



Silva Slovenica

Studia Forestalia Slovenica

191



GOZDARSKI INŠTITUT SLOVENIJE
SLOVENIAN FORESTRY INSTITUTE



UNIVERZA
V LJUBLJANI

BF

Biotehniška
fakulteta

Znanstveno srečanje

GOZD in LES: Prihodnost biogospodarstva



Ljubljana, 19. 5. 2026

Zbirka *Studia Forestalia Slovenica*, št. 191

ISSN 0353-6025

DOI 10.20315/SFS.191

Izdajatelj:

Gozdarski inštitut Slovenije,
Založba Silva Slovenica, 2026

Naslov: Znanstveno srečanje GOZD in LES: Prihodnost biogospodarstva

Glavni uredniki:

akad. prof. dr. Hojka Kraigher

dr. Jožica Gričar

prof. dr. Miha Humar

Tisk: BIROGRAFIKA BORI d.o.o.

Izdaja: 1. izdaja

Naklada: 50 izvodov

Cena: brezplačno

Sofinanciranje:

Srečanje in izdajo zbornika finančno podpirajo projekt WoodInnovate (Interreg V-A Italija–Slovenija), Programske skupine P4-0015, P4-0107, P4-0430, ARIS, MNVP, MKGP, GIS in BF

Prispevki v zborniku so recenzirani.

To delo je ponujeno pod licenco Creative Commons Priznanje avtorstva-Deljenje pod enakimi pogoji 4.0 Mednarodna licenca./This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0



International Licence

CIP - Kataložni zapis o publikaciji

Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

630*90(082)

674(082)

ZNANSTVENO srečanje Gozd in les (2026 ; Ljubljana)

Gozd in les : prihodnost biogospodarstva : znanstveno srečanje : Ljubljana, 19. 5. 2026 / [glavni uredniki Hojka Kraigher, Jožica Gričar, Miha Humar]. - 1. izd. - Ljubljana : Gozdarski inštitut Slovenije, Založba Silva Slovenica, 2026. - (Studia Forestalia Slovenica (Tiskana izd.), ISSN 0353-6025 ; 191)

ISBN 978-961-6993-94-4

COBISS.SI-ID 277854467

GOZD in LES:



Prihodnost
biogospodarstva



KAZALO

VABLJENA PREDAVANJA

- 9 Primerjava struktur inputov v gozdno-lesni verigi na podlagi nacionalnih input-output tabel v Sloveniji, na Češkem in v Avstriji
Domen Arnič, Peter Prislan, Hanuš Vavrčik, Luka Juvančič
- 15 Vloga shem plačil za ekosistemske storitve (PES) pri krepitevi gozdno-lesnega biogospodarstva
Kaja Plevnik, Anže Japelj
- 22 Vpliv časa sečnje na vlažnost lesa navadne bukve (*Fagus sylvatica* L.) na Kočevskem
Amina Gačo Jež, Mitja Piškur, Miha Humar

PLAKATI

- 31 Raziskave preživetja, ranljivosti in s fitnessom povezanih lastnosti provenienc navadne bukve (*Fagus sylvatica* L.) v poskusu Kamenski hrib/Straža (Bu20-12) za dinamično ohranjanje gozdov v času pospešenih okoljskih sprememb
Marija Kravanja, Marjana Westergren, Natalija Dovč, Gregor Božič
- 35 Izolacija rizosfernih bakterij in gliv bukve (*Fagus sylvatica* L.) in jelke (*Abies alba* Mill.) ter testiranje izolatov na rastlinam koristne lastnosti
Robert Logar, Tina Unuk Nahberger
- 39 Projekt EARTHONE in pilotna ploskev na Krasu: spremljanje prehoda rabe tal, talnih procesov, vegetacije in tokov ogljika v submediteranskem krasu
Nataša Šibanc, Gal Oblišar, Mitja Ferlan, David Fabjan, Konzorcij Projekta Earthone, Tine Grebenc
- 45 Medletna variabilnost značilnosti lesa in floema vrst, ki sobivajo: *Fraxinus ornus*, *Quercus pubescens* in *Ostrya carpinifolia*
Jožica Gričar, Klemen Eler, Saša Ogorevc, Debojit Chanda, Sarkiri Kro, Mohendra Thapa, Polona Hafner, Peter Prislan
- 51 Kronologije širin branik borov in hrastov v Sloveniji: podlaga za analizo vplivov podnebnih sprememb na kakovost lesa
Polona Hafner, Jožica Gričar, Luka Krajnc, Gregor Skoberne, Saša Ogorevc, Peter Prislan
- 55 Variabilnost širine branik in lesno-anatomskih parametrov pri dobu, gradnu in njihovih hibridih v Sloveniji
Peter Prislan, Polona Hafner, Gregor Skoberne, Saša Ogorevc, Jožica Gričar

- 60 Odzivanje gozdno-lesnega sektorja na ujme v alpsko-jadranski regiji: analiza izkušenj in prilagoditvenih strategij lesnopredelovalnih podjetij v Sloveniji in Furlaniji – Julijski krajini
Polona Hafner, Jožica Gričar, Peter Prislan, Luka Krajnc, Michele Missoni, Eleonora Provenzale, Stefania Silvestri, Bernard Likar, Erika Valentinčič, Boštjan Lesar, Eli Krežič, Miha Humar
- 64 Potencial prostorskih informacij hiperspektralnega oslikovanja za prepoznavanje lesnih vrst
Luka Kopač, Miha Humar
- 68 Ocena modelov globokega učenja za razvrščanje gozdnih lesnih sortimentov po tržni vrednosti na podlagi slik
Matevž Triplat, Žiga Lukančič, Vasja Kavčič
- 73 Možnosti pridobivanja nanoceluloze z ultra finim mletjem lesne biomase
Kramarič Luka, Hrovatič Peter, Osolnik Urša, Poljanšek Ida, Vek Viljem, Oven Primož
- 76 Izboljšanje adhezije površine lesa z obdelavo z netermično atmosfersko plazmo
Klemen Kotnik, Milan Šernek
- 80 Zamreževanje šelaka s citronsko in fosforno kislino za izboljšanje lepilnih lastnosti
Maks Brus, Klemen Kotnik, Luka Kramarič, Milan Šernek
- 83 Krožno gospodarstvo v pohištvenem sektorju: vsebina in ugotovitve praktičnega priročnika za mala in srednje velika podjetja
Polona Hafner, Peter Prislan, Erika Valentinčič, Bernard Likar, Jožica Gričar
- 87 Nagradni natečaj LES ZA VSE na Oddelku za lesarstvo 2026
Eli Keržič, Bojan Gospodarič, Drago Vidic, Miha Humar, Gorazd Fajdiga
- 90 Dejavniki razvoja kompetenc učečih se za trajnostni in digitalni prehod lesarstva
Luka Goropečnik, Danijela Makovec Radovan, Jože Kropivšek

Vabljena predavanja

Primerjava struktur inputov v gozdno-lesni verigi na podlagi nacionalnih input-output tabel v Sloveniji, na Češkem in v Avstriji

Domen Arnič¹, Peter Prislan², Hanuš Vavrčík³, Luka Juvančič⁴

1 Gozdno gospodarstvo Bled d.o.o, Ljubljanska cesta 19, 4260 Bled

2 Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana

3 Faculty of Forestry and Wood Technology - Mendel University in Brno, Zemědělská 3, 613 00 Brno

4 Biotehniška fakulteta - Univerza v Ljubljani, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana

E-naslov: domen.arnic@ggbled.si

POUDARKI:

- Struktura gozdno-lesne verige se med državami bistveno razlikuje: Avstrija in Češka izkazujeta višjo stopnjo notranje integracije in tehnološke kompleksnosti, medtem ko je Slovenija bolj odvisna od zunanjih inputov in ima bolj razpršeno strukturo proizvodnje.
- Ustvarjanje dodane vrednosti je v Sloveniji bolj delovno intenzivno, z visokim deležem sredstev za zaposlene, medtem ko Avstrija dosega višje poslovne presežke, kar kaže na večjo kapitalsko intenzivnost in bolj produktivne proizvodne strukture.
- Produktivnost (dodana vrednost na zaposlenega) je najvišja v Avstriji, najnižja na Češkem, Slovenija pa zavzema vmesno pozicijo, pri čemer razlike izhajajo predvsem iz različnih organizacij proizvodnje, stopnje predelave in vpetosti sektorjev v širšo industrijsko okolje.

HIGHLIGHTS:

- The structure of the forest-based value chain differs significantly across countries: Austria and Czechia exhibit higher levels of internal integration and technological complexity, while Slovenia shows a more fragmented structure and stronger dependence on external inputs.
- Value creation in Slovenia is more labour-intensive, with a high share of compensation of employees, whereas Austria achieves higher operating surpluses, indicating greater capital intensity and more efficient production structures.
- Productivity (value added per employee) is highest in Austria, lowest in Czechia, with Slovenia in an intermediate position, reflecting differences in production organization, processing depth, and integration within the broader industrial system.

UVOD:

Gozdno-lesna veriga je pomemben del slovenskega bio-gospodartva in vzpostavlja povezavo med primarno proizvodnjo lesa, njegovo predelavo in končno rabo. Podatki o proizvodnji okroglega lesa, njegovi rabi in zunanji trgovini so temeljni za spremljanje gospodarjenja z gozdovi ter za vrednotenje učinkovitosti in razvojnega potenciala lesne vrednostne verige (Arnič et al., 2019, Prislan et al., 2023).

V kontekstu evropskega bio-gospodartva postaja vse pomembnejše razumevanje makroekonomskega položaja gozdno-lesnega sektorja ter njegove vpetosti v nacionalna gospodarstva. Pri tem imajo pomembno vlogo kazalniki, kot so vrednost proizvodnje, dodana vrednost in zaposlenost v sektorjih gozdarstva, lesarstva, pohištvene industrije, papirništva in bioenergije. Primerjalne analize

med državami omogočajo identifikacijo strukturnih razlik ter razvojnih priložnosti v lesni verigi (Arnič et al., 2024).

Namen prispevka je analizirati in primerjati gozdno-lesno verigo v Sloveniji in na Češkem ter njun položaj umestiti v širši evropski kontekst s primerjavo z Avstrijo kot eno vodilnih držav na področju gozdno-lesnega biogospodarstva. Poseben poudarek je na analizi strukture inputov v lesnopredelovalnem sektorju, saj ta odraža stopnjo povezanosti sektorja z drugimi gospodarskimi dejavnostmi ter njegovo odvisnost od domačih in uvoznih virov.

MATERIAL IN METODEDE:

Analiza temelji na nacionalnih input-output tabelah, ki predstavljajo standardiziran makroekonomski okvir za proučevanje medsektorskih povezav v gospodarstvu. Input-output tabela je matrika medpanožnih transakcij, ki prikazuje tokove blaga in storitev med posameznimi sektorji v določenem časovnem obdobju (Arnič et al., 2023). Te podatke v večletnih časovnih intervalih (običajno vsakih 5 do 10 let) pripravljajo nacionalni statistični uradi, za večino evropskih držav pa so dostopni tudi preko podatkovnega portala EUROSTAT (2026).

Analiza zajema ključne segmente gozdno-lesne verige, vključno s sektorjem gozdarstva (A02 – gozdarstvo in sečnja), lesnopredelovalno industrijo (C16), papirno industrijo (C17) ter proizvodnjo pohištva (C31–C32). Struktura inputov je obravnavana v vertikalni smeri input-output matrike in prikazuje delež posameznih vrst inputov, ki so potrebni za proizvodnjo v obravnavanem sektorju.

Za potrebe analize smo inpute agregirali v štiri osnovne skupine:

(1) medsektorski inputi, ki predstavljajo proizvode in storitve drugih gospodarskih sektorjev, potrebne za proizvodni proces, (2) sredstva za zaposlene, ki vključujejo nadomestila za delo, (3) uvoz, ki zajema vrednost blaga in storitev iz tujine, in (4) ostali primarni inputi, ki vključujejo neto poslovni presežek, davke na proizvodnjo brez subvencij, potrošnjo stalnega kapitala ter druge davke, zmanjšane za subvencije.

Analiza temelji na primerjavi relativnih deležev posameznih skupin inputov znotraj sektorja lesarstva med obravnavanimi državami. Tak pristop omogoča vpogled v strukturne razlike v organizaciji proizvodnje, stopnjo odvisnosti od uvoza ter vpetost sektorja v domače gospodarsko okolje.

REZULTATI IN RAZPRAVA:

Gozdarstvo

Analiza strukture inputov v sektorju gozdarstva (A02) kaže, da v vseh treh obravnavanih državah prevladujejo znotrajsektorski tokovi, kar pomeni, da sektor v veliki meri temelji na lastnih proizvodnih kapacitetah in storitvah (Preglednica 1). Takšna struktura je značilna za primarne dejavnosti, kjer so proizvodni procesi relativno homogeni in manj odvisni od kompleksnih medsektorskih povezav.

Kljub tej skupni značilnosti pa so med državami opazne pomembne razlike v sekundarni strukturi inputov. V

Preglednica 1: Delež medsektorskih inputov v bruto proizvodnji sektorja gozdarstva (A02) v Sloveniji, na Češkem in v Avstriji.

		SLO	CZE	AUT
A02	Gozdarstvo	50%	39%	69%
C19	Proizvodnja koks in rafiniranih naftnih proizvodov	10%	1%	4%
C25	Proizvodnja kovinskih izdelkov, razen strojev in naprav	1%	2%	2%
C33	Popravila, vzdrževanje in montaža strojev in naprav	2%	0%	6%
F	Gradbeništvo	0%	5%	5%
C28	Proizvodnja strojev in naprav, d. n.	5%	2%	0%
H	Prevoz in skladiščenje	14%	5%	0%
G46	Trgovina na debelo	2%	10%	2%
H52	Skladiščenje in spremljajoče prevozne dejavnosti	1%	5%	0%
L64	Dejavnosti finančnih storitev, razen zavarovalništva in dejavnosti pokojninskih skladov	1%	2%	4%
C16	Proizvodnja lesa ter lesenih in plutovinastih izdelkov, razen pohištva; proizvodnja slamnatih in pletarskih izdelkov	0%	4%	0%
B	Rudarstvo	0%	5%	0%
X	Ostalo	14%	20%	8%

Sloveniji ima relativno velik pomen sektor goriv ter transportnih storitev, kar kaže na večjo odvisnost gozdarstva od logističnih dejavnosti in energentov. To je lahko povezano z razpršenostjo gozdnih virov, konfiguracijo terena ter organizacijo sečnje in spravila lesa, ki zahteva intenzivnejšo uporabo transporta.

