 5 mm x 20 mm za lepljenje (slika 2). Po vsakem strižnem testu smo s pomočjo kljunastega merila individualno izmerili dimenziji preklopa in natančno izračunali površino posameznega lepilnega spoja.

Furnirske lističe smo pred lepljenjem klimatizirali pri sobnih pogojih pri temperaturi 25 °C in relativni zračni vlažnosti 50 %. Povprečna ravnovesna vlažnost klimatiziranega bukovega furnirja je znašala 7,7 %.

Za lepljenje smo uporabili dve disperzijski PVAc lepili za lepljenje lesa: Mekol D3 in Mekol SPECIAL. Obe lepili sta v tekoči in vnaprej pripravljeni obliki. Mekol D3 je PVAc lepilo za lepljenje vseh drevesnih vrst, kjer je zahtevana večja vodoodpornost in odpornost proti višjim temperaturam. Lepilo Mekol SPECIAL je primerno za splošno lepljenje lesa, papirja, kartona in drugih poroznih materialov.

S pomočjo preliminarnih meritev smo zastavili potek glavne raziskave za ugotavljanje razvoja strižne trdnosti PVAc lepilnega spoja pri lepljenju furnirja v odvisnosti od časa stiskanja. Vse preizkušance smo lepili pri temperaturi stiskanja 80 °C. Stiskanje PVAc lepilnih spojev je bilo izvedeno pri različnih časih s 30-sekundnim intervalom na razponu od 30 do 300 s. Proučevali smo tudi vpliv hlajenja lepilnega spoja takoj po vročem stiskanju na njegovo trdnost.

Hlajenje vročih lepilnih spojev na ABES omogoča naprava s stisnjenim zrakom, ki po končanem stiskanju v obliki izvlečenega mehanizma (slika 3) obda lepilni spoj ter ga ohladi. Učinek hlajenja na strižno trdnost PVAc lepilnih spojev smo ugotavljali po 5 in 30-sekundnem hlajenju. Za kontrolno skupino nismo uporabili hlajenja s stisnjenim zrakom, ampak smo testirali vroče lepilne spoje. Za vse tri postopke lepljenja smo izmerili temperaturne profile v lepilnem spoju s termočlenom tip K (slika 4).



Slika 2. Preizkušanec za ABES predstavlja dva furnirja, z lepilnim spojem na površini preklopa 5 mm x 20 mm

Figure 2. Test piece for ABES composed of two veneers with bonded overlap of 5 mm x 20 mm surface area

Skupno smo izvedli 6 različnih kombinacij meritev:

- **Mekol D3** – testiranje strižne trdnosti, izvedeno po vročem stiskanju,
- **Mekol SPECIAL** – testiranje strižne trdnosti, izvedeno po vročem stiskanju,
- **Mekol D3 + 5 s hlajenja** – testiranje strižne trdnosti, izvedeno po vročem stiskanju in 5-sekundnem hlajenju,
- **Mekol SPECIAL + 5 s hlajenja** – testiranje strižne trdnosti, izvedeno po vročem stiskanju in 5-sekundnem hlajenju,
- **Mekol D3 + 30 s hlajenja** – testiranje strižne trdnosti, izvedeno po vročem stiskanju in 30-sekundnem hlajenju,
- **Mekol SPECIAL + 30 s hlajenja** – testiranje strižne trdnosti, izvedeno po vročem stiskanju in 30-sekundnem hlajenju.

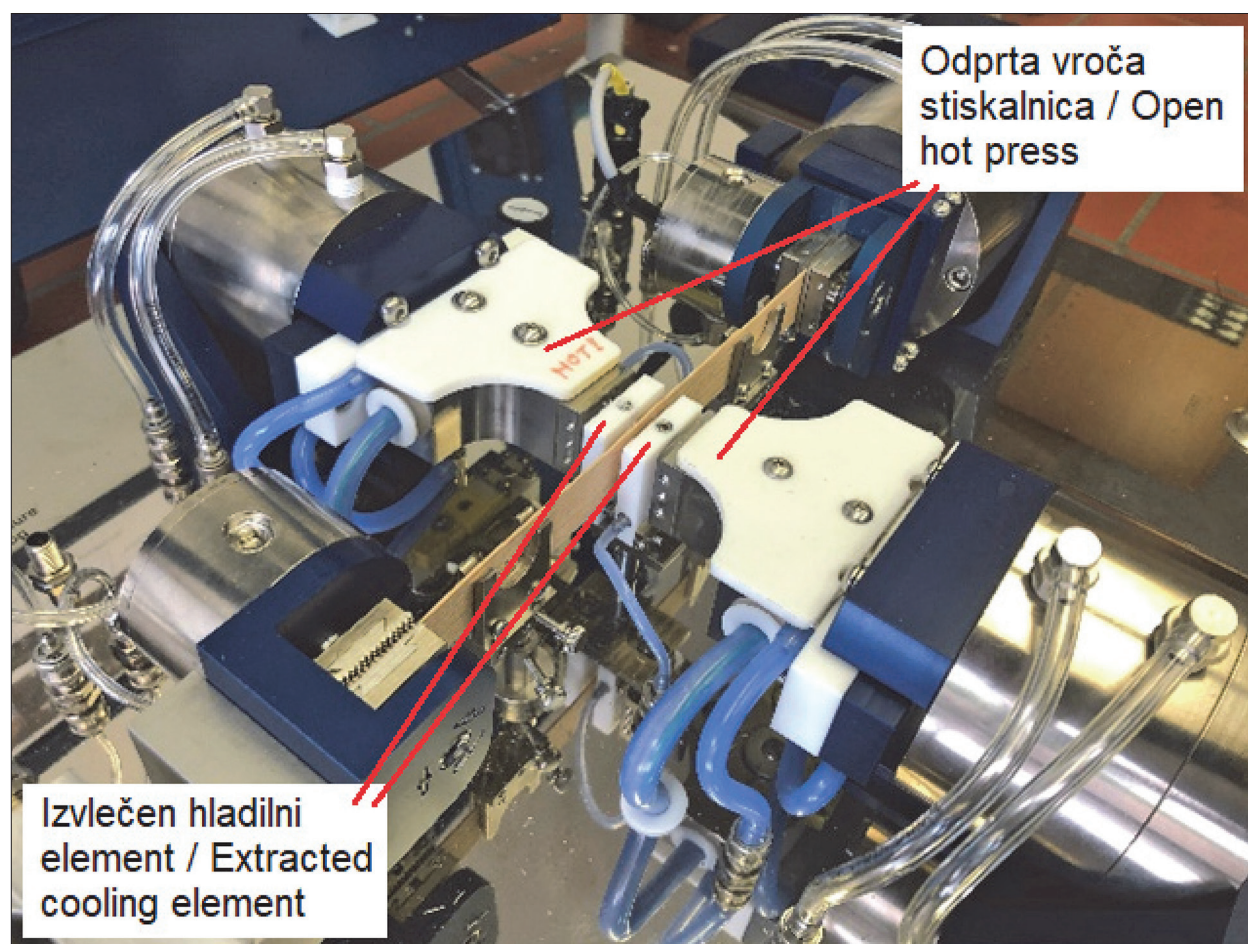
Meritve smo opravljali pri 10 časih stiskanja in naredili 6 ponovitev. Skupno smo tako testirali 360 preizkušancev.

Graditev trdnosti lepilnega spoja smo določali na podlagi strižne trdnosti, ki je definirana kot kvocient med maksimalno porušno silo (F_{max}) oziroma silo loma lepilnega spoja in površino preklopa (A).

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

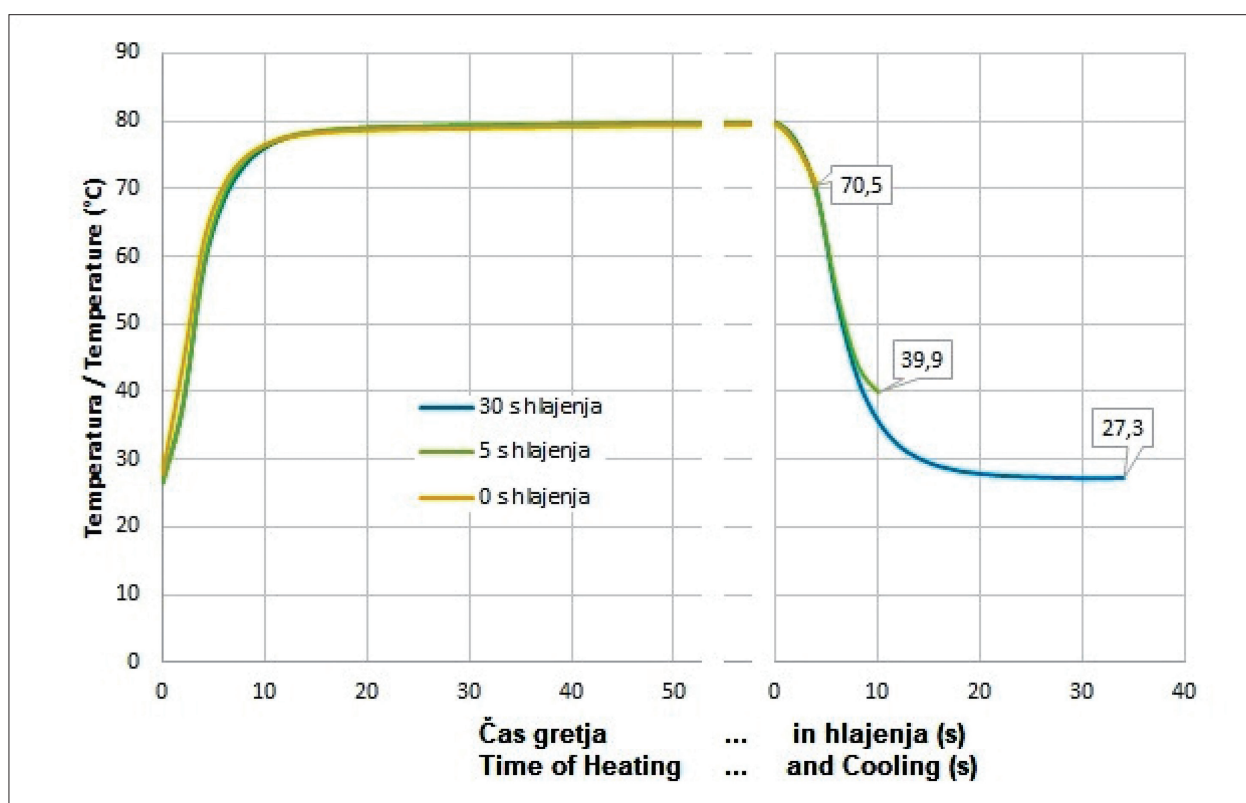
3 RESULTS AND DISCUSSION

Na sliki 4 so prikazane povprečne temperature PVAc lepilnih spojev med proučevanjem z ABES. V miniaturi vroči stiskalnici s temperaturo 80 °C se je temperatura lepilnih spojev iz sobne temperature po 20 s približala nastavljeni temperaturi in bila konstantna do odprtja stiskalnice po preteku izbra-



Slika 3. Hlajenje preizkušanca po odprtju vroče stiskalnice na ABES

Figure 3. Cooling of the lap-joint test piece after opening the hot press on the ABES



Slika 4. Temperatura lepilnega spoja glede na različne čase hlajenja

Figure 4. Temperature of the adhesive bond for different cooling times

nega časa stiskanja. Preizkušanci, ki niso bili hlajeni s stisnjenim zrakom, so bili testirani 3 - 4 s po odprtju stiskalnice, pri temperaturi malo nad 70 °C, tisti s 5 s hlajenjem približno pri 40 °C, tisti s 30 s hlajenjem pa pri temperaturi okrog 27 °C.

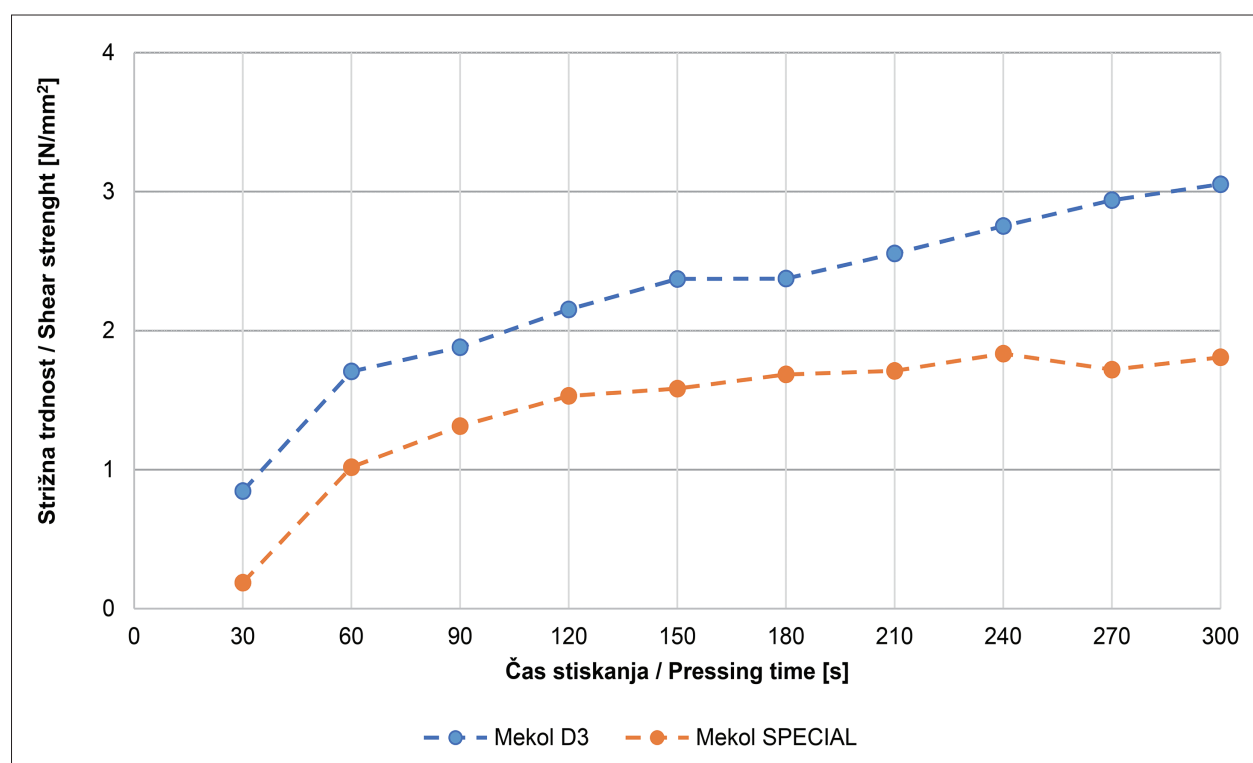
Na sliki 5 so predstavljeni rezultati graditve strižne trdnosti PVAc lepilnih spojev obeh uporabljenih lepil po vročem stiskanju (3 - 4 s po odprtju stiskalnice), brez hlajenja s stisnjenim zrakom. Predstavljeni krivulji sta si po obliki podobni in sicer najprej strmo rasteta, nato se rast upočasni in strižna trdnost se v obeh primerih lepil približa neki končni vrednosti.

Podrobnejša analiza obeh krivulj rasti strižne trdnosti pokaže, da je bila na začetku stiskanja trdnost enaka nič, saj je bilo lepilo v tekočem stanju in še ni začelo utrjevati. Ko je temperatura v lepilnem spoju narasla, je lepilo začelo intenzivneje oddajati vodo in utrjevati, kar je pomenilo strmo rast strižne trdnosti. Z nadaljnjim naraščanjem temperature v lepilnem spoju in podaljševanjem časa stiskanja je lepilo vse bolj utrjevalo, kar se je

odražalo na postopni rasti trdnosti spoja. Nato se je rast trdnosti upočasnila, saj se je utrjevanje lepila zaključevalo. Proti koncu stiskanja se je trdnost spoja približala neki konstantni vrednosti.

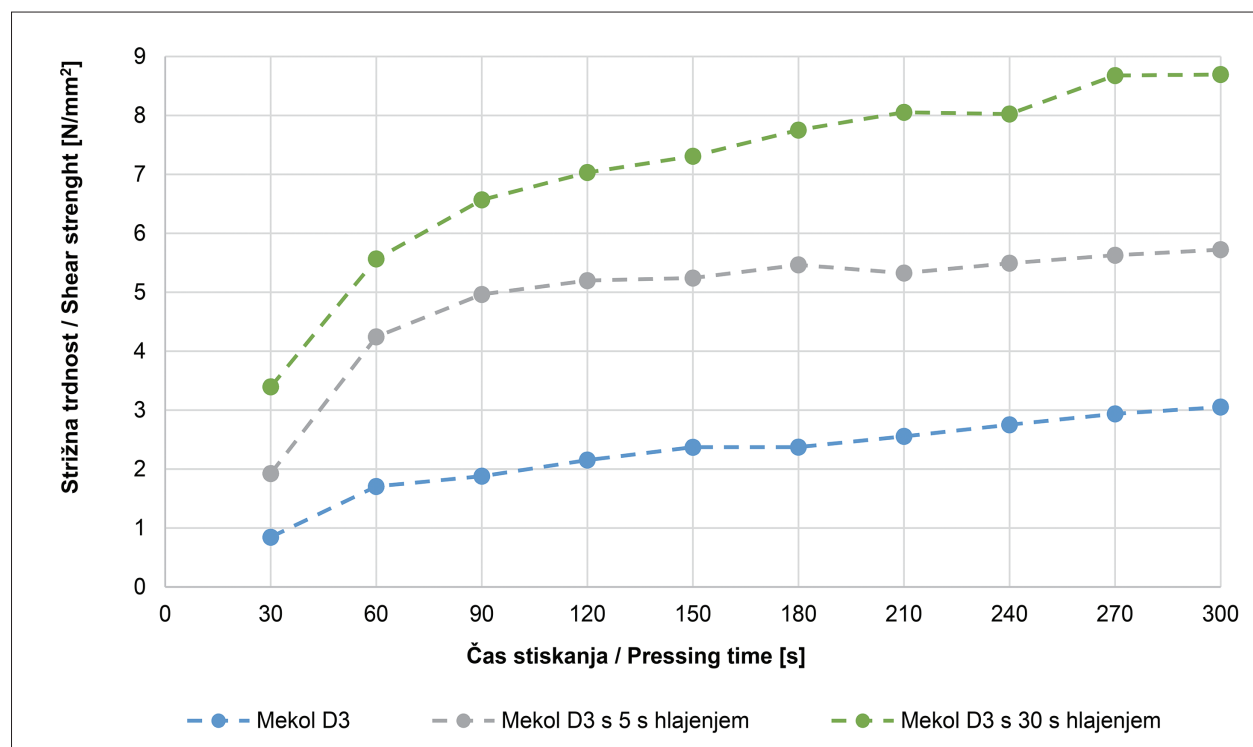
Strižna trdnost Mekol D3 lepilnih spojev je po začetnih 30 s lepljenja dosegla 0,85 N/mm² (slika 5) in nato naraščala ter po 300 s znašala 3,05 N/mm². Pri lepljenju preizkušancev z lepilom Mekol SPECIAL pa lahko ugotovimo, da so povprečne strižne trdnosti dosegale precej nižje vrednosti kot pri Mekol D3. Najvišjo strižno trdnost je Mekol SPECIAL lepilni spoj dosegel po 240 s in sicer 1,83 N/mm². Za obe proučevani lepili lahko ugotovimo, da strižna trdnost lepilnih spojev ni bila visoka, kar je pričakovano, saj sta obe PVAc lepili plastomerni in jima trdnost pri povišani temperaturi pade. Če tak lepilni spoj ohladimo, se mu trdnost poveča, kar je prikazano v nadaljevanju.

