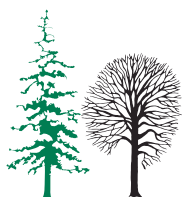




Silva  
Slovenica



*Zbornik povzetkov znanstvenega srečanja*

**GOZD IN LES**

*IDEJA, INVENCija, INOVACIJA*



[www.gozdis.si](http://www.gozdis.si)

[www.bf.uni-lj.si](http://www.bf.uni-lj.si)

Oblikovanje: akademik Hozo Dževad, Ljubljanska grafična šola



Silva  
Slovenica

**Izdajatelj / Publisher:**

Gozdarski inštitut Slovenije, založba Silva Slovenica, Ljubljana 2016 / Slovenian Forestry Institute, Silva Slovenica publishing centre, Ljubljana 2016

**Naslov / Title:**

Gozd in les: Ideja, invencija, inovacija (v gozdarstvu, lesarstvu in papirništvu): zbornik povzetkov znanstvenega srečanja, Ljubljana, 12. maj 2016 / Forest and Wood: Idea, Invention, Innovation (in Forestry, Wood Technology and Paper Industry): book of abstracts of the Scientific meeting Forest and Wood, Ljubljana, May 12th, 2016

**Glavna urednika / Editors-in-Chief:**

prof. dr. Hojka Kraigher, prof. dr. Miha Humar

**Programski svet posveta / Programme Board:**

prof. dr. Miha Humar, prof. dr. Hojka Kraigher, prof. dr. Tom Levanič, dr. Primož Simončič, prof. dr. Franc Pohleven, prof. dr. Franc Batič, doc. dr. Sergej Medved, dr. Tine Grebenc, prof. dr. Robert Brus, dr. Tanja Mrak, prof. dr. Marko Petrič, dr. Viljem Vek

**Tehnični urednik / Technical editor:**

dr. Peter Železnik

**Tisk / Print:**

Gozdarski inštitut Slovenije

**Naklada / Circulation:** 100 izvodov / 100 copies

**Cena / Price:** brezplačen / free

**Sofinanciranje / Co-financing:**

Izdajo zbornika je sofinanciral LIFEGENMON, financirajo finančni instrument Evropske unije LIFE (program za okolje in podnebne ukrepe) in nacionalni finančeri, Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano in Gozdarski inštitut Slovenije. The proceedings were co-financed by LIFEGENMON, financed by the EU LIFE, co-funded by national sources, in Slovenia by the Ministry of the Environment and Landscape Planning, Ministry for Agriculture, Forestry and Food, and the Slovenian Forestry Institute (the coordinating partner)

**Elektronski izvod / Electronic issue:**

DOI 10.20315/SilvaSlovenica.0001

# Uvodnik

## Gozd in les: Ideja, invencija, inovacija

**prof. dr. Miha Humar in prof. dr. Hojka Kraigher**

Gozdarski inštitut Slovenije in Oddelek za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani v sodelovanju z Oddelkom za gozdarstvo in obnovljive vire in Inštitutom za celulozo in papir v četrtek, 12. maja 2016, v Kosovelovi dvorani v Cankarjevem domu, organiziramo že sedmo tradicionalno znanstveno srečanje »Gozd in les«. Srečanje je nastalo kot pobuda dveh programskih skupin, da omogočita izmenjavo znanja med sorodnimi inštitucijami in se medsebojno povežeta. Znanstveno srečanje, namenjeno predvsem predstavitvam mladih in mlajših znanstvenikov, je v tem letu naslovljeno: »GOZD in LES: Ideja, inovacija in invencija« (v gozdarstvu, lesarstvu in papirništvu).

Čisto in zdravo okolje, ohranjena biotska raznovrstnost in naravni viri so zabeleženi kot izhodiščne prednosti v Strategiji pametne specializacije Slovenije; vse so tesno navezane na okoli 60 % gozdnatost Slovenije. Zaradi tradicionalno sonaravno in trajnostno usmerjenega in predpisanega gospodarjenja so gozdovi večinoma dobro ohranjeni, v kar 87 % gozdov je dejanska vegetacija enaka ali močno približana pričakovani zastopanosti vrst. Kljub dolgoletni tradiciji sonaravnega gospodarjenja z gozdom in rabe lesa pa so gozdove v zadnjih letih prizadele naravne ujme velikega obsega, žled 2014 in gradacije podlubnikov v izrazito sušnem in toplem naslednjem letu. Problemi vse pogostejšega pojavljanja ekstremnih vremenskih razmer še potencirajo probleme nazadovanja lesne panoge v prvem dvajsetletju po osamosvojitvi. Zato je pomembno 'na ogled postaviti' ideje, ki prispevajo k ohranjanju in trajnem razvoju gozdov z vsemi njihovimi funkcijami, ter podpreti inovativne pristope, ki prispevajo k 'zdravi rabi' lesa. Pri tem je zlasti pomembna komunikacija – prenos informacij med znanstveniki, inovativnimi idejami mladih raziskovalcev, ter gospodarstvom - pridobivanjem informacij o potrebah tehnologij ter sistemov gospodarjenja z gozdom in lesom.

Ideje, inovacije in invencije so na področju gozdarstva, lesarstva in papirništva premalo poudarjene, zato letošnje znanstveno srečanje namenjamo pregledu pobud, znanstvenih izsledkov in možnosti, kot jih razvijajo in vidijo predvsem naši mladi in mlajši raziskovalci.

Posvet letos podpira in prispeva k projektu LIFEGENMON - razvoj sistema genetskega monitoringa gozdov, v okviru in za potrebe katerega je nastal tudi eden od prispevkov srečanja na temo razvoja mehanske roke za vzorčenje.

# RESEARCH-BASED INNOVATION - A GATEWAY TO GREEN SUSTAINABLE DEVELOPMENT

**Igor Emri**

Slovenska akademija znanosti in umetnosti, Novi trg 3, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija

Science Europe wants to boost the societal value of basic research by introducing the »research-based innovation«<sup>1</sup>. Researchers should play a crucial role in innovation, not as entrepreneurs or business persons, but as contributors of knowledge. To achieve this, we need a strong interface between research and business, government and civil society. The contribution of researchers is at its greatest when they are empowered to explore the societal value of their work. Therefore, excellence-focused research organizations and researchers should take a more active role in shaping the debate on the societal value of research. Research-based innovation capacities are crucial for the use of knowledge to foster positive change in industry, governments and civil society.

Research-based innovation is an attempt to introduce new services, products or processes in companies, governments or civil society actors by relying on access to knowledge acquired through conducting research. Research-based innovation creates societal value, notably economic value. It strengthens businesses and is crucial to the appreciation of science by the public. Excellence-focused researchers also benefit from synergies between their work and technological and social developments: they have access to richer data and experiences as well as to better tools. Research based innovation should be apprehended as a win-win proposition that benefits researchers, businesses and society at large. The goal of creating a win-win research-based innovation culture is timely; it resonates with current political discussions and responds to a desire by the research community to be empowered when engaging in innovation.

Policy makers, including research policy makers, should therefore engage with research-based innovation. To support research-based innovation capacities, the Science Europe Opinion Paper<sup>1</sup> recommends focusing on »innovation communities« that bring together researchers and business persons around a shared goal connected to a societal need.

An innovation community is not a specific institutional entity, but rather a model that reflects the dynamics of research-based innovation:

- Researchers explore knowledge; business persons explore market needs.
- The boundary between researchers and business persons should not be blurred in innovation communities. Each brings different skills and requires different support and incentives. Researchers should not be required to become entrepreneurs; similarly, business persons should not be given academic-type funding or contracts.
- Innovation communities are extremely diverse, in terms of, for example, size, duration and structure. Research-based innovation is driven from the bottom up and diversity should be encouraged.
- Innovation communities empower researchers and business persons by promoting a relationship based on trust and knowledge-sharing. Research-based innovation is not limited to companies and business persons; it also takes place in other »markets«, where »business persons« may be civil servants or members of civil society.

# REMOTE SENSING IN FOREST HEALTH MONITORING

Sylwia A. Nasilowska\*<sup>1</sup>, Mariusz Kacprzak<sup>1</sup>, Jan Kotlarz<sup>1</sup>, Alicja Rynkiewicz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Remote Sensing Division, Institute of Aviation, al. Krakowska 110/11402-256 Warsaw, Poland

**Ključne besede:** daljinsko zaznavanje, vegetacijski indikatorji, zdravje gozdov

Keywords: Remote Sensing, vegetation indices, forest health

Monitoring and quantitative measuring changes in forest habitats is a great need in up to date time, due to the increased air pollution, climate changes, trees diseases or urbanization. Remote Sensing provide a wide range of methods for measuring of forest type, structure, condition or health. To assess the extent of last mentioned vegetation indices are developed, described and used with good effect in many studies.

During HESOFF project set of aerial and satellite Landsat-8 data were acquired, over choosen oak forest in Wielkopolska region in Poland. Selected indices were calculated to show the changes in forest state and thus indirectly its health. Data were gathered in 2013, 2014 and 2015. In this period few factors which could affect health conditions of trees were observed, in addition in the summer of 2015 there was a drought. Lack of water have double effect. Firstly water stress of vegetation could appear. Secondly the defoliation and the extent of Phytophthora genus disease (Sudden Oak Death) is growing.

Following indices for Landsat scenes were calculated:

- 1)** Chlorophyll concentration indices: GNDVI – Green Normalized Difference Vegetation Index.
- 2)** Vegetation vitality indices: NDVI – Normalized Difference Vegetation Index; SR – Simple Ratio; EVI – Enhanced Vegetation Index; MSAVI – Modified Modified Soil-adjusted Vegetation Index
- 3)** Water content indices: NDWI – Normalized Difference Water Index; MSI – Moisture Stress Index; NDMI – Normalized Difference Moisture Index
- 4)** Fire risk indices: NBR - Normalized Burn Ratio; NBR2 - Normalized Burn Ratio2
- 5)** LST – Land Surface Temperature

The research proves that remote sensing vegetation indexes are valuable in forest health monitoring in time and space.

## Aknowledgments

The research was developed within the HESOFF project: “Evaluation of the health state of forests and an effect of phosphite treatments with the use of photovoltaic SLE UAV”

# RAZVOJ BREZPILOTNEGA SISTEMA ZA VZORČENJE IZ DREVESNIH KROŠENJ

**Marko Bajc\*<sup>1</sup>, Jernej Brezovar<sup>2</sup>, Domen Finžgar<sup>1</sup>, Andraž Kladnik<sup>2</sup>, Rok Capuder<sup>2</sup>, Hojka Kraigher<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana

<sup>2</sup>Zavod 404, Jamova cesta 80, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

**Ključne besede:** brezpilotni letalnik, vzorčenje drevesnih krošenj, patent, drone, robotska roka, daljinsko upravljanje, EUFORINNO

Vzorčenje v nivoju drevesnih krošenj je pogosto uporabljena metoda v gozdarskem raziskovalnem in strokovnem delu, pri monitoringu stanja gozdnega drevja in pri gozdnem semenarstvu. Največkrat se takšno vzorčenje opravlja s plezanjem na drevo, odstrelom veje z drevesa s strelnim orožjem ali posekom drevesa s katerega je potrebno odvzeti želeni vzorec. Pomanjkljivost plezanja je predvsem razmeroma visoka cena najema plezalca in visoka poraba časa, hkrati pa je za plezalca delo tudi zelo nevarno. Odstrel predstavlja invazivno in naključno ter za vzorčevalca in gozdno bioto potencialno nevarno metodo vzorčenja, posek pa ne omogoča ponovitve vzorčenja na istih osebkih in je v večini primerov povsem nesprejemljiv. Z razvojem tehnologije brezpilotnih letalnikov se je na Gozdarskem inštitutu Slovenije (GIS) porodila ideja za razvoj daljinsko upravljane naprave za odvzem vzorcev iz drevesnih krošenj.

Takšen pristop za vzorčenje rastlinskega materiala v gozdarstvu ni povsem nov. Po našem vedenju je prvo takšno napravo skonstruiral Oddelek za gozdno

mikologijo in patologijo Univerze v Berkelyu. (<https://nature.berkeley.edu/garbelottowp/?p=1801>, dostopno 3.5.2016). Njihova naprava obsega komercialno dostopen model brezpilotnega letalnika DJI Phantom 2 z ravnim izvodilom, na koncu katerega je ostro kljukasto rezilo. Upravljalec poskrbi, da se kljukasto rezilo pravilno zatakne za vejo, nato pa jo fizično, s premikanjem letalnika vzvratno, poizkuša odrezati z drevesa. Vzorčenje se pri taki napravi še vedno izvaja relativno naključno, rezanje ni dovolj natančno. Poleg tega tovrstno vzorčenje ni primerno za delo v strnjem gozdu, saj se v trenutku, ko rezilo prereže vejo, odrezana veja sprosti od krošnje in vlečna sila povzroči, da se brezpilotni letalnik nekontrolirano premakne v smeri vlečenja in lahko trči v sosednjo krošnjo. Pomanjkljivost je tudi neobstojevarovalnega mehanizma, ki bi v primeru, da se rezilo zatakne v predebeli veji, omogočil avtomatski odklop rezila od brezpilotnega letalnika.

Z namenom odprave vseh naštetih pomanjkljivosti je Oddelek za gozdno fiziologijo in genetiko na GIS v so-

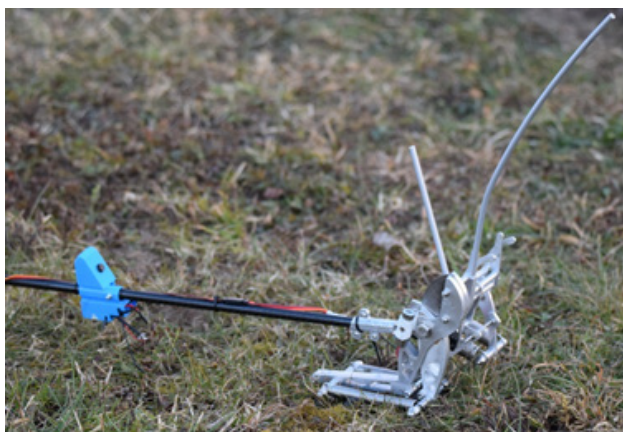


**Slika 1: Prototip sistema za vzorčenje v drevesnih krošnjah Lucanus, pritrjen na brezpilotnem letalniku z osmimi rotorji na osnovi šasije Sky Hero Spyder X8 in z DJI-jevimi autopilotom.**



delovanju z Zavodom 404 v okviru projekta EUFORINNO pripravil načrte za napravo za vzorčenje drevesnih krošenj z brezpilotnim letalnikom z imenom Lucanus (<http://lucanus.gozdis.si/>, dostopno 3.5.2016).

Lucanus je na letalnik pritrjena daljinsko upravljana mehanična roka (Slika 2), ki sestoji iz treh glavnih podsistemov. Prvi del predstavlja daljinsko proženi varovalni mehanizem, ki ob kritičnih dogodkih, ki ogrozijo letalno napravo (npr. če se roka zatakne v vejah), omogoča odklop robotske roke z naprave. Drugi del je elektronski sistem za daljinsko upravljanje in nadzor preko sistema kamer in laserjev na letalniku in roki. Senzorji omogočajo natančno pozicioniranje v krošnji in pozicijo reza na veji. Zadnji del robotske roke (orodje) predstavlja rezilo s prijemalom. Prijemalo zagotovi, da veja po rezu ne zdrsne z roke. Silo, potrebno za rezanje in prijem veje, zagotavlja sistem vzmeti. Upravljalec vodi letalnik in odvzame vzorec s pomočjo kamere na krovu letalnika, ki prikazuje sliko na zaslonu, nameščenem na daljinskem upravljalniku in s tem omogoča delovanje



**Slika 2: Prototip mehanske roke.**

tudi na razdaljah, pri katerih upravljalec ne more upravljati sistema zgolj s prostim očesom.