Na Češkem je struktura inputov nekoliko drugačna, saj poleg znotrajsektorskih tokov pomembno vlogo prevzemajo dejavnosti skladiščenja in posredništva. To nakazuje bolj razvite funkcije organizacije trga lesa, kjer ima večji pomen upravljanje zalog, distribucija ter vmesne trgovinske aktivnosti.

V Avstriji je delež znotrajsektorskih inputov izrazito visok (okoli 69 %), kar kaže na visoko stopnjo internalizacije proizvodnih procesov in s tem večjo samozadostnost sektorja. Poleg tega izstopata sektorja popravil in gradbeništva, kar lahko odraža večjo tehnološko intenzivnost ter večji poudarek na vzdrževanju mehanizacije in infrastrukture.

Lesarstvo

Lesnopredelovalna industrija (C16) predstavlja prvi ključni predelovalni člen gozdno-lesne verige. Primerjalna analiza treh držav kaže, da je sektor najrazvitejši v Avstriji, medtem ko Češka dosega primerljivo strukturo inputov, Slovenija pa v tem pogledu zaostaja.

Delež lastnega sektorja v strukturi inputov, ki do določene mere odraža stopnjo notranje integracije in ustvarjanja dodane vrednosti, znaša v Sloveniji 29 %, kar je za 7 odstotnih točk manj kot na Češkem in za 10 odstotnih točk manj kot v Avstriji. To nakazuje nižjo stopnjo predelovalne

poglobljenosti in manjšo interno povezanost sektorja v Sloveniji (Preglednica 2).

Po drugi strani je delež inputov iz gozdarstva (A02) najvišji na Češkem (21 %), sledita Slovenija (17 %) in Avstrija (14 %). To kaže, da je češka lesnopredelovalna industrija relativno bolj vezana na domačo surovinsko bazo, medtem ko je v Avstriji večji poudarek na nadaljnjih fazah predelave in višji dodani vrednosti.

Poleg gozdarstva in lastnega sektorja imajo v vseh treh državah pomembno vlogo tudi storitveni in podporni sektorji. Trgovina na debelo (G46) predstavlja enega ključnih inputov, zlasti v Avstriji in na Češkem, kar kaže na pomembno vlogo organizacije trga in distribucijskih verig. Prevozne storitve (H49–H51) so izrazitejše v Avstriji in na Češkem, kar je lahko povezano z večjo prostorsko integracijo proizvodnje.

Gradbeništvo (F) izstopa predvsem v Sloveniji (8 %), kar lahko nakazuje specifične povezave med lesarstvom in gradbenim sektorjem ali večjo vlogo investicij v infrastrukturo. Posebnost Slovenije je tudi relativno visok delež kovinskih izdelkov (C25), kar lahko odraža večjo odvisnost od vhodnih materialov za primarno obdelavo lesa. Na Češkem pa izstopa višji delež kemikalij (C20), kar je verjetno povezano z večjo razvitostjo nadaljnjih predelovalnih procesov (npr. lepljeni proizvodi, plošče).

Skupno gledano rezultati kažejo, da se Avstrija in Češka odlikujeta z bolj interno povezano in tehnološko raznoliko strukturo inputov, medtem ko je v Sloveniji struktura bolj odvisna od zunanjih sektorjev, kar lahko omejuje ustvarjanje dodane vrednosti v domači lesnopredelovalni verigi.

Preglednica 2: Struktura medsektorskih inputov v bruto proizvodnji lesnopredelovalne industrije (C16) v Sloveniji, na Češkem in v Avstriji.

		SLO	CZE	AUT
CPA_A02	Gozdarstvo	17%	21%	14%
CPA_C16	Proizvodnja lesa ter lesenih in plutovinastih izdelkov, razen pohištva; proizvodnja slamnatih in pletarskih izdelkov	29%	36%	39%
CPA_C17	Proizvodnja papirja in izdelkov iz papirja	0%	2%	3%
CPA_D	Oskrba z električno energijo, plinom, paro in hladnim zrakom	1%	3%	3%
CPA_F	Gradbeništvo	8%	1%	4%
CPA_G46	Trgovina na debelo	8%	10%	11%
CPA_H49_H50_H51	Kopenski, vodni in zračni prevoz	4%	6%	7%
CPA_M69_70	Pravne in računovodske dejavnosti; Dejavnost uprav podjetij, podjetniško in poslovno svetovanje	1%	1%	3%
CPA_C25	Proizvodnja kovinskih izdelkov, razen strojev in naprav	7%	1%	2%
CPA_C20	Proizvodnja kemikalij in kemičnih izdelkov	2%	6%	2%
X	Ostalo	23%	15%	12%

Papirništvo

Sektor papirništva (C17) med obravnavanimi državami izkazuje izrazite strukturne razlike v sestavi inputov, zlasti glede vloge primarne lesne surovine. V Sloveniji je delež inputov iz gozdarstva (A02) in lesarstva (C16) zelo nizek (skupaj približno 2 %), kar kaže na omejeno neposredno povezanost papirne industrije z domačo surovinsko bazo. Nasprotno je v Avstriji delež inputov iz gozdarstva bistveno višji (8 %), kar odraža močnejšo integracijo med primarno proizvodnjo lesa in papirno industrijo (preglednica 3).

Na Češkem poleg gozdarstva (4 %) izstopa tudi relativno visok delež inputov iz lesarstva (12 %), kar je mogoče povezati z večjo rabo stranskih proizvodov in ostankov iz lesnopredelovalne industrije. Takšna struktura kaže na bolj učinkovito izkoriščanje lesne biomase znotraj verige.

V vseh treh državah ima osrednjo vlogo lastni sektor (C17), katerega delež je najvišji v Sloveniji (43 %), na Češkem in v Avstriji pa znaša 30 %. To je skladno z značilnostmi papirne industrije, kjer ima recikliranje pomembno vlogo in kjer kroženje sekundarnih surovin (npr. odpadnega papirja) povečuje delež znotrajsektorskih tokov.

Pomemben del strukture inputov predstavljajo tudi kemikalije (C20), ki so ključne za procese predelave, ter energetika (D), kar odraža energetska intenzivnost proizvodnje.

Posebnost Slovenije je relativno visok delež sektorjev ravnanja z odpadki (E37–E39), kar je verjetno povezano z večjim poudarkom na recikliranju in predelavi sekundarnih surovin. Po drugi strani višji delež kategorije »ostalo« na

Češkem in v Avstriji nakazuje bolj razpršeno strukturo podpornih inputov.

Pohišvena industrija

Pohišvena industrija (C31–C32) med obravnavanimi sektorji izstopa kot izrazito "hibriden" sektor, saj združuje inpute iz različnih materialnih in industrijskih verig. Posledično so razlike v strukturi inputov med državami največje prav v tem segmentu.

V Sloveniji ima ključno vlogo les (C16), katerega delež v strukturi inputov znaša 29 %, kar kaže na izrazito usmerjenost v leseno pohištvo in relativno močno povezavo z domačo lesnopredelovalno verigo. Nasprotno se na Češkem večji del proizvodnje opira na izdelke iz gume in plastike (C22; 22 %), kar nakazuje večjo uporabo umetnih materialov. V Avstriji pa izrazito izstopa delež osnovnih kovin (C24; 37 %), kar kaže na pomembno vlogo kovinskega pohištva oziroma kombiniranih materialov (preglednica 4).

Delež lastnega sektorja (C31–C32) v strukturi inputov je v vseh treh državah relativno nizek (Slovenija 3 %, Češka 5 %, Avstrija 13 %), kar pomeni, da je pohišvena industrija močno odvisna od inputov drugih sektorjev. V primerjavi z lesarstvom in papirništvom je torej stopnja notranje integracije nižja, kar potrjuje izrazito medsektorsko naravo proizvodnje. Poleg ključnih materialnih inputov pomembno vlogo v vseh državah igrajo še kemikalije (C20), tekstil in usnje (C13–C15), kovinski izdelki (C25) ter trgovina na debelo (G46), kar odraža kompleksnost proizvodnih procesov in raznolikost končnih proizvodov.

Preglednica 3: Struktura medsektorskih inputov v bruto proizvodnji papirništva (C17) v Sloveniji, na Češkem in v Avstriji.

		SLO	CZE	AUT
CPA_A02	Gozdarstvo	1%	4%	8%
CPA_C16	Proizvodnja lesa ter lesenih in plutovinastih izdelkov, razen pohištva; proizvodnja slamnatih in pletarskih izdelkov	1%	12%	1%
CPA_C17	Proizvodnja papirja in izdelkov iz papirja	43%	30%	30%
CPA_C20	Proizvodnja kemikalij in kemičnih izdelkov	10%	7%	6%
CPA_C33	Popravila, vzdrževanje in montaža strojev in naprav	1%	2%	3%
CPA_D	Oskrba z električno energijo, plinom, paro in hladnim zrakom	4%	3%	6%
CPA_E36-39	Oskrba z vodo; ravnanje z odpadki in odpadki; saniranje okolja	7%	1%	4%
G46	Trgovina na debelo	9%	13%	10%
CPA_H49_H50_H51	Kopenski, vodni in zračni prevoz	6%	6%	8%
CPA_H52	Skladiščenje in spremljajoče prevozne dejavnosti	3%	1%	0%
x	Ostalo	15%	21%	24%

Preglednica 4: Struktura medsektorskih inputov v bruto proizvodnji pohištvene industrije (C31-C32) v Sloveniji, na Češkem in v Avstriji.

		SLO	CZE	AUT
CPA_C13-15	Proizvodnja tekstilij, oblačil, usnja, usnjenih in sorodnih izdelkov iz drugih materialov	2%	6%	2%
CPA_C16	Proizvodnja lesa ter lesenih in plutovinastih izdelkov, razen pohištva; proizvodnja slamnatih in pletarskih izdelkov	29%	11%	7%
CPA_C20	Proizvodnja kemikalij in kemičnih izdelkov	6%	6%	2%
CPA_C22	Proizvodnja gumenih in plastičnih izdelkov	10%	22%	2%
CPA_C24	Proizvodnja kovin	7%	6%	37%
CPA_C25	Proizvodnja kovinskih izdelkov, razen strojev in naprav	1%	8%	5%
CPA_C31_32	Proizvodnja pohištva; druge raznovrstne predelovalne dejavnosti	3%	5%	13%
G46	Trgovina na debelo	12%	10%	8%
CPA_F	Gradbeništvo	4%	1%	1%
CPA_H49_H50_H51	Kopenski, vodni in zračni prevoz	2%	2%	2%
X	Ostalo	24%	23%	21%

Analiza struktur dodanih vrednosti

Analiza struktur ustvarjene dodane vrednosti kaže na izrazite razlike med obravnavanimi državami tako v absolutnem kot tudi v relativnem smislu. Po podatkih nacionalnih računov Eurostata so štirje analizirani sektorji v letu 2020 v Sloveniji ustvarili približno 1,3 milijarde € dodane vrednosti, na Češkem 4,4 milijarde € in v Avstriji 7,6 milijarde €. Razlike odražajo tako velikost gospodarstev kot tudi stopnjo razvitosti in produktivnosti gozdno-lesne verige.

Z vidika strukture dodane vrednosti v Sloveniji izstopa primarni sektor (gozdarstvo), ki se bistveno razlikuje od predelovalnih sektorjev, medtem ko na Češkem in v Avstriji takšnih izrazitih odstopanj ni. Posebej opazna je tudi razlika v vlogi subvencij: v Sloveniji je njihov delež v strukturi dodane vrednosti gozdarstva zanemarljiv, medtem ko je na Češkem in v Avstriji bistveno višji. Nasprotno pa je v predelovalnih sektorjih delež subvencij in olajšav v Sloveniji razmeroma nizek v primerjavi z obema primerjanima državama.

Pomembne razlike se kažejo tudi v strukturi sredstev za zaposlene. V Sloveniji ta v pohištveni industriji predstavljajo kar 74 % dodane vrednosti, v lesarstvu in papirništvu pa okoli 63 %. Na Češkem in v Avstriji so ti deleži nižji; na Češkem za približno 15–20 odstotnih točk, v Avstriji pa za 9–12 odstotnih točk. Posledično so v teh državah višji bruto poslovni presežki, kar kaže na večjo kapitalno intenzivnost in višjo produktivnost proizvodnje, zlasti v Avstriji.

Dodatni vpogled v učinkovitost sektorjev daje kazalnik dodane vrednosti na zaposlenega. Ta v Sloveniji v analiziranih sektorjih v povprečju znaša približno 43 tisoč € na zaposlenega, na Češkem 24 tisoč €, v Avstriji pa več

kot 72 tisoč €. Avstrija tako v vseh predelovalnih sektorjih izstopa po produktivnosti. V lesnopredelovalni industriji na primer dosega približno 89,5 tisoč € dodane vrednosti na zaposlenega, medtem ko sta Slovenija in Češka na bistveno nižji, a medsebojno primerljivi ravni. Kljub temu je skupna dodana vrednost na Češkem bistveno višja, kar je predvsem posledica večjega števila zaposlenih v sektorju. Podoben vzorec se kaže tudi v drugih predelovalnih sektorjih, kjer je dodana vrednost na zaposlenega najnižja na Češkem in najvišja v Avstriji, čeprav so razlike manj izrazite kot v lesarstvu.

V sektorju gozdarstva je dodana vrednost na zaposlenega najvišja v Sloveniji (približno 79 tisoč €), sledita Avstrija in Češka. Pri interpretaciji tega rezultata je treba upoštevati metodološko omejitev input-output tabel, saj te ne vključujejo gospodinjske proizvodnje in dela lastnikov gozdov, kar lahko v Sloveniji, kjer je velik delež zasebnih lastnikov in dopolnilnih dejavnosti, pomembno vpliva na oceno produktivnosti.

LITERATURA IN VIRI:

Arnič, D., Prislan, P., & Juvančič, L. (2019). Raba lesa v slovenskem biogospodarstvu. *Gozdarski vestnik*, 10 (77), 375-393.