Slika 6 prikazuje tri krivulje graditve strižne trdnosti Mekol D3 lepilnih spojev, ki so izračunane kot povprečje šestih meritev. Ugotovimo lahko, da je trdnost lepilnih spojev s časom naraščala. Vse tri



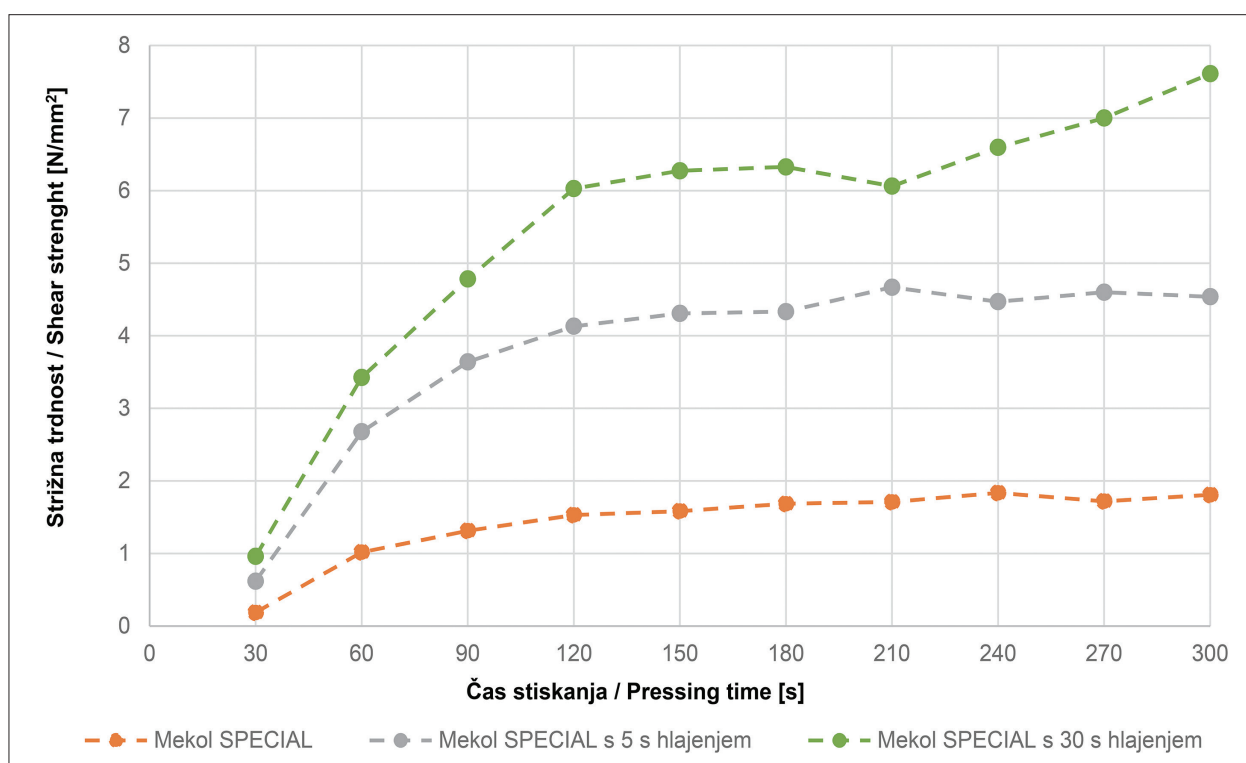
Slika 5. Rast strižne trdnosti PVAc lepilnih spojev v odvisnosti od časa stiskanja

Figure 5. Shear strength development of PVAc adhesive bonds and its dependence on pressing time



Slika 6. Graditev strižne trdnosti Mekol D3 lepilnih spojev pri različnih časih hlajenja

Figure 6. Shear strength development of Mekol D3 adhesive bonds at different cooling times



Slika 7. Graditev strižne trdnosti Mekol SPECIAL lepilnih spojev po različnih časih hlajenja

Figure 7. Shear strength development of Mekol SPECIAL adhesive bonds after different cooling times

Krivulje v prvem delu segrevanja lepilnega spoja (iz sobne temperature na temperaturo stiskanja) strmo naraščajo. V drugem delu temperatura lepilnega spoja doseže temperaturo 80 °C, rast trdnosti se upočasni in krivulja postaja bolj linearna. V zaključnem delu se posamezne krivulje približujejo maksimalni doseženi strižni trdnosti Mekol D3 lepilnega spoja pri danih pogojih. Ugotovili smo, da je bila trdnost pri lepilnem spoju, testiranem po vročem stiskanju, najnižja in je znašala 3,05 N/mm², sledila je trdnost preizkušancev, ki so bili hlajeni 5 s in je znašala 5,72 N/mm². Najvišjo trdnost in sicer 8,69 N/mm² smo ugotovili pri lepilnem spoju, ki je bil po stiskanju 30 s hlajen s stisnjenim zrakom.

Krivulje na sliki 7 prikazujejo graditev strižne trdnosti Mekol SPECIAL lepilnega spoja pri različnih časih hlajenja po vročem stiskanju. Ponovno lahko vidimo, da so najvišjo strižno trdnost lepilnega spoja (7,61 N/mm²) izkazovali preizkušanci, ki so bili 30 s hlajeni, nato tisti s 5 s hlajenjem (4,54 N/mm²), najnižjo vrednost (1,81 N/mm²) pa so imeli vroči lepilni spoji oziroma tisti brez hlajenja s stisnjenim zrakom.

Zaključimo lahko, da je na povečanje strižne trdnosti lepilnih spojev obeh proučevanih PVAc lepil odločilno vplivalo hlajenje oziroma temperatura lepilnega spoja med strižnim testom. To je bilo pričakovano, saj sta lepili plastomerni, kar pomeni, da ima temperatura velik vpliv na njune trdnostne lastnosti. Plastomeri se pri segrevanju namreč mehčajo in jim trdnost pada oziroma narašča, če jih ohlajamo.

V nadaljevanju so predstavljene osnovne statistične primerjave (ANOVA) proučevanih kombinacij načinov hlajenja (preglednica 1) in vrst lepil (preglednica 2) po najdaljšem, 300 s času vročega stiskanja, ko so bile večinoma izmerjene najvišje vrednosti strižne trdnosti. Razlike med vsemi preizkušanimi kombinacijami so se izkazale za statistično značilne. Zaključimo lahko, da je imel izbor postopka hlajenja večji vpliv na končno strižno trdnost lepilnega spoja (vse p-vrednosti < 0,00000 - preglednica 1) od vrste izbranega lepila (vse p-vrednosti med 0,00030 in 0,01402 - preglednica 2).

Preglednica 1. Statistična primerjava med različnimi postopki hlajenja po 300 s vročega stiskanja
Table 1. Statistical comparison between different cooling procedures after 300 s of hot pressing

Meritve po 300 s vročega stiskanja / Measurements after 300 s of hot pressing		0 s hlajenja / 0 s of cooling	5 s hlajenja / 5 s of cooling	30 s hlajenja / 30 s of cooling
Mekol Special	Povprečje / average [N/mm ²]	1,81	4,54	7,61
	Std. odklon / st. dev. [N/mm ²]	0,35	0,35	0,63
	Povečanje glede na prejšnjega za / increment in relation to the previous condition	→	151,0%	67,7%
	Značilnost razlik med povprečji (P-vrednost) / significance of the dif. between means (P-value)	→	2,24E-07	2,48E-06
Mekol D3	Povprečje / average [N/mm ²]	3,05	5,72	8,69
	Std. odklon / st. dev. [N/mm ²]	0,38	0,58	0,52
	Povečanje glede na prejšnjega za / increment in relation to the previous condition	→	87,5%	51,9%
	Značilnost razlik med povprečji (P-vrednost) / significance of the dif. between means (P-value)	→	6,28E-06	6,66E-06

Preglednica 2. Statistična primerjava med PVAc lepiloma po 300 s vročega stiskanja
Table 2. Statistical comparison between PVAc adhesives after 300 s of hot pressing

Meritve po 300 s vročega stiskanja / Measurements after 300 s of hot pressing		Mekol SPECIAL	Mekol D3
0 s hlajenja / 0 s of cooling	Povprečje / average [N/mm ²]	1,81	3,05
	Povečanje D3 glede na Special / increment of D3 in relation to the SPECIAL	→	68,8%
	Značilnost razlik med povprečji (P-vrednost) / significance of the dif. between means (P-value)	→	0,00030
5 s hlajenja / 5 s of cooling	Povprečje / average [N/mm ²]	4,54	5,72
	Povečanje D3 glede na Special / increment of D3 in relation to the SPECIAL	→	26,1%
	Značilnost razlik med povprečji (P-vrednost) / significance of the dif. between means (P-value)	→	0,00297
30 s hlajenja / 30 s of cooling	Povprečje / average [N/mm ²]	7,61	8,69
	Povečanje D3 glede na Special / increment of D3 in relation to the SPECIAL	→	14,2%
	Značilnost razlik med povprečji (P-vrednost) / significance of the dif. between means (P-value)	→	0,01402

Analiza procesa utrjevanja obeh PVAc lepil z ABES je pokazala, da je mogoče s sistemom za avtomatizirano vrednotenje zlepljenosti pridobiti zelo koristne podatke za nastavitve parametrov stiskanja pri lepljenju lesa. Raziskali smo vpliv časa stiskanja in časa hlajenja po stiskanju na trdnost lepilnih spojev, v nadaljevanju raziskav pa bi bilo smiselno proučiti še vpliv različne temperature stiskanja na hitrost utrjevanja PVAc lepilnih spojev.

4 SKLEPI

4 CONCLUSION

Na podlagi rezultatov meritev trdnosti lepilnega spoja dveh različnih PVAc lepil, testiranih s pomočjo ABES instrumenta, smo ugotovili, da je rast strižne trdnosti PVAc lepilnega spoja odvisna od časa stiskanja. Daljši časi stiskanja zagotavljajo večje oddajanje vode iz lepilnega spoja v les in s tem višjo trdnost spoja. Ker sta obe lepili plastomerni, je na trdnost lepilnega spoja vplivalo tudi hlajenje po vročem stiskanju oziroma temperatura lepilnega spoja med testiranjem. Pri lepilu Mekol SPECIAL je trdnost po 5-sekundnem hlajenju narasla iz 1,81 N/mm² na 4,54 N/mm² ter na 7,61 N/mm² po 30-sekundnem hlajenju. Podobno se je izkazalo pri lepilnih spojih, zlepljenih z lepilom Mekol D3 in sicer je trdnost po 5-sekundnem hlajenju narasla iz 3,05 N/mm² na 5,72 N/mm² ter na 8,69 N/mm² po 30-sekundnem hlajenju. Vpliv hlajenja je bil pri obeh lepilih statistično značilen. Prav tako so bile ugotovljene značilne razlike v trdnosti spoja glede na vrsto lepila.

5 POVZETEK

5 SUMMARY

The bonding of wood and other wood-based materials is one of the most important technological steps in wood processing. The need for affordable products manufactured as quickly as possible increases the importance of gluing in the shortest possible time. High-quality cured adhesive bonds are a basic requirement for successful further processing and the long service life of the glued elements (Kunc, 2009).

A stronger adhesive bond can be achieved by extending the pressing time, but this increases the cost of the supplied thermal energy and reduces production capacity. Manufacturers of glued wood are therefore constantly striving to find an optimal

pressing time that offers a good balance between the required performance of the products and acceptable production costs. To enable shorter pressing times and thus reduce production costs, early, fast and immediate formation of the adhesive bond strength is important (Thoemen et al., 2010).

In this study, the shear strength development of polyvinyl acetate adhesives when gluing veneer was determined as a function of pressing time at constant press temperature. Since PVAc adhesives are thermoplastic adhesives, we investigated the influence of the cooling after hot pressing on the final strength of the adhesive bonds in addition to testing the strength after hot pressing.

Beech (*Fagus sylvatica* L.) 0.84 mm thick veneer was used to produce the shear strength specimens. The test specimens measured 117 mm x 20 mm and had a moisture content of 7.7%. We used two different PVAc dispersion adhesives: Mekol D3 and Mekol SPECIAL. Mekol D3 is a higher quality PVAc adhesive suitable for bonding when greater resistance of the bonded joints to moisture and water is required. Mekol SPECIAL is an adhesive suitable for less demanding bonding and bonding of materials with higher porosity.

The shear strength of the PVAc adhesive bond was determined using an Automated Bonding Evaluation System (ABES). The pressing temperature was constant at 80 °C, while the pressing time for each measurement was between 30 seconds and 300 seconds, with an interval of 30 seconds. The effect of cooling on the final strength of the PVAc adhesive bond was determined at cooling times of 5 and 30 seconds. Six repetitions were performed for each pressing time.

The shear strength of PVAc adhesive bonds increased with the pressing time and approached a constant value after a certain time. The shear strength development curves of the two PVAc adhesives were similar, even though there were significant differences in the strength of adhesive bonds glued with Mekol D3 and Mekol SPECIAL. There was also a statistically significant effect of cooling on the strength of the adhesive bonds. The tested specimens achieved significantly higher bond strength under the influence of cooling than those tested hot. The highest shear strength (8.69 N/mm²) was determined after 300 seconds of hot pressing with Mekol D3 adhesive, followed by 30 seconds of cooling.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGEMENT

Raziskava je nastala v okviru programske skupine P4-0015, pod okriljem Agencije republike Slovenije za raziskovalno dejavnost (ARRS). Nakup naprave ABES je bil sofinanciran iz ARRS razpisa P17 in projekta WooBAdh (Environmentally-friendly bioadhesives from renewable resources), ki je del programa ERA CoBioTech ter Ministrstva Republike Slovenije za izobraževanje, znanost in šport.

LITERATURA

REFERENCES

- ASTM D7998 – 19 (2019). Standard Test Method for Measuring the Effect of Temperature on the Cohesive Strength Development of Adhesives using Lap Shear Bonds under Tensile Loading. 7 str. DOI: <https://doi.org/10.1520/D7998-19>
- Costa, N. A., Pereira, J., Ferra, J., Cruz, P., Martins, J., Magalhães, F. D., Mendes, A., & Carvalho, L. H. (2013). Evaluation of Bonding Performance of Amino Polymers Using ABES. *The Journal of Adhesion* 90 (1):80-88. DOI: <https://doi.org/10.1080/00218464.2013.784693>
- EN 14257 (2006). Adhesives - Wood adhesives - Determination of tensile strength of lap joints at elevated temperature (WATT '91). 6 str.
- Humphrey P. (1993). Device for testing adhesive bonds, US Patent 5176028.
- Humphrey P. (2014). Adhesive Evaluation Systems. Automated Bonding Evaluation System (ABES). (6.10.2020). <https://www.adhesiveevaluationsystems.com/products/automated-bonding-evaluation-system>
- Jošt, M., & Šernek, M. (2009). Shear strength development of the phenol-formaldehyde adhesive bond during cure. *Wood Science and Technology*, 43, 1/2: 153–166. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-008-0217-2>
- Kunc, D. (2009). Razvoj trdnosti urea-formaldehidnega lepilnega spoja med utrjevanjem. Diplomsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, 44 str.
- Martins, J., Pereira, J., Coelho, C., Ferra, J., Mena, P., Magalhães, F., & Carvalho, L. (2013). Adhesive bond strength development evaluation using ABES in different lignocellulosic materials. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 47: 105-109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.08.003>
- Pirc, G. (2019). Vpliv temperature stiskanja na dinamiko trdnosti lepilnega spoja. Magistrsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, 46 str.
- Resnik, J. (1997). Lepila in lepljenje lesa. 1. ponatis. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, 103 str.
- Šauperl, T. (2020). Razvoj trdnosti polivinilacetatnega lepilnega spoja pri lepljenju furnirja. Diplomsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, 34 str.

- Šernek, M. (1999). Vpliv bistvenih dejavnikov na penetracijo in trdnost UF lepilnega spoja pri lepljenju bukovine. Magistrsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, 111 str.
- Šernek, M., & Kutnar, A. (2008). Polivinilacetatna lepila za les. *Les*, 60, 10: 364–369.
- Thoemen, H., Irle, M., & Šernek, M. (2010). *Wood-Based Panels-An Introduction for Specialists*. Brunel University Press, London, ISBN 978-1-902316-82-6, 203-204.



UPORABA ODPADNE PLASTIKE ZA IZDELAVO LEPIL ZA LEPLJENJE LESA

USE OF WASTE PLASTICS FOR THE PREPARATION OF ADHESIVES FOR WOOD BONDING

Milan Šernek^{1*}, Vanja Turičnik², Rožle Repič³, Bogdan Šega¹

UDK 630*824.8:678.86

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Prispelo / Received: 16. 11. 2020

Sprejeto / Accepted: 30. 11. 2020

Izvleček / Abstract

Izvleček: Odpadne plastike je čedalje več, zato poskušamo najti različne načine njenega recikliranja in ponovne uporabe. Reciklirani termoplastični polimeri predstavljajo zanimiv potencial za izdelavo lepil, zato je bil cilj naše preliminarne raziskave proučiti primernost odpadnega polistirena za izdelavo lepil za lepljenje lesa. Lepilne mešanice smo izdelali tako, da smo odpadne polistirenske lončke (L) in žličke (Ž) za kavo razrezali na manjše koščke in jih ločeno raztopili v 5 različnih topil: butil acetat (BA), dimetilformamid (DMF), tetrahidrofuran (THF), limonen (L) in aceton (AC). Z njimi smo izdelali lepljenje iz dveh bukovih lamel (*Fagus sylvatica* L.), ki smo jih 10 minut stiskali v hidravlični stiskalnici pri temperaturi 150 °C in tlaku 12 barov. Za ugotavljanje kakovosti zlepljenosti smo izvedli strižni preizkus z univerzalnim testirnim strojem Zwick/Roell Z005. Ugotovili smo, da so preizkušanci, zlepljeni z lepilno mešanico Ž-DMF, dosegli povprečno strižno trdnost 6,5 N/mm², preizkušanci, zlepljeni z L-DMF, pa 3,8 N/mm². Vsi ostali preizkušanci so izkazovali nižjo trdnost lepilnega spoja oziroma so večinoma razpadli že po vročem stiskanju ali kasneje med žaganjem v preizkušance. V nadaljnjih raziskavah bomo obetajoči lepilni mešanici modificirali in optimizirali parametre stiskanja z namenom doseganja kakovosti zlepljenosti, ki ustreza standardnim zahtevam za plastomerna lepila za notranjo uporabo.