Sistem Lucanus je trenutno nameščen na brezpilotnem letalniku z osmimi rotorji na osnovi šasije Sky Hero Spyder X8 in z DJI-jevim avtopilotom. Brezpilotni letalnik je bil sestavljen iz komercialno dostopnih komponent in ga odlikujejo visoka stabilnost in odzivnost ter velika nosilnost, ki znaša približno 7 kg. Takšna rešitev omogoča nabiranje debelejših vej (tudi s plodovi) in v zahtevnejših letalnih pogojih. Pregled prednosti in slabosti obeh sistemov je naveden v Preglednici 1.

Takšno rešitev želi razvojna ekipa pravno zaščititi. Lucanus čaka na odločitev glede patentne prijave, ki je bila leta 2015 vložena tako pri Uradu RS za intelektualno lastnino (prijava št. P-201500288), kot tudi pri Evropskem patentnem uradu (prijava št. EP16150006.1).

Izdelan prototip Lucanusa je uspešno prestal prvo javno predstavitev na EUFORINNO delavnici o gozdnem genetskem monitoringu in genskih bankah, ki je potekala 25. januarja 2016 v Ljubljani (Slika 3). Kljub temu, da Lucanus že omogoča vzorčenje v drevesnih krošnjah in ga na GIS že planiramo uporabiti v tekočih in bodočih projektih, je možnosti za izboljšavo prototipa še veliko. Naslednje faze razvoja bodo, ob pridobitvi novih razvojnih sredstev, zajemale artikulacijo orodja z rezilom in prijemalom v treh oseh, nastavitve naklona roke pod poljubnim kotom in razvoj sistema za napajanje vzmeti v zraku. Ravno tako si razvojna ekipa želi čimprej integrirati RTK (real time kinematic) GPS sistem, ki bi omogočil izjemno natančnost pozicioniranja in izboljšano stabilnost letalnika. Z uporabo ustreznega avtopilota bi tako lahko zgolj s pritiskom gumba letalnik poslali globoko v gozdni sesto nad točno določeno drevo, potem prevzeli kontrolo nad njim in opravili rez.

**Preglednica 1 Primerjava dveh prototipov za vzorčenje drevesnih krošenj z brezpilotnimi letalniki.**

	<b>Lucanus</b>	<b>Berkeley »Sampling drone«</b>
<b>Nosilnost</b>	Cca. 7 kg	1,3 kg (tovarniška specifikacija)
<b>Naključnost vzorčenj</b>	Nenaključno	Naključno
<b>vzorec</b>	Vejice do 1,5 cm	Tanjše veje
<b>Število vzorčenj na let</b>	1 poizkus	1 uspešen rez, poljubno število poizkusov
<b>Vzorčenje v sestoji</b>	Da	Ne
<b>Varnostni mehanizem za odklop rezalne roke</b>	Da	Ne
<b>Način reza</b>	Škarje na vzmet	Fizično s premikanjem letalnika v smeri reza
<b>Lokacija vzorčenja</b>	Vrh krošnje ali stranske veje	Stranske veje
<b>Prijemalo za vejico</b>	Da	Ne



**Slika 3** Prva javna predstavitev sistema Lucanus je potekala v Ljubljani.

---

**Viri:**

- DJI Phantom 2 fact sheet. ([http://download.dji-innovations.com/downloads/press/Phantom\\_2\\_Fact\\_Sheet.pdf](http://download.dji-innovations.com/downloads/press/Phantom_2_Fact_Sheet.pdf), dostopno 3. 5. 2016)
- Sistem Berkley »Drone Sampler« (<https://nature.berkeley.edu/garbelottowp/?p=1801>, dostopno 3.5.2016)
- Sistem Lucanus. (<http://lucanus.gozdis.si/>, dostopno 3.5.2016).



# FUNKCIONALIZACIJA NANOFIBRILIRANE CELULOZE S TEMPO REAGENTOM

## FUNCTIONALIZATION OF NANOFIBRILATED CELLULOSE WITH THE TEMPO REAGENT

**Jaka Levanič<sup>1</sup>, Ida Poljanšek\*<sup>1</sup>, Primož Oven<sup>1</sup>**

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

**Ključne besede:** celuloza, kemična modifikacija, naravni polimer

### Uvod

Slovenija je z gozdom relativno bogata država in v prihodnosti bi lahko lesna industrija (zopet) predstavljala pomemben delež v slovenskem gospodarstvu. V času, ko je bolj pomembna visoka dodana vrednost, kot pa velika količina izdelkov, lahko z inovativnimi postopki proizvajamo izdelke z visoko dodano vrednostjo iz surovine, ki je v Sloveniji na voljo v velikih količinah. Ena skupina teh produktov je tako imenovana nanoceluloza (celulozne nanofibrile in celulozni nanokristali). Nanoceluloza predstavlja inovativen produkt, ki ga lahko pridobivamo iz različnih lignoceluloznih materialov. Uporabnost nanoceluloze je mnogoteri, od prehrane do kompozitov z odličnimi mehanskimi lastnostmi (Moon, 2011). V sklopu raziskave smo preučili možnost uporabe TEMPO oksidiranih celuloznih nanofibril za proizvodnjo novega, okolju prijaznejšega polimera, ki bi potencialno lahko zamenjal, trenutno bolj uveljavljene sintetične polimere, temelječe na nafti in zemeljskem plinu.

### Materiali in metode

Celulozna vlakna, katerih proizvodnja je vzpostavljena in okolju prijazna, smo modificirali z uporabo (2,2,6,6-tetrametilpiperidin-1-) oksidant (TEMPO) radikala. Na površino celuloznih vlaken smo uvedli karboksilne funkcionalne skupine, ki naredijo celulozo bolj reaktivno in primerno za nadaljnjo kemično modifikacijo (Isogai, 2011). Poleg uvedbe novih funkcionalnih skupin, je postopek kemične modifikacije s TEMPO reagentom omogočil tudi lažjo proizvodnjo celuloznih nanofibril, saj TEMPO reagent agresivno deluje na celulozno strukturo in omogoči lažjo mehansko razgradnjo, kar bistveno zmanjša porabo energije v postopku mehanske obdelave. V osnovi je postopek TEMPO oksidacije tudi okolju prijazen, saj je moč

reagente, ki jih uporabljamo za izvedbo modifikacije, ponovno pridobiti iz reakcijske zmesi in jih ponovno uporabiti. Celotna reakcija je potekala v vodi brez prisotnosti organskih topil. Modificirana celulozna vlakna smo z vakuumsko filtracijo ločili od reakcijske zmesi in sprali z vodo. Filtrat prvega spiranja se shrani, saj vsebuje velik delež TEMPO radikala. Filtrat drugega in tretjega spiranja vsebuje le sledove reagentov TEMPO oksidacije in jih lahko varno odstranimo. Po spiranju smo iz modificiranih vlaken pripravili razredčeno suspenzijo v vodi, to suspenzijo nato mehansko obdelali z mešalom, ki ustvarja visoke strižne sile in z ultrazvokom. Končni produkt mehanske obdelave so bile TEMPO oksidirane celulozne nanofibrile. Suspenzija TEMPO oksidiranih celuloznih nanofibril se je pri normalnih pogojih obnašala zelo drugače, kot suspenzija celuloznih vlaken pri istih pogojih in isti koncentraciji (1-5% suhe snovi v suspenziji). Viskoznost suspenzije TEMPO oksidiranih nanofibril se je močno povečala in prešla v gel stanje. Za potrebe kemične modifikacije tega produkta, smo morali iz njega najprej odstraniti vso vodo, saj le ta inhibira proces cepljenja poliol polietra na celulozno verigo. Za cepljenje poliol polietra na oksidirano celulozno verigo smo izbrali modificiran postopek Steiglicheve esterifikacije v kloriranem organskem topilu (Moore, 1990). Proces esterifikacije poteka med dvema funkcionalnima skupinama, med alkoholom (poliol polietar) in karboksilno skupino (TEMPO oksidirana celuloza), produkt reakcije je poleg estra tudi voda, ki jo moramo odstraniti, saj močno zmanjša izkoristek reakcije. Reakcijo smo vodili 24 ur pri normalnih pogojih in blagem mešanju s čimer smo skušali zagotoviti kar se da velik izkoristek reakcije, torej čim večji delež cepljenega poliol polietra na celulozno verigo.

## Rezultati

Z opisanim postopkom smo uspešno sintetizirali ester TEMPO oksidirane celuloze in polioli polietra. Končni produkt smo analizirali z različnimi metodami s katerimi smo dokazali uspeh reakcije cepljenja in ovrednotili nastali ester. IR spektroskopija je pokazala nastanek estrske vezi in zmanjšanje koncentracije karboksilnih skupin na TEMPO oksidirani celulozi. Vse produkte, tako ester kot tudi vmesne produkte (celuloza, TEMPO oksidirana celuloza) smo podvrgli termičnim analizam (diferenčna dinamična kalorimetrija in termo gravimetrična analiza) s katerimi smo ugotavljali termične lastnosti materialov. Te analize so pokazale, da se je termična obstojnost materialov bistveno spremenila - z vsakim korakom modifikacije smo znižali temperaturo razpada materiala. Hkrati pa smo ugotovili, da sam proces razpada ostane relativno podoben pri vseh produktih. TEMPO oksidirana celuloza predstavlja obetavno surovino za nadaljnjo funkcionalizacijo. V prihodnje bomo namesto umetnega poliola uporabili naravne poliole in nadaljevali raziskave v smeri razvoja naravnega biopolimera, ki bo temeljil na celulozi in naravnih poliolihi.

---

## Viri:

- Isogai A., Saito T., Fukuzumi H. 2011. TEMPO - oxidized cellulose nanofibers. *Nanoscale*, 3, 71 – 85
- Moon R. J., Martini A., Nairn J., Simonsen J., Youngblood J. 2011. Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, 40, 3941 – 3994
- Moore J. S., Stupp S. I. 1990. Room temperature polyesterification. *Macromolecules*, 23, No. 1: 65 - 70

## Zahvala

Raziskava je nastala v okviru programske skupine P4-0015, ki jo finančno podpira ARRS.

# BIOTEHNOLOGIJA V PAPIRNIŠTVU: UČINKOVITOST UPORABE ENCIMOV

M. Sežun\*<sup>1</sup>, M. Mešl<sup>1</sup>, J. Zule<sup>1</sup>, G. Lavric<sup>1</sup>, A. Gregori<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Inštitut za celulozo in papir, Bogišičeva ulica 8, 1000 Ljubljana, Slovenija

<sup>2</sup>Mycomedica d.o.o., Podkoren 72, 4280 Kranjska Gora, Slovenija

**Ključne besede:** biotehnologija, glive bele trahnobe, encimi, papirna industrija

## Uvod

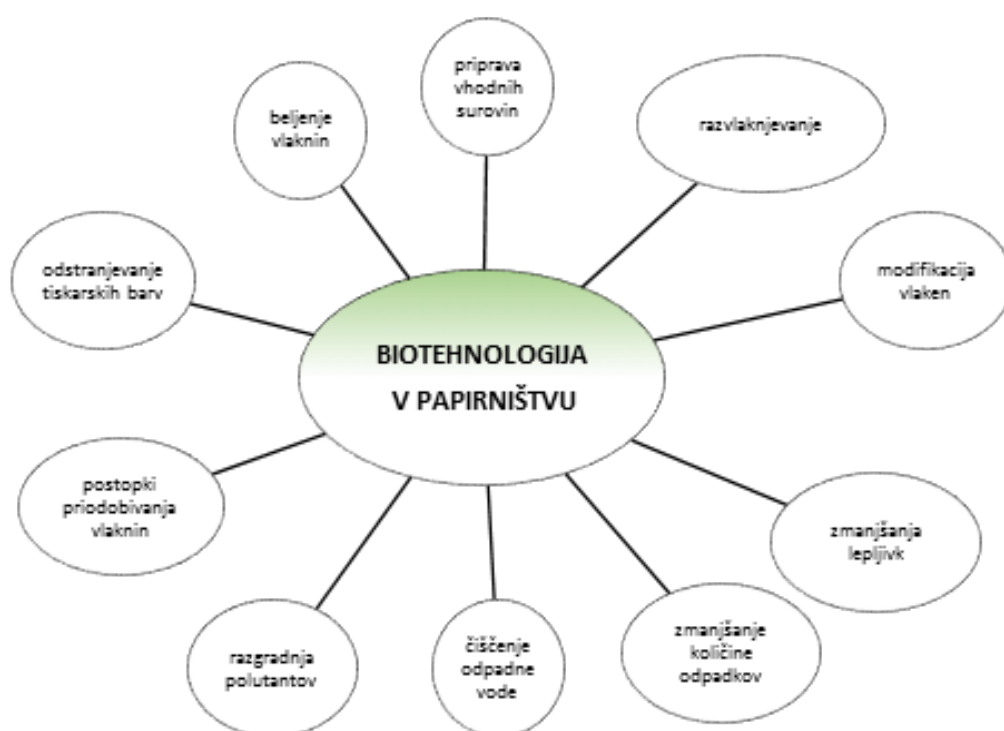
Papirna industrija je dobro znana po veliki porabi energije in kemikalij in posledičnih negativnih vplivih na okolje. Ukrepi za zmanjšanje vplivov na okolje so v papirni industriji še prav posebej dobrodošli in zato igra biotehnologija v papirništvu izredno veliko vlogo. Biotehnologija v papirništvu zajema predvsem: več specifičnih reakcij, uporabo okolju prijaznih tehnologij, ukrepe za zmanjšanje porabe energije, čim večji izplen vhodnih papirnih surovin, zmanjšanje okoljske problematike, izboljšanje lastnosti vlaken, povečanje stopnje recikliranja papirja,... V zadnjih letih v papirniški industriji opazimo trend porasta vpeljave različnih biotehnoloških pristopov v smislu izboljšanja procesov, predvsem pa z namenom zmanjšanja vplivov na okolje.

Glede na to, da je biotehnologija veda, ki uporablja bio-

loške pristope npr. uporaba mikroorganizmov ter njihovi produkti, je na področju biotehnologije za papirništvo znana uporaba encimov.

Glive bele lesne trahnobe učinkovito razgrajujejo lignocelulozne materiale, zaradi sinteze hidrolitičnih encimov (celulaze in hemicelulaze) in edinstvene sestave oksidativnih encimov, ki razgrajujejo lignin do nizkomolekularnih sestavin. Glive bele trahnobe izločajo ekstracelularne encime (mangan peroksidaza, lignin peroksidaza in lakaza), poleg teh pa sodelujejo pri razgradnji lignina tudi številni drugi encimi; glioksal oksidaza, aril alkohol oksidaza, veratril oksidaza, oksalat dekarboksilaza, NAD odvisna formiat dehidrogenaza in p450 monooksigenaza (Hatakka, 1994; Ander in Marzullo, 1997; Asgher in sod., 2008). Uporabo celulaz uvrščamo med pomembne biotehnološke aplikacije, za kate

**Slika 1: Biotehnologija v papirništvu**



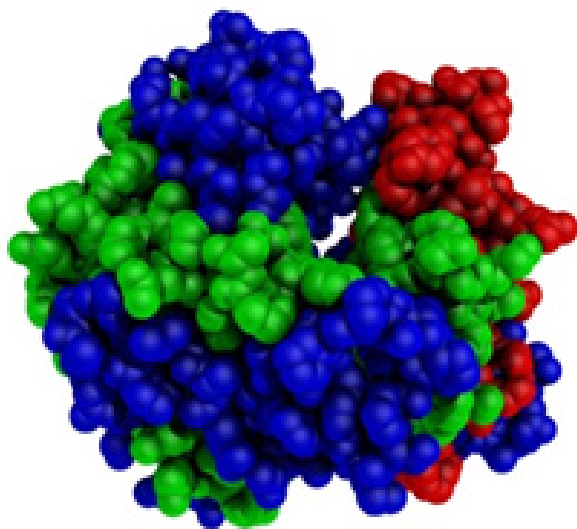
## Uvod

Papirna industrija je dobro znana po veliki porabi energije in kemikalij in posledičnih negativnih vplivih na okolje. Ukrepi za zmanjšanje vplivov na okolje so v papirni industriji še prav posebej dobrodošli in zato igra biotehnologija v papirništvu izredno veliko vlogo. Biotehnologija v papirništvu zajema predvsem: več specifičnih reakcij, uporabo okolju prijaznih tehnologij, ukrepe za zmanjšanje porabe energije, čim večji izplen vhodnih papirnih surovin, zmanjšanje okoljske problematike, izboljšanje lastnosti vlaken, povečanje stopnje recikliranja papirja, ... V zadnjih letih v papirniški industriji opazimo trend porasta vpeljave različnih biotehnoloških pristopov v smislu izboljšanja procesov, predvsem pa z namenom zmanjšanja vplivov na okolje.