Arnič, D., Loizou, E., Ščap, Š., Prislan, P., & Juvančič, L. (2024). Evaluating Alternative Transformation Pathways of Wood-Based Bioeconomy: Application of an Input-Output Model. *Forests*, 15(12), 2084. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1999-4907/15/12/2084>

Preglednica 5: Struktura bruto dodane vrednosti, zaposlenost in produktivnost v gozdno-lesni verigi (A02, C16, C17, C31+32) v Sloveniji, na Češkem in v Avstriji (2020).

KAZALNIK	A02		C16		C17		C31+32	
SLOVENIJA	mio €	%	mio €	%	mio €	%	mio €	%
Bruto dodana vrednost	352,76	100%	256,36	100%	342,65	100%	342,78	100%
Bruto poslovni presežek in mešani dohodek	328,15	93%	116,25	45%	140,41	41%	113,01	33%
Sredstva za zaposlene	27,45	8%	162,35	63%	214,77	63%	254,71	74%
Drugi davki na proizvodnjo, zmanjšani za subvencije	-2,84	-1%	-22,24	-9%	-12,53	-4%	-24,94	-7%
Število zaposlenih (SURs)	4.800,00		9.400,00		4.500,00		11.000,00	
Dodana vrednost na zaposlenega	73,49		27,27		76,14		31,16	
ČEŠKA	mio €	%	mio €	%	mio €	%	mio €	%
Bruto dodana vrednost	605,67	100%	1.208,77	100%	937,37	100%	1.655,79	100%
Bruto poslovni presežek in mešani dohodek	532,79	88%	710,83	59%	519,71	55%	683,58	41%
Sredstva za zaposlene	277,91	46%	501,27	41%	424,99	45%	988,28	60%
Drugi davki na proizvodnjo, zmanjšani za subvencije	-205,03	-34%	-3,33	0%	-7,33	-1%	-16,07	-1%
Število zaposlenih (SURs)	32.500,00		50.100,00		20.300,00		79.300,00	
Dodana vrednost na zaposlenega	18,64		24,13		46,18		20,88	
AVSTRIJA	mio €	%	mio €	%	mio €	%	mio €	%
Bruto dodana vrednost	837,99	100%	2.506,83	100%	1.852,62	100%	2.411,21	100%
Bruto poslovni presežek in mešani dohodek	700,94	84%	1.232,10	49%	906,96	49%	841,37	35%
Sredstva za zaposlene	273,23	33%	1.286,09	51%	1.000,28	54%	1.648,81	68%
Drugi davki na proizvodnjo, zmanjšani za subvencije	-136,18	-16%	-11,35	0%	-54,62	-3%	-78,96	-3%
Število zaposlenih (SURs)	15.400,00		28.000,00		12.900,00		48.600,00	
Dodana vrednost na zaposlenega	54,41		89,53		143,61		49,61	

Arnič, D., Prislán, P., & Juvančič, L. (2023). Macroeconomic impact of hardwood production and processing. *Les/Wood*, 72(1), 59-70. <https://doi.org/10.26614/les-wood.2023.v72n01a06>

EUROSTAT. (2026). Symmetric input-output table at basic prices (product by product). URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/data/database>

Prislán, P., Ščap, Š., Triplat, M., Krajnc, N., Krajnc, L., Arnič, D., . . . Juvančič, L. (2023). Možnosti rabe lesa listavcev v slovenskem biogospodarstvu : vsebinsko poročilo.

ZAHVALE:

Pripravo prispevka so omogočili Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS), raziskovalna programa P4-0430 in P4-0107 ter projekta J4-50130.

CC BY SA · DOI 10.20315/SFS.191.01

KLJUČNE BESEDE:

gozdno-lesno biogospodarstvo, input-output analiza, lesnopredelovalna panoga, struktura dodane vrednosti, medsektorske povezave

Vloga shem plačil za ekosistemske storitve (PES) pri krepitvi gozdno-lesnega biogospodarstva

Kaja Plevnik¹, Anže Japelj¹

¹ Gozdarski inštitut Slovenije

E-naslov: kaja.plevnik@gozdis.si

POUDARKI:

- Sheme plačil za ekosistemske storitve (PES) so pomembne za biogospodarstvo, saj lahko prispevajo k zagotavljanju dolgoročno trajnostne oskrbe z naravnimi viri.
- Uvajanje PES-shem v gozdarstvu v Sloveniji se je izkazalo za zahtevno.

UVOD:

Biogospodarstvo (BG) je ambiciozen poskus premika evropskega gospodarstva proti podnebni nevtralnosti. Njegov uspeh, kot pri vseh javnih politikah, je v veliki meri odvisen od sposobnosti ključnih deležnikov, da prepoznajo prednosti biogospodarstva in izkažejo pripravljenost za sprejetje potrebnih ukrepov za njegovo izvajanje. Zato je ključnega pomena, da se jasno opredelijo stališča, percepcije in zmogljivosti deležnikov znotraj BG. Gozdovi imajo pomembno vlogo pri doseganju ciljev biogospodarstva, saj zagotavljajo ne le obnovljive, ogljično nevtralne vire (Wolfslehner in sod., 2016), temveč tudi številne ekosistemske storitve (ES) (Hurmekoski in sod., 2019; Jonsson in sod., 2021; Luhas and Mikkilä, 2025). Glede na raznolikost teh ES je za krepitev gozdno-lesnega biogospodarstva (GBG) nujno interdisciplinarno sodelovanje med različnimi deležniki, vključno z javnostjo, odločevalci, znanstveniki, lastniki gozdov in podjetji (Evropska komisija, 2018; Lovrić in sod., 2020), ki so med seboj povezani.

Sheme plačil za ES, ang. payments for ecosystem services (PES) so finančni instrumenti, prek katerih uporabniki ali upravičenci ES plačajo tistim, ki te storitve zagotavljajo. V zadnjem času PES vse bolj pridobivajo na pomenu kot učinkovito orodje za izboljšanje in povečanje razpoložljivosti ES (Grilli in sod., 2020; Morgan in sod., 2022; Vedel in sod., 2015), kar se odraža tudi v politikah Evropske unije, ki države članice spodbuja k vzpostavitvi mehanizmov PES za lastnike gozdov kot odgovor na

naraščajoče povpraševanje po ES gozda (Evropska komisija, 2021, 2023; Plevnik and Japelj, 2023; Vedel in sod., 2015). PES sheme so pomembne za krepitev BG, ker lahko pomagajo ne le zagotoviti dolgoročno trajnostno oskrbo z naravnimi viri, temveč tudi povečajo družbeno sprejemljivost in stabilnost razvoja BG.

V Sloveniji PES shem v gozdarstvu še nimamo, še najbližji pa jim je sistem plačil Natura 2000. V okviru tega lastniki gozdov, katerih gozdne posesti ležijo znotraj območij Natura 2000, prejemajo sredstva (iz naslova Gozdnega sklada) za izvajanje določenih ukrepov gospodarjenja z gozdovi.

METODE:

Podatke smo zbrali z intervjuvanjem odločevalcev in predstavnikov podjetij, v juniju in juliju 2025. Vprašalniki so bili prilagojeni dvema skupinama intervjuvancev, vendar pa je bil del vprašanj enak za oboje, tako da je bila omogočena medsebojna primerjava. Vprašalnik je bil sestavljen iz trditev o različnih gozdarskih vidikih, iz vprašanj o krepitvi GBG, o PES shemah in o podjetniški dejavnosti ter vprašanj o prepoznavanju tržnega potenciala (samo za podjetja). V tem prispevku smo se osredotočili le na rezultate vprašanj o krepitvi GBG in o PES shemah. Intervjuvali smo več ključnih odločevalcev (n=35), vključno z državnimi sekretarji, direktorji direktorátov ter vodji sektorjev in služb na ključnih ministrstvih in drugih javnih institucijah. Naš cilj je bil vključiti čim več posameznikov s

strokovnim znanjem in izkušnjami na enem od področij, pomembnih za to raziskavo: gozdarstvo, lesarstvo, okolje in turizem (Preglednica 1).

Intervjuvali smo tudi predstavnike podjetij (n=24), ki smo jih glede na njihovo dejavnost razvrstili v tri skupine: primarna proizvodnja lesa (gojenje gozda, sečnja, spravilo in prevoz lesa), predelava lesa in izdelki (žage, lesene hiše, pohištvena industrija, kemična predelava lesa) in gozdni turizem (rekreativne, pustolovske dejavnosti v gozdu, gozdni potop, izobraževalna vodenja) (Preglednica 1).

Preglednica 1: Intervjuvanci po sektorju/profesionalni usmeritvi in klasifikaciji v skupino.

SKUPINA DELEŽNIKOV	SEKTOR/PROFESIONALNA USMERITEV		
		n	%
ODLOČEVALCI			
	Gozdarski sektor	10	28.6%
	Lesarski sektor	6	17.1%
	Okoljski sektor	9	25.7%
	Turistični sektor	10	28.6%
	Skupaj	35	
PREDSTAVNIKI PODJETIJ			
	Primarna proizvodnja lesa	5	20.8%
	Predelava lesa in izdelki	10	41.7%
	Gozdni turizem	9	37.5%
		Skupaj	24

OBDELAVA PODATKOV

Podatke smo analizirali z uporabo opisne statistike, tj. prikaz frekvenc in deležev in mere srednje vrednosti (aritmetična sredina, mediana). Odgovore na odprta vprašanja smo analizirali z analizo vsebine. Da bi ugotovili, ali med skupinami obstajajo statistično pomembne razlike, smo uporabili neparametrične statistične teste, s katerimi smo upoštevali morebitne odstopanja od normalnosti in različne velikosti skupin. Vse statistične analize so bile izvedene z uporabo programa R Commander (v. 4.1.1; Hamilton, ON, Kanada).

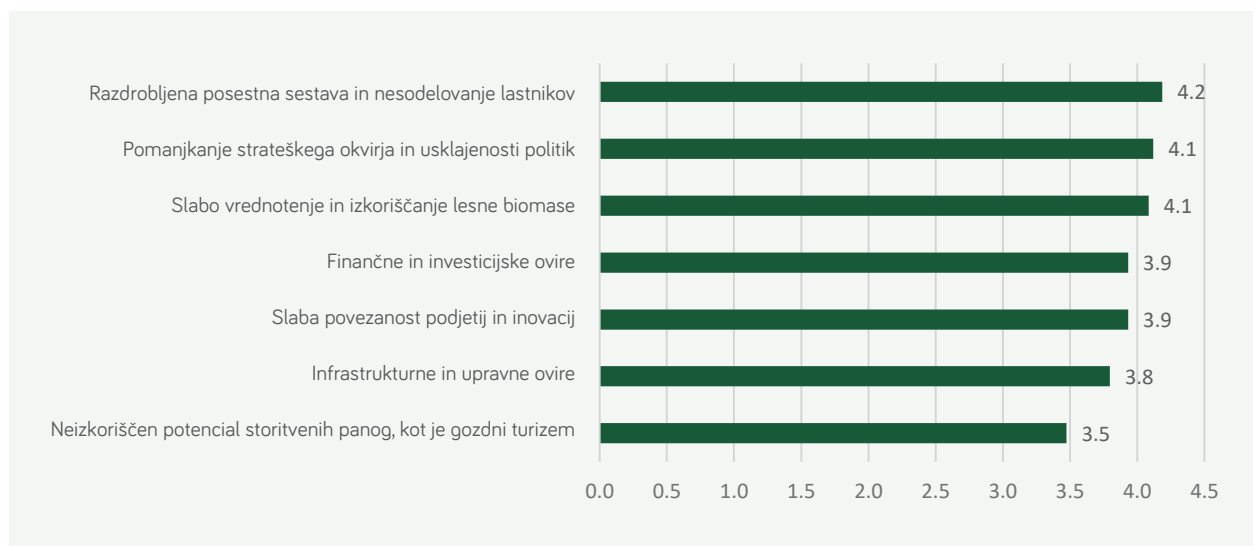
REZULTATI:

Tako odločevalce kot predstavnike podjetij smo prosili, da se opredelijo do glavnih izzivov pri uresničevanju GBG v Sloveniji (Slika 1).

Vsi izzivi, povezani z uresničevanjem GBG v Sloveniji, so bili ocenjeni relativno visoko. Intervjuvanci so kot najpomembnejši oviri opredelili razdrobljeno posestno sestavo in pomanjkanje sodelovanja med lastniki gozdov. Ti dve težavi že dolgo veljata za ključni oviri pri učinkovitem gospodarjenju z zasebnimi gozdovi v Sloveniji (Iveta, 2017; Kumer, 2013; Pezdevšek Malovrh, 2010; Plevnik and Japelj, 2023; Winkler and Medved, 1994). Intervjuvanci so kot pomembne izzive izpostavili tudi pomanjkanje strateškega okvirja in usklajenosti politik ter slabo vrednotenje in izkoriščanje lesne biomase.

Intervjuvance smo vprašali tudi, kako naj po njihovem mnenju država podpira krepitev GBG (Slika 2).

Slika 1: Izzivi pri uresničevanju GBG v Sloveniji.



Slika 2: Državna podpora krepitvi GBG.



Kot najpomembnejše oblike državne podpore GBG so navedli zagotavljanje prenosa znanja, podporo investicijam in ozaveščanje o pomenu okolju prijaznih izdelkov in storitev. Vzpostavitev plačilnih shem (PES) je bila ocenjena kot najmanj pomembna, kar je bilo pričakovano, saj večina anketirancev verjetno še ni imela neposrednih izkušenj s takšnimi mehanizmi, saj ti v Sloveniji v gozdarstvu še niso prisotni.

PES IN ODLOČEVALCI

Odločevalce smo prosili, naj navedejo, kako vidijo potencialno vlogo svojih institucij pri implementaciji potencialnih shem PES. Preglednica 2 prikazuje, v kolikšni meri različni sektorji vidijo svojo potencialno vključenost v vsaki fazi implementacije PES. Skupno, bi si želeli biti predstavniki vseh štirih sektorjev najmočnejše vključeni v začetno fazo vzpostavitve PES – oblikovanje in izvedljivost. Koordinacija in vzpostavitev sta prejeli najnižje ocene vključenosti, kar morda odraža omejeno institucionalno zmogljivost za naloge, zahtevane v tej fazi.