Ključne besede: lepilo, les, odpadna plastika, polistiren, strižna trdnost, ponovna uporaba plastike

Abstract: There is more and more plastic waste, so we try to find different ways to recycle and reuse it. Recycled thermoplastic polymers represent an interesting potential for the production of adhesives, so the aim of our preliminary investigations was to examine the suitability of waste polystyrene for the production of adhesives for wood bonding. The adhesive mixtures were prepared by cutting waste polystyrene cups (L) and coffee spoons (Ž) into smaller pieces and dissolving them separately in five different solvents: Butyl acetate (BA), Dimethylformamide (DMF), Tetrahydrofuran (THF), Limonene (L) and Acetone (AC). From these we prepared composite samples of two beech lamellae (*Fagus sylvatica* L.), which were pressed for 10 minutes in a hydraulic press at a temperature of 150 °C and a pressure of 12 bar. In order to determine the quality of the bonding, we carried out a shear test with a Zwick/Roell Z005 universal testing machine. We found that the test specimens bonded with the adhesive mixture Ž-DMF achieved an average shear strength of 6.5 N/mm² and the test specimens bonded with L-DMF achieved 3.8 N/mm². All other test specimens showed a lower strength of the adhesive bonds, or they mostly delaminated after hot pressing or later during sawing into test specimens. In further research work we will modify these promising adhesive mixtures and optimise the pressing parameters in order to achieve bonding quality that meets the standard requirements for thermoplastic adhesives for interior applications.

Keywords: adhesive, wood, waste plastics, polystyrene, shear strength, reuse of plastic

1 UVOD

1 INTRODUCTION

1.1 ODPADNA PLASTIKA

1.1 WASTE PLASTICS

Uporaba plastičnih izdelkov je izjemno razširjena, zato se kopiči čedalje več plastičnih od-

padkov, ki onesnažujejo naše okolje. Različne iniciative poskušajo omejiti/zamenjati uporabo plastičnih izdelkov, kljub temu pa se še vedno ogromne količine plastike uporablja za izdelke, ki se po uporabi zavržejo. Prekomerna proizvodnja in neodgovorna uporaba plastike, iz katere izvirajo resne ekološke težave in nepopravljiva škoda, je povezana predvsem s sorazmerno enostavno izdelavo izdelkov iz plastike, njihovo nizko ceno in dolgo življenjsko dobo (Achilias et al., 2012; Tullo, 2018; Scott, 2018).

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

* e-pošta: milan.sernek@bf.uni-lj.si

² Kompetenzzentrum Holz GmbH, Avstrija

³ Zavod za gradbeništvo Republike Slovenije

Leta 2017 je bila letna proizvodnja plastike na globalni ravni 230 milijonov ton, v letu 2020 pa naj bi se povečala na kar 400 milijonov ton (Tawfik et al., 2017). Glede na naraščajoči družbeni pritisk na skrb za okolje in sedanje trende v smeri krožnega gospodarstva, bi bila najboljša možnost ravnanja s plastičnimi odpadki njihova predelava v določene kemijske spojine (monomere) z zahtevano čistostjo in kakovostjo, ki bi se ponovno uporabila kot surovina pri isti polimerizaciji ali v drugih postopkih (Ordaz-Quintero et al., 2020).

Krožno gospodarstvo po svoji zasnovi deluje obnovitveno in regenerativno, kar pomeni, da materiali nenehno krožijo po sistemu »zaprte zanke«. V primeru plastike to pomeni hkratno ohranjanje njene vrednosti v gospodarstvu brez škode za okolje (Ledsham, 2018). Po poročanju Fundacije Ellen MacArthur se po več kot 40 letih po prvi uvedbi univerzalnega simbola za recikliranje, reciklira le 14 % plastične embalaže, ki se uporablja po vsem svetu, medtem ko je 40 % konča na odlagališčih in 32 % v ekosistemih. Preostalih 14 % se sežiga ali je namenjene pridobivanju energije. Družba se mora danes oddaljiti od linearnega poslovnega modela in miselnosti »vzemi-uporabi-zavrzi« in tako preiti na krožno gospodarstvo. To pa vključuje izboljšanje recikliranja, spodbujanje ponovne uporabe, ustvarjanje trga za reciklirane materiale in preoblikovanje izdelkov.

Plastične materiale je mogoče reciklirati na različne načine, zahtevnost recikliranja pa se razlikuje glede na vrsto polimera, obliko in vrsto embalaže

oziroma izdelka. Toge izdelke iz enega polimera je preprosteje in bolj ekonomično reciklirati kot večplastne in večkomponentne izdelke. Termoplasti oziroma plastomeri, vključno s PET (polietilentereftalat), PE (polietilen) in PP (polipropilen) imajo velik potencial za mehansko recikliranje, medtem ko duromerov, kot so nenasičeni poliestri, epoksidne smole ali PMMA/ATH (npr. kerrock) ni mogoče mehansko reciklirati. Ti se lahko le ponovno uporabijo kot polnilni material, ko se predhodno pretvorijo v manjše delce (Hopewell et al., 2009; Vovk et al., 2017). Velik izziv predstavljajo tudi kompozitni polimeri, pri katerih je strošek reciklaže zelo velik. Tovrstni materiali se lahko dodajajo kot polnilo pri izdelavi drugih materialov, npr. asfalta (Vovk, 2017).

Odpadni termoplasti so zaradi ugodnih lastnosti in relativno enostavnega recikliranja zanimivi za izdelavo lesno-plastičnih kompozitov (WPC). Odpadna plastika, ki predstavlja večji del kompozita, je reciklirana, polnilo, v tem primeru lesna moka/vlakna, pa so naravni material. Končni material je v primerjavi s plastiko ojačan, okolju prijazen kompozit. Tovrstni kompoziti se uporabljajo v avtomobilski industriji, gradbeništvu in drugih izdelkih široke potrošnje. Za zagotavljanje ustreznih mehanskih lastnosti kompozita je potrebno dodajati dodatke za izboljšanje adhezije med polimerom in lesnimi delci (Poletto, 2017).

Glede na tip plastike lahko plastične odpadke razvrstimo v 7 skupin, kot prikazuje preglednica 1 (povzeto po Selukar et al., 2014).

Preglednica 1. Razvrščanje plastičnih odpadkov

Table 1. Classification of plastic waste

Identifikacijska številka plastike / Plastic Identification Code	Tip plastičnih odpadkov / Type of Plastic Waste	Ime plastike / Name of Plastic	Tipična uporaba plastike / Common Application of Plastic
1	PET	Polietilen tereftalat / Polyethylene Terephthalate	Plastenke, folije / Bottles, Films
2	HDPE	Polietilen visoke gostote / High Density Polyethylene	Embalaža, vrečke / Packaging, Shopping Bags
3	PVC	Polivinil klorid / Polyvinyl Chloride	Cevi, zavese, kreditne kartice, folije / Water pipes, Curtains, Credit card, Packaging films
4	LDPE	Polietilen nizke gostote / Low Density Polyethylene	Vrečke, izolatorji / Plastic bags, Wire Cloth
5	PP	Polipropilen / Polypropylene	Vrečke, igrače / Plastic Bags, Toys
6	PS	Polistiren / Polystyrene	Prehranska embalaža, izolacijski materiali / Food Boxes, Insulation Materials
7	Ostalo	Poliamid, polikarbonat / Polyamide, Polycarbonate	Specialni nameni in uporaba / Special purpose and application

1.2 UPORABE ODPADNE PLASTIKE PRI LEPLJENJU LESA

1.2 APPLICATION OF WASTE PLASTICS FOR BONDING OF WOOD

Poraba lepil za lepljenje lesa in izdelavo lesnih kompozitov narašča. Uporabljajo se predvsem formaldehidna lepila, ki utrjujejo pri povišani temperaturi. Zaradi zahtev po zmanjševanju emisij formaldehida iz končnih proizvodov pa raziskovalci veliko pozornost posvečajo alternativnim rešitvam. Ena izmed možnosti je uporaba talilnih lepil, ki utrjujejo predvsem fizikalno in pri katerih ni emisij hlapnih spojin med uporabo lepljenega proizvoda. Do neke mere lahko kot talilno lepilo uporabimo tudi termoplastične polimere, ki jih recikliramo iz odpadkov. S tem pristopom tako zmanjšamo količino teh odpadkov na deponijah in posledično proizvedemo produkte, ki niso škodljivi za zdravje ljudi in okolje (Kajaks et al., 2012). Takšna lepila iz odpadne plastike bi lahko predstavljala novo generacijo talilnih lepil (Grinbergs, 2010).

Tawfik et al. (2017) so za izdelavo lignoceluloznega kompozita uporabili rižovo slamo in polistiren. Kompozit so izdelali s postopkom vročega stiskanja pri 170 °C in tlaku 4 bare, ki so ga vzdrževali 10 minut. Požarno odpornost kompozita so zagotovili z dodatkom retardantov, kar pa lahko ima negativen vpliv na mehanske lastnosti (Eskander et al., 2018). Tako izdelan kompozit je možna alternativa sedanjim lesno-plastičnim kompozitom, katerega prednost je, da je izdelan iz odpadnega materiala, ki bi v nasprotnem primeru končal v naravi ali na deponiji.

Cui et al. (2010) so v eni izmed raziskav namesto že uveljavljenih lepil za lepljenje vezanih plošč uporabili plastične vrečke iz polietilena, polipropilena, polivinil klorida in polistirena. Preizkušali so vpliv količine plastičnih materialov, temperature in časa stiskanja na končne lastnosti vezanih plošč. Avtorji navajajo, da je optimalna količina plastičnih materialov v spoju 100 g/m². Višja temperatura stiskanja pripomore k nižji viskoznosti omenjenih materialov, kar posledično izboljša adhezijo. Najvišjo trdnost so raziskovalci dosegli pri temperaturi 150 °C in časom stiskanja 6 minut. Pridobljeni kompozit zadošča minimalnim zahtevam trdnosti, emisij formaldehida pa ni.

Del Menezzi et al. (2016) so za izdelavo slojnatega furnirnega lesa (LVL) uporabili različne količine polistirena. LVL se pogosto uporablja v gradbene namene, za lepljenje pa se uporabljajo duromerne smole, ki izkazujejo dobre mehanske lastnosti.

Trdnost lepilnega spoja LVL, dosežena pri lepljenju s polistirenom v laboratorijskih pogojih, je bila zadostna, vendar pa je na tem področju po mnenju avtorjev potrebnih še veliko dodatnih raziskav.

Yang et al. (2011) so z dodajanjem kolofonije, fenolne smole, izocianata, benzoil peroksida in dibutil ftalata v polistiren pripravili lepilo, ki je po trdnosti primerljivo oziroma boljše kot komercialno belo polivinil acetatno (PVAc) lepilo za les. Kot navajajo avtorji, lepilo utrjuje 3,5 ure pri temperaturi 70 °C in naj bi bilo primerno za lepljenje lesa, plastike, stekla, papirja in drugih vlaknastih materialov.

Kajaks et al. (2012) so v svoji raziskavi dokazali, da je iz odpadne plastike (HDPE – polietilen visoke gostote, PP – polipropilen, PU – poliuretan, PA6 – poliamid) možno izdelati lesne kompozite, ki so po trdnosti primerljivi s kompoziti, zlepljenimi s konvencionalnimi lepili. Termoplasti lahko prodirajo do 40 µm globoko v les in zagotavljajo dobro adhezijo. Lepilni spoji so vodoodporni, tako da so kompoziti primerni za uporabo na prostem. Avtorji izpostavljajo visoko strižno trdnost, ki je bila dosežena pri lepljenju s PE, PU in PA6 vlakni (5,6 MPa do 10 MPa) in presega strižno trdnost konvencionalne vezane plošče, zlepljene s fenol-formaldehidnim lepilom.

Jasri et al. (2014) so izdelali lepilo iz recikliranega polistirena, ki je imelo primerljive mehanske lastnosti z nekaterimi komercialnimi lepili za les. Avtorji so lepilno mešanico pripravili tako, da so polistiren raztopili v topilu na osnovi etanola (RON 95) v razmerju EPS:RON 95 = 1:1.

1.3 RECIKLIRANJE POLISTIRENA 1.3 RECYCLING OF POLYSTYRENE

Polistiren je zelo razširjen in uporaben termoplastni material, vendar njegovi odpadki (še posebej ekspanziran polistiren) predstavljajo velik okoljski problem, saj v naravi zelo počasi razpada, danes pa ga v ogromnih količinah najdemo v morju (Tawfik, 2017).

Polistiren ((C₈H₈)_n) je polimerni material, sestavljen iz monomernih enot stirena (C₈H₈) (Lye & Aw, 2003) in je zaradi ugodnih lastnosti in široke uporabe tretji najbolj pogosto uporabljen termoplast na planetu (prednjačita samo še polietilen in polipropilen). Najpogosteje se uporablja v prehrambni industriji kot embalaža, najdemo pa ga tudi kot zaščitni material pri transportu ali pa kot toplotni izolator (Lye & Aw, 2003). Zaradi nizke gos-

tote, dobre toplotne izolativnosti, odpornosti in dobrih mehanskih lastnosti je zelo zastopan v obliki ekspandiranega polistirena (Lye & Aw, 2003), katerega odpadki pa zaradi počasnega razpadanja predstavljajo zelo velik okoljski problem (Tawfik et al., 2017). Pri proizvodnji izdelkov iz ekspandiranega polistirena se kroglice polistirena segrejejo in ekspandirajo, kasneje pa se vbrizgajo v kalupe, kjer jih s pomočjo vodne pare segrejejo in tako ekspandirajo do robov kalupa. Ker se plast polistirena ob kalupu nekoliko zmehta, to privede do gladke površine izdelkov oziroma polizdelkov (Lye & Aw, 2003).

95 % ekspandiranega polistirena predstavlja zrak, kar pomeni, da pri njegovi predelavi iz velikega volumna odpadkov pridobimo relativno malo polistirena. Mehanske in estetske lastnosti recikliranega polistirena so dobre, njegova cena pa nizka. Eden izmed možnih načinov ponovne uporabe polistirena je izdelava lepila, saj je dobro topen v različnih topilih kot so bencin, aceton, butil acetat, limonen ipd. V stiku s topilom se prične raztapljati, njegov volumen pa se drastično zmanjša (Curiac et al., 2017). Lisperguer et al. (2013) navajajo, da je recikliran polistiren mogoče dodatno izboljšati z dodajanjem lignina, saj že pri dodatku 2 % lignina izkazuje boljšo termično stabilnost. Selukar et al. (2014) so v eni izmed študij iz odpadnega polistirena z uporabo topil (bencin, aceton, toluen) na enostaven način izdelali lepilo. Največjo lepljivost so dosegli z uporabo bencina in toluena, medtem ko le-ta z acetonom ni bila dosežena.

Cilj naše preliminarne raziskave je bil v različnih topilih raztopiti polistiren iz odpadnih plastičnih žličk in lončkov za kavo ter ga uporabiti za izdelavo lepila za lepljenje lesa.

2 MATERIALI IN METODE

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 MATERIALI

2.1 MATERIALS

Za lepljenje smo uporabili radialne lamele iz bukovine (*Fagus sylvatica* L.), ki so bile klimatizirane v standardni klimi s temperaturo 20 °C in relativno zračno vlažnostjo 65 %.

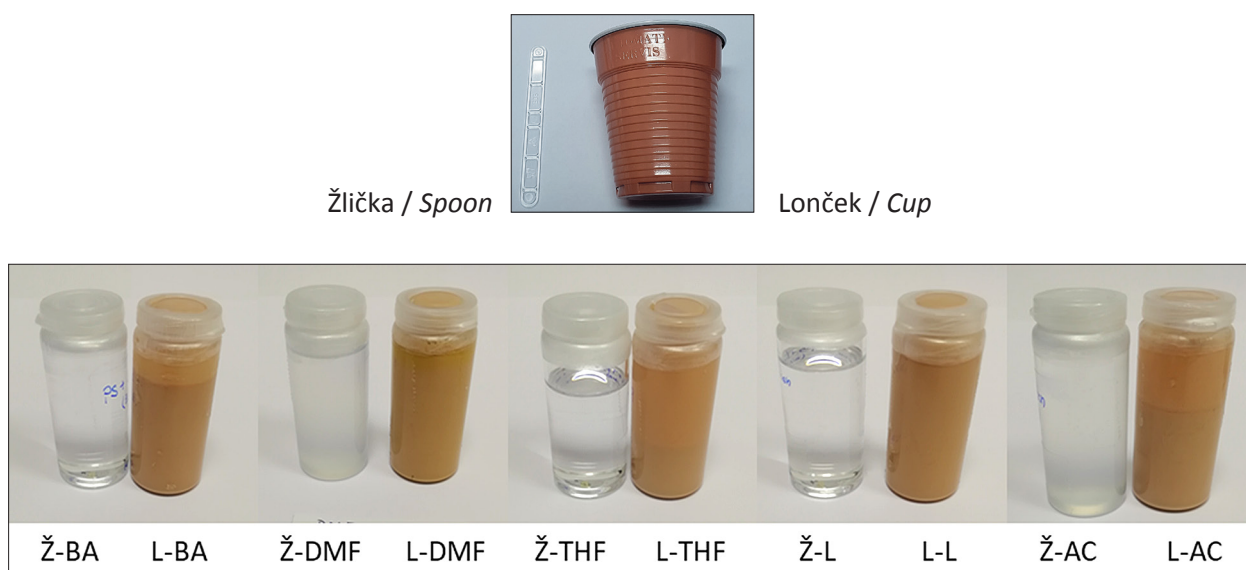
Lepilne mešanice smo pripravili iz polistirena, iz katerega so bili izdelani lončki in žličke za kavo, ki se uporabljajo v kavnih avtomatih in predstavljajo velik delež plastičnih odpadkov. Lončki za kavo so iz obarvanega polistirena, žličke pa iz čistega polistirena. Odpadna plastika iz lončkov in žličk je bila čista in suha, brez ostankov pijače. Razrezali smo jo na manjše koščke zaradi hitrejšega in lažjega raztapljanja v topilih. Za raztapljanje plastike smo uporabili 5 različnih topil: aceton (Roth), dimetilformamid – DMF (Roth), butil acetat (Sigma-Aldrich), tetrahidrofuran – THF (Roth, Bernd Kraft GmbH) in limonen (Merck KGaA).

Skupno smo pripravili 10 lepilnih mešanic, polovico iz žličk in polovico iz lončkov. Lepilne mešanice smo pripravili v steklenih posodah, kjer smo zmešali plastiko in topilo v utežnem razmerju 1:1. Mešanice smo sprva temeljito mešali, da se je raztopila večina kosov plastike, nato pa smo mešanice pustili stati čez noč. Pri raztapljanju smo si pomagali tudi z visoko frekvenčno kadjo. Po 16 urah so bile mešanice po večini homogene in gladke. Lepilne mešanice iz žličk so bile transparentne, iz lončkov pa motno rjave. Mešanice žličk v butil acetatu, tetrahidrofuranu in limonenu so bile kristalno čiste, medtem ko sta bili mešanici žličk v acetonu in dimetilformamidu motni (slika 1). Uporabljene lepilne mešanice in njihove oznake so predstavljene v preglednici 2.