Glede na to, da je biotehnologija veda, ki uporablja biološke pristope npr. uporaba mikroorganizmov ter njihovi produktov, je na področju biotehnologije za papirništvo znana uporaba encimov.

Glive bele lesne trohnobe učinkovito razgrajujejo lignocelulozne materiale, zaradi sinteze hidrolitičnih encimov (celulaze in hemicelulaze) in edinstvene sestave

**Slika 2: Struktura encima celulaza ([http://www.cheme.caltech.edu/groups/fha/old\\_website\\_2010.6.25/cellulase2.jpg](http://www.cheme.caltech.edu/groups/fha/old_website_2010.6.25/cellulase2.jpg))**



oksidativnih encimov, ki razgrajujejo lignin do nizkomolekularnih sestavin. Glive bele trohnobe izločajo ekstracelularne encime (mangan peroksidaza, lignin peroksidaza in lakaza), poleg teh pa sodelujejo pri razgradnji lignina tudi številni drugi encimi; glioksal oksidaza, aril alkohol oksidaza, veratril oksidaza, oksalat dekarboksilaza, NAD odvisna formiat dehidrogenaza in p450 monooksigenaza (Hatakka, 1994; Ander in Marzullo, 1997; Asgher in sod., 2008). Uporabo celulaz uvrščamo med pomembne biotehnološke aplikacije, za katere je značilno, da jih sintetizirajo številne glive in različne bakterije na celuloznih materialih (Sang-Mok, 2001).

Glive bele trohnobe lahko proizvajajo različne vrste encimov, kar je odvisno od njihove genetske zasnove in rastnih pogojev (Lamar, 1992; Vyas in sod., 1994). Glive bele trohnobe se lahko uporabljajo v lesni in papirni industriji v procesih delignifikacije ter za proizvodnjo biogoriv (bioetanola in bioplina), bioplastike, farmacevtskih izdelkov in encimov (Tišma in sod., 2010). Mnogo postopkov obdelave z encimi je že uveljavljenih in se že redno uporablja v industrijskih procesih (Šinkovec, 2012).

## Uporaba encimov v procesu papirništva

Encimi so proteini ali proteinski kompleksi, ki katalizirajo biokemične reakcije v živih ali neživih celicah, kar pomeni, da uravnavajo hitrost ali smer teh reakcij, pri čemer se sami ne porabljajo in se ne spremenijo. Hitrost in smer reakcije se pospeši z znižanjem aktivacijske energije med začetnim reaktantom in pretvorbo v produkte. Kot katalizatorji so specifični, kar pomeni, da vsak encim deluje le na določene substrate ali pospešuje samo eno reakcijo (Boyer, 2005).

## Zgodovina uporabe encimov v papirništvu

Encime so v papirništvu prvič uporabili že v letu 1986. V tistem obdobju so se encimi uporabljali še v manjši meri, so pa tedanji rezultati predstavljali izhodišče za vse nadaljnje raziskave. Na začetku so se encimi uporabljali predvsem za izboljšanje učinkovitosti mletjavnih surovin, kasneje pa tudi kot dodatek pri beljenju vlaken. Številne aplikacije encimov v papirni industriji so še vedno na razvojni stopnji, veliko pa jih je že vpeljanih in predstavljajo velik doprinos pri doseganju procesnih ciljev. Trenutno je eden izmed najbolj po-

**Tabela 1: Najpogosteje uporabljene vrste encimov in njihova uporaba (Tolan in Collins, 2004; Windsten in Kandelbauer, 2008; Bajpai, 2012; Fillat in sod., 2015)**

Encim	Delovanje	Področje uporabe
celulaza	razgradnja celuloze	izboljšanje lastnosti nekaterih vlaknin, izboljšanje učinka mletja, povišanje hitrosti delovanja papirnega stroja, pomoč pri beljenju in razčrniljenju papirja,
ksilanaza	razgradnja ksilana	učinkovitejše odstranjevanje lignina, predbeljenje celuloznih vlaken, zmanjšana poraba belilnih sredstev, povečanje čistosti surove celulozne vlaknine, razčrniljenje (deinking)
lakaza	razgradnja lignina	uporaba pri bioloških postopkih pridobivanja mehanskih in kemijskih vlaknin, razbarvanje fleksografskih tiskarskih barv
lipaza	razgradnja maščob in olj	učinkovitejše odstranjevanje tiskarskih barv na osnovi rastlinskih olj

membnih ravno uporaba encimov za beljenje papirne kaše. Ksilanaza se je za ta namen izkazala kot najučinkovitejša in jo tako uporabljajo v številnih papirnicah po vsem svetu. Tovrstna tehnologija je bila uspešno vpeljana v izjemno kratkem času (nekaj let). V začetku devetdesetih let prejšnjega stoletja so prvič uporabili lipazo za odstranjevanje lepljivih oblog. Lakaza se že dalj časa uporablja v procesu razčrniljenja, poleg omenjenih aplikacij, pa se že dolgo uporabljajo tudi ksilanaze za odstranjevanje hemiceluloze ksilana (Bajpai, 1999).

V procesu proizvodnje papirja v naprednejših papirnicah igrajo encimi izredno veliko vlogo. Uporabljajo se v mnogih procesih, žal pa predstavljajo tudi kar velik proizvodni strošek, kar je ena izmed glavnih pomanjklivosti.

### **Prednosti uporabe encimov v papirništvu**

V postopku razčrniljenja velja uporaba encimov za okolju prijazno alternativo oz. dopolnilo konvencionalnemu kemijskemu razčrniljenju (odstranjevanju tiskarske barve in nečistoč) v proizvodnji recikliranega papirja. Encimi pripomorejo k manjši porabi kemikalij, s čimer se znižajo proizvodni stroški in obremenitev okolja. Med take encime prištevamo predvsem celulaze, hemicelulaze, pektinaze, amilaze, lipaze, esteraze in lakaze. Za uspešno razčrniljenje s pomočjo encimov je bistveno optimiranje delovnih pogojev. Kljub temu, da encimatski postopek razčrniljenja predstavlja velik potencial, pa bodo zagotovo potrebne nadaljnje raziskave na tem področju za še učinkovitejše delo (Bajpai, 2014).

Med najpomembnejše pozitivne učinke uporabe enci-

mov prištevamo boljše odvodnjavanje, boljše mehanske in optične lastnosti papirja izdelanega iz encimsko obdelanih vlaken. Uporaba encimov lahko med drugim zmanjša količino energije, potrebno za mletje svežih celuloznih vlaken. So pa ob uporabi encimov v proizvodnji papirja velikokrat opažena predvsem nihanja v izkoristku.

### **Zaključek**

Positivni rezultati dosedanjih raziskav so zagotovo dober povod za nadaljnji razvoj biotehnologije v papirništvu. Prav uporaba encimov bo v prihodnosti ključnega pomena za izboljšanje proizvodnih procesov, znižanje stroškov in nenazadnje tudi za zmanjšanje negativnih vplivov na okolje. Razvoj zelenih tehnologij zagotovo mora biti eden izmed ključnih ciljev vseh papirnic in drugih s papirno industrijo povezanih podjetji, saj le ta omogoča napredek in dobre rezultate.

### **Viri:**

- Ander P., Marzullo L. (1997) Sugar oxidoreductases and veratryl alcohol oxidase as related to lignin degradation. *J. Biotechnol.*, 53: 115-131.

Asgheer M., Bhatti H.N., Ashraf M., Legge R.L. (2008) Recent developments in biodegradation of industrial pollutants by white rot fungi and their enzyme system. *Biodegradation* 19:771-783.

Bajpai P. (1999). Application of enzymes in the pulp and paper industry. *Biotechnol. Prog.*, (2) 47-157.

Bajpai P. (2012). Xylanase enzymes. & Lignin Oxidizing Enzymes. In: *Biotechnology for Pulp and Paper Industry*, 1st edition, Else-

**Slika 3: Zelena prihodnost papirnic (<http://www.ace.be/uploads/images/ACEBoardProduction.jpg>)**



# ESTIMATION OF THE FOREST LANDSCAPE DIVERSITY BY DESCRIBING THE STRUCTURE OF SPECTRAL REFLECTANCE DATASET

**Anna Mazur\***<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Remote Sensing Division, Institute of Aviation, al. Krakowska 110/11402-256 Warsaw, Poland

In recent years there has been a number of attempts to describe a comprehensive evaluation of ecosystems biodiversity based on multispectral satellite and aerial images. The accompanying problem of determining particular species of plants in images, including rare species, has not been fully resolved. The major problem in the correct species identification is a significant similarity of the spectral signatures of species and the limited number of optical channels used for imaging. Typically, images are composed of not more than ten spectral bands. Using hyperspectral imaging may resolve the existing

problems with spectral signatures similarity and limited number of optical channels, however such a solution is still very expensive. The results of presented paper are promising, is expected to continue the research leading to the assessment of species biodiversity of ecosystems. It remains an open question about the possibility of determining biodiversity indicators are based on the same values of their own analysis of the PCA. For this purpose, the analysis of the recursive type of the PCA should be extended to a much larger surface area than presented herein an example.



# PRIROČNIK ZA DOLOČANJE KORENIN OLESENELIH RASTLIN

»ATLAS OF WOODY PLANT ROOTS – Morphology and Anatomy  
with Special Emphasis on Fine Roots«

Tanja Mrak\*<sup>1</sup>, Jožica Gričar<sup>1</sup>, Peter Železnik<sup>1</sup>, Hojka Kraigher<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gozdarski inštitut Slovenije, Oddelek za gozdno fiziologijo in genetiko, Večna pot 2, 1000 Ljubljana

**Ključne besede:** določevalni ključi, znanstvene monografije, morfologija rastlin, anatomija rastlin, drobne korenine, Založba Silva Slovenica, Studia Forestalia Slovenica

Raziskave biotske pestrosti in procesov v tleh, ki potekajo v sestojih, kjer se več drevesnih oz. grmovnih vrst pojavlja sočasno, so neobhodno povezane z identifikacijo korenin. Za delovanje gozdnih ekosistemov so najbolj pomembne drobne korenine (drobne korenine so po klasični opredelitvi vse korenine, tanjše od dveh milimetrov), ki sicer v listnatih gozdnih zmerne pasu predstavljajo le neznaten delež celotne biomase korenin, 10-20 % (Jackson s sod. 1997), so pa fiziološko najbolj aktivne, saj preko njih poteka privzem snovi v rastlino. Poleg tega živijo v simbiozi z mikoriznimi glivami, ki so zaradi svoje vloge pri privzemu dušika, fosforja, drugih mineralov in vode, ter zaščite korenin pred herbivori in patogeni (Kraigher 1996) pogosto predmet raziskav v gozdnih tleh. Metode vzorčenja v so prilagojene temu, da zajamejo predvsem drobne korenine, kar pa lahko prestavlja težave pri identifikaciji. Pri analizi vzorcev, ki jih prinesemo iz gozda, se najprej srečamo s čiščenjem, pri katerem s korenin odstranimo substrat, čemur sledi ločevanje korenin glede na vrsto na podlagi morfologije. Vendar pa imajo drobne korenine le malo morfoloških lastnosti, ki bi omogočale preprosto in hitro identifikacijo. Manjše število razpoložljivih znakov naj bi bilo povezano z majhno spremenljivostjo pogojev v okolju, v katerem korenine rastejo (Fitter 2002). Medtem ko obstajajo opisi morfoloških lastnosti celotnega koreninskega sistema olesenelih rastlin (Kutschera in Lichtenegger 2002), določevalnih ključev na podlagi morfologije drobnih korenin ni, oz. so podatki o morfoloških lastnostih drobnih korenin zelo razpršeni, nepopolni in omejeni na nekaj najbolj pogostih drevesnih vrst. Še vedno imamo na izbiro, da za vsak tip korenin v vzorcu pripravimo preparat različnih prereзов za mikroskopsko določevanje anatomske zgradbe koreninskih tkiv, a se tudi pri tem srečamo s težavo, saj se anatomija olesenelih korenin v določeni meri razlikuje od anatomije lesa v deblu. Poleg tega so določevalni ključi za les praviloma pripravljene za adultni les (npr. Torelli 1991), ki se bistveno razlikuje od anatomije juvenilnih tkiv, tako da le-ti

niso najboljša izbira za anatomijo drobnih korenin. Znaki, ki se razlikujejo med lesom v korenini in lesom v deblu, so npr. razločnost branik, tip poroznosti in v nekaterih primerih tudi širina trakov pri listavcih, olesenelost epitelnih celic smolnih kanalov ter pojavljanje trakovnih traheid pri iglavcih. Leta 1987 je sicer izšel priročnik za določanje korenin drevesnih in grmovnih vrst Velike Britanije in Severne Evrope (Cutler s sod. 1987), vendar je razprodan in zato težko dosegljiv. Na podlagi tega določevalnega ključa je nastal tudi anatomski določevalni ključ za korenine debelejšje od 2 mm za nekaj ektomikoriznih vrst, ki ga je pripravil Agerer (1987-2012), obsežen atlas korenin Kutschera in Lichteneggerja (2002) pa je za identifikacijo slabše uporaben, čeprav v obliki preglednice vključuje izsledke Cutlerja s sod. (1987).