Predstavniki lesarskega sektorja se vidijo kot najmanj vključene v vse faze PES, medtem ko predstavniki gozdarskega in okoljskega sektorja zaznavajo največjo vključenost, sledijo pa jim predstavniki turističnega sektorja. V primerjavi s okoljskim sektorjem, bi si gozdarski želel biti bolj enakomerno vključen v vse faze izvajanja PES, medtem ko se okoljski sektor vidi

predvsem v začetni fazi. Vendar pa niti neparametrični Kruskal-Wallisov test (tabela 10) niti hi-kvadratni test ($p > 0,05$) nista pokazala statistično pomembnih razlik dojemaju zelenih vlog pri izvajanju PES med sektorji.

PES se lahko financira iz različnih virov. Odločevalci vključeni v našo raziskavo menijo, da bi bilo za potencialno PES shemo v gozdarstvu najprimernejše javno financiranje (32,9 %), sledili pa so zasebni viri (27,6 %) in javno-zasebna partnerstva (21,1 %). Ta izid je bil deloma pričakovan, saj javno financirani PES predstavljajo najpogostejši model na svetovni ravni (Ezzine-De-Blas in sod., 2016).

Pred vzpostavitvijo sheme PES je treba opredeliti in predvideti morebitne ovire za njeno izvajanje, da se zagotovi dolgoročno učinkovitost in trajnost. Najpomembnejše ovire, ki so jih opredelili odločevalci, so bile neaktivnost lastnikov gozdov ali pomanjkanje zanimanja za njihove gozdove ter razdrobljena posestna sestava (Preglednica 3). Ti izzivi so podobni tistim, ki so bili prej opredeljeni kot glavne ovire za izvajanje GBG v Sloveniji, kar potrjuje njihovo splošno priznanje med odločevalci in predstavniki podjetij. Kot pomembna težava so bili poudarjeni tudi konflikti interesov med državo, zasebnimi lastniki, javnostjo in ekološkimi cilji. Najmanj pomembna ovira so bili visoki transakcijski stroški za delovanje PES, kar kaže na omejene praktične izkušnje s shemami PES.

Preglednica 2: Razlike v zeleni vključenosti v faze implementacije PES.

	GOZDARSKI SEKTOR	TURISTIČNI SEKTOR	OKOLJSKI SEKTOR	LESARSKI SEKTOR
Oblikovanje in izvedljivost	2,50	2,20	2,78	2,00
Koordinacija in vzpostavitev	1,80	1,80	1,78	1,17
Realizacija	1,80	2,30	1,56	1,67
Nadzor in prilagajanje	2,00	1,70	1,89	1,50

Preglednica 3: Izziv pri implementaciji shem PES

IZZIV PRI IMPLEMENTACIJI SHEM PES	DELEŽ
Neaktivnost lastnikov gozdov oz. nezanimanje za njihov gozd	15,1 %
Razdrobljena posestna sestava	14,3 %
Konflikti interesov (država, lastniki, javnost, ekološki cilji)	14,3 %
Nizki zneski plačil	13,4 %
Pomanjkanje pravnega okvira za tovrstne sheme	12,6 %
Nizka ozaveščenost o obstoju shem pri potencialno vključenih	11,8 %
Kratkoročno financiranje in pomanjkanje dolgoročno zagotovljenih financ	10,1 %
Visoki transakcijski stroški za delovanje shem	5,0 %
Zamudno in drago zbiranje podatkov o stanju ES oziroma o učinkih shem	3,4 %

PES IN PODJETJA

Tudi del vprašalnika za predstavnike podjetij je bil posvečen PES. Predstavniki primarne proizvodnje in predelave lesa so prejeli enaka vprašanja, predstavniki gozdnega turizma pa nekoliko prilagojeno različico.

V Sloveniji bi lahko potencialno vzpostavili shemo PES, v okviru katere bi lastniki gozdov prejeli plačila za izvajanje več nege gozda v svojih gozdovih. Ta sredstva bi lahko delno zagotovila podjetja, odvisna od visokokakovostnega lesa iz primarne proizvodnje lesa in predelave lesa. Toda le dva od petnajstih predstavnikov sta izrazila pripravljenost za sodelovanje v taki shemi. Ob vprašanju o zelenem trajanju pogodbe sta se oba odločila za dolgoročno shemo (10 let ali več).

77,8 % predstavnikov gozdnega turizma je navedlo, da svoje dejavnosti izvajajo v gozdovih, ki niso v njihovi lasti. Zato bi bilo mogoče zasnovati koncept PES, v okviru katerega bi lastniki gozdov prejeli plačilo za dajanje na uporabo svojega gozda turističnim podjetjem. Obenem bi lahko lastniki skrbeli za urejanje in vzdrževanje poti, odstranjevanje nevarnih dreves, ohranjanje biotske raznovrstnosti, izboljšanje estetskega izgleda in urejanje dostopa (npr. parkirišča). Podjetja, ki ponujajo aktivnosti gozdnega turizma, bi lahko finančno prispevala v takšno shemo. Vsi predstavniki gozdnega turizma vključeni v našo raziskavo si bi želeli sodelovati v takšnem tipu sheme. Večina (44,4 %) je za najprimernejšo ocenila kratkoročno shemo (do pet let), medtem ko je 33,3 % podprlo srednjeročno shemo (pet do deset let), preostalih 22,3 % pa dolgoročno shemo (več kot 10 let).

RAZPRAVA:

Čeprav intervjuvani vpeljave PES niso prepoznali kot pomembne oblike podpore države h krepitvi GBG, ostaja PES potencialno uporaben instrument za izboljšanje razpoložljivosti ES gozda (Dietz in sod., 2018), njihovo vpeljavo pa spodbuja EU tudi z usmeritvenimi dokumenti (Evropska komisija, 2023). Večja razpoložljivost ES lahko koristi podjetjem, ki lahko ES vključijo v gozdne lesne vrednostne verige (Salvador in sod., 2022), s čimer izboljšujejo konkurenčnost in podpirajo GBG.

Ključni pogoj za uspešno implementacijo PES je, da njegova zasnova in izvajanje sledita preglednemu, postopnemu procesu. V našem štirifaznem okviru oblikovanja in izvajanja PES so odločevalci na splošno svojo vlogo videli kot najmočnejšo v začetni fazi oblikovanja in izvedljivosti ter najšibkejšo v fazi koordinacije in vzpostavitve. To se ujema z ugotovitvami Förster in sod. (Förster in sod., 2017), ki so ugotovili, da so glavni izzivi pri implementaciji regulativnih okvirov (kot so tudi PES) največji v fazah koordinacije in uresničevanja. Tudi ostali rezultati naše raziskave to potrjujejo: trije največji izzivi – neaktivnost lastnikov gozdov ali pomanjkanje zanimanja za gospodarjenje z gozdovi, razdrobljena posestna sestava in konflikti interesov – vsi zahtevajo učinkovito usklajevanje in iskanje kompromisov, kar je v tem primeru lahko zelo zahtevno. Več slovenskih raziskav je ugotovilo precejšnjo pasivnost zasebnih lastnikov gozdov (Malovrh in sod., 2015; Ščap in sod., 2021) in nepripravljenost za spremenjeno oz. aktivnejše gospodarjenje z gozdovi celo ob hipotetičnih plačilih (Plevnik and Japelj, 2023). Konflikti zaradi različnih interesov pri gospodarjenju z gozdovi in njihovi rabi so razmeroma pogosti tudi v Sloveniji (Laktic in sod., 2020; Lindstad in sod., 2015; Mavsar in sod., 2013), kar je glede

na tradicijo večnamenskosti in prostega javnega dostopa tudi pričakovano. Wunder (2015) meni, da so lahko PES pomembno orodje za povečanje razpoložljivosti ES ravno kadar so drugi politični ali finančni instrumenti neučinkoviti in kadar je treba premostiti konflikte med različnimi deležniki.

Razlike v dojemanju potencialnih vlog odločevalcev v okviru PES so lahko povezane s strokovnimi zmogljivostmi, vendar pa lahko odražajo tudi prizadevanja za izvajanje sektorskega vpliva. Zato je za uspešno oblikovanje in izvajanje PES bistveno, da se identificira odločevalce glede na njihovo moč in interese (Barton in sod., 2017; Rodríguez de Francisco and Boelens, 2015) ter oceni strokovne in upravne zmogljivosti (Costedoat in sod., 2016; Sainz-Santamaria, 2024). Med sektorji nismo ugotovili statistično značilnih razlik v prepoznavanju potencialnih vlog v PES. Razlog za to je lahko, da v Sloveniji shem PES v gozdarstvu še nimamo, kar vodi v pomanjkanje informacij o teh instrumentih ter omejeno zavedanje o njihovih potencialnih koristih med odločevalci.

Sektorska heterogenost v stališčih podjetij do PES je očitna. Vsi predstavniki gozdnega turizma so izrazili pripravljenost za finančno podporo shemam PES. To morda odraža tesno interakcijo, ki jo gozdni turizem zahteva med obiskovalci in lokalnim gozdom (Wunder, 2015). Glede na to, da je skoraj 80 % gozdov v Sloveniji v zasebni lasti, bi PES, ki bi omogočil boljše izvajanje turističnih dejavnosti, lahko tudi upravičil komercialni turizem v gozdovih. Po drugi strani pa je le majhen delež predstavnikov primarne proizvodnje lesa in predelave lesa in izdelkov (13 %) pripravljen prispevati k financiranju PES. Ti najverjetneje nimajo takšnega motiva, kot predstavniki gozdnega turizma, saj že opravljajo transakcije za les in lesene izdelke. Njihova zadržanost do PES bi lahko izvirala iz tveganja, da dolgoročno financiranje nege gozda morda ne bi prineslo pričakovanega povečanja količine visokokakovostnega lesa. Naši rezultati in prejšnje raziskave kažejo, da oddaljene koristi morda v celoti ne pokrijejo trenutnih vlaganj in s tem povezanih tveganj (Robertson and Wunder, 2005; Thompson, 2021; Wunder in sod., 2020), zaradi česar podjetja oklevajo pri financiranju dolgoročnih shem (Goldstein in sod., 2011).

ZAKLJUČEK:

Odločevalci svojo vlogo dojemajo kot najmočnejšo v zgodnjih fazah PES, najšibkejšo pa v fazah usklajevanja in vzpostavitve, kar kaže bodisi na omejene zmogljivosti bodisi na osredotočenost na oblikovanje ciljev, upravičencev in pogojev PES, namesto na njihovo praktično izvajanje. To poudarja potrebo po nadaljnjem preučevanju strokovnih

zmogljivosti ter po opredelitvi moči zainteresiranih strani, da bi identificirali potencialno dominantne akterje, katerih vpliv bi lahko ogrozil preglednost in pravičnost razvoja PES. Pripravljenost predstavnikov podjetij iz gozdnega turizma, da se vključijo v PES sheme, kaže, da lahko takšne sheme služijo kot obetaven mehanizem za krepitev odnosov med lastniki gozdov in ponudniki gozdnega turizma. Prihodnje raziskave bi zato morale raziskati ključne vidike oblikovanja plačil za ekosistemske storitve, kot so učinkovitost, uspešnost in pravičnost. Predstavniki podjetij iz primarne proizvodnje lesa ter predelave lesa in izdelkov bi morda pokazali večje zanimanje za prispevanje v PES, če bi tržni mehanizmi lahko izravnali njihove vložke v PES, na primer prek cenovnih marž ali kombinacij z drugimi instrumenti – zato je smiselno nadalje raziskati alternativne zasnove PES shem.

LITERATURA IN VIRI:

- Barton D. N., Benavides K., Chacon-Cascante A., Le Coq J. F., Quiros M. M., Porras I., Primmer E., Ring I. 2017. Payments for Ecosystem Services as a Policy Mix: Demonstrating the institutional analysis and development framework on conservation policy instruments. *Environmental Policy and Governance*, 27, 5: 404–421, <https://doi.org/10.1002/eet.1769>
- Costedoat S., Koetse M., Corbera E., Ezzine-de-Blas D. 2016. Cash only? Unveiling preferences for a PES contract through a choice experiment in Chiapas, Mexico. *Land Use Policy*, 58: 302–317, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.07.023>
- Dietz T., Börner J., Förster J.J., von Braun J. 2018. Governance of the bioeconomy: A global comparative study of national bioeconomy strategies. *Sustainability (Switzerland)*, 10, 9 <https://doi.org/10.3390/su10093190>
- Evropska komisija. 2018. A sustainable bioeconomy for Europe: Strengthening the connection between economy, society and the environment: Updated bioeconomy strategy. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/edace3e3-e189-11e8-b690-01aa75ed71a1> (Apr. 1, 2025)
- Evropska komisija. 2021. New EU Forest Strategy for 2030. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0572> (Apr. 1, 2025)
- Evropska komisija. 2023. Guidance on the Development of Public and Private Payment Schemes for Forest Ecosystem Services. https://agriculture.ec.europa.eu/system/files/2023-07/guidance-dev-public-private-payment-schemes-forest_en.pdf (Mar. 5, 2025)
- Ezzine-De-Blas D., Wunder S., Ruiz-Pérez M., Del Pilar Moreno-Sanchez R. 2016. Global patterns in the

implementation of payments for environmental services. *PLoS ONE*, 11, 3: 1–16, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149847>

Förster J. J., Downsborough L., Chomba M. J. 2017. When Policy Hits Practice: Structure, Agency, and Power in South African Water Governance. *Society and Natural Resources*, 30, 4: 521–536, <https://doi.org/10.1080/08941920.2016.1268658>

Goldstein J. H., Presnall C. K., López-Hoffman L., Nabhan G. P., Knight R. L., Ruyle G. B., Toombs T. P. 2011. Beef and beyond: Paying for ecosystem services on Western US rangelands. *Rangelands*, 33, 5: 4–12, <https://doi.org/10.2111/1551-501X-33.5.4>

Grilli G., Fratini R., Marone E., Sacchelli S. 2020. A spatial-based tool for the analysis of payments for forest ecosystem services related to hydrogeological protection. *Forest Policy and Economics*, 111: 102039, <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.102039>

Hurmekoski E., Lovrić M., Lovrić N., Hetemäki L., Winkel G. 2019. Frontiers of the forest-based bioeconomy – A European Delphi study. *Forest Policy and Economics*, 102, March: 86–99, <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.03.008>

Iveta N. 2017. Ocena pripravljenosti zasebnih lastnikov gozdov za poslovno sodelovanje pri gospodarjenju z gozdom na primeru revirja vodice. M. Sc. Thesis. University of Ljubljana, Biotehniška fakulteta