Preglednica 2. Lepilne mešanice iz odpadne plastike in različnih topil

Table 2. Adhesive mixtures from plastic waste and different solvents

LEPILNE MEŠANICE IZ ŽLIČK / ADHESIVE MIXTURES FROM SPOONS		LEPILNE MEŠANICE IZ LONČKOV / ADHESIVE MIXTURES FROM CUPS	
OZNAKA / LABEL	POMEN / MEANING	OZNAKA / LABEL	POMEN / MEANING
Ž-BA	Žličke + Butil acetat / Spoons + Butyl acetate	L-BA	Lončki + Butil acetat / Cups Butyl acetate
Ž-DMF	Žličke + Dimetilformamid / Spoons + Dimethylformamide	L-DMF	Lončki + Dimetilformamid / Cups + Dimethylformamide
Ž-THF	Žličke + Tetrahidrofuran / Spoons + Tetrahydrofuran	L-THF	Lončki + Tetrahidrofuran / Cups + Tetrahydrofuran
Ž-L	Žličke + Limonen / Spoons + Limonene	L-L	Lončki + Limonen / Cups + Limonene
Ž-AC	Žličke + Aceton / Spoons + Acetone	L-AC	Lončki + Aceton / Cups + Acetone

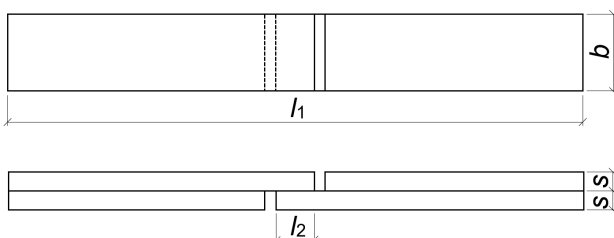


Slika 1. Raztopljene žličke (prozorno) in lončki za kavo (rjavo) v različnih topilih
Figure 1. Dissolved spoons (transparent) and coffee cups (brown) in different solvents

2.1 METODE

2.1 METHODS

Za ugotavljanje kakovosti zlepljenosti lesa z lepilnimi mešanici iz odpadne plastike smo izdelali lepljenice, ki so bili zlepljeni iz dveh poskobljanih bukovih lamel dimenzij 500 mm × 150 mm × 5 mm. Lepilni površini smo obrusili z brusnim papirjem granulacije 240 in na površino ene lamele s pomočjo lopatice ročno nanесли 200 g/m² lepilne mešanice. Nato smo lameli združili in ju v hidravlični stiskalnici 10 minut stiskali pri temperaturi 150 °C in tlaku 12 barov. Po stiskanju smo lepljenice obtežili in počakali, da so se ohladili. Iz njih smo nato izžagali preizkušance za ugotavljanje strižne trdnosti lepilnega spoja po standardu SIST EN 205:2016 (slika 2), ki so bili 150 mm dolgi (l_1) in 20 mm široki (b). Strižna površina pa je bila dolga 10 mm (l_2) in smo jo izdelali tako, da smo



Slika 2. Strižni preizkušanec za ugotavljanje kakovosti zlepljenosti

Figure 2. Shear specimen for determination of bonding performance

na vsaki strani preizkušanca zažagali utor do lepilnega spoja oziroma skozi obe 5 mm debeli lameli (s).

Za vsako lepilno mešanico smo pripravili 10 preizkušancev. Preizkušance smo med razžagovanjem ustrezno označili in jih razvrstili glede na uporabljene lepilne mešanice (preglednica 2) ter jih nato sedem dni klimatizirali v standardni klimi ($T = 20\text{ °C}$, $\phi = 65\%$).

Strižni preizkus smo opravili z univerzalnim testirnim strojem Zwick/Roell 2005. Vsakemu preizkušancu smo pred vpetjem v stroj izmerili dolžino (l_1) in širino (b) strižne ploskve (A) z digitalnim kljunastim merilom ter podatke meritev vnesli v računalniški program testXpert. Preizkušanec smo nato vpeli v vpenjalne čeljusti stroja in ga s hitrostjo 50 mm/min obremenili z natezno silo do porušitve (F_{max}). Strižno trdnost (f_v) smo izračunali po enačbi:

$$f_v = \frac{F_{max}}{A} = \frac{F_{max}}{l_2 \times b}$$

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 SPLOŠNA OPAŽANJA

3.1 GENERAL OBSERVATIONS

Med pripravo lepilnih mešanic iz odpadne plastike in med lepljenjem smo opazili nekaj zanimivih lastnosti in posebnosti, ki lahko vplivajo na uspešnost lepljenja:

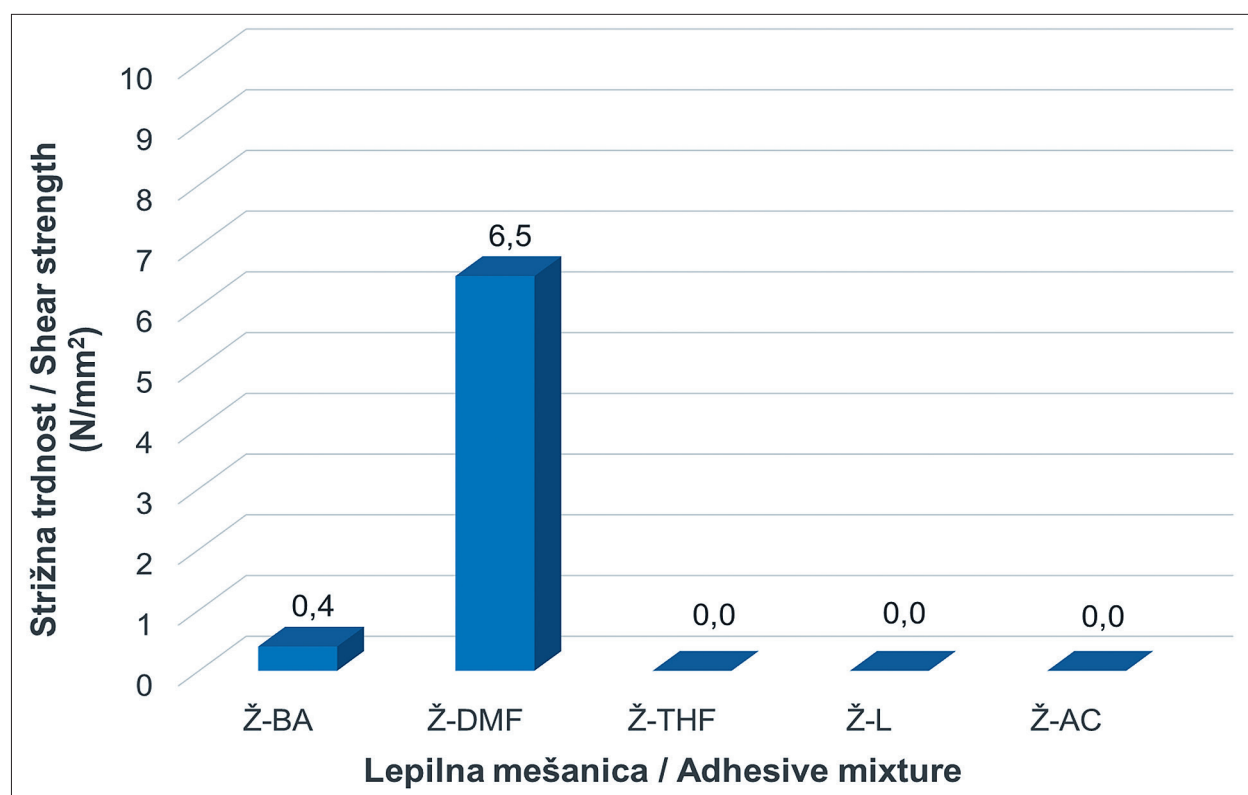
- Lepilni mešanici z acetonom sta bili že od začetka najbolj viskozni, med nanašanjem pa je topilo zelo hitro izhlapevalo in se je viskoznost hitro povečevala, zaradi česar je bil nanos zelo otežen.
- Lepilne mešanice z dimetilformamidom in tetrahidrofuranom so bile zelo močnega in neprijetnega vonja (smrad).
- Mešanice z butilacetatom in limonenom so bile gladke in homogene. Viskoznost je bila primerna za nanašanje.
- Lamle, ki so bile zlepljene z lepilno mešanico, kjer je bilo topilo limonen, so se pri odpiranju stiskalnice takoj razslojile. Med vročim stiskanjem ni izparelo dovolj limonena in lepilni spoj ni utržil.
- Pri lepilni mešanici iz lončkov in dimetilformamida se je na površini izločala tekoča snov rjave barve, ki smo jo z mešanjem brez težav spet homogenizirali.
- Vse lepilne mešanice iz lončkov so bile na splošno bolj heterogene in obarvane v primerjavi z mešanicami iz žličk, ki so bile precej prozorne in bolj homogene.
- Lepilne mešanice, pripravljene iz kavnih lončkov, so bile na splošno bolj viskozne od tistih iz žličk. To pripisujemo primesem, s katerimi so bili lončki obarvani.

Pomembna ugotovitev je tudi, da lepljenje pri sobni temperaturi ni bilo uspešno, oziroma je stiskanje trajalo pretirano dolgo (več dni), da se je ustvaril delno trden spoj, kljub temu pa je v lepilnem spoju še vedno ostal del topila. Ta ugotovitev je botrovala odločitvi, da stiskanje izvedemo v vroči stiskalnici pri temperaturi 150 °C, ki pospeši proces izhlapevanja in izparevanja topila iz lepilne mešanice. Hkrati pa lahko visoka temperatura pomeni popolno mehčanje plastike v lepilni mešanici, zato tak spoj ni trden in pridobi trdnost šele, ko ga po stiskanju ohladimo. Če so napetosti v lesu po stiskanju velike zaradi temperturnega in vlažnostnega gradienta, lahko lepilni spoj med procesom hlajenja popusti zaradi teh pojavov.

3.1 STRIŽNA TRDNOST LEPILNIH SPOJEV

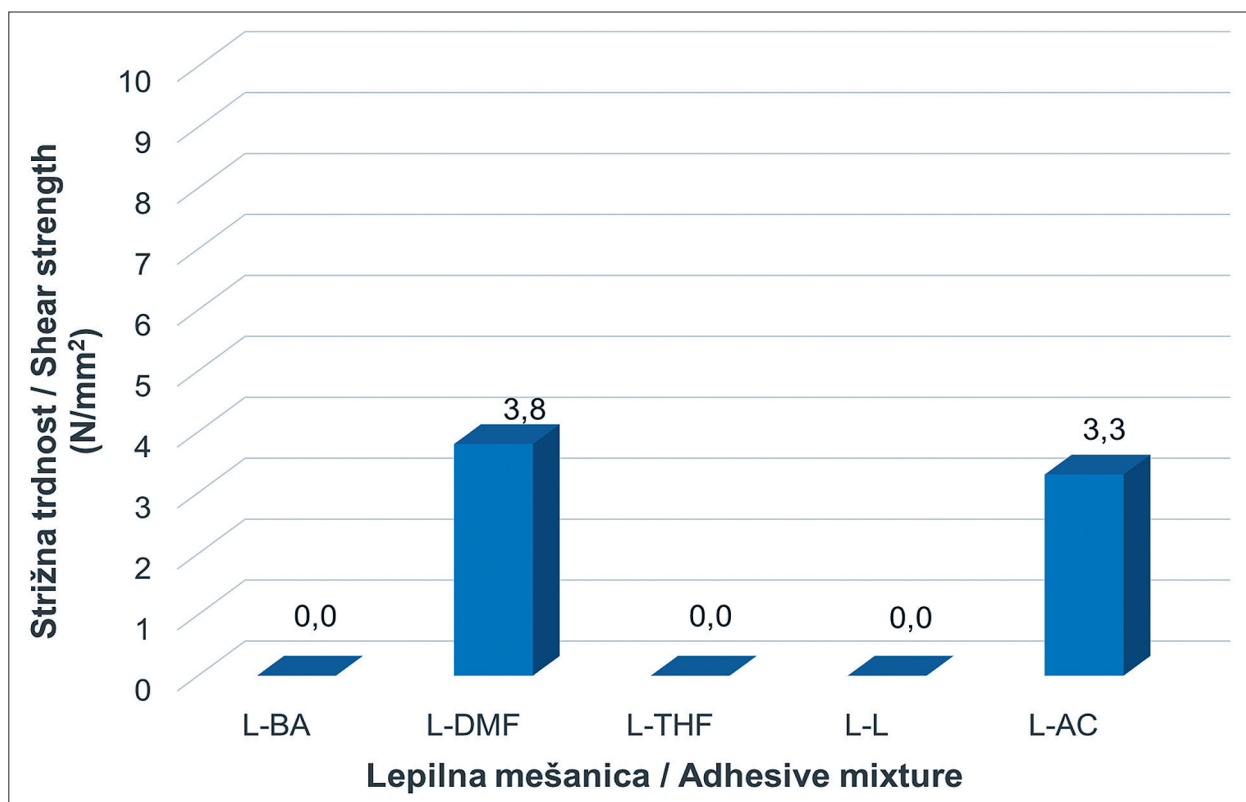
3.1 SHEAR STRENGTH OF ADHESIVE BONDS

Ugotovili smo, da sta dve lepilni mešanici iz žličk (Ž-BA in Ž-DMF) zleplili bukove lamle, medtem ko tri lepilne mešanice iz žličk (Ž-THF, Ž-L in Ž-AC) niso zlepile bukovih lamel in je večina preizkušancev razpadla že med žaganjem ali pred izvedbo strižnega testa (slika 3).



Slika 3. Strižna trdnost preizkušancev, zlepljenih z lepilnimi mešanicami iz žličk

Figure 3. Shear strength of test specimens glued with adhesive mixtures from spoons



Slika 4. Strižna trdnost preizkušancev, zlepljenih z lepilnimi mešanicami iz lončkov
Figure 4. Shear strength of test specimens glued with adhesive mixtures from cups

Preglednica 3. Rezultati strižnega testa za obetajoči lepilni mešanici
Table 3. Shear test results for a promising adhesive mixture

Lepilna mešanica / Adhesive mixture	Ž-DMF		L-DMF	
	f_v	Lom po lesu / Wood failure	f_v	Lom po lesu / Wood failure
Št. / No.	N/mm ²	%	N/mm ²	%
1	5,7	0	1,8	0
2	5,6	0	4,7	0
3	2,9	0	2,2	0
4	7,1	0	1,8	0
5	7,0	0	4,0	0
6	8,3	25	9,3	50
7	4,6	0	7,8	50
8	8,4	0	6,1	0
9	8,4	0	0,0	0
10	6,6	25	0,0	0
Povprečje / Average	6,5	5	3,8	10
St-DEV / ST-DEV	1,7	10	3,0	20

Podoben rezultat je bil pri lepilih iz lončkov. Dve lepilni mešanici iz lončkov (L-DMF in L-AC) sta zlepile bukove lamele, medtem ko tri lepilne mešanice (L-BA, L-THF in L-L) niso zlepile bukovih lamel in je večina preizkušancev razpadla že med žaganjem ali pred izvedbo strižnega testa (slika 4).

Izmed vseh uporabljenih topil se je za pripravo lepilnih mešanic najbolje obneslo topilo dimetilformamid (DMF), saj so preizkušanci, zlepljeni z lepilno mešanico Ž-DMF, dosegli povprečno strižno trdnost $6,5 \text{ N/mm}^2$, z L-DMF zlepljeni preizkušanci pa $3,8 \text{ N/mm}^2$. Vsi ostali preizkušanci so izkazovali nižje trdnosti lepilnega spoja, oziroma so večinoma po lepljenju ali žaganju razpadli.

Na osnovi rezultatov strižne trdnosti in odstotka loma po lesu preizkušancev, ki so bili zlepljeni z lepilnima mešanicama Ž-DMF in L-DMF (preglednica 3), lahko ugotovimo, da ti mešanici izkazuje ta določen potencial za izdelavo lepil iz odpadne plastike. Naslednji raziskovalni korak bo optimizacija parametrov stiskanja (predvsem temperature) in postopka hlajenja lepljencev takoj po stiskanju. Predpostavljamo, da bi z ustrezno modifikacijo lepilne mešanice in postopka lepljenja lahko dosegli zadostne strižne trdnosti spojev za notranjo uporabo po SIST EN 204:2016 (10 N/mm^2).

4 SKLEPI

4 CONCLUSION

Preliminarna raziskava možnosti uporabe odpadne plastike (žličke (Ž) in lončki (L) za kavo) za izdelavo lepilnih mešanic za lepljenje lesa je pokazala, da je izmed petih uporabljenih topil za pripravo lepilne mešanice bilo obetajoče zgolj topilo dimetilformamid (DMF). Preizkušanci, zlepljeni z lepilno mešanico Ž-DMF, so dosegli povprečno strižno trdnost $6,5 \text{ N/mm}^2$, preizkušanci, zlepljeni z L-DMF, pa $3,8 \text{ N/mm}^2$. Ostali preizkušanci so izkazovali bodisi nižje trdnosti lepilnega spoja oziroma so večinoma razpadli po vročem stiskanju ali žaganju v preizkušance. V nadaljnjih raziskavah bomo obetajoči lepilni mešanici modificirali in optimizirali parametre stiskanja z namenom doseganja kakovosti zlepljenosti, ki ustreza standardnim zahtevam za plastomerna lepila za notranjo uporabo.

5 POVZETEK

5 SUMMARY

The use of plastic products is extremely widespread, which is why there is an increasing amount of plastic waste that pollutes our environment. Various initiatives are trying to limit the use of plastic products, but huge amounts of plastic are still used for products that are thrown away after use.

Plastic materials can be recycled in different ways, and the complexity of recycling varies depending on the type of polymer, the shape and type of packaging or product. Thermoplastic polymers that are recycled from waste can be used for a variety of purposes, including the production of adhesives. A very common and useful thermoplastic material is polystyrene. It is most often used in the food industry as packaging, but it is also found as a protective material during transport or as a thermal insulator. One possible way to reuse polystyrene is to produce an adhesive.

The aim of our preliminary investigations was to dissolve polystyrene from plastic waste spoons (Ž) and coffee cups (L) in various solvents and to produce an adhesive for bonding of wood. The adhesive mixtures were made from polystyrene from which coffee cups and coffee spoons were made. We cut it into smaller pieces so that it could dissolve in solvents more quickly and easily. Five different solvents were used to dissolve the plastic: Acetone (AC), Dimethylformamide (DMF), Butyl acetate (BA), Tetrahydrofuran (THF) and Limonene (L).

We have produced a total of 10 adhesive mixtures, half from spoons and half from cups. The adhesive mixtures were produced in glass containers in which plastic and solvent were mixed in a weight ratio of 1:1 (Table 2). In order to determine the quality of bonding with adhesive mixtures made of plastic waste, we made bonded assemblies from two planed beech wood lamellas (*Fagus sylvatica* L.) with dimensions of $500 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$. The adhesive surface was sanded with 240 grit sandpaper and then 200 g/m^2 of adhesive mixture was applied by hand with a spatula to the surface of one lamella. The samples were then compressed in a hydraulic press for 10 minutes at a temperature of 150°C and a pressure of 12 bar. After pressing, the samples were cooled and then cut into test specimens to determine the shear strength of the adhesive bonds according to the standard SIST EN

205: 2016 (Figure 2). The shear test was performed with a Zwick/Roell Z005 universal testing machine.