Na Gozdarskem inštitutu Slovenije se je v okviru projekta EUFORINNO porodila ideja, da pripravimo ključ za določanje drobnih korenin, ki bo združeval oba pristopa, morfološkega in anatomskega. Izvedli smo pilotno študijo, v katero smo vključili dvanajst pogostih drevesnih vrst, štiri iglavce (*Abies alba* Mill., *Picea abies* (L.) Karsten, *Larix decidua* Mill., *Pinus sylvestris* L.) in osem listavcev (*Prunus avium* L., *Castanea sativa* Mill., *Fagus sylvatica* L., *Quercus petraea* (Matt.) Liebl., *Carpinus betulus* L., *Acer pseudoplatanus* L., *Populus nigra* L., *Fraxinus excelsior* L.). Vzorce za vsako vrsto smo nabrali na več različnih rastiščih, da bi ugotovili, kateri morfološki in anatomski znaki so za identifikacijo najbolj uporabni. Rewald s sod. (2012) je kot možne morfološke kriterije za identifikacijo korenin navedel sledeče lastnosti: barva, vonj, odpornost na lomljenje, tip mikorize, prisotnost koreninskih laskov, lastnosti periderma, premer, tip razvejanja, gostoto koreninskih vršičkov in morfotip mikoriznih vršičkov. Kot najbolj zanesljive morfološke lastnosti smo opredelili barvo, strukturo površine (vključno s prisotnostjo in obliko lenticel ter koreninskih brazgotin = brazgotine, ki nastanejo, ko drobna korenina odpade), lastnosti koreninskih

vršičkov ter tip mikorize, pri čemer se barva in struktura površine lahko uporabljata le pri koreninah, debelejših od 2 mm. Na podlagi teh lastnosti smo sestavili morfološki ključ, ki ga spremljajo fotografije morfoloških lastnosti za vsako vrsto posebej. Za anatomske kriterije smo imeli na razpolago zelo širok nabor znakov, ki se sicer uporabljajo za opis anatomskih značilnosti lesa (zbrani v priročnikih IAWA – IAWA Committee 1989, 2004), dodatno pa smo vključili znake za opis skorje (IAWA priročnik v pripravi – IAWA Committee 2016) in primarnih tkiv. Pri drobnih koreninah skorja zavzema velik del prečnega prereza, primarna tkiva pa se pri olesenelih koreninah pojavljajo kot primarni ksilem v osrednjem delu. Ostanek primarnega tkiva v drobnih koreninah je tudi pericikel, ki s prehodom korenine iz primarne rasti v sekundarno proliferira, zunanje plasti celic tvorijo plutni kambij (felogen), preostanek pa tvori tkivo, podobno korteksu (Evert in Eichhorn 2013). Pogosto je to tkivo napačno poimenovano kot korteks, tudi v nekaterih obstoječih določevalnih ključih za korenine. Skorja in primarna tkiva so pri olesenelih rastlinah razmeroma slabo raziskani, zato obstoječih podatkov o tipičnih lastnostih ni bilo veliko. Na podlagi prečnih in vzdolžnih prerezov korenin debelih 5, 3 in 1 mm smo pripravili anatomske opise vrst, iz katerih smo nato izluščili najbolj značilne znake. Korenine debeline 1 mm imajo že dovolj anatomskih znakov, da jih je možno zanesljivo identificirati. Ugotovili smo, da se najbolj značilni in stabilni znaki nahajajo v sekundarnem ksilemu, nekoliko večjo variabilnost smo zasledili v skorji, primarni ksilem pa je za identifikacijo najmanj primeren, saj je zelo variabilen. Hishi in Takeda (2005) navajata, da naj bi bila oblika in količina primarnega ksilema povezana s položajem korenine v koreninskem sistemu, pri čemer naj bi apikalne korenine imele manj primarnega ksilema od bazalnih, dolge korenine pa naj bi imele več protoksilmskih skupin od kratkih korenin (Zadworny in Eissenstat 2011). Za vse vrste smo pripravili fotografije prečnih in vzdolžnih prerezov tkiv in preglednice z značilnostmi. Tudi za korenine, tanjše od 1 mm, smo poskušali ugotoviti stabilne anatomske znake. Medtem ko so bile vse korenine v debelini 1 mm že v fazi sekundarne rasti, so bile korenine, tanjše od 1 mm, bodisi v fazi primarne rasti bodisi na začetku sekundarne rasti. V obdobju primarne rasti in v začetnih fazah sekundarne rasti je količina anatomskih znakov, ki bi omogočali identifikacijo, zelo omejena. V prvem letu sekundarne rasti se prične tvorba trakov, ki v drugem letu sekundarne debelitve pričnejo rasti v širino. Zagotovo je v pri koreninah, tanjših od 1 mm možno ločiti iglavce od listavcev, medtem ko je za natančnejšo identifikacijo priporočljivi poiskati debelejšo olesenele korenine.

Kombinirani morfološko-anatomski določevalni priročnik smo izdali v tiskani obliki v 500 izvodih na 120 straneh, pri čemer smo uporabili vezavo v mapo. Ta način vezave

omogoča, da obstoječim vrstam v priročniku dodajamo nove. Izšel je pri založbi Silva Slovenica kot del serije monografij Studia Forestalia Slovenica v začetku leta 2016. Poleg tega smo priročnik pripravili tudi v elektronski obliki (prosto dostopen na <http://eprints.gozdis.si/1666>) ter ga vključili v depozitorij Gozdarskega inštituta Slovenije SciVie. Ker ima vključen seznam vseh anatomskih znakov (320), ki se pojavljajo pri koreninah obravnavanih vrst oz. jih pričakujemo pri vrstah, ki jih nameravamo vključiti v priročnik kasneje, z opisi in navedenimi posebnostmi korenin, pričakujemo, da bo uporaben širše, tudi kot učbenik pri predmetu botanika. Priročnik smo izdali v angleškem jeziku, da bi dosegli najširši krog uporabnikov. V fazi nastajanja je bil predstavljen potencialnim uporabnikom na konferenci Rhizosphere 4 v Maastrichtu na Nizozemskem, na konferenci ICOM 8 v Arizoni, na zaključni konferenci projekta EUFORINNO, na delavnici EUFORINNA v Butanu ter na srečanjih COST FP1305 BioLink v Readingu ter Rimu, na zadnjem od COST srečanj v Sofiji pa tudi že v končni obliki.

### Zahvale

Pripravo in izdajo priročnika "Atlas of Woody Plant Roots" je financiral projekt EUFORINNO FP7 Capacities Project (REGPOT no. 315982) in ARRS preko raziskovalnega programa P4-0107.

### Viri:

- Agerer R (1987-2012) *Colour Atlas of Ectomycorrhizae*, 1st-15th edn., Schwäbisch Gmünd: Einhorn-Verlag.
- Evert RF, Eichhorn SE (2013) *Raven Biology of Plants*. 8th Ed. New York: W.H. Freeman and Company Publishers/Palgrave Macmillan, 727 str.
- Fitter A (2002) *Characteristics and Functions of Root Systems*. V: Waisel Y., Eshel A., Kafkafi U. (ur.). *Plant Roots: The Hidden Half*. 3rd ed., New York: Marcel Dekker, str. 15-32.
- Hishi T, Takeda H (2005) Dynamics of heterorhizic root systems: protoxylem groups within the fine-root system of *Chamaecyparis obtusa*. *New Phytologist* 167: 509-521.
- IAWA Committee, (1989) IAWA list of microscopic features for hardwood identification. *IAWA Bulletin n.s.*, 10: 219-322.
- IAWA Committee, 2004. IAWA list of microscopic features for softwood identification. *IAWA Journal* 25: 1-70.
- IAWA Committee, 2016, in preparation. IAWA list of microscopic features for bark identification. *IAWA Journal*.
- Kraigher H (1996) Tipi ektomikorize - taksonomija, pomen in aplikacije. *Zbornik gozdarstva in lesarstva* 49: 33-66.
- Kutschera L, Lichtenegger E (2002) *Wurzelatlas Mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher*. Graz: Stocker, 604 str.
- Rewald B, Meinen C, Trockenbrodt M, Ephrath JE, Rachmilevitch S (2012) Root taxa identification in plant mixtures – current techniques and future challenges. *Plant and Soil* 359: 165-182.
- Torelli N (1991) Makroskopska in mikroskopska identifikacija lesa. Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 121 str.
- Zadworny M, Eissenstat DM (2011) Contrasting the morphology, anatomy and fungal colonization of new pioneer and fibrous roots. *New Phytologist* 190: 213-221.

# STABILNI IZOTOPI V GOZDNEM EKOSISTEMU – ANALIZNE METODE IN UPORABA

Saša Zavadlav\*<sup>1</sup>, Grega E. Voglar<sup>1</sup>, Polona Hafner<sup>1</sup>, Mitja Ferlan<sup>1</sup>, Tom Levanič<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gozdarski inštitut Slovenije, Oddelek za gozdno fiziologijo in genetiko, Večna pot 2, 1000 Ljubljana

**Ključne besede:** stabilni izotopi, masna spektrometrija, laserska absorpcijska spektroskopija, EA-IRMS, OA-ICOS

Uporaba t.i. stabilno-izotopskih tehnik v okoljskih raziskavah je v zadnjih treh desetletjih pripomogla k podrobnejšemu poznavanju biogeokemijskih, fizioloških in ekoloških procesov v okolju, v katerem živimo, tako na časovni kot tudi na prostorski ravni (Ferrio in sod., 2005, Muccio in Jackson, 2009). Izotopska sestava lahkih elementov vodika, ogljika, dušika, kisika in žvepla, kot najpomembnejših gradnikov organske in anorganske materije, neke snovi zavisi od njenega izvora in procesov, ki jim je podvržena pri kroženju omenjenih elementov v naravi (Carter in sod., 2011). Zato se izotopska sestava snovi pogosto uporablja (a) za identifikacijo geografskega, kemijskega in biološkega porekla spojin (npr. izvor onesnažil v rekah (Clague in sod., 2015) ali pristnosti hrane (Portarena in sod., 2014)), (b) v paleoklimatologiji za preučevanje spreminjanja klime v preteklosti na podlagi informacij v morskimi ali jezerskimi sedimentih, kapnikih idr. (Novello in sod., 2016, Trindade in sod. 2016), (c) v ekohidrologiji za razumevanje kroženja vode med terestričnimi in vodnimi ekosistemi (Tetzlaff in sod., 2015), (d) kot orodje za spremljanje ekofizioloških procesov v rastlinah (Bahn in sod., 2009) in raziskovanju ekologije živali (npr. Clementz in Koch, 2011) in (e) kot podporno orodje za razvoj okoljskih modelov (Sulzman, 2007).

V slovenskem prostoru je uporaba stabilnih izotopov kot sledilcev kroženja elementov v naravi razmeroma dobro zastopana na področju hidrogeokemije (Kanduč in sod., 2013; Zavadlav in sod 2013; Tamše in sod., 2014; Brenčič in Vreča, 2016), agronomije (Burik Šturm in sod., 2011), paleo- (Lojen in sod., 2009; Zavadlav in sod., 2016) in dendro-klimatologije (glej npr. Hafner in sod., 2014), medtem ko so objave na področju gozdne ekologije razmeroma redke in omejene predvsem na dendroekološke študije (Levanič in sod. 2011; Hafner in Levanič, 2009; Hafner in sod. 2015) in ekološke študije gozdno-travnatih ekosistemov na prostorskem nivoju (Plestenjak in sod., 2012). Analize stabilnih izotopov omogočajo tudi vpogled

in boljše razumevanje fiziološkega in biokemijskega odziva rastlin oz. dreves na stresne dogodke (npr. pomanjkanje vode) ter fizioloških procesov asimilacije in transporta produktov fotosinteze (npr. Hommel in sod., 2016).

## Stabilni izotopi

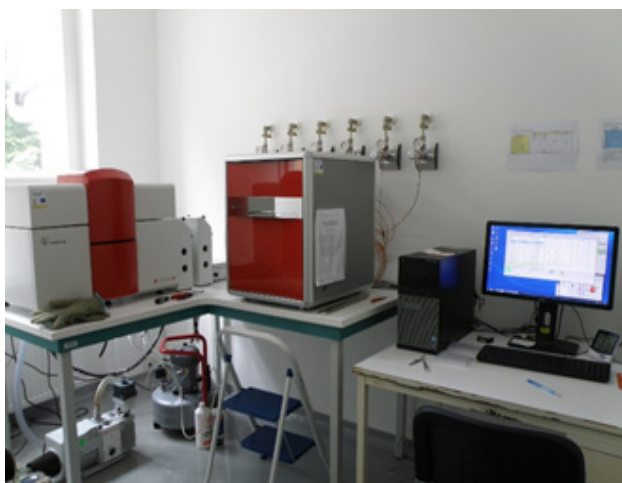
Izotopi so elementi z enakim številom protonov in elektronov, vendar se razlikujejo v številu nevtronov. Slednje je tudi vzrok, da se izotopi istega elementa razlikujejo v masi, ki vodi do razlik v reakcijskih hitrostih in jakosti vezi med lažjimi in težjimi izotopi. Ta pojav v izotopski terminologiji imenujemo izotopska frakcionacija, s katero opišemo izotopske razlike med reaktanti in produkti v kemijski reakciji (Sulzman, 2007; Hoefs, 2015). Kadar govorimo o izotopski sestavi, imamo pravzaprav v mislih izotopsko razmerje težjega proti lažjemu izotopu nekega elementa (npr.  $2\text{H}/1\text{H}$ ,  $13\text{C}/12\text{C}$ ,  $15\text{N}/14\text{N}$ ,  $18\text{O}/16\text{O}$ ,  $34\text{S}/32\text{S}$ ). Ker so razlike v izotopski sestavi različnih materialov (npr. listov, drevesnih branik, živalskih tkiv, plinov, vode) izredno majhne, izotopsko sestavo vzorca ( $\delta_{\text{vzorec}}$ ) podajamo glede na izotopsko sestavo mednarodnih standardov ( $\delta_{\text{standard}}$ ; VPDB, VSMOW, AIR, V-CDT; Gonfatinini in sod., 1995) in v promilih (‰):

$$\delta_{\text{vzorec}} (\text{‰}) = \left( \frac{R_{\text{vzorec}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000$$

kjer je R razmerje težjega proti lažjemu izotopu nekega elementa.

## Analitske metode

Čeprav obstaja več različnih analitskih metod merjenja razmerja stabilnih izotopov, se bomo v tem prispevku osredotočili na opis masne spektrometrije in absorpcijske spektroskopije, ki ju v okviru raziskovalnih študij na področju dendrokronologije, gozdne fiziologije in gozdnih ekosistemov uporabljamo na Gozdarskem inštitutu Slovenije.

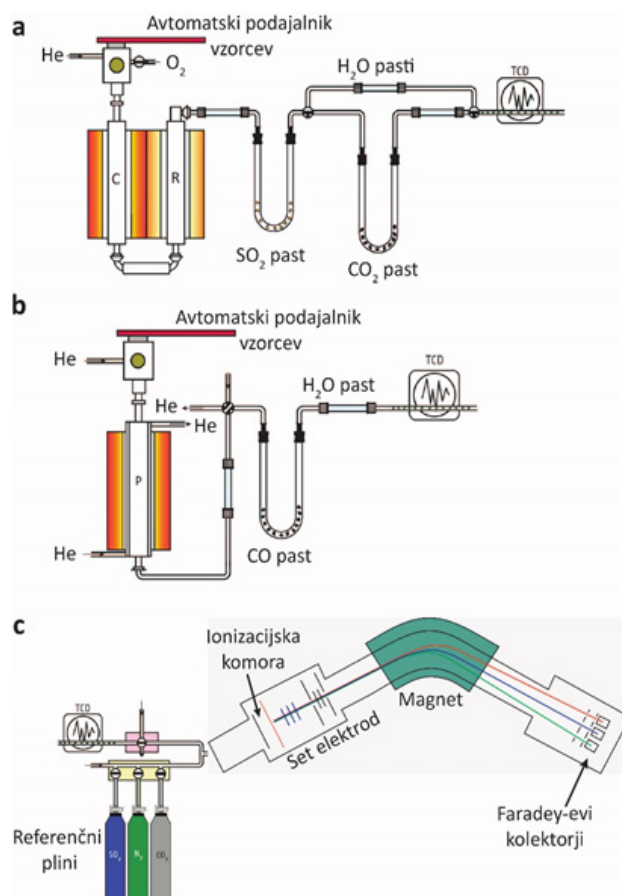


**Slika 1: TC/EA-IRMS analizni inštrument vario Pyro cube elementni analizator združen z IsoPrime100 masnim spektrometrom za stabilne izotope v Laboratoriju za stabilne izotope (Oddelek za prirastoslavlje in gojenje gozda) na Gozdarskem inštitutu Slovenije (fotografija: Saša Zavadlav)**

### Masna spektrometrija

V okviru Oddelka za prirastoslavlje in gojenje gozda deluje Laboratorij za stabilne izotope z opremo, ki omogoča pripravo različnih vzorcev za izotopske analize in izvajanjem le-teh z TC/EA-IRMS analiznim sistemom (angl. »Thermal Conversion / Elemental Analysis – Isotope Ratio Mass Spectrometry«). Leta 2013 je bil nameščen IsoPrime100 IRMS (IsoPrime, Manchester, VB) združen z elementnim analizatorjem vario Pyro cube (Elementar, Hanau, Nemčija), s katerima določamo elementno in izotopsko sestavo lahkih elementov (H, C, N, O in S) v trdnih in tekočih vzorcih v sežignem ali piroliznem načinu (slika 1). TC/EA-IRMS je najpogosteje uporabljena analizna tehnika, s katero lahko izmerimo povprečno  $\delta$  vrednost trdnih ali tekočih vzorcev, ne omogoča pa meritev izotopske sestave posameznih specifičnih komponent v vzorcu (npr. aromatskih verig, alkanov, fosfolipidov). Slednje sicer omogočajo nekoliko bolj kompleksnejše analize metode kot sta plinska in tekočinska kromatografija (Brenna in sod., 1997; Sulzman, 2007; Muccio in Jackson, 2009).