Jonsson R., Rinaldi F., Pilli R., Fiorese G., Hurmekoski E., Cazzaniga N., Robert N., Camia A. 2021. Boosting the EU forest-based bioeconomy: Market, climate, and employment impacts. *Technological Forecasting and Social Change*, 163: 120478, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120478>

Kumer P. 2013. Vpliv družbenogeografskih dejavnikov na gospodarjenje z majhnimi zasebnimi gozdnimi posestmi: doktorska disertacija. Ljubljana, Biotehniška fakulteta. <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpis/Gradiva.php?lang=slv&id=100219> (Apr. 7, 2026)

Laktić T., Žiberna A., Kogovšek T., Malovrh Š. P. 2020. Stakeholders' social network in the participatory process of formulation of natura 2000 management programme in Slovenia. *Forests*, 11, 3 <https://doi.org/10.3390/f11030332>

Lindstad B. H., Pistorius T., Ferranti F., Dominguez G., Gorriiz-Mifsud E., Kurttila M., Leban V., Navarro P., Peters D. M., Pezdevsek Malovrh S., Prokofieva I., Schuck A., Solberg B., Viiri H., Zadnik Stirn L., Krc J. 2015. Forest-based bioenergy policies in five European countries: An explorative study of interactions with national and EU policies. *Biomass and Bioenergy*, 80: 102–113, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.04.033>

Lovrić N., Lovrić M., Mavsar R. 2020. Factors behind development of innovations in European forest-based bioeconomy. *Forest Policy and Economics*, 111: 102079, <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.102079>

Luhas J., Mikkilä M. 2025. Social sustainability in the forest-based bioeconomy: A narrative review. *Forest Policy and Economics*, 177, May <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2025.103523>

Malovrh Š. P., Nonić D., Glavonjić P., Nedeljković J., Avdibegović M., Krč J. 2015. Private Forest Owner Typologies in Slovenia and Serbia: Targeting Private Forest Owner Groups for Policy Implementation. *Small-scale Forestry*, 14, 4: 423–440, <https://doi.org/10.1007/s11842-015-9296-8>

Mavsar R., Japelj A., Kovač M. 2013. Trade-offs between fire prevention and provision of ecosystem services in Slovenia. *Forest Policy and Economics*, 29: 62–69, <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2012.10.011>

Morgan E. A., Buckwell A., Guidi C., Garcia B., Rimmer L., Cadman T., Mackey B. 2022. Capturing multiple forest ecosystem services for just benefit sharing: The Basket of Benefits Approach. *Ecosystem Services*, 55: 101421, <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101421>

Pezdevšek Malovrh Š. 2010. Vpliv institucij in oblik povezovanja lastnikov gozdov na gospodarjenje z zasebnimi gozdovi: doktorska disertacija. Ljubljana, Biotehniška fakulteta.

Plevnik K., Japelj A. 2023. Uncovering the Latent Preferences of Slovenia's Private Forest Owners in the Context of Enhancing Forest Ecosystem Services through a Hypothetical Scheme. *Forests*, 14, 12: 2346, <https://doi.org/10.3390/f14122346>

Robertson N., Wunder S. 2005. Fresh tracks in the forest: assessing incipient payments for environmental services initiatives in Bolivia. <https://doi.org/10.17528/cifor/001811>

Rodríguez de Francisco J. C., Boelens R. 2015. Payment for Environmental Services: mobilising an epistemic community to construct dominant policy. *Environmental Politics*, 24, 3: 481–500, <https://doi.org/10.1080/09644016.2015.1014658>

Sainz-Santamaria J. 2024. Calibrating payment for ecosystem services: a process-oriented policy design approach. *Policy Design and Practice*, 7, 2: 158–175, <https://doi.org/10.1080/25741292.2024.2346977>

Salvador R., Barros M. V., Donner M., Brito P., Halog A., De Francisco A. C. 2022. How to advance regional circular bioeconomy systems? Identifying barriers, challenges, drivers, and opportunities. *Sustainable Production and Consumption*, 32: 248–269, <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.04.025>

Ščap Š., Stare D., Krajnc N., Triplat M. 2021. Značilnosti opravljanja sečnje in spravila v zasebnih gozdovih v Sloveniji. *Acta Silvae et Ligni*, 125: 25–38, <https://doi.org/10.20315/ASetL.125.3>

Thompson B. S. 2021. Corporate payments for ecosystem services in theory and practice: links to economics, business, and sustainability. *Sustainability*, 13, 15: 8307, <https://doi.org/10.3390/su13158307>

Vedel S. E., Jacobsen J. B., Thorsen B. J. 2015. Forest owners' willingness to accept contracts for ecosystem service provision is sensitive to additionality. *Ecological Economics*, 113: 15–24, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.02.014>

Winkler I., Medved M. 1994. Spremembe lastninske strukture gozdov zaradi denacionalizacije in njihove gozdnogospodarske posledice. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, 44: 215–246,

Wolfslehner B., Linser S., Pülzl H., Bastrup-Birk A., Camia A., Marchetti M. 2016. Forest bioeconomy - a new scope for sustainability indicators. *From Science to Policy 4*. European Forest Institute <https://doi.org/10.36333/fs04>

Wunder S. 2015. Revisiting the concept of payments for environmental services. *Ecological Economics*, 117: 234–243, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.08.016>

Wunder S., Börner J., Ezzine-de-Blas D., Feder S., Pagiola S. 2020. Payments for Environmental Services: Past Performance and Pending Potentials. *Annual Review of Resource Economics*, 12, 1: 209–234, <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-094206>

KLJUČNE BESEDE:

plačila za ekosistemske storitve (PES), gozdno-lesno biogospodarstvo, odločevalci, podjetja, ovire, oblike podpore.

ZAHVALE:

Raziskava je nastala v okviru programa mladih raziskovalcev Javne agencije za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost RS in raziskovalnega programa Gozdna biologija, ekologija in tehnologija (P4-0107).

Vpliv časa sečnje na vlažnost lesa navadne bukve (*Fagus sylvatica* L.) na Kočevskem

Amina Gačo Jež¹, Mitja Piškur², Miha Humar¹

1 Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

2 Slovenski državni gozdovi d.o.o.

E-naslov: amina.gaco.jez@bf.uni-lj.si

POUDARKI:

- Čas sečnje, lunine mene in fenološke faze vplivajo na vlažnost lesa navadne bukve (*Fagus silvatyca* L.)

UVOD:

Les in materiali na osnovi lesa so že od nekdaj vsestranski material, ki se uporablja v različnih panogah, od gradbeništva in pohištvene industrije do umetnosti (Ghorbanian Far in sod., 2024). Ena izmed ključnih lastnosti lesa je njegova higroskopičnost, saj lahko absorbira vodo in jo zadržuje v celičnih stenah ter lumnih (Dietsch in sod., 2015). Spremembe v vsebnosti vlage pomembno vplivajo na lastnosti lesa, predvsem na njegovo dimenzijsko stabilnost, saj lahko povzročajo nabrekanje in krčenje materiala. Vlažnost v deblu stoječega drevesa je neenakomerno razporejena, in odraža prevajalno funkcijo lesa ter fiziološke dejavnike v drevesu (Čufar, 2006). Zaradi transpiracijskega toka se voda premika od korenin proti krošnji. Pri navadni bukvi poteka prevajanje predvsem po zunanjih branikah, kjer vlažnost dosega približno 110 %, medtem ko se proti notranjosti debla postopno zmanjšuje (Straže in sod., 2015; Torelli, 1998). Po drugi strani lahko visoka vlažnost

pospešuje razkroj lesa ter razvoj gliv (Dietsch in sod., 2015). Pomembna lastnost lesa je tudi gostota, ki skupaj z mehanskimi lastnostmi določa kakovost lesa in lesnih izdelkov (Gorišek in sod., 2009). Pri večini drevesnih vrst predstavlja gostota ključni parameter kakovosti (Bouriaud in sod., 2004). V strokovni literaturi in standardih je opisanih več vrst gostot lesa (Arnič in sod., 2021; Gorišek in sod., 2009; ISO 13061-2, p. 13). Po pomenu izstopa osnovna gostota. Ta je definirana kot razmerje med suho maso in volumnom lesa v stanju nasičenosti celičnih sten (25-40 % vlažnosti), ko je volumen največji (Arnič in sod., 2021; Gorišek in sod., 2009). Gostota lesa se razlikuje znotraj posamezne drevesne vrste, na kar vplivajo številni dejavniki, kot so vlažnost lesa, okoljske razmere, podnebje in fenološke faze (Bouriaud in sod., 2004; Jyske in sod., 2008; Sopushynskiy in sod., 2008).

Preglednica 1: Opis glavnih fenoloških faz razvoja listov pri bukvi ((Koch in sod., 2007; Škrk in sod., 2020)

FAZA	OPIS FAZE
BBCH00 (A)	speči popki
BBCH02 (B)	popki napeti (nabrekli)
BBCH07 (C)	popki nabrekli, rjave luske se razprejo in pojavi se zelena barva razvijajočih se listov
BBCH09 (D)	popki nabrekli in odprti
BBCH10 (E)	listi delno razviti, vidna listna ploskev, listni pecelj ni viden
BBCH11 (F)	listi razviti, listna ploskev je odprta, 10 % listov je značilne oblike, ni še končne velikosti in barve, viden je listni pecelj
BBCH19 (G)	zreli listi, končne velikosti in barve

V literaturi je več študij obravnavalo časovne povezave med fenologijo krošnje in nastajanjem lesa. Fenologija krošnje zajema časovni potek ključnih razvojnih procesov v drevesni krošnji, kot so nastajanje listov, njihovo zorenje, staranje, odpadanje ter podaljševanje poganjkov (Silvestro in sod., 2025). Razumevanje teh procesov je bistveno za napovedovanje prihodnjih sprememb v delovanju rastlin ter njihovega vpliva na kroženje ogljika in vode v lesu (Silvestro in sod., 2025). Na fenološke procese pomembno vplivajo podnebni dejavniki, predvsem temperatura in razpoložljivost vode, vendar se njihov vpliv med posameznimi procesi razlikuje. Kljub temu je razumevanje povezav med fenologijo krošnje in nastajanjem lesa še vedno omejeno. Za spremljanje teh procesov so bili razviti natančni protokoli, kot so smernice za fenološka opazovanja rastlin (2007) iz katerih smo povzeli fenološke faze razvoja listov, relevantne za navadno bukev. Te faze so predstavljene v preglednici 1.

V literaturi se vpliv luninih men na fiziološke procese v rastlinah in posledično na lastnosti lesa občasno omenja, vendar ostaja znanstveno neenotno potrjen in pogosto predmet razprav. Nekateri avtorji poročajo o možnih razlikah v vlažnosti in rasti lesa glede na lunin cikel, medtem ko drugi teh povezav niso uspeli statistično potrditi. Ena izmed zanimivih raziskav poleg Torellija (2005) so raziskave Zürcher in sod. (2000; 2001), ki opisuje vpliv luninih men na drevesno biologijo vključno s kalitvijo, cirkadianimi fluktuacije drevesnega premera ter bioelektričnimi potenciali. Po tej razlagi naj bi se ritmično spreminjal delež vode v lesu zaradi prehajanja med simplastom in apoplastom. Pri določanju luninih men smo uporabili podatke in definicije, kot jih navaja NASA (NASA Science, 2023), kar zagotavlja standardizirano in mednarodno primerljivo opredelitev luninega cikla.

Preglednica 2: Lunine faze (NASA, 2023)

FAZA	OPIS
Mlaj (new moon)	Luna je med Zemljo in Soncem; vidni del je skoraj povsem v temi.
Rastoči srp (waxing crescent)	tanek, ukrivljen osvetljeni rob na desni.
Prvi krajec (first quarter)	Desna polovica diska je osvetljena.
Rastoča izbočena (waxing gibbous)	Več kot polovica diska, osvetlitev pretežno na desni.
Polna luna / ščip (full moon)	Cel disk je osvetljen.
Pojemajoča izbočena (waning gibbous)	Manj kot polna, osvetlitev pretežno na levi.
Zadnji krajec (last quarter)	Leva polovica diska je osvetljena.
Pojemajoči srp (waning crescent)	Tanek osvetljeni rob na levi.

METODE IN MATERIALI:

Za raziskavo smo uporabili sveže posekan les navadne bukve (*Fagus sylvatica* L.), pridobljen na gozdno-gospodarskem območju Kočevje na štirih odsekih (05123A, 05123B, 07020B in 07021B). Izvedli smo devet vzorčenj in pridobili 54 kolotov navadne bukve. Pri izbiri dreves smo se osredotočili na debelino kolotov nad 20 cm, saj ti omogočajo pripravo vzorcev, primernih za laboratorijske analize. Kolote smo odvzemali nad 4 m višine drevesa, kar nam omogoča izogib napakam. Vzorčenje je potekalo v dvotedenskih intervalih če so to omogočali vremenski pogoji. Ob vsakem odvzemu smo izbrali šest dreves, od tega tri z rdečim srcem in tri brez diskoloracij. Pri izbiri smo vedno skušali zagotoviti, da vzorci niso imeli vidnih napak, kot so grče, trohnoba ali druge nepravilnosti, ki bi lahko vplivale na rezultate.

Sveže odvzete kolote smo takoj po poseku ustrezno zaščitili, da bi preprečili sušenje med transportom do laboratorija. V raziskavi smo uporabili klasične gravimetrične metode, poleg tega še rezistografsko analizo in hiperspektralno oslikovanje, ki v tem prispevku niso podrobneje obravnavane. V laboratoriju smo vsak kolot razpolovili po sredini. Iz prve polovice smo pripravili zaporedne vzorce, ki so vključevale del sredice, iz katerih smo nato izdelali manjše vzorce dimenzij 50 × 25 × 15 mm v skladu s standardom EN 113 (SIST EN 113, 2002). Vsak vzorec smo natančno izmerili in mu določili masi. Nato smo vzorce sušili v sušilniku pri 103 °C 48 ur, kot predpisuje standardni postopek za določanje vlažnosti lesa. Po sušenju smo vzorce ponovno stehali, da smo izračunali izgubo vlage. Drugo polovico kolota smo razžagali na debelejšo

segmente, ki smo jih najprej en teden sušili pri 40 °C . Iz teh desk smo nato izdelali manjše vzorce enakih dimenzij, ki smo jih posušili pri 103 °C 48 ur ter jim po koncu sušenja ponovno določili maso in dimenzije v absolutno suhem stanju.