It was found that two adhesive mixtures from spoons (Ž-BA and Ž-DMF) partially bonded the beech lamellae, while three adhesive mixtures from the spoons (Ž-THF, Ž-L and Ž- AC) were not successful and most of the specimens disintegrated already during cutting or before the shear test was performed (Figure 3). A similar result was obtained with adhesives from cups. Two adhesive mixtures from cups (L-DMF and L- AC) partially bonded the beech lamellas, whereas three adhesive mixtures (L- BA, L-THF and LL) were not successful (Figure 4).

From the results of the shear strength of the specimens that were bonded with adhesive mixtures Ž-DMF and L-DMF (Table 3), it can be concluded that these mixtures have a certain potential for the production of adhesives from plastic waste. Test specimens bonded with Ž-DMF adhesive achieved an average shear strength of 6.5 N/mm², and specimens bonded with L-DMF achieved 3.8 N/mm². The next research step will be to optimise the pressing parameters (especially temperature) and the cooling process of the adhesives immediately after hot pressing. It is assumed that with appropriate modification of the adhesive mixture and the bonding process, the required shear strengths of adhesive bonds for interior applications according to SIST EN 204: 2016 (10 N/mm²) can be achieved.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGEMENT

Raziskava je nastala v okviru programske skupine P4-0015, pod okriljem Agencije Republike Slovenije za raziskovalno dejavnost (ARRS).

LITERATURA

REFERENCES

- Achilias, D. S., Andriotis, L., Koutsidis, I. A., Louka, D. A., Nianias, N. P., Siafaka, P., Tsagkalias, I., & Tsintzou, G. (2012). Recent advances in the chemical recycling of polymers (PP, PS, LDPE, HDPE, PVC, PC, Nylon, PMMA). V: *Material Recycling Trends and Perspectives*. Ur. Achilias, D. InTechOpen: London, UK.
- Cui, T., Song, K., & Zhang, S. (2010). Research on utilizing recycled plastic to make environment-friendly plywood. *Forestry Studies in China*, 12(4): 218–222.
- Curiac, A. S., Petre, A., Stoica, A. G., & Sandu, S. A. (2017). Preparation of adhesives from the expandable polystyrene waste. *Journal of Young Scientist*, Vol. V: 21-26.
- Del Menezzi, C. H. S., Nakamura, A., Queiroz, F., & Couto, M. (2016). Preliminary evaluation of laminated veneer lumber bonded with expanded polystyrene. *Eur. J. Wood Prod.*, 74: 759–761.
- Ellen MacArthur Foundation. Circular Economy (<https://www.ellen-macarthurfoundation.org/>)
- Eskander, S. B., Tawfik, M., & Tawfic, M. L. (2018). Mechanical, flammability and thermal degradation characteristics of rice straw fiber-recycled polystyrene foam hard wood composites incorporating fire retardants. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 132: 1115-1124.
- Grinbergs, U., Kajaks, J., & Reihmane, S. (2010). Usage of ecologically perspective adhesives for wood bonding. *Scientific Journal of Riga Technical University: Material Science and Applied Chemistry*, 22(1): 114-118.
- Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Phil. Trans. R. Soc. B.*, 364: 2115-2126.
- Jasri, M. A. H. M., Afendi, M., Zulkepli, N. N., Basirom, I., Nurhashima, S., Abu, N., Yahud, S., Amin, N. A. M. (2014). Tensile shear strength of wood adhesive from recycled polystyrene. *Applied Mechanics and Materials*, 554: 3-6.
- Kajaks, J., Reihmane, S., Grinbergs, U., & Kalnins, K. (2012). Use of innovative environmentally friendly adhesives for wood veneer bonding. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 61,3: 207-211.
- Lisperguer, J., Nuñez, C., & Perez-Guerrero, P. (2013). Structure and thermal properties of maleated lignin-recycled polystyrene composites. *J. Chil. Chem. Soc.*, 58, 4: 1937-19740.
- Lye, S. W., & Aw, H. D. (2003). Powder adhesive moulding of recycled expandable polystyrene. *Plastics, Rubber and Composites*, 32, 8-9: 368-376.
- Ordaz-Quintero, A., Monroy-Alonso, A., & Saldívar-Guerra, E. (2020). Thermal pyrolysis of Polystyrene aided by Nitroxide end-functionality. *Experiments and Modeling. Processes*, 8, 432: 1-26.
- Park, Y. J., & Kim, H. J. (2003). Hot-melt adhesive properties of EVA/aromatic hydrocarbon resin blend. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 23(5): 383-392.
- Poletto, M. (2017). Mechanical, dynamic mechanical and morphological properties of composites based on recycled polystyrene filled with wood flour wastes. *Maderas, Cienc. tecnol.*, 19, 4, pp.433-442.
- Scott, A. (2018). Not-so-fantastic plastic. *Chem. Eng. News*, 96: 16-18.
- Selukar, N. B., Lande, C. V., & Ingole, C. G. (2014). Waste Thermocol to adhesive for better environment. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, Volume 1, Issue 6: 98-101.
- SIST (2016). *Razvrstitev plastomernih lepil za les za nekonstrukcijsko uporabo* (SIST EN 204:2016).
- SIST (2016). *Lepila - Lepila za les za nekonstrukcijsko uporabo - Ugotavljanje natezno-strižne trdnosti spojev s preklopom* (SIST EN 205:2016).
- Tawfik, M., Eskander, S. B., & Nawwar, G. A. M. (2017). Hardwood-composites made of rice straw and recycled polystyrene foam wastes. *J. Appl. Polym. Sci.*

- Tullo, A. H. (2018). Fighting ocean plastics at the source. *Chem. Eng. News*, 96: 28-34.
- Vovk, M., Beličič, A., & Šernek, M. (2017). Sestava, lastnosti, uporaba in reciklaža Kerrocka. *Les/Wood*, 66(2), 57-69. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2017.v66n02a06>
- Winther, T., Bannerman, J., Skogstad, H., Johansson, M. K. G., Jacobson, K., & Samuelsson, J. (2015). Adhesives for adhering polystyrene plastic and their long-term effect. *Studies in Conversation*, 60,2: 107-120.
- Yang, M., Sui, W., Qin, Y., & Nie, Y. (2011). Study on recycling of waste styrofoam for adhesive. *Advanced Materials Research*, 181-182: 975-978.

**PROF. DR. KATARINA ČUFAR – PREJEMNICA ZOISOVEGA PRIZNANJA ZA POMEMBNE DOSEŽKE IN ZLATE PLAKETE UNIVERZE V LJUBLJANI****PROF. DR. KATARINA ČUFAR RECEIVED THE ZOIS PRIZE FOR IMPORTANT ACHIEVEMENTS AND THE GOLDEN PLAQUE OF THE UNIVERSITY OF LJUBLJANA**Milan Šernek^{1*}, Marko Petrič¹

Izvleček / Abstract

Izvleček: Prof. dr. Katarina Čufar je konec leta 2020 prejela dve prestižni priznanji: Zoisovo priznanje za pomembne znanstvenoraziskovalne dosežke za razvoj dendrokronologije in znanosti o lesu in Zlato plaketo Univerze v Ljubljani za izjemne znanstvenoraziskovalne dosežke, za zgledno pedagoško delo ter za zasluge pri krepitvi ugleda univerze. Kratko predstavljamo nagrajenko in njeno raziskovalno delo.

Ključne besede: dendrokronologija, znanost o lesu, anatomija lesa, državno priznanje, zlata plaketa univerze

Abstract: At the end of 2020, Prof. Dr. Katarina Čufar received two prestigious awards: the Zois Prize for important scientific research achievements in the development of dendrochronology and wood science, which is a state award of the Republic of Slovenia, and Golden Plaque from the University of Ljubljana for outstanding scientific research, exemplary teaching and achievements in enhancing the university's reputation. We briefly introduce the prize-winner and her work.

Keywords: dendrochronology, wood science, wood anatomy, award

Vrhunska znanstvenica in pedagoginja, prof. dr. Katarina Čufar je konec leta 2020, v prvem tednu decembra, prejela dve zares prestižni priznanji: Zoisovo priznanje za pomembne znanstvenoraziskovalne dosežke za razvoj dendrokronologije in znanosti o lesu in Zlato plaketo Univerze v Ljubljani za izjemne znanstvenoraziskovalne dosežke, za zgledno pedagoško delo ter za zasluge pri krepitvi ugleda univerze.

Prof. dr. Katarina Čufar je Zoisovo priznanje za pomembne dosežke prejela za razvoj znanosti o lesu, posebej za dosežke in razvoj na področju anatomije lesa in dendrokronologije ter za prenos znanja na področja kulturne dediščine in arheologije, s čimer je trajno prispevala k razvoju znanstvenoraziskovalne in razvojne dejavnosti na področju biotehnike in humanistike v Republiki Sloveniji. Prof. dr. Katarina Čufar ter sodelavke in sodelavci doma in po svetu so v večletnih raziskavah pojasnili najpomembnejše fiziološke procese, predvsem tiste, povezane z delovanjem kambija ter nastajanjem lesa in skorje v drevesih (Čufar et al., 2008c; Prislan et al., 2011, 2013; Gričar et al., 2014). Te procese vodi-

jo notranji in okoljski dejavniki, predvsem klima, njihov vpliv pa je zabeležen v anatomiji lesa (Balzano et al., 2018). Les s svojimi celicami in tkivi zato predstavlja arhivski zapis preteklih dogodkov, ki jih proučuje dendrokronologija. Dendrokronologija temelji na proučevanju lesa branik, razmejenih z letnicami, kjer v prvi fazi ugotovijo, v katerem letu je les nastal in s tem les datirajo. V mnogih primerih je datiranje in ugotavljanje starosti tudi končni cilj raziskav. Datiranje je hkrati velik izziv, saj naša kulturna dediščina hrani tudi več tisoč let stare predmete (Čufar et al., 2014b). Nagrajenka je opravila pionirsko delo na področju dendrokronologije v Sloveniji, kjer je bilo najprej treba sestaviti referenčne kronologije (Čufar et al., 2008b). Delo na tem področju ne bo nikoli zares končano, saj bi v idealnem primeru potrebovali kronologije glavnih drevesnih vrst za vsa interesna obdobja in območja v Sloveniji, za kar pa je seveda nujno delo širokega kroga sodelavk in sodelavcev ter interdisciplinarno in mednarodno sodelovanje.

Izsledki raziskovalnega dela prof. Katarine Čufar s sodelavkami in sodelavci so pomagali, da lahko tudi v Sloveniji uporabljamo dendrokronologijo za ugotavljanje starosti lesa v objektih kot so na primer koliščarske naselbine na Ljubljanskem barju in najstarejše leseno kolo na svetu (Čufar et al., 2010; Čufar & Velušček, 2012). Uvedba dendrokronologi-

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

* e-mail: milan.sernek@bf.uni-lj.si

je je omogočila, da danes vemo, kdaj natančno so bile med leti 3770–2450 pr. n. št. naseljene posamezne koliščarske naselbine na Ljubljanskem barju (Čufar et al., 2015). Datiranje je omogočilo boljše razumevanje življenja ljudi na našem ozemlju v prazgodovini ter njihove povezanosti s kulturami v širšem geografskem območju. Rezultati in skrbno hranjen arheološki les iz raziskav so ključni za nadaljnje temeljne raziskave, kot je na primer proučevanje genetike in migracij hrasta v obdobju 10.000 let po zadnji poledenitvi (Wagner et al., 2018). Material so porabili tudi za raziskave gospodarjenja z gozdnimi viri v daljni preteklosti (Out et al., 2020).

Pri mnogih lesnih konstrukcijah in predmetih, pomembnih za našo kulturno dediščino, dendrokronologija pomaga poleg starosti ugotavljati tudi izvor lesa ter originalnost in vrednost predmetov, kar najbolje prikazujejo raziskave umetniških in uporabnih predmetov, glasbenih instrumentov ter konstrukcij različnih stavb od gradov, cerkva, palač ter mestnih in kmečkih stavb, od bivališč do kozolcev (Čufar et al., 2014a, 2017, 2020). Material in rezultati iz omenjenih raziskav so pripomogli k rekonstrukciji klime

v Sloveniji za zadnjih 500 let in v Evropi za zadnjih 2000 let (Čufar et al., 2008a; Cook et al., 2015).

Razvoj dendrokronologije nagrajenka s svojimi sodelavkami in sodelavci gradi na trdni osnovi poznavanja anatomije lesa in fiziologije dreves. Prav zato so izredno pomembne raziskave živih dreves, kjer dendrokronologija, navezana na klimatologijo, med drugim pojasnjuje, kaj omejuje in kaj podpira rast določenih dreves in drevesnih vrst na določenem območju, kar je posebej pomembno takrat, ko se glavni dejavniki (npr. klima) spreminjajo in je preživetje dreves ogroženo (Čufar et al., 2014a; Cailleret et al., 2017; Novak et al., 2017). Temeljne raziskave širše skupine na področju delovanja kambija ter nastajanja lesa (ksilema) in skorje (še posebej floema), ki vključujejo drevesa iz pretežno zmerno celinskih (Cuny et al., 2015; Martinez del Castillo et al., 2018), hladnih alpskih (Rossi et al., 2016; Li et al., 2017) in vroče suhih sredozemskih okolij (De Luis et al., 2013; Novak et al., 2013; Prislan et al., 2016), so prinesle številna bazična spoznanja. Ta spoznanja pa so nadgradili z uporabo satelitskih podatkov (Decuyper et al., 2020) in opazovanjem listne fenologije dreves (Škrk et al., 2020).



Slika 1. Zoisovo priznanje prof. dr. Katarina Čufar za pomembne dosežke za razvoj dendrokronologije in znanosti o lesu.

Figure 1. Zois Prize for Prof. Dr. Katarina Čufar for important achievements in the development of dendrochronology and wood science.

Izsledki raziskav so bili predstavljeni v prestižnih objavah, ki jih je svetovna znanstvena skupnost prepoznala in dobro sprejela, kar se odraža tudi v visoki citiranosti objav (Bibliography..., 2020a, b).

Iz bibliografije nagrajenke je razvidno, kako pomembno je sodelovanje ter delo raziskovalk in raziskovalcev v Sloveniji ter kako je domače dosežke potrebno in mogoče vpeti v delo mednarodnih konzorcijev. Pri tem nagrajenka deluje tudi kot glavna urednica revije *Les/Wood*, kjer z uredniškim delom in objavljanim skrbi za slovenski jezik in slovensko znanstveno izrazoslovje.

Na kratko opisane temeljne in aplikativne raziskave se tesno prepletajo in medsebojno dopolnjujejo, zato smo veseli, da je bilo delo Katarine Čufar prepoznano in nagrajeno z državnim priznanjem.

Redna profesorica dr. Katarina Čufar je na področju znanosti o lesu tudi izvrstna in med študenti izjemno priljubljena pedagoginja. Naključje je hotelo, da ji je prav v istem tednu, kot ji je bilo podeljeno

Zoisovo priznanje, kot ugledni mednarodni raziskovalki in odlični predavateljici tudi Univerza v Ljubljani podelila enega svojih najvišjih priznanj, Zlato plaketo. Prof. Čufarjeva je Katedro za tehnologijo lesa, ki jo vodi, postavila na svetovni zemljevid odlično opremljenih laboratorijev, v katerega radi prihajajo tuji znanstveniki in študenti. Zavzeto skrbi tudi za prenos znanja v prakso. Svoje vrhunske izsledke objavlja v najuglednejših svetovnih publikacijah, ob tem pa ji vedno uspe poiskati čas za najrazličnejše zahtevne vodstvene funkcije in ne nazadnje, za prijazno besedo svojim sodelavcem, ko se slučajno srečamo na hodniku ali ob kavici.

Sodelavci Oddelka za lesarstvo na Biotehniški fakulteti smo se obeh uglednih priznanj naše pedagoginje in raziskovalke, prof. dr. Katarine Čufar, izjemno razveselili in ji iskreno čestitamo! Verjamemo, da se našim čestitkam pridružujete tudi vsi ostali, ki z njo tako ali drugače sodelujete, ali pa jo poznate kot svojo sedanjo ali bivšo profesorico.



Slika 2. Predavanje v mikroskopirnici na Oddelku za lesarstvo. Foto: Angela Balzano.

Figure 2. Lecture in a microscopy classroom at the Department of Wood Science and Technology. Photo: Angela Balzano.

Šernek, M., & Petrič, M.: Prof. Dr. Katarina Čufar received the Zois Prize for important achievements and the Golden Plaque of the University of Ljubljana



Slika 3. Najstarejše kolo na svetu z osjo staro 5150 let hrani Mestni muzej Ljubljana MGML. Večino temeljnih raziskav lesa kolesa in drugih najdb iz koliščarskih naselbin na Ljubljanskem barju so v sodelovanju z Inštitutom za arheologijo ZRC SAZU opravili na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete. Foto: Rado Likon, (Vrhunci..., 2020).

Figure 3. The oldest wheel in the world with an axle is 5,150 years old and is kept by the City Museum of Ljubljana MGML. Most of the basic research on the wood of the wheel and other finds from pile-dwelling settlements of Ljubljansko barje was conducted at the Department of Wood Science and Technology of the Biotechnical Faculty, in cooperation with the Institute of Archeology RC SASA. Photo: Rado Likon (Vrhunci..., 2020).



Slika 4. Dendrokronološka analiza violine za določitev starosti in originalnosti instrumenta. Foto: Rado Likon, (Vrhunci..., 2020).

Figure 4. Dendrochronological analysis of a violin to determine the age and origin of the instrument. Photo: Rado Likon (Vrhunci..., 2020).



Slika 5. Fenološko opazovanje rumenenja listja na bukvah iz krajinskega parka Tivoli – Rožnik v Ljubljani. Foto: Rado Likon, (Vrhunci..., 2020).

Figure 5. Phenological observation of leaf yellowing in beech in the Tivoli - Rožnik Landscape Park in Ljubljana. Photo: Rado Likon (Vrhunci..., 2020).

In the first week of December 2020, our top scientist and teacher, Prof. Dr. Katarina Čufar, received two truly prestigious awards: the Zois Prize for important scientific research achievements in the development of dendrochronology and wood science, and Golden Plaque from the University of Ljubljana for outstanding scientific research, exemplary pedagogical work and achievements to enhance the reputation of the University.

Katarina Čufar received the Zois Award for important achievements for the development of wood science, especially in the field of wood anatomy and dendrochronology and for the transfer of knowledge on cultural heritage and archaeology. In this way, she contributed to scientific research and development in the fields of both the life sciences and humanities in the Republic of Slovenia.

Katarina Čufar, in cooperation with colleagues from Slovenia and around the world, has spent many years studying the most important physiological processes in trees, including those related to cambium activity and the formation of wood and bark (Čufar et al., 2008c; Prislan et al., 2011, 2013; Gričar et al., 2014). Such processes are driven by

internal and environmental factors, especially climate, and their influence is recorded in wood anatomy (Balzano et al., 2018).