Na sliki 2 je prikazana poenostavljena shema delovanja TC/EA-IRMS tehnike. Načeloma je priprava vzorca (seveda v odvisnosti od substance, ki jo želimo analizirati) preprosta in navadno zahteva le fino mletje ter, po potrebi, tudi obdelavo vzorca z različnimi, a navadno zamudnimi kemijskimi postopki. Primerno pripravljen vzorec oz. substanco zatehtamo v kositrno ali srebrno kapsulo, ki jo s pomočjo avtomatskega podajalnika vzorcev spustimo v sežigalno komoro, kjer zgori v prisotnosti kisika (sežigni način, slika 2a) ali ogljika (pirolizni način, slika 2b) v sežigni



**Slika 2: Shematski prikazi TC/EA-IRMS analiznega sistema: (a) sežigni (C – sežigna cev, R – redukcijaska cev) in (b) pirolizni sistem v elementnem analizatorju (P – pirolizna cev) ter (c) masna spektrometrija (IRMS) in referenčni plini. Povzeto po: Isoprime Technical Note 002 in 005 ([www.isoprime.co.uk/applications.php](http://www.isoprime.co.uk/applications.php)).**

koloni pri temperaturah med 950 in 1450 °C. Nastali plini ( $N_2$ ,  $NO_x$ ,  $CO_2$  in  $SO_2$  v sežignem načinu in  $CO$  ter  $N_2$  v piroliznem načinu) potujejo s helijem (t.i. nosilnim plinom) do redukcijske kolone napolnjene z bakrom, kjer se produkti  $NO_x$  in presežni kisik reducirajo v  $N_2$  in  $CuO$  (redukcijaska kolona pri piroliznem načinu ni nameščena). Nastali plini nato vstopijo v sušilno kolono, napolnjeno z  $P_2O_5$ , ki absorbira vodo, preostala plinska mešanica pa potuje naprej skozi pasti, ki ločujejo (in zadržujejo) željene pline ( $CO_2$ ,  $SO_2$  in  $CO$ ) ter omogočajo dotok plinov na podlagi temperature do termičnega člana, ki na podlagi konduktivnosti plina izmeri količino elementa v plinu oziroma vzorcu. Plini s tokom helija nato potujejo naprej do masnega spektrometra.

Masna spektrometrija izotopskih razmerij (v nadaljevanju IRMS) deluje na osnovi ločevanja nabitih delcev



(atomov ali molekul) glede na njihovo razmerje med maso in nabojem ( $m/z$ ). IRMS sestoji iz štirih glavnih komponent (slika 2c): (1) ionizacijske komore, v kateri se molekule plinov ionizirajo pod vplivom elektronov, ki jih pri povišani temperaturi oddaja filament, prevlečen s torijem, (2) seta elektrod, ki ionski žarek fokusirajo, (3) magneta, ki pri določeni napetosti odklanja ionske žarke glede na njihovo maso in naboj ter (4) niza Faraday-evih kolektorjev razporejenih tako, da zbirajo ione točno določenih mas in trke molekul pretvorijo v električne impulze (Brenna in sod., 1997). Pridobljene podatke v numerične vrednosti pretvori programska oprema, ki omogoča kontrolo in upravljanje delovanja analiznega sistema. Pomemben del analiznega sistema so tudi referenčni plini (slika 3c), ki jih uporabljamo za preverjanje in optimizacijo delovanja masnega spektrometra.

TC/EA-IRMS analizna tehnika omogoča razmeroma hitre meritve vzorcev (med 7 in 15 min za analizo enega vzorca s kapaciteto do 150 vzorcev v eni analizni sekvenci) z natančnostjo rezultatov med 0.1 in 0.3 ‰ (za  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  in  $\delta^{34}\text{S}$ ) ter  $\delta 2\%$  za  $\delta^2\text{H}$ . Potrebna količina nastalega plina pri sežigu vzorca je majhna, navadno približno 50  $\mu\text{mol}$ .

### Laserska absorpcijska spektroskopija

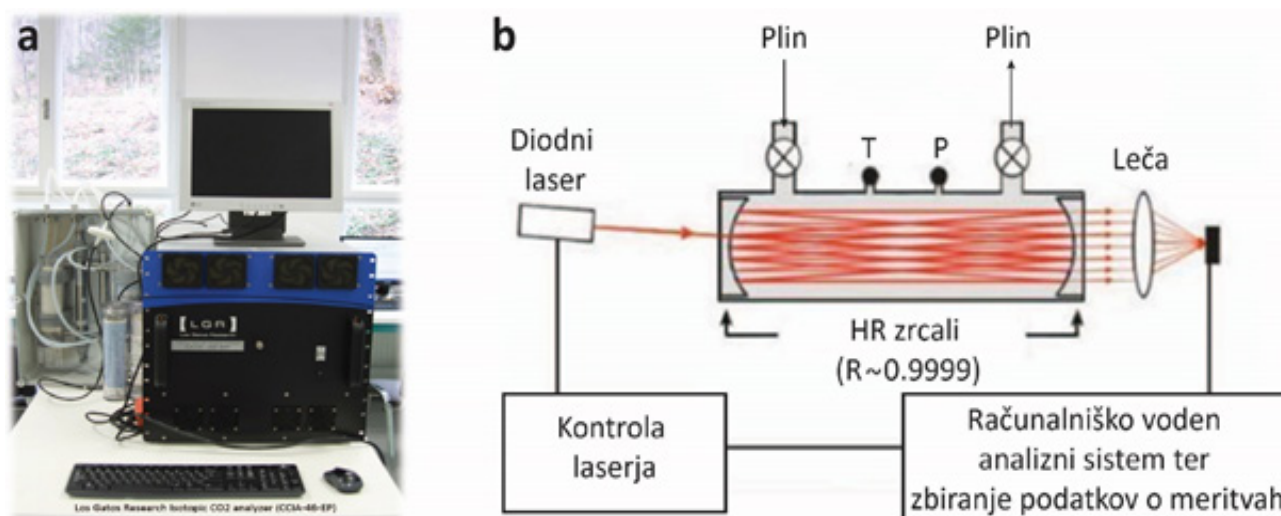
Laserska absorpcijska spektroskopija je razmeroma nova analizna tehnika, primerna za meritve koncentracij in izotopske sestave plinastih vzorcev (npr.  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ) in vode (Bowling in sod., 2003). V okviru Oddelka za gozdno ekologijo za meritve stabilnih izotopov uporabljamo eno izmed različic tehnike laserske spektroskopije, t.j. (izraz le v angl.) »Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy« (v nadaljevanju OA-

ICOS), ki je implementirana v napravi CCIA-46-EP (Los Gatos Research Inc., Mountain View, CA, ZDA; slika 3a), s katero določamo koncentracije in izotopsko sestavo  $\text{CO}_2$  ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{17}\text{O}$  in  $\delta^{18}\text{O}$ ).

OA-ICOS analizna tehnika omogoča visoko-občutljivostne meritve  $\text{CO}_2$  z uporabo robustnih diodnih laserjev, ki delujejo na valovni dolžini blizu infrardeče svetlobe. S pomočjo vakuumske črpalke se vzorčni plin vodi do absorpcijske celice v integrirani komori (slika 3b), ki lovi laserske fotone tako, da ti večkrat potujejo med visoko-reflektivnima zrcaloma, pri čemer se meri količina absorbirane svetlobe skozi absorpcijsko celico. S količino absorbirane svetlobe pri določenih absorpcijskih spektrih vzorčnega in referenčnega  $\text{CO}_2$  lahko določimo molske frakcije štirih izotopologov vzorčnega  $\text{CO}_2$  ( $^{12}\text{CO}_2$ ,  $^{13}\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}^{17}\text{O}$  in  $\text{CO}^{18}\text{O}$ ), zato je izredno pomembno oba plina vzdrževati pri enaki temperaturi in tlaku. Končni rezultat so podatki o treh izotopskih razmerjih v vzorčenem  $\text{CO}_2$  ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{17}\text{O}$  in  $\delta^{18}\text{O}$ ) (Baer in sod., 2002; Guillon in sod., 2012). Laserska absorpcijska spektroskopija je primerna za dolgotrajnejše meritve  $\text{CO}_2$  tokov v ekosistemih na terenu in omogoča vzorčenje do 5-krat v sekundi. Koncentracija  $\text{CO}_2$  v zajetem vzorcu je lahko do 2000 ppm, z ustreznim razredčevalnim sistemom pa je lahko tudi višja, natančnost rezultata pa, odvisno od temperature in tlaka, niha med 0.05 in 1.38 ‰ (Guillon in sod., 2012).

### Primeri uporabe stabilnih izotopov v raziskavah v gozdarstvu

Trenutno na Gozdarskem inštitutu Slovenije sodelavci izvajamo različne projekte na področju raziskav



Slika 3: a) OA-ICOS analizni inštrument (model CCIA-46-EP, Los Gatos Research Inc., Mountain View, CA, ZDA) za analize stabilnih izotopov v plinastih vzorcih  $\text{CO}_2$  na Gozdarskem inštitutu Slovenije (fotografija: Grega E. Voglar). b) shematski prikaz analiznega inštrumenta (Los Gatos Inc., Mountain View, CA, ZDA) - slika je povzeta po Los Gatos Research Inc. (2014).

gozdnih ekosistemov, ki med drugimi vključujejo tudi uporabo analizičnih tehnik za meritve stabilnih izotopov. V okviru dendroklimatoloških raziskav preučujemo klimatski signal v izotopskih kronologijah ogljika in kisika v drevesnih branikah hrastov (nižinska rastišča v Sloveniji) in borov (visokogorska rastišča na področju Balkana), na področju rastlinske fiziologije pa raziskujemo izotopsko frakcionacijo ogljika pri tvorbi asimilatov v listih v obdobju raste sezone. V okviru oddelka za gozdno ekologijo nameravamo opraviti in-situ neprekinjeno merjenje koncentracije CO<sub>2</sub> in njegovih izotopov ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{17}\text{O}$  in  $\delta^{18}\text{O}$ ) v tleh različnih gozdnih sestojev (monokulturnih, mešanih) ter preučiti njihovo vertikalno porazdelitev v talnem profilu. S pridobljenimi podatki skozi daljše sezonsko obdobje bomo določili dejavnike, ki vplivajo na spremembe koncentracije CO<sub>2</sub> in njegovih izotopov ter preverili biotsko aktivnost gozdnih tal.

### Zahvala

Avtorji se zahvaljujemo finančni podpori projekta EU-FORINNO (RegPot No. 315982) za nakup analizičnih instrumentov in ARRS za omogočanje izvajanja raziskovalnega dela (programska skupina P4-0107 in projekt J4-5519).

### Viri:

- Baer DS, Paul JB, Gupta M, O'Keefe A (2002) Sensitive absorption measurements in the near-infrared region using off-axis integrated cavity output spectroscopy. In: Proceedings SPIE 4817 Diode Lasers and Applications in Atmospheric Sensing 167.
- Bahn M, Schmitt M, Siegwolf R, Richter A, Bruggemann N (2009) Does photosynthesis affect grassland soil-respired CO<sub>2</sub> and its carbon isotope composition on a diurnal timescale?. *New Phytol* (182): 451-460.
- Bowling DR, Sargent SD, Tanner BD, Ehleringer JR (2003) Tunable diode laser absorption spectroscopy for stable isotope studies of ecosystem-atmosphere CO<sub>2</sub> exchange. *Agr Forest Meteorol* 118: 1-19.
- Brenčič M, Vreča P (2016) Hydrogeological and isotope mapping of the karstic River Savica in NW Slovenia. *Env Earth Sci* 75 (8): 6511-6513.
- Brenna JT, Corso TN, Tobias HJ, Caimi RJ (1997) High-precision continuous-flow isotope ratio mass spectrometry. *Mass Spectrometry Rev* 16:227-258.
- Burnik Šturm M, Kacjan-Maršič N, Lojen S (2011) Can d15N in lettuce tissues reveal the use of synthetic nitrogen fertiliser inorganic production?. *J Sci Food Agr* 91 (2): 262-267.
- Carter JF, Lock C, Meier-Augenstein W, Kemp H, Schneiders S, Stern L, van der Peijl G (2011) Good practice guide for isotope ratio mass spectrometry. In: Carter JF, Barwick VJ (Eds.). FIRMES.
- Clague JC, Stenger R, Clough TJ (2015) Evaluation of the stable isotope signatures of nitrate to detect denitrification in a shallow groundwater system in New Zealand. *Agric Ecosyst Environ* 202 (1): 188-197.
- Clementz MT, Koch PL (2002) Differentiating aquatic mammal habitat and foraging ecology with stable isotopes in tooth enamel. *Oecologia* 129 (3):461-472.
- Ferrio JP, Resco V, Williams DG, Serrano L, Voltas J (2005) Stable isotopes in arid and semi-arid forest systems. *Invest. Agrar: Sist Recur For* 14 (3): 371-382.
- Gonfiantini R, Stichler W, Rozanski K (1995) standards and intercomparison materials distributed by the International Atomic Energy Agency for stable isotope measurements. In: Reference and intercomparison materials for stable isotopes of light elements, IAEA-TECD0C-825. International Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 13-29.
- Guillon S, Pili E, Agrinier P (2012) Using a laser-based CO<sub>2</sub> carbon isotope analyser to investigate gas transfer in geological media. *Appl Phys* 107: 449-457.
- Hafner P, Levanič T (2009) Stable carbon isotopes in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) tree rings at two sites in Slovenia = Stabilna ogljikova izotopa v branikah smreke (*Picea abies* (L.) Karst.) na dveh rastiščih v Sloveniji. *Zbornik gozdarstva in lesarstva* 88: 43-52.
- Hafner P, McCarroll D, Robertson I, Loader NJ, Gagen M, Young G, Bale RJ, Sonninen E, Levanič T (2014) A 520 year record of summer sunshine for the eastern European Alps based on stable carbon isotopes in larch tree rings. *Clim Dynam* 43 (3/4): 971-980.
- Hafner P, Gričar J, Skudnik M, Levanič T (2015) Variations in environmental signals in tree-ring indices in trees with different growth potential. *PLoS one* 10 (11)
- Hoefs J (2015) Stable isotope geochemistry. Berlin: Springer-Verlag, pp. 388.
- Hommel R, Siegwolf RW, Zavadlav S, Arend M, Schaub M, Galiano L, Kayler ZE, Gessler A (2016) Impact of interspecific competition and drought on the allocation of new assimilates in trees. *Plant Biol* (in press).
- Kanduč T, Burnik Šturm M, McIntosh J (2013) Chemical dynamics and evaluation of biogeochemical processes in alpine river Kamniška Bistrica, North Slovenia. *Aquat Geochem* 19 (4): 323-346.
- Levanič T, Čater M, McDowell NG (2011) Associations between growth, wood anatomy, carbon isotope discrimination and mortality in a *Quercus robur* forest. *Tree Phys* 31 (3): 298-308.
- Lojen S, Trkov A, Ščančar A, Vazquez-Navarro JA, Cukrov N (2009) Continuous 60-year stable isotopic and earth-alkali element records in a modern laminated tufa (Jaruga, river Krka, Croatia): implications for climate reconstruction. *Chem Geol* 258 (3): 242-250.
- Los Gatos Research inc. (2014) User manual for Isotopic CO<sub>2</sub> analyzer CCIA-46-EP. Document No. 913-U033, Version 1.A, Release date 3/20/2014, Los Gatos Research Inc., Mountain View, CA, ZDA p. 88.
- Muccio Z, Jackson GP (2009) Isotope ratio mass spectrometry. *Analyst* 134: 213-222.
- Novello VF, Vuille M, Cruz FW, Strikis NM, Saito de Paula M, Edwards LR, Cheng H, Karmann I, Jaquetto PF,
- Plestenjak G, Eler K, Vodnik D, Ferlan M, Čater M, Kanduč T, Simončič P, Ogrinc N. (2012) Sources of soil CO<sub>2</sub> in calcareous grassland with woody plant encroachment. *J Soils Sed* 12 (9): 1327-1338.
- Portarena S, Gavrichkova O, Lauteri M, Brugnoli E (2014) Authentication and traceability of Italian extra-virgin olive oils by means of stable isotope techniques. *Food Chem* 164 (1): 12-16.
- Soulsby (2015) A preliminary assessment of water partitioning and ecohydrological coupling in northern headwaters using stable isotopes and conceptual runoff models. *Hydrol Process* 29 (25):5153-5173.
- Sulzmann SW (2007) Stable isotope chemistry and measurement: a primer. In: Michener R & Lajtha K (Eds.). *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*. Singapore: Blackwell Publishing, pp. 1-21.
- Tamše S, Mozetič P, France J, Ogrinc N (2014) Stable isotopes as a tool for nitrogen source identification and cycling in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic). *Cont Shelf Res* 91: 145-157.
- Tetzlaff D, Buttle J, Carey SK, van Huijgevoort MHJ, Laudon H, McNamara JP, Mitchell CPJ, Spence C, Gabor RJ, Soulsby C (2015) A preliminary assessment of water partitioning and ecohydrological coupling in northern headwaters using stable isotopes and conceptual runoff models. *Hydrol Process* 29: 5153-5173.
- Trindade RIF, Hartmann GA, Moquet JS (2016) Centennial-scale solar forcing of the South American Monsoon System recorded in stalagmites. *Sci. Reports* 6.
- Zavadlav S, Kanduč T, McIntosh J, Lojen S (2013) Isotopic and chemical constraints on the biogeochemistry of dissolved inorganic carbon and chemical weathering in the karst watershed of Krka river (Slovenia). *Aquat Geochem*, 19 (3): 209-230.
- Zavadlav S, Rožič B, Dolenc M, Lojen S (2016) Stable isotopic and elemental characteristics of recent tufa from a karstic Krka River (SE Slovenia): useful environmental proxies?. *Sedimentology* (in review).