Opisan postopek nam je omogočil natančno spremljanje vlažnosti lesa, hkrati pa zagotovil primerljivost med rezultati. S tem smo lahko analizirali vpliv časa sečnje, fenoloških faz in luninih men na vlažnost bukovega lesa, pri čemer smo minimalizirali vpliv morebitnih napak ali heterogenosti v vzorcih. Podatke smo obdelali v statističnem programu JASP (0.95.4.0).

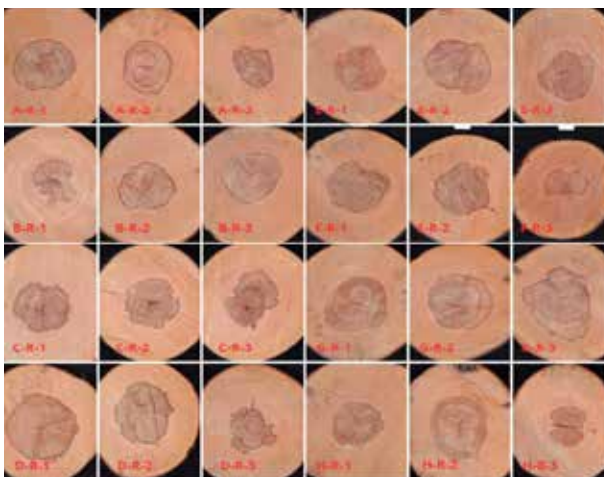
Slika 1: Izolacija vzorcev na terenu v Kočevju



Slika 2: Priprava vzorcev za meritve



Slika 3: Lesni vzorci rdečega srca (levo) in les brez diskoloracij (desno)

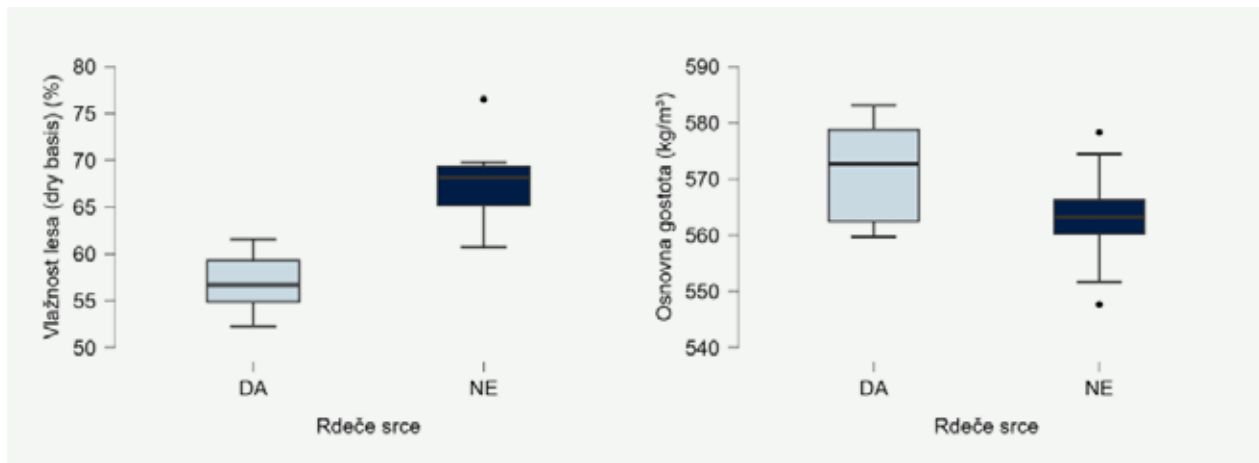


REZULTATI:

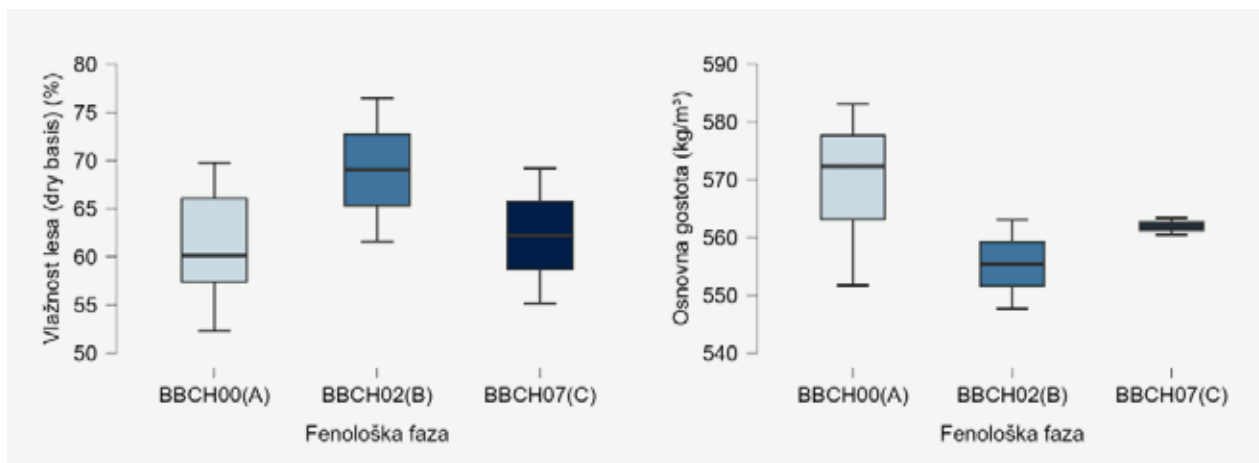
Analiza podatkov je pokazala razlike v vlažnosti lesa (suha osnova) in osnovni gostoti lesa glede na prisotnost rdečega srca. Slika 4 prikazuje, da imajo vzorci z rdečim srcem (DA) v povprečju nižje vrednosti vlažnosti (57 %) v primerjavi z vzorci brez rdečega srca (NE) (68 %). Mediane vlažnosti so bile pri skupini brez rdečega srca višje, kar nakazuje na povezavo med

prisotnostjo rdečega srca in zmanjšano vlažnostjo. Nasprotno so rezultati za osnovno gostoto pokazali obraten trend. Vzorci z rdečim srcem so imeli višje vrednosti osnovne gostote kot vzorci brez rdečega srca, kar lahko pripišemo razlikam v vlažnosti. Mediane so bile pri skupini z rdečim srcem jasno višje, kar kaže na možno povezavo med prisotnostjo rdečega srca in povečano gostoto.

Slika 4: Prikaz vlažnosti lesa (suha osnova) in osnovne gostote glede na prisotnost rdečega srca



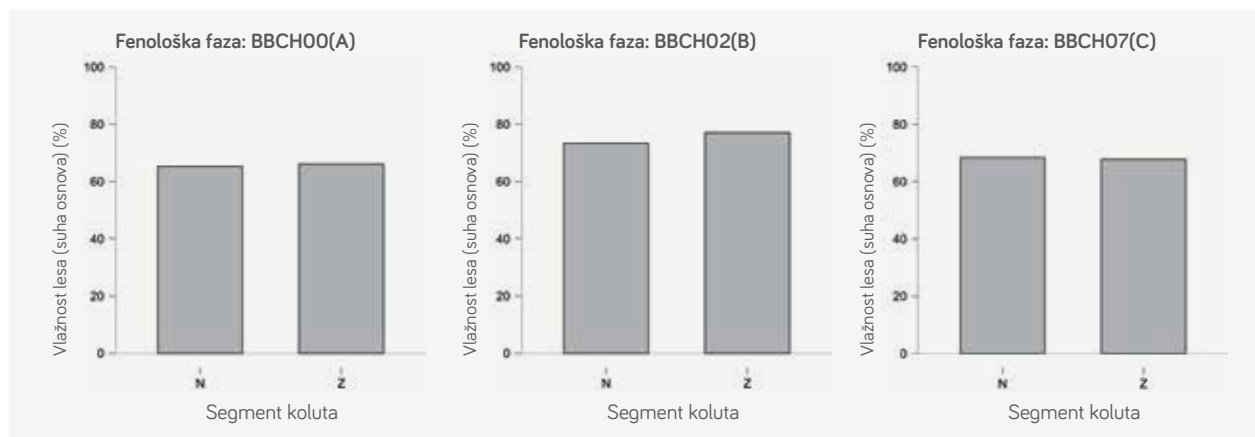
Slika 5: Prikaz porazdelitve vlažnosti lesa (suha osnova) in osnovne gostote glede na fenološko fazo



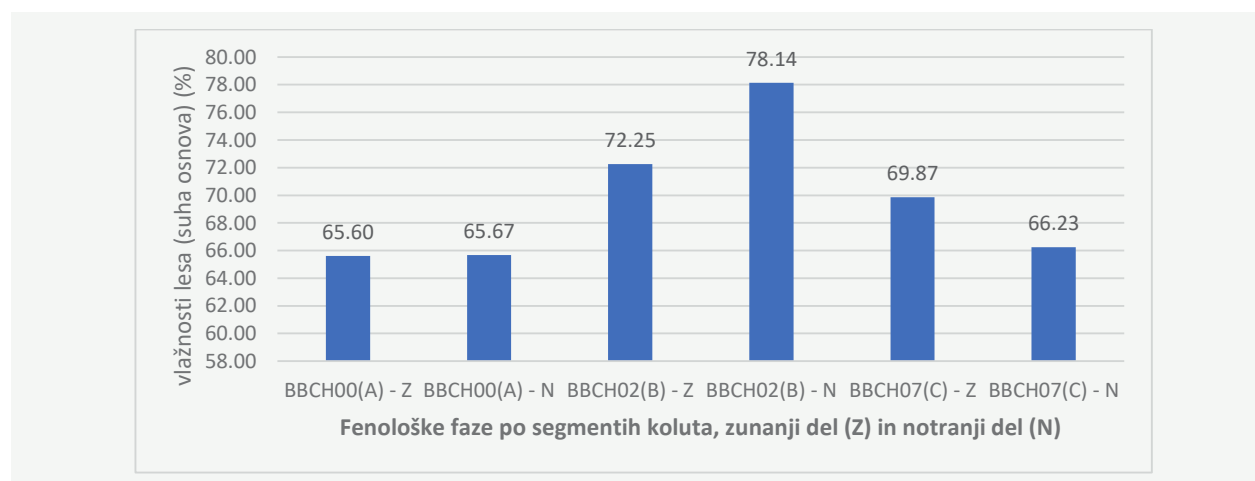
Vzorci so bili do sedaj izolirani v treh prisotnih fenoloških fazah navadne bukve: BBCH00 (A) – speči popki; BBCH02 (B) – napeti popki; BBCH07 (C) – nabrekli popki, pri katerih se rjave luske razprejo in se pojavi zelena barva razvijajočih se listov. Slika 5 prikazuje porazdelitev vrednosti vlažnosti lesa (suha osnova) in osnovne gostote lesa v treh fenoloških fazah. Vrednosti vlažnosti lesa se med fenološkimi fazami razlikujejo. Najvišje mediane so bile zabeležene v fenološki fazi BBCH02, kjer se vrednosti gibljejo približno med 62 in 76. Fenološki fazi BBCH00 in BBCH07 dosegata nižje mediane parametra vlažnosti lesa, pri čemer ima

BBCH07 nekoliko višje vrednosti kot BBCH00. Razpon vrednosti v vseh treh fazah kaže na zmerno variabilnost, ki je najbolj izrazita v fazi BBCH02. Nasprotno se osnovna gostota med fenološkimi fazami ne spreminja vzporedno s vlažnostjo lesa. Najvišja mediana osnovne gostote je bila opažena v fenološki fazi BBCH00, ki hkrati izkazuje tudi največjo razpršenost vrednosti. Fenološka faza BBCH02 ima najnižje vrednosti osnovne gostote ter relativno ozek razpon, kar kaže na bolj homogen vzorec. V fazi BBCH07 so vrednosti osnovne gostote nekoliko višje kot v BBCH02, vendar z zelo majhno variabilnostjo.

Slika 6: Prikaz porazdelitve vlažnosti lesa (suha osnova) v odvisnosti od fenološke faze in segmenta koluta razdeljen na zunanji del (Z) in notranji del (N) koluta

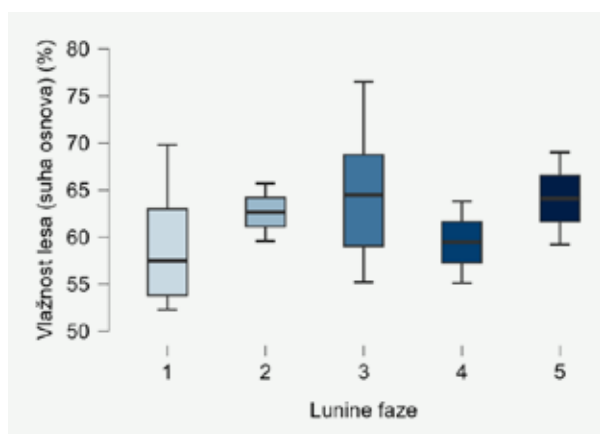


Slika 7: Prikaz porazdelitve vlažnosti lesa (suha osnova) v odvisnosti od fenološke faze in segmenta koluta razdeljen na zunanji del (Z) in notranji del (N) koluta



Slika 6 in 7 prikazuje, da se vlažnost lesa (suha osnova) med fenološkimi fazami in segmentoma koluta razlikuje. V dve faze (BBCH00 A in BBCH002 B) je notranji del koluta (N) bolj vlažen od zunanjšega (Z), kar odraža počasnejše sušenje centralnega dela lesa in morebitni vpliv fenološke faze. Pri BBCH07 C je trend obraten, ker opazimo znižanje vlažnosti. Saj ta faza predstavlja prehodno obdobje v katerem popki nabreknejo, luske odpadajo in se začne razvoj listov, kar lahko vpliva na fiziološke procese in tudi na vsebnost vode v lesu.