Wood with its cells and tissues therefore represents an archive of past events, which is investigated by dendrochronology. Dendrochronology is the study of tree-rings and is based on cross-dating, which can be used to determine in which calendar year the wood was formed. Dendrochronology thus makes it possible to date the wood, which is sometimes the ultimate goal of research. However, such dating can be a great challenge, as Slovenian cultural heritage also contains objects that are thousands of years old (Čufar et al., 2014 b). Katarina Čufar pioneered the field of dendrochronology in Slovenia, where reference chronologies first had to be established (Čufar et al., 2008b). The creation of such chronologies sometimes seems to be a never-ending project. Ideally we need chronologies of the main tree species for all periods of interest, and all regions in geographically heterogeneous Slovenia. This requires well-organised teamwork with broad interdisciplinary and international cooperation.

The research work of Katarina Čufar and her colleagues helped us to determine the age of wood in pile-dwelling settlements in the Ljubljansko barje and the oldest wooden wheel in the world (Čufar et al., 2010; Čufar & Velušček, 2012). Dendrochronology has made it possible to determine exactly when the pile-dwelling settlements at Ljubljansko barje were inhabited in the period between 3770 and 2450 BC (Čufar et al., 2015). Dating this made it possible to better understand the life and cultural connections of people in the distant past. The research results and carefully preserved archaeological wood enabled further basic research, such as the DNA study, which explained how populations of oak trees changed in space and time over a period of 10,000 years after the last glaciation (Wagner et al., 2018). The material was also used to study woodland management in the distant past (Out et al., 2020).

For constructions and objects of cultural heritage, dendrochronology helps to determine the origin of wood and the originality and value of objects, which is best shown by studies of musical instruments and constructions of castles, churches, palaces and various buildings, including rural architecture (Čufar et al., 2014a, 2017, 2020). The material and results of numerous studies have enabled reconstruction of the climate in Slovenia over the last 500 years, and in Europe over the last 2,000 years (Čufar et al., 2008a; Cook et al., 2015).

Katarina Čufar together with colleagues developed dendrochronology on a solid foundation of wood science, including wood anatomy and tree physiology. She showed that the study of living trees is necessary to relate dendrochronology to climatology and explain the factors that limit tree growth. This is particularly important when the climate changes and the survival of trees is threatened (Čufar et al., 2014a; Cailleret et al., 2017; Novak et al., 2017). Basic research by a wider group on cambium activity and the formation of wood (xylem) and bark (especially phloem) in trees from temperate continental (Cuny et al., 2015; Martinez del Castillo et al., 2018), cold alpine (Rossi et al. 2016; Li et al. 2017) and hot dry Mediterranean environments (De Luis et al., 2013; Novak et al., 2013; Prislan et al., 2016) have produced a number of fundamental findings. These were scaled up to studies using remote sensing data (Decuyper et

al., 2020) and terrestrial observations of leaf phenology in trees (Škrk et al., 2020). Most of the papers were published in prestigious publications and acknowledged by the global scientific community, which is reflected in a high citation frequency (Bibliography 2020 a, b).

The bibliography of Katarina Čufar shows that the arduous work of researchers in Slovenia can and must be integrated into the work of international consortia. Katarina Čufar also serves as editor-in-chief of the journal *Les / Wood* and is also involved in the development of Slovenian scientific terminology.

The basic and applied research briefly described here are closely intertwined and complement each other, so we are pleased that the work of Katarina Čufar has been recognized and awarded the high state award of the Republic of Slovenia.

Katarina Čufar is a full professor who is known as an excellent teacher in the field of wood science. She is extremely popular among students. Coincidentally, in the same week that the Zois Prize was awarded to her, the University of Ljubljana presented her with one of its highest awards, the Golden Plaque. As an internationally recognized researcher and outstanding teacher, Prof. Čufar has put the Department of Wood Science and Technology and the team she heads in Wood Science on the world map of well-equipped laboratories with highly qualified and friendly staff. Therefore, the Wood Science team is a very popular partner, and the laboratories are constantly visited by scientists and students of all grades from all over the world. Katarina Čufar is also actively involved in the transfer of knowledge into practice. Together with co-authors she publishes in the most prestigious publications. At the same time, she always manages to find time for numerous challenging management functions and, last but not least, for a friendly conversation with her colleagues when we happen to meet in the hallway or over a coffee.

The staff of the Department of Wood Science of Biotechnical Faculty are very happy and proud that our teacher, scientist and colleague Prof. Dr. Katarina Čufar has received both prestigious awards. We sincerely congratulate her! We believe that all those who have worked with her in one way or another, or got to know her as a teacher, join us in congratulating her.

VIRI

REFERENCES

- Balzano, A., Čufar, K., Battipaglia, G., Merela, M., Prislán, P., Aronne, G., & De Micco, V. (2019). Xylogenesis reveals the genesis and ecological signal of IADFs in *Pinus pinea* L. and *Arbutus unedo* L. *Annals of Botany*, 121 (6), 1231-1242.
- Cailleret, M., Jansen, S., Robert, E., Desoto, L., ... Čufar, K., Levanič, T., & Martínez-Vilalta, J. (2017). A synthesis of radial growth patterns preceding tree mortality. *Global Change Biology*, 23 (4): 1675-1690.
- Cook, E. R., Seager, R., Kushnir, Y., Briffa, K. R., ... Čufar, K., ... Levanič, T., ... & Zang, Ch. (2015) Old world megadroughts and pluvials during the common era. *Science advances*, 1 (10): 1-9.
- Cuny, H. E., Rathgeber, C. B.K., Frank, D., ... Prislán, P., ... Gričar, J., ... Čufar, K., ... & Fournier, M. (2015). Woody biomass production lags stem-girth increase by over one month in coniferous forests. *Nature plants*, 1, article 15160.
- Čufar, K., De Luis, M., Eckstein, D., & Kajfež-Bogataj, L. (2008a). Reconstructing dry and wet summers in SE Slovenia from oak tree-ring series. *International Journal of Biometeorology* 52: 607-615.
- Čufar, K., De Luis, M., Zupančič, M., & Eckstein, D. (2008b). 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., Prislán, P., De Luis, M., & Gričar, J. (2008c). Tree-ring variation, wood formation and phenology of beech (*Fagus sylvatica*) from a representative site in Slovenia, SE Central Europe. *Trees*, 22, 749-758.
- Čufar, K., Kromer, B., Tolar, T., & Velušček, A. (2010). Dating of 4th millennium BC pile-dwellings on Ljubljansko barje, Slovenia. *Journal of Archaeological Science* 37 (8), 2031-2039.
- Čufar, K., & Velušček, A. (2012). Les s količarskih naselbin na Ljubljanskem barju in njegov raziskovalni potencial. *Les* 64 (3-4), 49-56.
- Čufar, K., Bizjak, M., Kitek Kuzman, M., Merela, M., Grabner, M., & Brus, R. (2014a). Castle Pišce, Slovenia - building history and wood economy revealed by dendrochronology, dendroprovenancing and historical sources. *Dendrochronologia*, 32 (4), 357-363.
- Čufar, K., Grabner, M., Morgós, A., Martínez Del Castillo, E., Merela, M., & De Luis, M. (2014b). Common climatic signals affecting oak tree-ring growth in SE Central Europe. *Trees*, 28, 1267-1277.
- Čufar, K., Merela, M., & Erič, M. (2014). A Roman barge in the Ljubljanica river (Slovenia) : wood identification, dendrochronological dating and wood preservation research. *Journal of archaeological science*, 44 (1), 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 (1), 91-98.
- Čufar, K., Beuting, M., Demšar, B., & Merela, M. (2017). Dating of violins : the interpretation of dendrochronological reports. *Journal of cultural heritage*, 27, S44 - S54.
- Čufar, K., Dolžan Eržen, T., Krže, L., & Merela, M. (2020). Dendrokronološke raziskave poslikanih kmečkih skrinj iz zbirke Gorenjskega muzeja v Kranju. *Les / Wood* 69 (1), 33-45.
- Decuyper, M., Chávez, R. O., Čufar, K., Sergio, A., Estay, S. A., Clevens, J. G. P. W., ... & Sass-Klaassen, U. (2020). Spatio-temporal assessment of beech growth in relation to climate extremes in Slovenia – An integrated approach using remote sensing and tree-ring data. *Agricultural and Forest Meteorology* 287 107925.
- De Luis, M., Čufar, K., Di Filippo, A., Novak, K., ... & Smith, K. T. (2013). Plasticity in dendroclimatic response across the distribution range of aleppo pine (*Pinus halepensis*). *PloS one*, 8 (12), 1-13.
- Gričar, J., Prislán, P., Gryc, V., Vavrčík, H., De Luis, M., & Čufar, K. (2014). Plastic and locally adapted phenology in cambial seasonality and production of xylem and phloem cells in *Picea abies* from temperate environments. *Tree physiology*, 34 (8), 869-881.
- Li, X., Liang, E., Gričar, J., Rossi, S., Čufar, K., Ellison, A. M. (2017). Critical minimum temperature limits xylogenesis and maintains treelines on the southeastern Tibetan Plateau. *Science Bulletin*, 62 (11), 804-812.
- Martínez Del Castillo, E., Prislán, P., Gričar, J., Gryc, V., Merela, M., ... & Čufar, K. (2018). Challenges for growth of beech and co-occurring conifers in a changing climate context. *Dendrochronologia*, 52, 1-10.
- Novak, K., De Luis, M., Saz, M. A., Longares, L. A., ... Čufar, K., Gričar, J., ... & Smith, K. T. (2016). Missing rings in *Pinus halepensis* : the missing link to relate the tree-ring record to extreme climatic events. *Frontiers in Plant Science*, 7, article 727.
- Out, W., Baittinger, C., Čufar, K., Lopez Bultó, O., Hänninen, K., Vermeeren, C. (2020). Identification of woodland management by analysis of roundwood age and diameter: Neolithic case studies. *Forest Ecology and Forest Management*, 467: 1-14.
- Prislán, P., Schmitt, U., Koch, G., Gričar, J., & Čufar, K. (2011). Seasonal ultrastructural changes in the cambial zone of beech (*Fagus sylvatica*) grown at two different altitudes. *IAWA Journal*, 32 (4), 443-459.
- Prislán, P., Gričar, J., De Luis, M., Smith, K. T., & Čufar, K. (2013). Phenological variation in xylem and phloem formation in *Fagus sylvatica* from two contrasting sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 180, 142-151.
- Prislán, P., Gričar, J., Novak, K., Martínez Del Castillo, E., De Luis, M., ... & Čufar, K. (2016). Cambial rhythm of *Pinus halepensis* and *Pinus sylvestris* from different environments indicate tree adaptation to local conditions. *Frontiers Plant Sciences*, 7, Article 1923.
- Škrk, N., Črepinšek, Z., & Čufar, K. (2020). Phenology of leaf development in European beech (*Fagus sylvatica*) on a site in Ljubljana, Slovenia in 2020 = Fenologija razvoja listov navadne bukve (*Fagus sylvatica*) na rastišču v Ljubljani v letu 2020. *Les / Wood* 69 (1), 5-19.
- Wagner, S., Lagane, F., Seguin-Orlando, A., Schubert, M., ... Čufar, K., ... & Orlando, L. (2018). High-throughput DNA sequencing of ancient wood. *Molecular Ecology*, 27 (5), 1138-1154

Šernek, M., & Petrič, M.: Prof. Dr. Katarina Čufar received the Zois Prize for important achievements and the Golden Plaque of the University of Ljubljana

Internetni viri / Web sources

Bibliography of Katarina Čufar - COBISS Kooperativni online bibliografski sistem Osebna bibliografija za obdobje 1980-2020. (10.12.2020a). <http://splet02.izum.si/cobiss/bibliography?code=02937>

Bibliography of Katarina Čufar – Orcid. (10.12.2020b). <https://orcid.org/0000-0002-7403-3994>

Vrhunci slovenske znanosti v luči nagrajencev za izjemne dosežke 2020 - dokumentarni film. (10.12.2020). <https://www.rtvsl.si/4d/arhiv/174736192?s=tv>



ZASLUŽNI PROFESOR, PROF. DR. DR. H.C. NIKO TORELLI
PROFESSOR EMERITUS, PROF. DR. DR. H.C. NIKO TORELLI

Primož Oven^{1*}

Izvleček / Abstract

Izvleček: Prof. dr. dr. h.c. Nikolaj Torelli je konec leta 2020 postal zaslužni profesor Univerze v Ljubljani. Naziv zaslužna profesorica in zaslužni profesor Univerze v Ljubljani podeljuje upokojenim profesorici in profesorjem za prepoznaven prispevek pri delovanju, ugledu in razvoju Univerze v Ljubljani. V prispevku predstavljamo zaslužnega profesorja in njegovo delo.

Ključne besede: zaslužni profesor, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, lesarstvo, gozdarstvo

Abstract: At the end of 2020, Prof. Dr. Dr. h.c. Nikolaj Torelli became a Professor Emeritus of the University of Ljubljana. The title of Professor Emeritus is awarded to retired Professors for their significant contributions to the operation, reputation, and development of the University of Ljubljana. We briefly introduce our new Professor Emeritus and his work.

Keywords: professor emeritus, University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, wood science and technology, forestry

Univerza v Ljubljani je največja in najstarejša univerza v Sloveniji, ki za svoj ustanovni dan šteje 3. december 1919, ko je na Univerzi potekalo prvo predavanje v slovenskem jeziku. Univerza v Ljubljani ta jubilej vsako leto obeležuje v okviru *Tedna Univerze v Ljubljani* z organizacijo različnih slavnostnih dogodkov, med drugim tudi s podelitvijo častnih nazivov, plaket, nagrad in priznanj. Na izvedbo Tedna Univerze v letu 2020 je močno vpliva epidemija covid-19, zato je Univerza v Ljubljani za predstavitev najodličnejših raziskovalnih dosežkov, prejemnic in prejemnikov častnih nazivov, plaket, nagrad in priznanj pripravila posebno spletno stran z nagovorom prof. dr. Igorja Papiča, rektorja Univerze v Ljubljani, ki je dosegljiva na povezavi <https://www.uni-lj.si/tedenuniverze/>.

Častni naziv zaslužni profesor so v letu 2020 prejeli trije upokojeni profesorji Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani, prof. dr. Borut Bohanec, prof. dr. Peter Raspor in, kar sodelavce Oddelka za lesarstvo še posebej veseli, tudi prof. dr. dr. h.c. Nikolaj Torelli. Naziv zaslužna profesorica in zaslužni profesor Univerze v Ljubljani podeljuje upokojenim profesorici in profesorjem Univerze v Ljubljani za prepoznaven prispevek pri delovanju, ugledu in razvoju Univerze v Ljubljani.

Redni profesor in častni doktor dr. Nikolaj Torelli (roj., Ljubljana, 4. julij 1940) je maturiral (1959)

na Klasični gimnaziji v Ljubljani in leta 1964 diplomiral na Gozdarskem oddelku Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani z nalogo »Prispevek k sinekologiji termofilnih in kserofilnih hrastovih gozdov klimazonalnega karakterja« ter za diplomsko nalogo prejel univerzitetno študentsko Prešernovo nagrado. Med leti 1966 in 1968 je kot fitocenolog služboval na Biroju za gozdarsko načrtovanje v Ljubljani in si pri terenskem delu izostril občutek za povezavo med gozdno-gojitvenimi ukrepi in kvaliteto lesa. Leta 1968 je prevzel mesto asistenta v Katedri za tehnologijo lesa na Oddelku za lesarstvo na Biotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani in se s tem zavezal lesarstvu v pedagoškem, strokovnem in znanstvenem smislu. V obdobju 1972-79 je bil štipendist in zunanji aspirant na Humboldtovi univerzi v Berlinu. Leta 1974 je magistriral s področja tehnologije lesa na Univerzi v Ljubljani, leta 1979 pa je na Fakulteti za biološke znanosti Humboldtove univerze v Berlinu doktoriral (dr. rer. nat.) z disertacijo z naslovom „Beitrag zur Ökologie und Physiologie der fakultativen Farbkernbildung bei der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.)“. Etiologija sekundarnih sprememb v lesu je postala ena izmed osrednjih tem v njegovem raziskovalnem opusu. V študijskem letu 1978/79 je na takratnem VTOZD za lesarstvo prevzel predavanja iz predmetov Anatomija lesa in Tehnologija lesa, na VTOZD za gozdarstvo pa predavanja pri predmetu Biologija lesa. Leta 1979 je postal predstojnik Katedre za tehnologijo lesa in v naslednjih dvajsetih letih ustvaril prepoznavno podobo Katedre v domačem in mednarodnem strokovnem okolju. Leta

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

* e-mail: primoz.oven@bf.uni-lj.si

je 1990 habilitiral v rednega profesorja za področje Tehnologija lesa. Za izjemen prispevek na pedagoškem in raziskovalnem področju na širokem področju lesarskih znanosti v mednarodnem okolju, mu je Universität für Bodenkultur (BOKU) na Dunaju leta 1998 podelila naslov častni doktor (dr. h.c.). Kmalu zatem (1999) je sprejel nov strokovni izziv, postal je direktor Gozdarskega inštituta Slovenije, ki ga je uspešno vodil vse do upokojitve leta 2008. Kot zagovornik zdržnega multifunkcionalnega gospodarjenja z gozdom in kot izjemen poznavalec lesa je uspešno vzpostavil tesnejše sodelovanje med gozdarsko in lesarsko stroko. Tudi po upokojitvi je ostal aktiven pedagog, raziskovalec in ploden pisec. Od leta 2011 je član Sveta za varovanje okolja pri Slovenski akademiji znanosti in umetnosti in svetovalec SAZU za področje naravoslovja.

Prof. dr. dr. h.c. Torelli je znanstveno in raziskovalno deloval na širšem področju lesarstva, kar je vključevalo raziskave anatomskih, bioloških, fizikal-

nih in mehanskih lastnosti lesa, specialna področja drevesne fiziologije, predvsem fenomene staranja in abscisije drevesnih tkiv, odziv drevja na mehanska in polucijska poškodovanja, kakovost lesa, ki nastaja v takšnih razmerah, možnosti bioelektrične karakterizacije drevesne kondicije za napoved preživetvenih možnosti drevja v normalnih in stresnih razmerah, kompartmentalizacijo razkroja v drevju, etiologijo diskoloriranega lesa, obenem pa je razvijal arboristiko.

Kot odgovorni raziskovalec ali sodelavec je prof. dr. dr. h.c. Torelli usmerjal več domačih in mednarodnih raziskovalnih projektov. Med drugim je bil vodja 5. sklopa vsejugoslovanskega programa Detekcija in spremljanje fiziološkega stanja gozdnega drevja in spremembe na lesu zaradi zračne polucije ter koordinator nacionalnih raziskovalnih projektov Kvaliteta, modificiranje in zaščita lesa, Mokro srce pri jelki, Uvajanje certificiranja gozdov in lesnih izdelkov v Sloveniji ter Anatomske in fiziološke spremembe v skorji in lesu zaradi škodljivih vplivov okolja in me-



Slika 1. Zaslužni profesor, prof. dr. dr. h.c. Nikolaj Torelli z ekipo v Chiapasu, Mehika, leta 1989.