# ALI LAHKO Z OBDELAVO Z VOSKI PODALJŠAMO ŽIVLJENJSKO DOBO LESA?

Ajda Pogorelčnik<sup>1</sup>, Boštjan Lesar<sup>1</sup>, Nejc Thaler<sup>1</sup>, Matej Lesar<sup>1</sup>, Davor Kržišnik<sup>1</sup>, Aleš Ugovšek<sup>2</sup>, Barbara Šubic<sup>2</sup>, Gregor Rep<sup>3</sup>, Miha Humar<sup>\*1</sup>

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

<sup>2</sup>M Sora d.d., Žiri, Slovenia

<sup>3</sup>Silvaprodukt d.o.o., Ljubljana, Slovenia

**Ključne besede:** les, zaščita lesa, modifikacija lesa, naravni voski, vodoodbojnost

## Uvod

Les je vsakodnevno izpostavljen razkroju. V naravi so ti procesi zaželeni, kadar želimo les uporabiti na prostem, želimo te procese čim bolj upočasniti. V zmernem podnebnem pasu največjo nevarnost za les predstavljajo glive razkrojevalke. Le te lahko že v kratkem času razvrednotijo les. V preteklosti smo problem zaščite lesa pred glivami večinoma reševali le z uporabo biocidov. Ker se danes nekateri uporabniki izogibajo rabi biocidov v bivanjskem okolju, je bilo v zadnjem obdobju razvitih več rešitev, kako izboljšati odpornost domačih lesnih vrst. Novejše rešitve ne temeljijo na biocidnem pristopu, temveč spremenijo strukturo lesa tako, da se bo manj navlažil oziroma tako, da je glive ne prepoznajo kot vir hrane.

Eden izmed komercialno najuspešnejših postopkov nebiodidne zaščite lesa je termična modifikacija. Ta postopek temelji na tem, da les segrevamo pri visokih temperaturah (od 160 °C do 250 °C) v odsotnosti atmosferskega kisika. Lesu se pri tem spremenijo sorpcijske lastnosti tako, da je ravnovesna vlažnost termično modificiranega lesa pri istih klimatskih pogojih bistveno nižja od ravnovesne vlažnosti nemodificiranih kontrolnih vzorcev. Ta rešitve se dobro obnesejo v pogojih, kjer ni prisotne kapljične vode, saj je termično modificiran les (predvsem les modificiran pri višjih stopnjah modifikacije) pogosto bolj permeabilen kot nemodificiran les. Zato se les v bolj izpostavljenih pogojih celo bolj navlaži kot nemodificiran les. To rešitev želimo preseči tako, da površino lesa napravimo hidrofobno. Ena od rešitev za izboljšanje hidrofobnosti je aplikacija naravnih voskov. To rešitev smo preizkusili v laboratoriju in na prostem.

## Materiali in metode

### Materiali

Analizirali smo štiri različne materiale; les smreke (smreka), termično modificiran les smreke (TM smreka), termično modificiran les smreke, kjer smo voske nanесли pred termično modifikacijo (TM smreka + vosek II) in po termični modifikaciji (TM smreka + vosek). Za impregnacijo smo uporabili naravni vosek (Silvacera, Silvaprodukt). Les je bil termično modificiran pri 230 °C v skladu s postopkom Silvaprop® (Silvaprodukt). Za laboratorijske analize smo uporabili vzorce velikosti 1,5 × 2,5 × 5,0 cm<sup>3</sup>. Vzorci izpostavljeni na prostem so imeli konstanten presek 2,5 cm × 5,0 cm. Dolžina teh vzorcev je nihala med 40 cm in 60 cm.

### Metode

Vzorci smo pred analizo uravnovesili pri standardnih laboratorijskih pogojih. Kapilarni navzem vode smo določili s tenziometrom K 100 (Krüss, Nemčija), kot to natančneje opisuje standard SIST EN 1609:2013. Prečno (aksialno) površino vzorcev smo za 200 s potopili v destilirano vodo in vsaki 2 s izmerili maso, globina potopitve čela je bila 1,00 mm. Preostali parametri, ki smo jih uporabili so bili: hitrost pomika vzorca pred kontaktom z vodo 6 mm/min, občutljivost kontakta 0,005 g. Glede na končno maso potopljenega vzorca in površino potopljenega čela smo izračunali navzem vode v g/m<sup>2</sup> (Žlahtič in sod., 2015).

Z metodo s stoječo kapljico smo določili stični kot kapljice destilirane vode. Z optičnim tenziometrom Theta (Biolin Scientific, Finska) smo merili dinamiko spreminjanja stičnega kota na površini vzorcev od pretrganja kapljice na konici pipete do 60 s. Podatke smo zajemali s programom OneAttension. Na vsakem vzorcu smo ovrednotili 3 kapljice.

Vlažnost lesa na prostem smo spremljali na modelnem objektu Oddelka za lesarstvo. Objekt je bil postavljen oktobra 2013. V vzorce smo na sredino tangencialne ploskve pod kotom 10 ° na razdalji 32 mm privijačili 2 vijaka iz nerjavnega jekla premera 3,9 mm in dolžine 25 mm (Bauhaus Profi Depot, Nemčija), ki smo ju predhodno izolirali v dolžini 13,5 mm z univerzalno toploskrčljivo cevjo – DERAY®-H. Na vijake smo pritrdili elektrode in jih povezali z merilno opremo (Scantronik, Gigamodule), s katero smo dvakrat dnevno določili upor in temperaturo in iz teh podatkov izračunali vlažnost lesa.

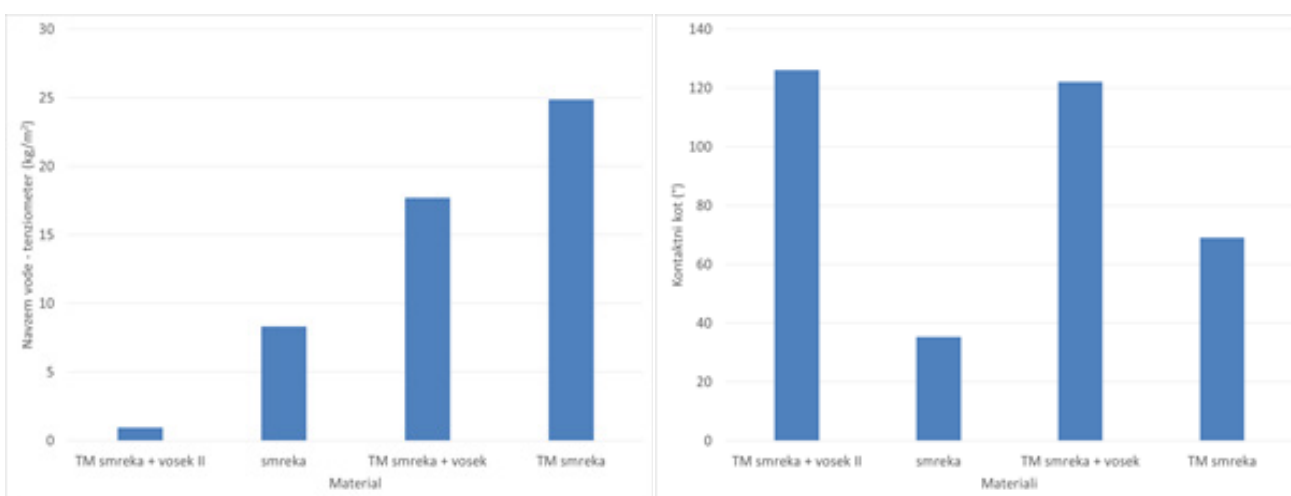
## Rezultati

V laboratoriju lahko izvedemo le krajše teste, s katerimi spremljamo individualni parameter, kot je na primer prodiranje vode v čela lesa. Čela po eni strani predstavljajo le majhen delež lesa na prostem, po drugi strani pa so ravno čela pogosto vir okužb lesa z glivami.

Kot je razvidno iz slike 1, je med posameznimi obdelavami lesa opaziti velike razlike. Najbolj je voda prodrla v čela termično modificiranega lesa smreke. Tako je v les termično modificirane smreke v 200 s prodrlo kar 25 kg/m<sup>2</sup> vode. To je skoraj trikrat več kot v les smreke (8,7 kg/m<sup>2</sup>) (Slika 1). Razlog za dobro prodiranje vode v les termično modificirane smreke je dejstvo, da se pri termični modifikaciji razgradijo depoziti na pikenjskih membranah, v lesu pa se ustvarijo nove razpoke, ki omogočajo dobro prodiranje vode v les. Obdelava z voski učinkovito zmanjša prodiranje vode v les. Ta razlika je še posebej opazna pri vosku, ki smo ga nanесли pred modifikacijo. Upoštevati je treba, da smo v tem primeru z voskom verjetno zapolnili lumne traheje na čelih vzorcev in s tem fizično blokirali prodiranje vode v les.

Povsem drug obraz pa pokaže analiza stičnih kotov na površini lesa vzorcev po 60 sekundah. Najnižje kote smo opazili pri lesu smreke (37 °). Najvišje pa pri lesu obdelanem z voskom (126° oziroma 124°). V tem primeru jasno pride do izraza hidrofobna narava lesa obdelanega z voski (Slika 1). Termično modificiran les je nekoliko bolj hidrofoben kot les smreke, a bistveno manj kot termično modificiran les obdelan z voski.

Na terenskem testu smo izpostavili le eno kombinacijo lesa zaščitenega z voski. Iz preglednice 1 je jasno opaziti razliko med vodoravno in navpično izpostavljenimi vzorci. Vodoravno izpostavljeni vzorci so se ne glede na lesno vrsto bistveno bolj navlažili kot navpično postavljeni kosi. To jasno kaže na pomen konstrukcijske zaščite. S konstrukcijskimi ukrepi moramo omogočiti, da voda z lesa čim lažje in čim hitreje odteče. Tako je bilo na vodoravno izpostavljenemu lesu smreke zabeleženih 171 meritev, ko je vlažnost preseгла 30 %, na vertikalnih vzorcih pa je bilo takšnih meritev skoraj desetkrat manj (15). Podobna razmerja je bilo opaziti tudi na drugih dveh preiskovanih materialih. Zanimivo je analizirati razliko med termično modificirano smrekovino in običajno smrekovino. Srednja vlažnost (mediana) smrekovine na fasadi je bila 15,7 %, vlažnost TM smrekovine pa je bila nižja (10,9 %). Razlog za to razliko lahko pripišemo dejstvu, da je bila vlažnost lesa na fasadi odvisna predvsem od relativne zračne vlažnosti zraka. V tem primeru je ravnovesna vlažnost lesa odvisna predvsem od sorpcijskih lastnosti in je posledično ravnovesna vlažnost TM smreke za nekaj odstotnih točk nižja od običajne smrekovine. Po drugi strani je bila vlažnost lesa izpostavljenega na terasi bistveno višja. V tem primeru je vlažnost lesa odvisna ne le od sorpcijskih lastnosti temveč tudi od prodiranja tekoče vode v les. Termično modificiran les je bolj permeabilen, kar se odraža v višji povprečni



**Slika 1: Vpliv impregnacije z voski in termične modifikacije lesa smreke na kratkotrajni navzem vode (200 s) v čela vzorcev (levo) in na kontaktni kot vode na površini lesa po 60 s (desno)**

vlačnosti TM smrekovine (28,3 %) v primerjavi s smrekovino (23,1 %). Še bolj izrazito razliko je opaziti v številu dni, ko vlažnost presega 30 %.

Z obdelavo z voski lahko močno zmanjšamo prodiranje vode v les. Tako je bila povprečna vlažnost TM lesa impregniranega z voski izpostavljenega na terasi bistveno nižja (15,2 %) od lesa smreke (23,1 %) in TM smreke (28,3 %). Tudi število dni, ko vlažnost preseže 30 % je bilo pri z voskom obdelanem termično modificiranem lesu bistveno nižje od ostalih materialov.

### Sklepi

Z laboratorijskimi in terenskimi testi smo potrdili, da lahko s kombinacijo termične modifikacije in impregnacije z voski učinkovito izboljšamo odpornost lesa na navlaževanje in s tem podaljšamo življenjsko dobo lesa izpostavljenega na prostem. Ugotovljeno je bilo, da TM smrekovina obdelana z voski izkazuje hidrofobno naravo površine in da vosek pripomore k nižje-

mu kratkotrajnemu navzemu vode preko čel vzorcev. Vosek tudi bistveno pripomore k nižji relativni lesni vlažnosti vertikalno in horizontalno izpostavljenim vzorcev iz TM smrekovine kar je bistvenega pomena za uporabo lesenih elementov na prostem in tudi praktično uporabnost v praksi.

### Zahvala

Avtorji se zahvaljujejo Evropski komisiji za sofinanciranje projekta 'WINDow based on THERmally modified wood with high performance WAX coating' (WINTHERWAX, 666206) in ARRS za sofinanciranje programa P4-0015.