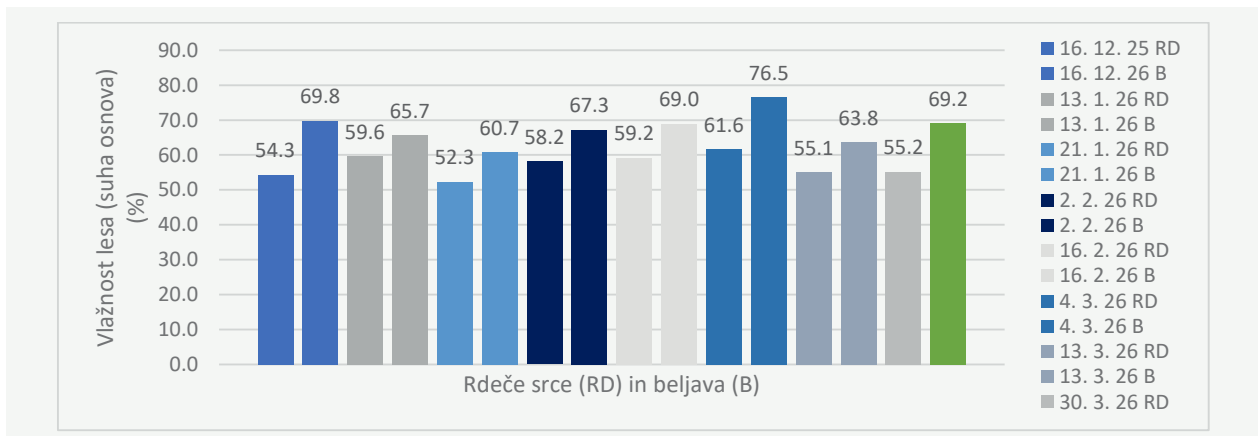
Slika 8: Vpliv luninih faz na vlažnosti lesa (suha osnova); 1 (rastoči srp); 2 (zadnji krajec); 3 (pojemojoča izbočena); 4 (pojemojoči srp); 5 (rastoča izbočena)



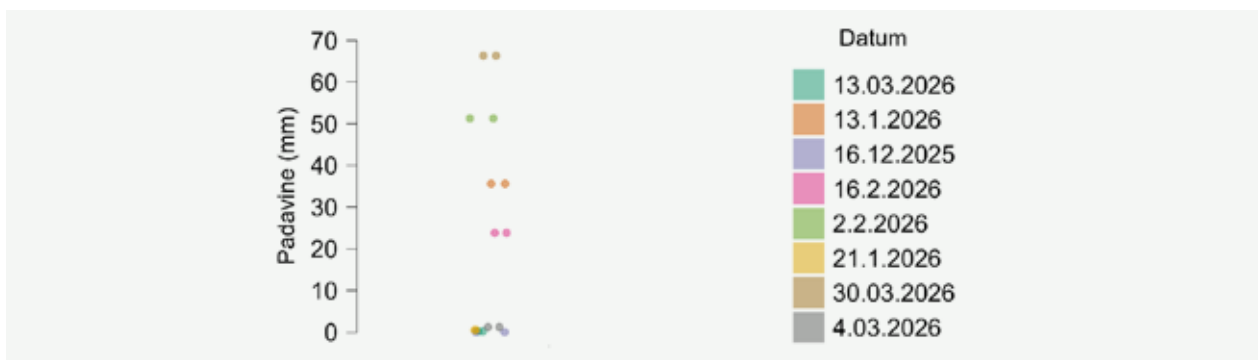
Vlažnost lesa se med fazami razlikuje, pri čemer je najvišja v fazi pojemajoče izbočene in najnižja v fazi rastočega srpa. Razlike med ostalimi fazami so manj izrazite. Na podlagi analize prikazane na sliki 8 ni mogoče potrditi statistične značilnosti teh razlik ampak s statističnimi testi ugotavljamo da ni statistično značilnih razlik med luninim fazami in vlažnosti lesa (suha osnova). Ta del bo bolj jasen po koncu raziskave, ko bo na voljo več podatkov. Prikaz vlažnosti lesa (suha osnova) glede na čas sečnje za rdeče srce in beljavo (slika 9), kaže da je vlažnost lesa večja pri

beljavi. Razvidno je da se vlažnost lesa (suha osnova) med datumi ni enakomerno zmanjševala, ampak se giblje med 52 % in 76 %, kar lahko nakazuje na vpliv okoljskih razmer. V raziskavi smo upoštevali tudi količino padavin (slika 10) glede na čas sečnje. V nadaljevanju raziskave pričakujemo, da se bodo morebitne razlike izraziteje pokazale ko bomo vzorčili tudi v suhem poletnem obdobju. Bomo poskušali podrobneje razložiti vpliv padavin na dinamiko spremembe vsebnosti vode v lesu.

Slika 9: Prikaz vlažnosti lesa (suha osnova) glede na čas sečnje posamezno za rdeče srce in beljavo



Slika 10: Padavine (mm) v tednu pred vzorčenjem



ZAKLJUČEK:

Ker sveže posekan les vsebuje veliko vode, smo pričakovali, da bodo čas sečnje, fenološke faze in lunine mene vplivali na vlažnost lesa. Dosedanji rezultati teh vplivov še ne potrjujejo jasno, kar kaže na potrebo po nadaljnjem spremljanju, zlasti v poletnem obdobju. Rezultati kažejo, da je prisotnost rdečega srca povezana z nižjimi vrednostmi vlažnosti lesa in hkrati z višjo osnovno gostoto. Obraten trend pri obeh parametrih nakazuje, da spremembe, povezane z nastankom rdečega srca, vplivajo na fizikalne lastnosti materiala na različne načine, pri čemer višja osnovna gostota ne pomeni nujno tudi višjih vrednosti vlažnosti lesa. To potrjuje, da prisotnost rdečega srca predstavlja pomemben dejavnik pri interpretaciji merjenih lastnosti. Skupno rezultati potrjujejo, da sta čas vzorčenja in

fenološka faza ključna dejavnika, ki vplivata na obravnavane fizikalne lastnosti. Ugotovitve poudarjajo pomen upoštevanja fenološkega stanja pri interpretaciji meritev ter prispevajo k boljšemu razumevanju dinamike sprememb lastnosti materiala skozi razvojno obdobje. Skupno rezultati kažejo, da fenološka faza pomembno vpliva, pri čemer je faza BBCHO2 povezana z najvišjimi vrednostmi vlažnosti lesa in hkrati z najnižjo osnovno gostoto, medtem ko faza BBCHO0 izkazuje obraten trend. Razlike med luninimi fazami niso bile statistično značilne. Spremljanje vlažnosti skozi čas je pokazalo nihanja med 52 % in 76 %, kar nakazuje vpliv spremenljivih okoljskih razmer. V nadaljevanju raziskave bomo podrobneje preučili še vpliv padavin na dinamiko sprememb vsebnosti vode v lesu.

LITERATURA IN VIRI:

Arnič, D., Humar, M., Kržišnik, D., Krajnc, L., & Prislan, P. (2021). Gostota lesa—Metode določanja in pomen pri razvoju gozdno lesnega biogospodarstva. *Acta Silvae et Ligni*, 124, 1–11. <https://doi.org/10.20315/ASetL.124.1>

Bouriaud, O., Bréda, N., Le Moguédec, G., & Nepveu, G. (2004). Modelling variability of wood density in beech as affected by ring age, radial growth and climate. *Trees*, 18(3), 264–276. <https://doi.org/10.1007/s00468-003-0303-x>

Čufar, K. (2006). *Anatomija lesa: [Univerzitetni učbenik]*. Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo.

Dietsch, P., Franke, S., Franke, B., Gamper, A., & Winter, S. (2015). Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 5(2), 115–127. <https://doi.org/10.1007/s13349-014-0082-7>

Ghorbanian Far, M., Najafian Ashrafi, M., Shaabani Asrami, H., Amiri Moghadam, Y., Bari, E., Niemz, P., Hosseinpourpia, R., & Ribera, J. (2024). Physical and mechanical properties of different beech wood species grown at various climate conditions: A review. *Holzforschung*, 78(7), 377–386. <https://doi.org/10.1515/hf-2023-0117>

Gorišek, Ž., Oven, Primož, & Čufar, K. (2009). *Les: Zgradba in lastnosti : njegova variabilnost in heterogenost*. Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo. ISO 13061-2:2014. (n.d.). EVS. Retrieved 27 May 2025, from <https://www.evs.ee/en/iso-13061-2-2014>

Jyske, T., Mäkinen, H., & Saranpää, P. (2008). Wood density within Norway spruce stems. *Silva Fennica*, 42(3). <https://doi.org/10.14214/sf.248>

Koch, E., Bruns, E., Chmielewski, F.-M., Defila, C., Lipa, W., & Menzel, A. (2007). *Guidelines for Plant Phenological Observations*.

Lunine mene—NASA Science. (2023, June 5). <https://science.nasa.gov/moon/moon-phases/>

Silvestro, R., Deslauriers, A., Prislan, P., Rademacher, T., Rezaie, N., Richardson, A. D., Vitasse, Y., & Rossi, S. (2025). From Roots to Leaves: Tree Growth Phenology in Forest Ecosystems. *Current Forestry Reports*, 11(1), 12. <https://doi.org/10.1007/s40725-025-00245-9>

Škrk, N., Črepinšek, Z., & Čufar, K. (2020). Phenology of leaf development in European beech (*Fagus sylvatica*) on a site in Ljubljana, Slovenia in 2020: Fenologija razvoja listov navadne bukve (*Fagus sylvatica*) na rastišču v Ljubljani v letu 2020. *Les/Wood*, 69(1), 5–19. <https://doi.org/10.26614/les-wood.2020.v69n01a07>

Sopushynskiy, I., Vitovin, Teischinger, A., & Michalak, R. (n.d.). *The influence of site factors on wood density and*

moisture content of beech in the Ukrainian Carpathians. 2005.

Straže, A., Merela, M., Krže, L., Čufar, K., & Gorišek, Ž. (2015). Fizikalne lastnosti bukovine po žledolomu. *Gozdarski vestnik. slovenska strokovna revija za gozdarstvo*, 73(10), 454–460. <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=83669>

Torelli, N. (1998). *Daljinski transport vode v drevesu—Vodni potencial*. <https://www.dlib.si/details/URN:NBN:SI:DOC-YFOY1F2A>

KLJUČNE BESEDE:

Vlažnost lesa, navadna bukev, *Fagus sylvatica* L., lunine mene, fenološke faze, gostota lesa

ZAHVALE:

Avtorji se zahvaljujejo za finančno podporo Slovenske raziskovalne in inovacijske agencije (ARIS) v okviru raziskovalnega projekta J7-50231 (GROWTH), raziskovalnega programa P4-0015 (les in lignocelulozni kompoziti) ter infrastrukturnih centrov (IC LES PST 0481-09 in IO-E012 E-RIHS). Avtorji se zahvaljujejo tudi za podporo slovensko-italijanskega projekta Interreg WoodInnovate in projekta ARIS TRL 3-6 Smart-Living.

CC BY SA · DOI 10.20315/SFS.191.03

Predstavitve plakatov

Raziskave preživetja, ranljivosti in s fitnessom povezanih lastnosti provenienc navadne bukve (*Fagus sylvatica* L.) v poskusu Kamenski hrib/Straža (Bu20-12) za dinamično ohranjanje gozdov v času pospešenih okoljskih sprememb

Marija Kravanja¹, Marjana Westergren¹, Natalija Dovč¹, Gregor Božič¹

¹ Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-naslov: gregor.bozic@gozdis.si

IZVLEČEK:

Slovenski provenienčni poskus Kamenski hrib/Straža 1996/1998 (Bu20-12) je del mednarodne mreže evropskih provenienčnih poskusov z bukvi, ki predstavlja enega najpomembnejših objektov za raziskovanje prilagoditvenega potenciala bukve. Na mezofilnem rastišču mešanega bukovo-jelovega gozda (preddinarsko fitogeografsko območje) so na nadmorski višini 544–546 m posajena poskusna drevesa 38 provenienc iz 15 evropskih držav. V poskusu spremljamo rast in preživetje osebkov različnega geografskega izvora v enakih okoljskih razmerah; povezave morfoloških, fenoloških, anatomskih, mikoriznih in genomskih podatkov odpirajo možnosti integrirane presoje prilagoditvene sposobnosti vrste.

UVOD:

Navadna bukev (*Fagus sylvatica* L.) je ena ključnih vrst evropskih zmernih gozdov. Zaradi velikega območja razširjenosti, lastnosti lesa ter vloge v gozdnih ekosistemih ima velik gospodarski in varstveni pomen, hkrati pa predstavlja modelni sistem za razumevanje prilagajanja dolgoživih drevesnih vrst na spremenjene okoljske razmere. V evropskem prostoru bukev pokriva približno 14 milijonov hektarov, mednarodna mreža provenienčnih poskusov pa vključuje velik del njenega naravnega območja razširjenosti ter genetske raznolikosti. Prav zato imajo dolgoročni provenienčni poskusi posebno vrednost, saj znotraj istega eksperimentalnega okvirja omogočajo primerjalne raziskave rastišč, provenienc, fenotipske plastičnosti in lokalnih prilagoditev.

Podnebne spremembe imajo neposreden vpliv na ključne procese, ki določajo vitalnost bukovih sestojev: fenologijo, rast, vodno bilanco, občutljivost na sušo, izpostavljenost poznim spomladanskim pozebam ter interakcije s škodljivci, patogeni in simbiotskimi organizmi. Pri

dolgoživih drevesnih vrstah je težava posebej izrazita, saj so generacijski intervali dolgi, jakost okoljskih sprememb pa presega hitrost naravne migracije in morebiti tudi naravne selekcije v obstoječih sestojih. Bukve kot poznosukcesijska in praviloma kompeticijsko močna vrsta ima konservativno rastno strategijo, njeni odzivi na stres pa se lahko kažejo bolj v morfoloških in anatomskih znakih kot v očitnih fizioloških prilagoditvah.

Mednarodna mreža evropskih provenienčnih poskusov z bukvi, vzpostavljena v serijah 1993/1995, 1996/1998 in 2007, predstavlja enega najpomembnejših objektov za raziskovanje prilagoditvenega potenciala bukve. Harmonizirana podatkovna zbirka BeechCOSTe52 vključuje meritve fenotipskih znakov iz 38 poskusnih lokacij, 217 provenienc in več kot 862000 meritev dreves pri starosti 2 – 15 let. Zajema višine, prsne premere, smrtnost, spomladansko in jesensko fenologijo. Mreža omogoča analize prenosov provenienc vzdolž makroklimatskih gradientov, preučevanje tveganj zaradi pozeb in suš ter

oblikovanje priporočil glede gozdnega reprodukcijskega materiala v bodočih podnebnih razmerah.