Figure 1. Professor Emeritus, Prof. Dr. Dr. h.c. Nikolaj Torelli with the team in Chiapas, Mexico, in 1989

hanskih poškodovanj. Kot raziskovalec je deloval v programski skupini Lesarstvo in v programski skupini Gozdna biologija, ekologija in tehnologija.

Posebej velja poudariti njegovo mednarodno raziskovalno dejavnost, saj je kot glavni raziskovalec vodil 4 jugoslovansko-ameriške projekte (npr. *Machining and Related Characteristics of Five Wood Species from Bayanga Region (Central African Republic)*, *Possible Alternations of Wood in Air Polluted Trees*), pri enem slovensko-ameriškem pa je bil ključni sodelavec (*Research on Physical and Mechanical Properties of Tropical Wood Species*), bil je tudi glavni raziskovalec pri mednarodno zelo odmevnem jugoslovansko-mehiškem projektu (*Estudio promocional de 43 especies tropicales forestales Mexicanas*). Prof. dr. dr. h.c. Torelli je kot strokovnjak za trajnostno rabo tropskih gozdov raziskal lastnosti več kot 70 manj znanih tropskih lesnih vrst v osrednji Afriki in Mehiki. Tako je po dvakrat obiskal Centralno Afriško Republiko in Gvajano, ter za potrebe takratnega Slovenijalesa izdelal ekspertizi o možnosti izrabe tropskih gozdov. Njegovo najobširnejše delo je študija o bioloških, kemijskih, fizikalnih, mehanskih in tehnoloških lastnostih 43 lesnih vrst iz tropskih gozdov Mehike (*Estudio promocional de 43 especies tropicales forestales Mexicanas*, SARH Mexico.D.F. 1983, 603 str.). To delo je omogočilo grupiranje slabo poznanih lesnih vrst glede na podobnosti tehnoloških lastnosti in končne uporabe, kar je bilo osnova za prehod od prevladujoče, biološko in gozdarsko uničujoče visoko selektivne sečnje le nekaterih tehnološko izpostavljenih vrst (npr. mahagonija/caobe (*Swietenia macrophylla*) in cedrele (*Cedrela odorata*)) k uravnoteženemu gospodarjenju s tropskimi gozdovi in rabi več lesnih vrst. Grupiranje lesnih vrst na podlagi lastnosti je pomemben prispevek k zdravemu gospodarjenju z botanično zelo heterogenimi tropskimi gozdovi, vključujoč certificiranje in označevanje lesov. V obdobju med 1977 in 1988 je prof. dr. dr. h.c. Torelli kot raziskovalec ali kot izvedenec FAO kar devetkrat obiskal Mehiko, kjer je bil več let svetovalec mehiške vlade za področje rabe tropskih gozdov in leta 1988 tudi generalni koordinator mednarodne strokovne skupine pri izdelavi Tropskega gozdarskega akcijskega programa FAO za Mehiko.

Kot raziskovalec in pedagog se je prof. dr. dr. h.c. Torelli zavedal, da je strokovna terminologija ključna za razvoj lesarstva kot znanosti. Vrsto let je

deloval kot predsednik Lesarske terminološke komisije in kot član Sekcije za terminološke slovarje Inštituta za slovenski jezik Frana Ramovša SAZU ter sodeloval pri nastajanju največjih slovenskih leksikografskih del. Prof. dr. dr. h.c. Torelli je bil pisec gesel za gozdarstvo, lesarstvo in papirništvo za Enciklopedijo Slovenije (Mladinska knjiga, MK), Veliki splošni leksikon (Državna založba Slovenije, DZS) in za slovensko nacionalno enciklopedijo Slovenika (MK). Na tem mestu velja posebej izpostaviti strokovni slovar Les & skorja (1990), ki ostaja nepogrešljiv študijski pripomoček v pedagoškem procesu Oddelka za lesarstvo. Profesor Torelli je opravil tudi obsežno uredniško delo, bodisi kot član uredniških odborov ali urednik. V obdobju 1996-2007 je deloval kot glavni urednik revije Les/Wood in uspel strokovno revijo dvigniti na nivo osrednje nacionalne znanstvene publikacije za področje lesarstva, ki ga je revija ohranila vse do danes.

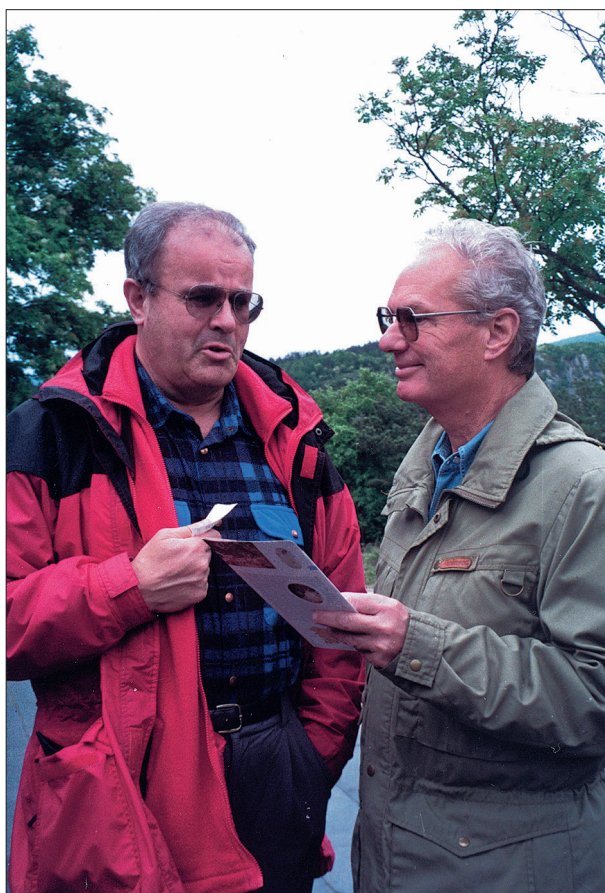
Prof. dr. dr. h.c. Torelli je samostojno ali v soavtorstvu objavil več kot 80 izvirnih znanstvenih člankov, od tega 24 s faktorjem vpliva, skupaj pa ima v podatkovni bazi Cobiss 962 zapisov. Bil je mentor 62 diplomantom, mentor pri 5 znanstvenih magistriranjih, in mentor 8 doktorandom, ki danes delujejo kot uspešni raziskovalci in pedagogi na univerzah in inštitutih. Svoje izsledke je predstavil na številnih konferencah doma in v tujini. Znanstvenoraziskovalno in pedagoško dejavnost je nenehno dopolnjeval s poljudnoznanstveno in strokovno publicistiko, ki je odločilno prispevala k prepoznavnosti lesa kot strateške surovine države Slovenije, lesarstva kot stroke in znanosti ter k promociji Oddelka za lesarstvo, s tem pa tudi Biotehniške fakultete in Univerze v Ljubljani v slovenskem javnem prostoru. Kot izreden poznavalec lesa in tehnoloških procesov je ostal v tesnem stiku s slovensko lesno industrijo in podjetjem redno svetoval pri reševanju najrazličnejših tehnoloških in procesnih izzivov.

Prof. dr. dr. h.c. Torelli je aktivno deloval v številnih strokovnih organizacijah doma in v tujini, zato je potrebno izpostaviti tudi njegovo vodstveno in organizacijsko dejavnost. V obdobju med 1981 in 1985 je bil prof. dr. dr. h.c. Niko Torelli dvakrat namestnik predstojnika takratnega VTOZD za lesarstvo, od leta 1985 do 1987 pa predstojnik (VTOZD) Oddelka za lesarstvo. Bil je podpredsednik Sveta Oddelka za lesarstvo, član Sveta Biotehniške fakultete, član sveta Univerze Edvarda Kardelja ter član

projektne sveta in znanstveno raziskovalnega sveta za biotehniške vede pri RSS. Med drugim je bil leta 1986 član organizacijskega odbora 18. svetovnega IUFRO kongresa (18th IUFRO World Congress), ki je potekal v Ljubljani, v okviru tega dogodka pa je bil tudi organizator satelitskega sestanka International Society of Wood anatomists (IAWA). Vrsto let je deloval kot nacionalni zastopnik v EUREKA-Forest and wood industry in v tehniškem komiteju COST za gozdarstvo, lesarstvo in papirništvo. V okviru Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije in Ministrstva za izobraževanje, znanost in šport, je prof. dr. dr. h.c. Torelli član Programskega sveta Ciljnega raziskovalnega programa „Zagotovimo si hrano za jutri“. Bil je tudi dolgoletni član ali predsednik Državne predmetne komisije za materiale za splošno maturo Državnega izpitnega centra.

Profesor Torelli je v razmišljanjih o svojem delu največkrat izpostavil, da je nenehno deloval predvsem kot profesor. In res je v spominu številnih generaciji študentov ostal zapisan kot odličen predavatelj in kot izjemen poznavalec lesa, drevesa in gozda, ki je znal v svoja predavanja na duhovit in izviren način vtakati anekdote iz sveta umetnosti in neprecenljive izkušnje iz svojih ekspedicij v tropskih predelih Afrike in Mehike. Na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete je predaval na celotni izobraževalni vertikali, na višješolskem, visokošolskem strokovnem, univerzitetnem in magistrskem študiju predmete kot so Anatomija lesa, Tehnologija lesa, Zgradba in lastnosti lesa, Biološke, mehanske, fizikalne lastnosti lesa. Predaval je tudi na Oddelku za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, kjer je uvedel nov predmet Arboristika, na Akademiji za likovno umetnost - smer oblikovanje in tudi na Fakulteti za dizajn, kjer med drugim deluje tudi kot prodekan za študijske zadeve. Izredno tesne stike je gojil z Universität für Bodenkultur (BOKU) na Dunaju in s takratnim inštitutom Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft v Hamburgu (BFH) (sedaj Thünen Institut), kjer je večkrat predaval.

Zaslужni profesor, prof. dr. dr. h.c. Torelli je za svoje pedagoško, znanstveno in strokovno delo prejel več uglednih nagrad in priznanj, med katerimi velja izpostaviti Certification of Appreciation US Dept. of Agriculture za uspešno vodenje dveh jugoslovansko-ameriških in slovensko-ameriških projektov (1983 in 1994), priznanje ob 10. obletnici mehiške generalne direkcije „Dirección General



Slika 2. Prof. dr. dr. h.c. Nikolaj Torelli in prof. dr. Gottfried Halbwachs z Universität für Bodenkultur (BOKU) Dunaj na terenu v Sloveniji leta 1998 (Foto: K. Čufar).

Figure 2. Prof. Dr. Dr. h.c. Nikolaj Torelli and Prof. Dr. Gottfried Halbwachs from the Universität für Bodenkultur (BOKU) Vienna during the fieldwork in Slovenia in 1998. (Photo: K. Čufar).

para el Desarrollo Forestal, Mexico City, (1983), kot edini tujec doslej pa je prijel prestižno nacionalno mehiško priznanje za gozdarstvo (Merito nacional forestal, 1986), Zlato plaketo Univerze v Ljubljani za posebne dosežke na področju izobraževanja in raziskav (1993), častni doktorat (dr. h.c.) Universität für Bodenkultur (BOKU) na Dunaju (1998), Jesenkovo priznanje (2001) Biotehniške fakultete za največje dosežke na področju pedagoške, raziskovalne in strokovne dejavnosti s področja biotehniških ved, imenovanje za Ambasadorja v znanosti Republike Slovenije (2004), Zlato plaketo Zveze lesarjev Slovenije (2008) za 10-letno uredništvo strokovno-znanstvene revije Les/Wood, »Priznanje za življenjsko



Slika 3. Prof. dr. dr. h.c. Nikolaj Torelli in prof. dr. dr. h.c. mult. Walter Liese z Univerze Hamburg po predavanjih na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete decembra 2005. (Foto: K. Čufar)

Figure 3. Prof. Dr. Dr. h.c. Nikolaj Torelli and Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Walter Liese after the lectures at the Department of Wood Science and Technology of the Biotechnical Faculty in December 2005. (Photo: K. Čufar)

delo» Združenja lesne in pohištvene industrije pri GZS na področju povezovanja gozdarstva in lesarstva ter za izjemne znanstvene in pedagoške dosežke (2017) ter »Življenjsko nagrado« Gozdarskega Inštituta Slovenije (2017).

Zaslužni profesor, prof. dr. dr. h.c. Niko Torelli je s svojim pedagoškim, strokovnim in raziskovalnim delovanjem v domačem in mednarodnem strokovnem prostoru gradil prepoznavno podobo lesarstva kot znanosti, Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete ter s tem tudi Univerze v Ljubljani, kar je s podelitvijo častnega naziva zaslužni profesor prepoznala tudi Univerza v Ljubljani. Naj na koncu te kratke predstavitve poudarimo, da je profesor dr. dr. h.c. Nikolaj Torelli osebnost, ki se zavzema za moralno in etično držo, navdušujoč pripovedovalec, koncizen pisec in nepogrešljiv sogovornik o širokem

spektu humanističnih, družbenih in znanstvenih tem, ki segajo od klasične glasbe, slikarstva, civilizacije Majev do sodobnih trendov v lesarstvu, gozdarstvu in izzivov podnebnih sprememb, če omenimo le nekatere. Častni naziv zaslužni profesor je prof. dr. dr. h.c. Torelli prejel v letu 2020, ko je praznoval tudi visok osebni jubilej, zato mu sodelavke in sodelavci ter alumne in alumni Oddelka za lesarstvo iskreno čestitamo in želimo trdnega zdravja in veliko ustvarjalnih trenutkov tudi v prihodnje.

POVZETEK SUMMARY

Prof. Dr. Dr. h.c. Nikolaj Torelli received the title of Professor Emeritus of the University of Ljubljana at the end of 2020. This is awarded to retired Pro-

fessors for their significant contributions to the operation, reputation, and development of the University of Ljubljana. Nikolaj Torelli, Full Professor at the University of Ljubljana, honorary doctor of the Universität für Bodenkultur (BOKU) in Vienna, Ambassador of the Republic of Slovenia in Science, member of the Council for Environmental Protection and consultant for natural sciences at the Slovenian Academy of Sciences and Arts, defended his doctoral dissertation at Humboldt-Universität zu Berlin (1979). He was the head of the Chair of Wood Science at the Department of Wood Science and Technology, Biotechnical Faculty, University of Ljubljana for twenty years, where he left an indelible mark on the research and pedagogical tradition. In 1999 he accepted a new professional challenge, when he became the director of the Slovenian Forestry Institute and successfully led it until his retirement in 2008. As an advocate of sustainable multifunctional forest management and an exceptional authority in wood structure and properties, he successfully established close cooperation between forestry and wood science. His main research topics were the anatomical, biological, physical and mechanical properties of wood, special areas of tree physiology, especially the phenomena of aging and abscission of tree tissues, the response of trees to mechanical and pollution damage, the quality of wood produced in such conditions, the possibilities of bioelectrical characterization of tree conditions for predicting the survival of trees under normal and stressful circumstances, compartmentalization of decay in trees, aetiology of discoloured wood, while also developing arboriculture. Prof. Dr. Dr. h.c. Torelli contributed to the terminology in wood science, wood technology, forestry and, pulp and paper in the largest lexicographic Slovenian works, like the Encyclopaedia of Slovenia, and the Great General Lexicon. From 1996 to 2007, he was editor-in-chief of our journal *Les / Wood* and managed to raise it to the level of the central national scientific journal in the field of wood science and technology. Prof. Dr. Dr. h.c. Torelli has directed several national and international research projects as a principal researcher, and this international research activity should be highlighted in this context. He led four Yugoslav-American projects (e.g., *Machining and Related Characteristics of Five Wood Species from Bayanga Region (Central African Re-*

public) and Possible Alternations of Wood and Air Polluted Trees). He was the main researcher in an international Yugoslav-Mexican project, where he studied the biological, chemical, physical, mechanical, and technological properties of 43 wood species from the tropical forests of Mexico (*Estudio promocional de 43 especies tropicales forestales Mexicanas*, SARH Mexico. D.F. 1983, 603 p.). This work enabled grouping poorly known wood species according to similarity of technological properties and end use, which was the basis for the transition from dominant, highly selective destructive felling of only some technologically exposed species (e.g. mahogany/caoba (*Swietenia macrophylla*)) and cedrela (*Cedrela odorata*)) to sustainable tropical forest management and the use of several wood species. Grouping of tree species on the basis of characteristics is an important contribution to the sustainable management of botanically very heterogeneous tropical forests, including the certification and labelling of forests. In the period between 1977 and 1988, Prof. Dr. Dr. h.c. Torelli visited Mexico nine times as a researcher or FAO expert, where he was an adviser to the Mexican government on tropical forest use for several years and in 1988 also the general coordinator of the international expert group of the FAO Tropical Forestry Action Program for Mexico. He has received several prestigious national and international awards and recognitions, including the prestigious Mexican National Forestry Award (Merito nacional forestal, 1986) which occupies a special place, as to date he is the only non-Mexican national to have received this. He was closely associated with the international community in wood science. He was a member of the organizing committee of the 18th International Union of Forestry Organization (IUFRO) World Congress, which took place in Ljubljana in 1986, where he was also the organizer of the satellite meeting of the International Society of Wood Anatomists (IAWA). For many years, he worked as a national representative in the EUREKA - Forest and wood industry and in the COST technical committee for forestry, wood science and technology and papermaking. He had close contacts with the Universität für Bodenkultur (BOKU) in Vienna, with the Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft in Hamburg (BFH) (now the Thünen Institute), Universität Hamburg, and Technische Universität Dresden, where he has

lectured frequently. In the memories of many generations of students, who had privilege to attend his lectures and complete their theses under his supervision, Prof. Dr. Dr. h.c. Nikolaj Torelli, remains an inspiring lecturer, known for his exceptional erudition in wood science, wood technology and forest management, who weaved anecdotes from the world of art and the invaluable experiences gained from his expeditions in the tropical regions of Africa and Mexico into his lectures in a witty and original way. Professor Emeritus, Professor Dr. Dr. h.c. Nikolaj Torelli is a personality committed to morality and ethics, an inspiring narrator, writer and discussion partner able to critically reflect on broad range of humanistic, social and scientific topics, reaching from classical music, painting, Mayan civilization, to modern trends in wood science, forest management and the actual challenges of climate crisis, to mention only some of them. He received the honorary title of Professor Emeritus in 2020, when he also celebrated a significant personal anniversary, and thus both his colleagues and alumni of the Department of Wood Science and Technology of Biotechnical Faculty sincerely congratulate him, and wish him good health and many creative years in the future.