### Viri:

- SIST EN 1609 (2013) Toplotnoizolacijski proizvodi za uporabo v gradbeništvu – Ugotavljanje vpojnosti vode z metodo delne kratkotrajne potopitve.
- Žlahtič M, Thaler N, Humar M (2015) Water Uptake of Thermally Modified Norway Spruce. *Drvna industrija*, 66, 4: 273-279

**Preglednica 1: Vpliv termične modifikacije in obdelave z voski na vlažnost lesa na modelnem objektu Oddelka za lesarstvo od oktobra 2013 do marca 2016.**

Lesna vrsta		Izpostavitev	
		Navpično (fasada)	Vodoravno (terasa)
Smreka	Število meritev	1485	1396
	Povprečje (%)	15,8	21,9
	Mediana (%)	15,7	23,1
	u > 20 %	118	977
	u > 25 %	26	398
	u > 30 %	15	171
	Max (%)	59,9	54,0
	u >20 % & T >20 °C	4	150
TM Smreka	Število meritev	1328	1396
	Povprečje (%)	10,1	28,4
	Mediana (%)	10,9	28,3
	u > 20 %	59	1112
	u > 25 %	30	883
	u > 30 %	14	619
	Max (%)	44,4	54,2
	u >20 % & T >20 °C	3	174
TM Smreka + vosek	Število meritev	1261	1396
	Povprečje (%)	8,9	15,2
	Mediana (%)	9,6	17,9
	u > 20 %	41	507
	u > 25 %	21	282
	u > 30 %	4	140
	Max (%)	33,0	44,1
	u >20 % & T >20 °C	4	72

# PRIMERJAVA STRIŽNE TRDNOSTI LINEARNO VARJENEGA SPOJA BUKOVINE IN UREA-FORMALDEHIDNEGA LEPILNEGA SPOJA

Jure Žigon\*<sup>1</sup>, Milan Šernek<sup>1</sup>

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

**Ključne besede:** Lepilni spoj, strižna trdnost, termična modifikacija, urea-formaldehidno lepilo, varjenje lesa

## 1 Uvod

Varjenje lesa predstavlja novo tehniko za spajanje dveh kosov lesa, na okolju prijazen način, brez uporabe lepil ali drugih povezovalnih elementov. Mehanske lastnosti varjenega lesa so primerljive z mehanskimi lastnostmi lesa spojenega z nekaterimi nekonstrukcijskimi lepili (Gfeller in sod., 2003). Ena od glavnih pomanjkljivosti varjenega lesa je njegova občutljivost na povišano vlažnost. V primeru izpostavitve varjenega lesa v okolju s povišano relativno zračno vlažnostjo, se navzem vode in navlaževanje začne na robovih spoja, kar na koncu doprivede do delaminacije spoja. Odpornost varjenega spoja na povišano vlažnost lahko do neke mere izboljšamo z spreminjanjem parametrov varjenja, s termično in kemično modifikacijo lesa pa lahko to lastnost še izboljšamo.

Izpostavitvev lesa povišanim temperaturam (od 170 do 220 °C), ob odsotnosti kisika, privede do sprememb v njegovi strukturi in kemijski sestavi, kar lahko izboljša dimenzijsko stabilnost lesa in njegovo odpornost proti razkroju. Nekatere njegove mehanske lastnosti pa se pri tem poslabšajo. Trdnost varjenega termično modificiranega lesa je okoli 50 % nižja od trdnosti nemodificiranega, naravnega lesa (Boonstra in sod., 2006). Omrani in sod. (2010) so ugotovili, da predhodna izpostavitvev kontaktnih površin temperaturam višjim od 85 °C povzroči spremembe, ki močno znižajo strižno trdnost spojev varjenega lesa.

Z namenom zmanjšanja adsorpcije vlage, dimenzijskih sprememb, nagnjeosti k foto- in biološki degradaciji lahko les tudi kemično modificiramo. Modifikacija bukovega lesa s citronsko kislino, zaradi reakcije z kemičnimi komponentami lesa, poveča njegovo dimenzijsko stabilnost in biološko odpornost (Despot in sod., 2008), ter do neke mere učvrsti njegova vlakna.

Namen raziskave je bil ugotoviti optimalne parametre pri varjenju za zadovoljivo spajanje kontrolnega (nemodificiranega) in termično modificiranega bukovega lesa. Rastopina citronske kisline je bila nanesena na kontaktne površine z namenom izboljšanja strižne trdnosti vzorcev in njihove odpornosti na povišano vlažnost. Za primerjavo smo pripravili vzorce, zlepljene z urea-formaldehidnim (UF) lepilom.

## 2 Materiali in metode

### 2.1 Termična modifikacija in priprava bukove

Termično modifikacijo bukoveine (*Fagus sylvatica* L.) smo izvedli v inertni atmosferi z intaktnim vakuumom v 3 urah, pri temperaturi 210 °C. Pred začetkom in po koncu modifikacije je bil les 12 ur kondicioniran pri temperaturi 103 ± 2 °C. Iz desk smo pripravili lamele za varjenje in lepljenje z UF lepilom.



## 2.2 Kemična modifikacija lesa s citronsko kislino

Pripravili smo dve vodni raztopini citronske kisline (10 % in 20 %) in ju nanесли na dva različna načina (premazovanje in vakuumska impregnacija). Na sveže poskobljano površino smo nanесли približno  $125 \text{ g m}^{-2}$  raztopine. Vakuumsko impregnacijo vzorcev z raztopinami kislin smo izvedli v eksikatorju, z 10 minutnim vakuumiranjem, sledilo pa je še eno urno potapljanje pri normalnem tlaku. Vzorce smo nato kondicionirali v standardni klimi z relativno zračno vlažnostjo (RZV) 65 %, pri  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , s čimer so dosegli ravnovesno vlažnost lesa.

## 2.3 Linearno varjenje vzorcev

Varjenje dveh kosov lesa smo izvedli na napravi za varjenje lesa KLN Ultraschall LVW-2261 (Epinal, Francija). Amplituda varjenja je bila 2 mm, pri frekvenci 150 Hz. Ostali parametri pri varjenju so prikazani v preglednici 1. Po ustavitvi procesa varjenja, je bil na vzorce apliciran dodaten tlak, dokler spoj ni popolnoma utrdil in se ohladil. Pred nadaljnim testiranjem so bili vzorci kondicionirani pri RZV 65 % in temperaturi  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## 2.4 Lepljenje vzorcev z UF lepilom

Dve bukovi lameli smo zlepili skupaj v skladu s standardom EN 205. Uporabili smo komercialno UF lepilo Lendur 200 (Nafta-Petrochem d.o.o., Lendava). UF lepilno mešanico smo z valjčkom nanесли na eno lepilno površino ( $200 \text{ g m}^{-2}$ ). Specifični tlak stiskanja je znašal 1,8 MPa, temperatura stiskanja je bila  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ , čas stiskanja pa 7 minut.

## 2.5 Priprava in testiranje strižnih preskušancev

Iz varjenih in zlepjenih vzorcev smo pripravili strižne preskušance širine 20 mm in dolžine 150 mm, ter po izvedbi predpisanih pripravah standarda EN 12765, na univerzalni testirni napravi Zwick / Roell Z005 izmerili natezno strižno trdnost njihovih spojev.

## 3 Rezultati in razprava

Strižna trdnost spojev je upadala z naraščanjem drastičnosti priprav standarda EN 12765 (Preglednica 2). Najvišjo strižno trdnost spoja so dosegli vzorci, ki so bili zgolj kondicionirani v standardni atmosferi (prva priprava). Druga (potopitev v vodi) in tretja (potopitev v vroči vodi) sta povzročili velik upad strižne trdnosti. V spošnem so vzorci varjenega termično modificiranega bukovega lesa dosegli višjo strižno trdnost spoja kot vzorci kontrolne naravne bukovine. To lahko povežemo z večjo dimenzijsko stabilnostjo termično modificiranega lesa v vlažnem okolju, kar povzroča manjše notranje

napetosti v spoju. Zgolj preskušanci termično modificirane bukovine, zlepjeni z UF lepilom, so se približali zahtevam standarda pri pripravah 1 do 3. To lahko prav tako pripišemo boljši dimenzijski stabilnosti termično modificiranega lesa v vlažnih pogojih. V primerjavi z zlepjenimi preskušanci so zvarjeni preskušanci dosegli nižje vrednosti strižne trdnosti. Po četrti pripravi (potopitev v vrelo vodo) so vsi spoji razpadli. Uporaba raztopine citronske kisline pri spojih kontrolnega in termično modificiranega bukovega lesa ni zvišala njegovih strižnih trdnosti, kot tudi ne odpornosti na povišano vlažnost, ne glede na uporabljeno tehniko vnašanja v les (premazovanje / vakuumska impregnacija) in koncentracijo kisline.

## 4 Zaključek

Tehnika varjenja naravne in termično modificirane bukovine se je izkazala kot uporabna, brez uporabe lepil, vendar so meritve strižne trdnosti pokazale nižje vrednosti, kot v primeru preskušancev zlepjenih z UF lepilom. Ugotovljeno je bilo, da so varjeni vzorci termično modificirane bukovine manj dovzetni za sprejemanje vlage iz okolice, v primerjavi z varjeno naravno bukovino. Vnašanje raztopine citronske kisline ni izboljšalo strižne trdnosti varjenih spojev in njihove odpornosti na povišano vlažnost. Varjeni spoji naravne in termično modificirane bukovine niso dosegli zahtevanih vrednosti natezno strižne trdnosti standarda EN 12765.

## Zahvala

Avtorji se za finančno podporo zahvaljujejo fundaciji Mercator Stiftung iz Švice, v okviru mednarodne študentske konference "Innovation School Sprungbrett" v Ljubljani, 8. - 14. maj 2016.

## Viri:

- Boonstra M, Pizzi A, Ganne-Chedeville C, Properzi M, Leban J M (2006). Vibrational welding of heat-treated wood, (Journal of adhesion science and technology 20, 4). pp. 359-369.
- Despot R, Hasan M, Jug M, Šefc B (2008). Biological durability of wood modified by citric acid, (Drvna industrija 59, 2). pp. 55-59.
- Gfeller B, Zanetti M, Properzi M, Pizzi A, Pichelin F, Lehmann M, Delmotte L (2003). Wood bonding by vibrational welding, (Journal of adhesion science and technology 17, 11). pp. 1573-1589.
- Omrani P, Mansouri H R, Pizzi A, Masson E (2010). Influence of grain direction and pre-heating on linear wood welding, (European journal of wood production 68). pp. 113-114
- Žigon J, Pizzi A, Zhang H, Šega B, Čop M, Šernek M (2015). The influence of heat and chemical treatments of beech wood on the shear strength of welded and UF bonded specimens, (Holz als Roh- und Werkstoff 73). pp. 1-3.

Preglednica 1: Parametri pri linearnem varjenju kontrolne in termično modificirane bukovine

Material	Čas varjenja [s]	Tlak pri varjenju [MPa]	Čas stiskanja [s]	Tlak stiskanja [MPa]	Vlažnost lesa [%]
Bukovina, kontrola	5	1,25	30	1,75	10,1
Bukovina, termično modificirana	5	1,50	45	2,50	4,2

Preglednica 2: Primerjava povprečne (n=10) strižne trdnosti preskušancev iz kontrolne in termično modificirane bukovine po različnih pripravah. V oklepajih so navedene vrednosti standardnega odklona.

Vrsta lesa	Način spajanja	Koncentracija citronske kisline [%]	Način vnosa citronske kisline	Strižna trdnost [N mm <sup>-2</sup> ]		
				Priprava vzorca po standardu (EN 12765)		
				1. (10*)	2. (7*)	3. (4*)
Naravna bukovina	Varjenje	/	/	8,6 (1,4)	0,8 (0,9)	0,7 (0,6)
		10	Premazovanje	6,6 (0,7)	1,1 (0,7)	1,6 (1,5)
		10	Vakuumska impregnacija	7,2 (1,8)	1,3 (0,7)	0,1 (0,1)
	UF lepilo	/	/	14,3 (2,1)	6,0 (1,6)	3,4 (1,9)
Termično modificirana bukovina	Varjenje	/	/	8,8 (0,6)	3,5 (1,4)	1,3 (0,9)
		10	Premazovanje	9,9 (1,2)	1,8 (1,7)	1,0 (0,7)
		10	Vakuumska impregnacija	8,2 (2,3)	3,3 (1,3)	1,9 (1,3)
		20	Premazovanje	9,3 (1,9)	1,2 (1,0)	0,4 (0,5)
		20	Vakuumska impregnacija	10,5 (2,5)	2,9 (1,0)	1,8 (1,2)
	UF lepilo	/	/	11,9 (1,9)	7,6 (1,5)	6,4 (2,8)

\* Minimane vrednosti trdnosti lepilnega spoja (v N mm<sup>-2</sup>) navedene v standardu EN 12765 za vsako pripravo



# ONESNAŽILA V ODSLUŽENEM LESU IZ RECIKLAŽNIH IN KOMUNALNIH PODJETJI

**Boštjan Lesar\*<sup>1</sup>, Miha Humar<sup>1</sup>, Guido Hora<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup>Fraunhofer-Institut für Holzforschung Wilhelm-Klauditz-Institut WKI, Bienroder Weg 54 E, 38108 Braunschweig, Nemčija

**Ključne besede:** odslužen les, anorganska onesnažila, lignin, sistemi za razvrščanje

## Uvod

Odslužen les postaja vedno bolj pomemben vir surovin za proizvodnjo novih materialov in kemikalij. Za dobro kakovost končnih izdelkov je zelo pomembno, da se za proizvodnjo uporablja čist odslužen les, oziroma da je znano katera onesnažila se lahko pojavijo v tej surovini. Sedaj se kot surovina večinoma uporablja le mehansko obdelan les (pakirni les). Vendar je takšnega lesa relativno malo, zato bo v prihodnje težko zagotoviti zadostne količine za naraščajoče potrebe po lesu. Po vsej verjetnosti, se bo v prihodnosti odslužen les poleg proizvodnje lesnih kompozitov uporabljal tudi v biorafinerijah kot vir kemičnih snovi na naravni osnovi. Vendar pa je uporaba odsluženega lesa v biorafinerijah povezana z določenimi izzivi. Obstoječe biorafinerije uporabljajo čisto vhodno surovino znane kakovosti, medtem ko se kakovost odsluženega lesa spreminja in niha od dobave do dobave, ki je odvisna od vira odsluženega lesa. Reciklažna podjetja dobivajo odslužen les iz različnih virov, ki ga sortirajo glede na sestavo in videz. Dodatno imajo še notranje sisteme razvrščanja odsluženega lesa. V Evropi ni skupne direktive, ki bi predpisovala razvrščanje odsluženega lesa, zato se večina reciklažnih podjetij poslužuje nemške uredbe za razvrščanje odsluženega lesa Altholzverordnung (2002). Kljub natančni kontroli odsluženega lesa v reciklažnih podjetjih, se v odsluženem lesu še vedno znajde del ne-lesnih materialov. Metode za razvrščanje odsluženega lesa so zelo grobi industrijski postopki zato se je skoraj nemogoče popolnoma izogniti vsem ne-lesnim onesnažilom v odsluženem lesu (Lesar and Humar 2014).

## Materiali in metode

### Materiali

V raziskavo smo vključili različne tipe odsluženega lesa iz reciklažnih podjetij iz Nemčije (G) in Slovenije (S1) ter komunalnega podjetja iz Slovenije (S2). Vzorčenje pri tujih partnerjih ja potekalo v podjetjih po njihovih ustaljenih pravilih. Poleg odsluženega lesa smo za kontrolo pri reciklažnem podjetju v Sloveniji (S1) vzorčili tudi klasične sekance. Za odvzem reprezentativnega vzorca smo poskrbeli z vzorčenjem na minimalno 5 mestih velikega kupa odsluženega lesa ali klasičnih sekancev. Povprečna velikost posameznega vzorca je bila 5 litrov. Dodatno smo enkrat odvzeli tudi večjo količino odsluženega lesa (20 kg) v Slovenskem (S1) in Nemškem (G) reciklažnem podjetju, na katerem smo izvedli sejnalno analizo. Ter nato v posameznih frakcijah določili količine anorganskih onesnažil, delež lignina in delež ne topnih snovi.

### Metode

V laboratoriju smo nato vse vzorce posušili, pregledali in ocenili sestavo vzorcev (drevesna vrsta, lesni kompoziti, ne-lesni materiali...) in odstranili ter določili masne deleže posameznih ne-lesnih materialov v vzorcih. Nato smo vzorce zmleli na največjo velikost delcev 1 mm. Takšen vzorec smo dodatno homogenizirali z mešenjem in iz vsakega pripravili tri tablete za nadaljnje analize.