VIRI

REFERENCES

Bibliografija - Dr. Nikolaj Torelli [01641] Osebna bibliografija za obdobje 1964-2019 - COBISS Kooperativni online bibliografski sistem, <http://splet02.izum.si/cobiss/bibliography?code=01641> (11. 12. 2020)

Teden univerze v Ljubljani, <https://www.uni-lj.si/tedenuniverze/> (11. 12. 2020)

Prof. dr. Lidija Zadnik Stirn je prejela prestižno nagrado „DONALD MICHIE - ALAN TURING“

Prof. Dr. Lidija Zadnik Stirn received the prestigious “Donald Michie - Alan Turing” award

Leon Oblak



Veliko je zaposlenih na ljubljanski univerzi, ki so z vsem srcem predani svojemu delu. Med temi pa nekateri še posebej izstopajo s svojim neusahljivim entuziazmom in se tudi v zrelih letih še vedno tako zavzeto posvečajo pedagoškemu, raziskovalnemu in strokovnemu delu, kot bi bili na začetku akademske kariere. S takim zanosom in navdušenjem je svoje delo do upokojitve opravljala tudi prof. dr. Lidija Zadnik Stirn. Ko se je pred leti upokojila, smo vsi, ki smo z njo sodelovali in jo dobro poznali, vedeli, da želi, predvsem pa, da je sposobna Biotehniški fakulteti in ljubljanski univerzi še veliko dati. In res se njene znanstvene in strokovne aktivnosti z upokojitvijo niso končale. Še naprej kot vabljen predavateljica nastopa na številnih mednarodnih konferencah, simpozijih in delavnicah s področja operacijskih raziskav, še naprej pomaga pri organizaciji mednarodnih konferenc, vodenju sekcij ter je članica programskih in organizacijskih odborov v Evropi, ZDA ter drugod po svetu. O njenem delu pričajo številna priznanja, ki jih je prejela.

Leta 2016 ji je takratni rektor podelil naziv zaslužna profesorica Univerze v Ljubljani, ki ga prejmejo tisti, ki so pomembno prispevali k razvoju znanstvenega ali umetniškega področja, ob tem pa

predano opravljali pedagoško in mentorsko delo. Listine zaslužnih profesorjev ne pomenijo le izraza zahvale Univerze, ampak tudi iskreno željo po nadaljnjem sodelovanju. Prof. dr. Lidija Zadnik Stirn to željo na najboljši možni način udejanja. Še naprej ostaja velika promotorka Biotehniške fakultete in Univerze v Ljubljani.

Konec leta 2018 je v prostorih nove Ekonomske fakultete (WU) na Dunaju, na slavnostni seji ob 40-letnici Avstrijskega društva za operacijske raziskave (ÖGOR), na katero je bila kot častna gostja povabljen, prejela naziv častne članice Avstrijskega društva za operacijske raziskave (ÖGOR). Avstrijci njenega dolgoletnega dela na področju operacijskih raziskav doma in v svetu ter njenega velikega prispevka k razvoju operacijskih raziskav na teoretičnem, aplikativnem in publicističnem področju, tako v interdisciplinarnem kot internacionalnem okolju, niso spregledali.

Zadnje v vrsti pomembnih priznanj pa je prestižna nagrada „DONALD MICHIE - ALAN TURING“ za izjemen prispevek k razvoju in promociji informacijske družbe, ki jo je prof. dr. Lidija Zadnik Stirn prejela za svoje življenjsko delo. Nagrada ji je bila podeljena oktobra 2020 na Inštitutu Jožef Stefan v okviru multikonference Informacijska družba (Information Society – IS). Na petdnevnem znanstvenem srečanju je okoli 160 raziskovalcev predstavilo svoje najnovejše raziskave in odkritja z različnih področij informacijske družbe. Spletne predstavitve v okviru samostojnih konferenc in delavnic se je udeležilo skoraj 300 obiskovalcev. Prof. dr. Lidija Zadnik Stirn je prva ženska, ki je prejela to nagrado in prva sodelavka Biotehniške fakultete, ki se je pridružila uglednim raziskovalcem in znanstvenikom, ki so doslej prejeli to prestižno priznanje, za katero je plaketo oblikoval Oskar Kogoj. Zaposleni na Biotehniški fakulteti smo zelo ponosni na našo kolegico in ji za nagrado iskreno čestitamo, pri nadaljnjem delu pa ji želimo še veliko uspehov.

There are many people at the University of Ljubljana who are wholeheartedly committed to their work. Some of them, however, stand out above all for their inexhaustible enthusiasm, and even in their more mature years still devote themselves with as much passion to their educational, scientific and professional work as they did at the beginning of their academic careers. One of these is Prof. Dr. Lidija Zadnik Stirn, who continued to work with full enthusiasm until her retirement. When she retired some years ago, everyone who had worked with her and knew her well, knew that she always maintained her interest and gave all she could to her work at the Biotechnical Faculty and the University of Ljubljana. More than that, her scientific and professional activities did not end with her retirement. She is still a guest lecturer at numerous international conferences, symposia and workshops in the field of operational research, continues to help organise international conferences, leads sections and is a member of program and organising committees in Europe, the USA and around the world. The numerous awards she has received are testimony to her work.

In 2016, the then Rector awarded her the title Professor Emerita of the University of Ljubljana, which is given to those who have made an important contribution to the development of science or art, while at the same time dedicating themselves to educational and mentoring work. The charter of Meritorious Professors is not only an expression of gratitude to the University, but also a sincere wish for further cooperation. Prof. Dr. Lidija Zadnik Stirn fulfils this wish in the best possible way, and remains a great supporter of the Biotechnical Faculty and the University of Ljubljana.

At the end of 2018, she was awarded the title of honorary member of Austrian Society for Operations Research at the Faculty of Economics (WU) in Vienna in a formal session on the occasion of the 40th anniversary of Austrian Society for Operations Research (ÖGOR), to which she was invited as guest of honour, and received the title of honorary member of the ÖGOR. The Austrians have not overlooked her many years of work in the field of Operations Research at home and abroad, and her major contribution to the development of the subject in theoretical, applied and journalistic fields, both in an interdisciplinary and international environment.

The last in a series of important awards is the prestigious "Donald Michie - Alan Turing" award for outstanding contributions to the development and promotion of the information society, which Prof. Dr. Lidija Zadnik Stirn received for her life's work. The award was presented to her in October 2020 at the Jožef Stefan Institute during the Multiconference Information Society (IS). During the five-day scientific conference, around 160 researchers presented their latest research and discoveries from various areas of the information society. The online presentations were attended by almost 300 visitors at individual conferences and workshops. Prof. Dr. Lidija Zadnik Stirn is the first woman to receive this award and the first employee of Biotechnical Faculty, joining the outstanding researchers and scientists who have received this prestigious prize, for which a plaque designed by Oskar Kogoj was produced. The staff of Biotechnical Faculty is very proud of our colleague, sincerely congratulate her on this award, and wish her every success in her future work. ●

Eli Keržič je dobitnica Jesenkove nagrade za najboljšo študentko magistrskega študija v letu 2019

Eli Keržič was awarded as the best M.Sc. student of the Biotechnical Faculty in 2019

Miha Humar, Viljem Vek

Eli Keržič, magistrica inženirka lesarstva, je prejela Jesenkovo nagrado kot najboljša študentka na magistrskih študijskih programih Biotehniške fakultete v letu 2019. Študijske obveznosti na študiju druge stopnje lesarstva (MSc) je opravila s povprečno oceno 9,94, ki je najvišja ocena na Biotehniški fakulteti v letu 2019.

Eli Keržič je z odliko zaključila diplomsko nalogo na univerzitetnem študiju 1. stopnje, odlično ocenjeno pa je bilo tudi njeno zaključno delo na magistrskem študijskem programu 2. stopnje z naslovom »Ekstraktivi v lesu debel, grč in vej bele jelke ter njihov fungicidni potencial«. Za magistrsko nalogo, ki jo je izdelala pod mentorstvom doc. dr. Viljema Veka, je Eli Keržič leta 2019 prejela fakultetno Prešernovo nagrado.

Magistrsko delo je bilo zasnovano in opravljeno na Katedri za kemijo lesa in drugih lignoceluloznih materialov na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani. Vsebina naloge je bila definirana v sodelovanju s partnerjem iz gospodarstva, podjetjem Ars Pharmae d.o.o. Raziskava je bila zasnovana na drevesih bele jelke (*Abies alba*), iz katerih je Eli izolirala vzorce lesa debela, grč in vej. Vzorce lesa je zmelala in jih nato ekstrahirala v sistemu za pospešeno ekstrakcijo. Ekstrakte je preiskala gravimetrično, spektrofotometrično in kromatografsko, ter določila njihov fungicidni in antioksidativni potencial. Rezultati raziskave so pokazali, da grče in veje vsebujejo največ hidrofilnih ekstraktivov, manj jedrovina, najmanj pa beljava. Največ fenolnih spojin je ekstrahirala iz delov grč, ki so bile vključene v beljavo, ter iz delov vej tik ob deblu.

Eli je dokazala, da so prevladujoče fenolne spojine v grčah jelke lignani. Ugotovila je, da izvlečki iz jelovine zavirajo rast gliv razkrojevalk lesa in izkazujejo velik antioksidativen potencial. Zaščitno funkcijo fenolnih ekstraktivov v lesu je pripisala njihovim bioaktivnim lastnostim, ob tem pa izpostavila, da je lahko tudi manj kakovosten les pomemben surovinski vir dragocenih naravnih učinkovin.



Eli Keržič, dobitnica Jesenkove nagrade za najboljšo študentko magistrskega študija v letu 2019. Foto: Željko Stevanič, IFP d.o.o.

Eli Keržič awarded as the best M.Sc. student of the Biotechnical Faculty in 2019. Photo: Željko Stevanič, IFP d.o.o.

Del rezultatov iz magistrskega dela je Eli Keržič s soavtorji objavila v naši reviji Les/Wood v članku z naslovom Optimization of accelerated solvent extraction (ASE) of silver fir wood (*Abies alba* Mill.). Eli Keržič se je leta 2019 vpisala na interdisciplinarni doktorski študijski program Bioznanosti, znanstveno področje Les in biokompoziti, ter se kot mlada raziskovalska zaposlila na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Eli Keržič, Master of Wood Science, received the Jesenko Award as the best student in the Master's programs of the Biotechnical Faculty in 2019. She completed her exams at the Master's level

(MSc) of Wood Science and Technology with the grade 9.94, which was the highest grade at the Faculty in 2019.

Eli Keržič completed her diploma thesis in the 1st (BSc) level university course with distinction, and her thesis in the 2nd (MSc) level master's course, with the title "Extracts in silver firs, branches and twigs of silver fir and their fungicidal potential", was also given excellent marks. For her master's thesis, which she wrote under the mentorship of Doc. Dr. Viljem Vek, Eli Keržič was awarded the Faculty's Prešeren Prize in 2019.

The master's thesis was designed and completed at the Chair of Chemistry of Wood and Other Lignocellulosic Materials at the Department of Wood Science and Technology of the Biotechnical Faculty of the University of Ljubljana. The content of the thesis was defined in cooperation with a partner from industry, the company Ars Pharmae d.o.o. The research was based on an investigation of Silver fir (*Abies alba*), from which Eli isolated wood samples from trunks, branches and bark. She ground the wood samples and then extracted them in an accelerated extraction system. She examined the extracts gravimetrically, spectrophotometrically and chromatographically

and determined their fungicidal and antioxidative potential. The research showed that branches and bark contained the most hydrophilic extracts, with less in heartwood and the least in sapwood. She extracted most of the phenolic compounds from the parts of the branches.

Eli Keržič proved that the predominant phenolic compounds in fir knots are lignans. She found that fir extracts inhibit the growth of wood-destroying fungi and have a great antioxidant potential. Eli attributed the protective function of phenolic extracts in wood to their bioactive properties, pointing out that even low-quality wood could be an important source of valuable natural active ingredients.

Some of the results of this master's thesis were published by Eli Keržič and co-authors in our journal *Les / Wood* in an article entitled "Optimization of accelerated solvent extraction (ASE) of silver fir wood (*Abies alba* Mill.)". In 2019 Eli Keržič enrolled in the interdisciplinary PhD program in Life Sciences, in the scientific field of Wood and Bio-composites. She is currently employed as a young researcher in the Department of Wood Science and Technology of the Biotechnical Faculty of the University of Ljubljana. ●

13. srečanje kluba alumnov Oddelka za lesarstvo BF UL

13th annual meeting of the alumni club of the Department of Wood Science and Technology BF UL

Katarina Čufar, Boštjan Lesar



Člani ALUMNI kluba Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani (OL BF UL) so se 26. 11. 2020 zbrali na tradicionalnem 13. srečanju. V okoliščinah pandemije covid 19 je bilo to hkrati tudi prvo srečanje alumnov, ki je potekalo preko spleta. Srečanja se je udeležilo več kot 45 udeleženk in udeležencev vseh generacij. Program je vseboval formalni del s kratkimi predstavitvami in neformalno spletno druženje.

Udeleženci so v okviru konferenčnega dela poročali o novostih in dogajanjih v zadnjem letu. Katarina Čufar in Boštjan Lesar sta kot vodji predstavila živahno dejavnost alumnov v okviru Univerze v Ljubljani, ki ima profesionalno platformo <https://alumniul.online/> preko katere se v klub lahko včlanijo vsi, ki so zaključili študij na Univerzi v Ljubljani. Organiziran je v sekcije, naša se imenuje »BF - Klub alumnov lesarstva« in ga podpira ter dopolnjuje sekcija ALUMNI klub Oddelka za lesarstvo v okviru Društva lesarjev Slovenije (DSL).

Vodenje DSL je v letu 2020 prevzel mag. Tomaž Kušar, zaposlen na Oddelku za lesarstvo, ki je na srečanju predstavil živahno delovanje društva.

Novosti na Oddelku za lesarstvo je predstavil prof. dr. Marko Petrič, novi prodekan za področje lesarstva za obdobje od 1. 10. 2020 do 30. 9. 2022. Marka Petriča naši alumni poznajo kot odličnega profesorja in znanstvenika, ki je bil v obdobju 1. 10. 2002 – 30. 9. 2004 namestnik prodekana, v obdobju od 1. 10. 2004 do 30. 9. 2010 pa kar tri mandate prodekan za področje lesarstva.

Na srečanju se je predstavila tudi generacija 1985 – 1990, ki letos praznuje 30. obletnico diplome. Z besedo jo je orisala mag. Majda Kanop, ravnateljica Srednje lesarske šole Ljubljana, kjer so vzgojili številne alumne, ki so uspešno nadaljevali in zaključili študij na naši fakulteti. V letu 1985 se je na univerzitetni študij lesarstva vpisalo okoli 60 študentk in študentov, do zaključka pa jih je prišlo 27. Danes jih 13 deluje v lesarski panogi, 3 v šolstvu, 11 pa na drugih področjih (inšpektorat, turizem, ministrstvo, občina, privat ...). Generacija je ostala povezana in se srečuje skoraj vsako leto, vsakič v drugi regiji. Tudi njihovo srečanje so v letu 2020 zaradi pandemije organizirali preko ZOOMa.

Alumen Robert Gomišček je predstavil novo kolekcijo YPSI chair, inovativnih in lepih izdelkov podjetja Linea r d.o.o., od ideje do trenutka, ko so pripravljeni za predstavitev na trgu.

V neformalnem delu je potekalo srečanje interesnih skupin po ločenih virtualnih prostorih. Udeleženci so bili najprej razdeljeni v skupine po izbrani povezovalni lastnosti, nato pa so med skupinami lahko prehajali. V majhnih skupinah so se razvile živahne razprave o preteklosti, sedanjosti in prihodnosti alumnov in stroke, izzivih študija in dela v razmerah pandemije, poslov in osebnih stikov. S pogovori smo osvežili stike, kar ohranja skupnost živo in aktivno. Druženje po skupinah je pokazalo, da je tudi video srečanje lahko zanimivo.

Srečanje so organizirale sodelavke in sodelavci Oddelka za lesarstvo (OL) v sodelovanju z Društvom lesarjev Slovenije, kamor je včlanjena večina alumen in alumnov. Poleg zgoraj omenjenih se posebej zahvaljujemo dr. Mateju Joštu in dr. Jožetu Kropivšku za odlično načrtovanje, izvedbo in tehnično podporo video konference. Hvala tudi dr. Davorju Kržišniku za neutrudno podporo v vseh fazah organizacije in izvedbe srečanja ter seveda vsem udeleženkam in udeležencem, ki so z dobro voljo pripomogli, da je srečanje uspelo.

V veliko pomoč delovanju kluba je stalna podpora strokovnih svetovalk dr. Tanje Potočnik Mesarič z Biotehniške fakultete (BF) in Barbare Baragater Tine Malenšek Kojić z Univerze v Ljubljani.

Upamo, da se kmalu spet srečamo, in to v živo.

Alumni of the Department of Wood Science and Technology of the Biotechnical Faculty, University of Ljubljana (OL BF UL) gathered on November 26, 2020 at the 13th traditional annual meeting. This was also the first online alumni meeting, due to the pandemic. The meeting was attended by more than 45 participants of all generations. The program included a formal part, with short presentations, as well as an informal part.

The participants reported on the most important news. Katarina Čufar and Boštjan Lesar, the leaders of the alumni, presented the lively activities of the club within the University of Ljubljana, which has a professional platform <https://alumniul.online/> through which all those who have completed their studies at the University can join. It is organized into sections, and ours is called "BF - Klub alumnov lesarstva", and is supported and supplemented by the ALUMNI club section of the professional association "Društvo lesarjev Slovenije" (DSL) <http://www.ditles.si/>. In 2020, the management of DSL was taken over by Mag. Tomaž Kušar, a staff member of the Department of Wood Science, who presented details of the activities of the association.

New developments at the Department of Wood Science were presented by Prof. Dr. Marko Petrič, the current vice-dean elected for the period 1.10.2020 to 30.9.2022. Many alumni know Marko Petrič as an excellent professor and scientist, who also led the department in the period 1.10.2004 - 30.9.2010.

The alumni of the generation 1985-1990, celebrating the 30th anniversary of graduation, were presented by Mag. Majda Kanop, the principal of the Secondary Carpenter School in Ljubljana, who helped educate many alumni who successfully continued and completed their studies at the OL BF. She reminded us that in 1985 about 60 students enrolled in the university study of Wood Science and Technology, and 27 of them successfully graduated. Today, 13 of them work in the Wood Science and Technology sector, three in education, and 11

in other fields (inspectors, tourism, ministries, municipalities, and private enterprises). The generation has remained connected and meets almost every year, each time in a different region of Slovenia, although their 2020 meeting was also organized as a video conference.

Robert Gomišček presented the Ypsi chair from the Linea-R d.o.o. He also introduced a collection of innovative and aesthetic products, taking us from the initial idea to the final product ready for presentation on the market.

The informal part was a meeting of stakeholders in virtual breakout rooms. The participants were first divided into groups, but afterwards they could move between them. These small groups provided an environment for lively discussions about the past, present, and future of alumni, and of Wood Science and Technology, the challenges of studying, teaching and business during the pandemic, as well as other issues. We thus refreshed many of our personal links, which help to keep the community alive and active.

Virtual socializing in groups showed that even video meetings can be interesting. The event was organized by the staff of the Department of Wood Science and Technology in cooperation with "Društvo lesarjev Slovenije". In addition to the above-mentioned colleagues, we especially thank Dr. Matej Jošt and Dr. Jože Kropivšek for their excellent technical support of the video conference. Thanks also to Dr. Davor Kržišnik for his tireless support in all phases of the organization and implementation, and of course to all participants in the meeting. We thank the professional advisors Dr. Tanja Potočnik Mesarič from the Biotechnical Faculty (BF), as well as Barbara Baraga and Tina Malenšek Kojić from the University of Ljubljana for their constant support with the activities of alumni club.

We all hope to meet again live very soon. ●