Na podlagi preteklih raziskav odsluženega lesa (Hladnik 2009) smo določili onesnažila, ki se pojavljajo v odsluženem lesu (Fe, Zn, Pb, Br, Cl, Cu, Cr). Za te kemijske elemente smo pripravili ustrezno umeritveno krivuljo. Vse analize smo izvedli z rentgenskim fluorescenčnim spektrometrom (XRF, TwinX, Oxford

instruments). Večino meritev smo izvedli s PIN detektorjem ( $U = 26 \text{ kV}$ ,  $I = 115 \text{ }\mu\text{A}$ ,  $t = 300 \text{ s}$ ). Prisotnost klora smo pri istih pogojih določali s proporcionalnim detektorjem v helijevi atmosferi.

## Rezultati

Vzorci odsluženega lesa kategorije AI vseh preiskovanih podjetji so bili v glavnem sestavljeni iz smreke, bora in jelke ter v manjši meri iz topola. Veliko večje razlike so pri mešani kategoriji AI-AIII, kjer so velike razlike med podjetji in tudi med posameznimi datumi vzorčenja, 65 % - 80 % (iverne plošče, MDF, HDF) 20 % - 30 % les iglavcev (smreka, bor jelka) in 5%-10% les listavcev (bukev, hrast, robinija). V vzorcih smo poleg lesne sestave opazovali deleže stekla, kovin, plastičnih mas, tekstila, papirja, kamnin in preostalih lesnih materialov. Rezultati kažejo da je v odsluženem lesu z zahtevnimi sortirnimi sistemi manj ne-lesnih materialov. V povprečju ima AI odslužen les (odslužen les najvišje kakovosti) 0,2 % ne-lesnih materialov medtem ko je delež ne lesnih materialov tudi do 6 krat višji v mešani kategoriji odsluženega lesa AI-AIII. Približno 3 % vzorcev odsluženega lesa AI kategorije je preseglo mejne vrednosti po nemški Altholz direktivi. Medtem ko je bil takšen delež vzorcev odsluženega lesa AI-AIII kar 85 %. Najbolj kritični elementi (kateri so presegli mejne vrednosti) so klor, krom, baker in svinec. V raziskavi smo spremljali tudi spreminjanje koncentracije onesnažil skozi leto. Spremembe skozi leto smo spremljali na odsluženem lesu AI-AIII kategorije. Iz slike 1

je razvidno da ni sezonskih vplivov na koncentracije anorganskih onesnažil, ampak koncentracije variirajo zaradi različne vhodne surovine. Rezultati sejalne analize kažejo, da je v prvih treh (bolj grobih) frakcijah več kot 85 % celotne mase. Koncentracija onesnažil v odsluženem lesu narašča z zmanjševanjem velikosti posameznih frakcij. Ravno tako kot deleži onesnažil z zmanjševanjem frakcij narašča tudi delež lignina in delež netopnih komponent v vzorcih sejalne analize.

## Zahvala

Zahvala Ministrstvu za izobraževanje, znanost in šport Republike Slovenije za sofinanciranje projekta REWO-BIOREF (WoodWisdom-Net+ ) in ARRS za sofinanciranje programa P4-0015.

## VIRI

- Altholzverordnung (2002) Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung - AltholzV ). 1–16.
- Hladnik J (2009) Anorganska onesnažila v odsluženem lesu in ploščah iz dezintegriranega lesa. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, diplomsko delo
- Lesar B, Humar, M (2014); Vsebnost anorganskih onesnažil v lesnih ostankih slovenske pohištvene industrije. V: Kraiger H (ur.), Humar M (ur.) Pametna specializacija v gozdarstvu, lesarstvu in papirništvu : zbornik povzetkov Znanstvenega srečanja Gozd in les, [Ljubljana, 27. maj 2014], Založba Silva Slovenica, Gozdarski inštitut Slovenije, Ljubljana, pp 27–28



**Slika 1: Povprečne koncentracije klora v AI-AIII odsluženem lesu Slovenskega reciklažnega podjetja (S1) skozi eno leto vzorčenja. Vzorci grobe frakcije (zgoraj), Vzorci fine frakcije (spodaj).**



# VPLIV KLIMATSKIH POGOJEV NA POTES NEKATERIH LESNIH PLOŠČNIH KOMPOZITOV

Sergej Medved<sup>1</sup>, Vladimir Jambreko<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Svetošimunska cesta 25, HR-10000 Zagreb, Hrvaška

**Ključne besede:** lesni ploščni kompoziti, poves, obremenitev, upogib

## UVOD

Uporabnost lesnih ploščnih kompozitov, še posebej tistih namenjenih uporabi v gradbeništvu je pogojena z njihovim obnašanjem v okolju s spreminjajočimi klimatskimi pogoji in pri dalj časa trajajočih obremenitvah. Mehano-sorptivno obnašanje lesnih ploščnih kompozitov je odvisno tako od morfoloških značilnosti gradnikov, uporabljenega lepila, vrste plošče in tudi gostote plošč (Gressel 1972, Clad in Schmidt-Helle-rau 1981, Leichter 1986, Dinwoodie in sod. 1990, Friedly in sod. 1992, Lee 1999, Dube in sod. 2006, Fan in sod. 2009). Kot so ugotovili Dinwoodie in sod. 1990, Niemi in sod. 1997, Fernández-Golfín Seco in Díez Barra 1998, Mundy in sod. 1998, Prithcard, 2001, Fan in Enjily 2008, Fan in sod. 2009 ter Wang in sod. 2012 pa na mehanosorptivno lezenje vplivajo tudi čas trajanja obremenitve, velikost obremenitve in klimatski pogoji.

Namen tega prispevka je prikazati vpliv klimatskih pogojev na poves nekaterih lesnih ploščnih kompozitov.

## MATERIALI IN METODE DELA

Za ugotavljanje vpliva klimatskih pogojev na poves lesnih ploščnih kompozitov smo uporabili pet različnih lesnih ploščnih kompozitov namenjenih tako uporabi v gradbeništvu, kakor tudi splošni oz. pohištveni rabi (preglednica 1).

Iz vsake vrste plošče smo izžagali šest preskušance velikosti 180 mm × 30 mm × debelina, ki smo jih izpostavili trem različnim klimatskim pogojem (preglednica 2).

Za ugotavljanje povesa smo uporabili štiritočkovni upogibni test (slika 1).

Klimatizirane preskušance smo obremenili z obremenitvijo 600 N. Čas obremenitve je bil 240 minut.

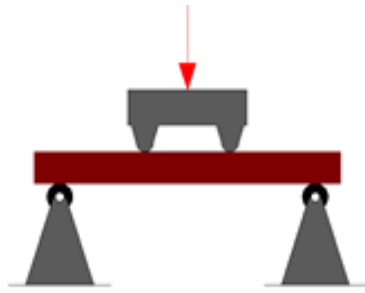
**Preglednica 1: Lastnosti izbranih lesnih ploščnih kompozitov**

	Oznaka	Debelina v mm	Gostota in kg/m <sup>3</sup>
<b>Furnirna plošča – Bukev (7 slojev)</b>	FP-Bu	12	750
<b>OSB</b>	OSB	19	600
<b>Konstruktivna iverna plošča P5</b>	KIP P5	19	700
<b>Pohištvena iverna plošča P2</b>	IP P2	18	650
<b>MDF</b>	MDF	18	700

**Preglednica 2: Klimatski pogoji**

	Temperatura v °C	Relativna zračna vlažnost v %
<b>A</b>	20	20
<b>B</b>	20	65
<b>C</b>	20	85

## Slika 1: Shematski prikaz štiritočkovnega upogibnega testa



### REZULTATI

Poves preskušancev pri štiritočkovnem upogibnem testu je odvisen tako od vrste lesnega ploščnega kompozita kakor tudi od klimatskih pogojev (slika 2).

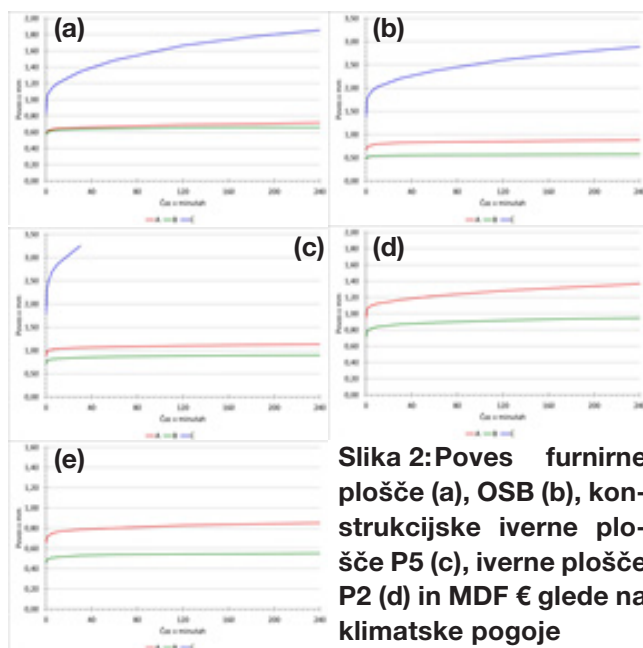
Ugotovimo lahko, da imajo plošče, ki so namnjene uporabi v gradbeništvo (FP-Bu, OSB, KIP P5) manjši poves kakor pri iverni plošči namenjeni splošni oz. pohištveni uporabi (IP P2). Majhen povesa pri nizki in normalni klimi smo ugotovili tudi pri MDF plošči. Pri ploščah narejenih iz manjših gradnikov (KIP P5, IP P2 in MDF) smo ugotovili, da je pri preskušancih izpostavljenih višji vlažnosti prišlo do predčasne porušitve in sicer je pri KIP P5 prišlo do porušitve po 30 minutah, pri IP P2 in MDF pa celo po 1 minuti obremenitve.

### ZAKLJUČKI

Poves lesnih ploščnih kompozitov je odvisen tako od velikosti gradnikov, uporabljenega lepila, vrste ploščnega kompozita ter klimatskih pogojev.

### ZAHVALA

Avtorja se zahvalujeta Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije za podporo in financiranje v okviru programa P4-0015.



Slika 2: Poves furnirne plošče (a), OSB (b), konstrukcijske iverne plošče P5 (c), iverne plošče P2 (d) in MDF € glede na klimatske pogoje

### Viri:

- Clad, W., Schmidt-Hellerau, C. (1981) Zeitstandversuche mit Spanplatten. Teil 1: Ergebnisse von Untersuchungen an industriell hergestellten Spanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff, 39: 217-222.
- Dube, H., Stephani, B., Krug, D., Roffael, E., Dix, B. (2006) Zur Feuchtebeständigkeit und Hydrolyseresistenz von mitteldichten Faserplatten (MDF). Teil 3: Kriechverhalten und Formstabilität. Holztechnologie 47: 24-32.
- Dinwoodie J.M., Higgins J.A., Paxton B.H., Robson D.J. (1990): Creep research on particleboard. Holz als Roh- und Werkstoff, 48: 5-10
- Fernández-Golfín Seco J.I., Díez Barra M.R. (1998): Long – term deformation of MDF panels under alternating humidity conditions. Wood Science and Tehnology 32: 33-41
- Gressel, P. (1972) Zeitstandbiegeverhalten von Holzwerkstoffen in Abhängigkeit von Klima und Belastung. Teil 1: Bisherige Untersuchungen, Versuchsplan, Versuchsdurchführung. Holz als Roh- und Werkstoff, 30: 259-266.
- Fan M., Enjily V. (2008): Strength and Deformation Modification Factors of Wood Based Composites for Engineering Design. The open Construction and Building Technology Journal, 2: 224-232
- Fan M., Ohlmeyer M., Irle M., Haelvoet W., Athanassiadou E., Rochester I. (2009): Performance in Use and New Products of Wood Based Composites. Brunell University Press, London, UK: 169-191
- Firedly K.J., Tang R.C., Soltis, L.A. (1992): Creep behavior model for structural lumber. Journal of Structural Engineering, 118(8): 2261-2277
- Lee J.N. (1999): Structural behavior of yellow-poplar LVL: Effect of veneer-joint designs and environ-mental conditions. Auburn University, Auburn, USA. 354 p.
- Leichti R.J. (1986): Assessing the reliability of wood composites I-beams. Auburn University, Auburn, USA. 267 p.
- Mundy J.S., Bonfield, P.W., Dinwoodie, J.M., Paxton, B.H. (1998): Modelling the creep behavior of chipboard: The reological approach. Wood Science and Technology, 32: 261-272.
- Niemz P., Pobleto H., Vidaure S. (1997): Untersuchungen zum Kriechverhalten von MDF und Spanplatten im Normalklima. Holz als Roh-und Werkstoff 55: 314-342
- Pritchard J., Ansell M.P., Thompson R.J.H., Bonfield P.W. (2001): Effect of two relative humidity envi-ronments on the performance properties of MDF, OSB and chipboard. Part 2. Fatigue and creep per-formance. Wood Science and Technology 35: 405-423
- Wang J.B., Lam F., Foschi R.O. (2012): Duration-of-load and creep effects in strand-based wood com-posite: experimental research. Wood Science and Technology, 46: 361-373





# Kazalo

- 4 RESEARCH-BASED INNOVATION - A GATEWAY TO GREEN SUSTAINABLE DEVELOPMENT  
**Igor Emri**
- 5 REMOTE SENSING IN FOREST HEALTH MONITORING  
**Sylwia A. Nasilowska, Mariusz Kacprzak, Jan Kotlarz, Alicja Rynkiewicz**
- 6 RAZVOJ BREZPILOTNEGA SISTEMA ZA VZORČENJE IZ DREVESNIH KROŠENJ  
**Marko Bajc, Jernej Brezovar, Domen Finžgar, Andraž Kladnik, Rok Capuder, Hojka Kraigher**
- 9 FUNKCIONALIZACIJA NANOFIBRILIRANE CELULOZE S TEMPO REAGENTOM  
**Jaka Levanič, Ida Poljanšek, Primož Oven**
- 11 BIOTEHNOLOGIJA V PAPIRNIŠTVU: UČINKOVITOST UPORABE ENCIMOV  
**M. Sežun, M. Mešl, J. Zule, G. Lavric, A. Gregori**
- 14 LANDSCAPE DIVERSITY BY DESCRIBING THE STRUCTURE OF SPECTRAL REFLECTANCE DATASET  
**Anna Mazur**
- 15 PRIROČNIK ZA DOLOČANJE KORENIN OLESENELIH RASTLIN: »ATLAS OF WOODY PLANT ROOTS – Morphology and Anatomy with Special Emphasis on Fine Roots«  
**Tanja Mrak, Jožica Gričar, Peter Železnik, Hojka Kraigher**
- 17 STABILNI IZOTOPI V GOZDNEM EKOSISTEMU – ANALIZNE METODE IN UPORABA  
**Saša Zavadlav, Grega E. Voglar, Polona Hafner, Mitja Ferlan, Tom Levanič**
- 21 ALI LAHKO Z OBDELAVO Z VOSKI PODALJŠAMO ŽIVLJENJSKO DOBO LESA?  
**Ajda Pogorelčnik, Boštjan Lesar, Nejc Thaler, Matej Lesar, Davor Kržišnik, Aleš Ugovšek, Barbara Šubic, Gregor Rep, Miha Humar**
- 24 PRIMERJAVA STRIŽNE TRDNOSTI LINEARNO VARJENEGA SPOJA BUKOVINE IN UREA-FORMALDEHIDNEGA LEPILNEGA SPOJA  
**Jure Žigon, Milan Šernek**
- 27 ONESNAŽILA V ODSLUŽENEM LESU IZ RECIKLAŽNIH IN KOMUNALNIH PODJETJI  
**Boštjan Lesar, Miha Humar, Guido Hora**
- 29 VPLIV KLIMATSKIH POGOJEV NA POVES NEKATERIH LESNIH PLOŠČNIH KOMPOZITOV  
**Sergej Medved, Vladimir Jambreković**