Slovenski poskus Kamenski hrib/Straža 1996/1998 (Bu20-12) je del druge serije teh poskusov, ki jih vodi Inštitut za gozdno genetiko iz Grosshansdorfa v Nemčiji (Inštitut Thünen). Poskus se nahaja v občini Žužemberk na nadmorski višini 544–546 m v mešanem bukovo-jelkovem gozdu (predninarsko fitogeografsko območje). V njem so na 1,3 ha posajena poskusna drevesa 38 provenienc iz 15 evropskih držav. V razpravi Božič & Kraigher (2019) opisujeta rastiščne značilnosti, zasnovo, postavitve, dosajevanje in uskladitev podatkov iz poskusa z ostalimi poskusi po Evropi v okviru COST akcije E52. Poskus je bil po začetnih izgubah in poškodbah sadik zaradi glodavcev nekoliko spremenjen in dosajen, zato ima zaradi zasnove ter blokov (ponovitev) in provenienc posebno metodološko vrednost. Od vzpostavitve poskus služi kot dolgoročno raziskovalna ploskev za spremljanje preživetja, višinske in debelinske rasti, fenologije, zdravstvenega stanja, anatomije in gostote lesa, dinamike korenin in ektomikoriznih združb. V letu 2023 so bila poskusna drevesa prvič tudi genotipizirana; v okviru projekta H2020 FORGENIUS je bilo zbranih 854 vzorcev dreves iz 36 provenienc, sekvenciranje pa je potekalo s tehnologijo SPET (ang. *Single Primer Enrichment Technology*), tj. ciljno genotipizacijo izbranih delov genoma. Prednost omenjene metode v primerjavi s klasičnimi SNP čipi je v tem, da poleg znanih markerjev omogoča tudi odkrivanje novih SNP-ov v izbranih genomskih regijah. V primerjavi z naključnimi pristopi je SPET sekvenciranje bolj usmerjeno, saj omogoča načrtno zajemanje lokusov z boljšo pokritostjo ciljnih regij in bolj primerljivo strukturo podatkov med populacijami oz. proveniencami. Zato je posebej uporabno za gozdne drevesne vrste, ki so dolgožive in imajo relativno velike genome, vzorčenje pa pogosto vključuje genetsko raznolike naravne populacije. Pridobljeni genetski podatki predstavljajo dragoceno orodje za nadaljnje raziskovanje razlik med proveniencami ter pomembno podlago za genetski monitoring, dinamično ohranjanje genskih virov in presojo prilagoditvenega potenciala bukve v spremenjenih podnebnih razmerah. Podatki iz provenienčnih poskusov ne služijo le razumevanju pretekle in sedanje prilagojenosti populacij, temveč tudi oblikovanju praktičnih usmeritev za gozdarstvo v vse hitreje spreminjajočem se podnebnju. Med ključne aplikacije sodijo izbor ustreznih provenienc za obnovo gozdov, presoja tveganj pri prenosu reprodukcijskega materiala, načrtovanje prenosa provenienc znotraj (ang. *assisted gene flow*) in onkraj (ang. *assisted migration*) areala vrste, ohranjanje znotrajvrstne genetske pestrosti ter oblikovanje ukrepov za dolgoročno zagotavljanje stabilnosti, produktivnosti in biotske raznovrstnosti bukovih gozdov.

PREGLED OBJAV:

Znanstveni pomen poskusa Bu20-12 je dvojen; gre za dolgoročni provenienčni poskus, v katerem spremljamo rast in preživetje osebkov različnega geografskega izvora v enakih okoljskih razmerah. Poleg tega pa povezave morfoloških, fenoloških, anatomskih, mikoriznih in genomskih podatkov odpirajo možnosti integrirane presoje prilagoditvene sposobnosti bukve.

Izhodiščno in metodološko najpomembnejše delo za razumevanje poskusa je poglavje Božič & Kraigher (2019), ki predstavlja referenčni vir o poskusu, saj dokumentira nastanek poskusa, prvotno zasnovo, poškodbe in dosajevanje po začetnih izgubah, spremembe v številu provenienc in ponovitev ter vključitev poskusa v evropsko mrežo provenienčnih poskusov z bukvijo. Prispevek omogoča pravilno interpretacijo vseh kasnejših meritev, zlasti pri analizah razlik med proveniencami, saj lahko razlike v številu ponovitev in dosajevanje vplivajo na statistično moč in interpretacijo rezultatov.

Prve raziskave na poskusu so obravnavale podzemni del poskusnih dreves ter interakcije s simbiotskimi glivami. Pučko in sod. (2005) so analizirali tipe ektomikorize na sadikah treh provenienc in na naravno pomlajeni bukvi z iste lokacije. V analizo je bilo vključenih več kot 20000 koreninskih vršičkov; vse kratke korenine so bile mikorizirane, pri čemer je bil velik delež koreninskih vršičkov neturgescenčnih oz. morfološko težje določljivih tipov ektomikorize. Študija je dokaz širše uporabnosti provenienčnih poskusov, ki lahko poleg primerjav nadzemne rasti dreves ipd. služijo tudi za proučevanje funkcionalnih povezav med njihovim koreninskim sistemom in talno bioto.

Študija Železnik in sod. (2019) je obravnavala dinamiko drobnih korenin treh provenienc bukve v poskusu med letoma 2007 in 2010. Uporabljene so bile tri komplementarne metode za oceno biomase drobnih korenin, nastajanja korenin in spremljanje dolgoživosti korenin. Raziskava je pokazala provenienčno pogojene razlike v podzemnih znakih, ki so v raziskavah, temelječih le na višinski rasti in/ali debelinski rasti ter preživetju, prezrti. Za presojo prilagajanja bukve na sušo in spremenjeno vodno bilanco so koreninski znaki izjemno pomembni, saj določajo zmožnost črpanja vode in hranil ter s tem odpornost na stres. Članek naslavlja variabilnost provenienc v povezavi s funkcionalnimi znaki, ki so neposredno relevantni za podnebno odpornost.

Pomemben sklop raziskav se nanaša na debelinsko rast, gostoto lesa in anatomijo sekundarnega ksilema. Krajnc in sod. (2022) so primerjali debelinski prirastek in gostoto lesa bukovih provenienc v slovenskem poskusu Kamenski

hrib/Straža in madžarskem poskusu Bucsuta. V raziskavo so bile vključene provenience iz okoljsko kontrastnih območij po Evropi, posajene na mezofilnem do vlažnem rastišču v Sloveniji in bolj sušnem rastišču na Madžarskem. Glavna ugotovitev je, da razlike v debelinskem prirastku in gostoti lesa med proveniencami obstajajo, vendar niso nujno tako velike, da bi same po sebi zadostovale za izbor gozdnega reprodukcijskega materiala. Stopnja višinske rasti ni edino merilo prilagojenosti, še posebej v času pogostejših ekstremnih dogodkov. Rezultati tako poudarjajo pomembnost vprašanja, ali je pri izbiri provenienc za prihodnje razmere pomembneje upoštevati stabilnost rasti, preživetje in odziv na stres kot zgolj povprečno produktivnost. Na to se navezuje tudi študija Gričar in sod. (2024), ki je primerjala medletno variabilnost povprečne površine trahej in širine branik pri bukovih proveniencah v poskusih Kamenski hrib/Straža in Bucsuta. Rezultati kažejo, da se odzivi anatomskih znakov in širine branik razlikujejo med rastiščema; rastišče na Kamenskem hribu je glede vodnih razmer razmeroma ugodno za bukev, medtem ko sušnejše rastišče v Bucsuti omogoča bolj izrazito zaznavanje stresnih odzivov. Primerjalna študija nakazuje, da provenienčni odzivi niso absolutni, temveč odvisni od interakcije med izvorom provenience in konkretnimi okoljskimi razmerami na poskusni lokaciji.

Leta 2024 je izšel tudi članek Mrak in sod., ki obravnava vpliv provenience na strukturo sekundarnega ksilema, listne znake in ektomikorizno združbo v ugodnih rastiščih. Ključna ugotovitev je, da provenienca vpliva na prevodno površino sekundarnega ksilema, listno površino in stabilne izotope ogljika, dušika in kisika v listih, medtem ko za sestavo ektomikorizne združbe niso ugotovili pomembnega učinka provenience. Ta rezultat je vsebinsko zelo uporaben, ker razlikuje med znaki, ki kažejo jasen genetski oziroma provenienčni signal, ter znaki, pri katerih je verjetno močnejši vpliv okolja ali lokalne talne biote. Za interpretacijo poskusa Kamenski hrib/Straža (Bu20-12) to pomeni, da vsi merjeni znaki niso enako primerni kot indikatorji genetsko pogojene prilagojenosti. Ksilem, listni in izotopski znaki lahko kažejo jasnejši signal provenienčnih razlik kot sama sestava ektomikorizne združbe, vsaj v razmerah, ki niso izrazito stresne.

Za poskus izjemno pomembna sta podatkovni članek Robson in sod. (2018) in povezana zbirka BeechCOSTe52, saj standardizirata fenotipske podatke iz evropske mreže provenienčnih poskusov z bukvijo. Podatkovna zbirka vključuje 38 poskusnih lokacij, 217 provenienc in več kot 862000 meritev dreves, med drugim višine, premere, podatke o preživetju, spomladanski in jesenski fenologiji. Podatki so tako postali primerljivi med poskusi, preverljivi

in ponovno uporabni, kar omogoča nadaljnje metaanalize, modeliranje lokalnih adaptacij in preverjanje odzivov provenienc vzdolž klimatskih gradientov.

V mednarodno odmevni objavi Chakraborty in sod. (2024) so avtorji uporabili podatke iz provenienčnih poskusov, med drugimi Bu20-12, za modeliranje prenosa provenienc onkraj (trenutnih) arealov vrst (ang. *assisted migration*). Scenarije prenosa so modelirali za sedem evropskih gozdnih drevesnih vrst ter ob upoštevanju okoljskih in genetskih razlik analizirali učinke izbire vrst in porekla semena na letni nadzemni ponor ogljika v mladih gozdovih v obnovi. Za povečanje odpornosti gozdov predlagajo nadomeščanje iglavcev v večjem delu njihovih arealov z listavci. Zmanjšanje trenutnega ponora ogljika (40 TgC/leto) do leta 2061–2080 ob uporabi lokalnih virov semena je bilo ocenjeno na 34–41 %, medtem ko bi bilo z uporabo semena iz provenienc, prilagojenih prihodnjim podnebnim razmeram, možno sedanje ponore ohraniti ali celo povečati na 48–60 TgC/leto.

V širši evropski sklop sodijo tudi zgodnejše objave, kot so Ivanković in sod. (2008), Mátyás in Božič (2009), Alía in sod. (2010) ter Robson in sod. (2010) o juvenilni rasti, prenosu provenienc, preživetju in fenologiji. Njihov glavni prispevek je interpretacija bukovih provenienčnih poskusov kot naravnih simulacij podnebnega prenosa: provenienca, posajena zunaj izvornega okolja, je izpostavljena drugačnim temperaturnim in padavinskim razmeram, kar omogoča študije lokalnih adaptacij in plastičnosti.

POVZETEK:

Bukov provenienčni poskus Kamenski hrib/Straža (Bu20-12) ni pomemben samo kot slovenska raziskovalna ploskev, temveč kot dolgoročni eksperimentalni objekt v evropski mreži raziskav bukve. Zgodnje meritve preživetja in rasti so pokazale veliko variabilnost med proveniencami, kasnejše raziskave pa so dokazale, da se razlike med proveniencami izražajo tudi v koreninski dinamiki, ksilemski anatomiji, listnih znakih, debelinskem prirastku in gostoti lesa. Hkrati rezultati opozarjajo, da odzivi niso enoznačni: nekateri znaki kažejo jasen provenienčni signal, drugi so močno odvisni od rastišča, leta ali lokalnih biotskih razmer, kar je z vidika dinamičnega ohranjanja vrste ključnega pomena.

LITERATURA IN VIRI:

Alía R, Božič G, Gömöry D, Huber G, Rasztovits E, von Wühlisch G. 2011. The survival and performance of beech provenances over a Europe-wide gradient of climate. In: Genetic resources of European beech (*Fagus sylvatica* L.) for sustainable forestry: proceedings of the COST E52 Evaluation of beech genetic resources for sustainable

forestry, Final Meeting, 4-6 May 2010, Burgos, Spain. Madrid: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, 22, 115-126.

Božič G., Kraigher H. 2019. International European Beech Provenance Trial Kamenski hrib/Straža in Slovenia. V: Šijačić-Nikolić, M., Milovanović, J., Nonić, M. (ur.): Forests of Southeast Europe Under a Changing Climate. Advances in Global Change Research, vol 65. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95267-3_24

Chakraborty D, Ciceu A., Ballian D, Garzón M. B., Bolte A., Bozic G., Buchacher R., Čepl J., Cremer E., Ducouso A., Gaviria J., Steffenrem A., Stejskal J., Stojnic S., Volmer K., Schueler S. 2024. Assisted tree migration can preserve the European forest carbon sink under climate change. Nature Climate Change, 14, August <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02080-5>

Gričar J., Arnič D., Krajnc L., Prislán P., Božič G., Westergren M. 2024. Different patterns of inter - annual variability in mean vessel area and tree - ring widths of beech from provenance trials in Slovenia and Hungary. Trees, 179-195, <https://doi.org/10.1007/s00468-023-02476-4>

Ivanković M., Bogdan S., Božič G. 2008. European Beech (*Fagus sylvatica* L.) Height Growth Variability in Croatian and Slovenian Provenance Trials. Šumarski list, 132, 11-12: 541-541, <https://hrcak.srce.hr/30753>

Krajnc L., Prislán P., Božič G., Westergren M., Arnič D., Mátyás C. 2022. A comparison of radial increment and wood density from beech provenance trials in Slovenia and Hungary. European Journal of Forest Research, 141, 3: 433-446, <https://doi.org/10.1007/s10342-022-01449-5>

Mátyás C., Božič G. 2009. Juvenile growth response of European beech (*Fagus sylvatica* L.) to sudden change of climatic environment in SE European trials., 213-220, <https://doi.org/10.3832/ifer0519-002>

Mrak T., Gričar J., Unuk T., Gregor N., Luka B., Peter K. 2024. How beech provenance affects the structure of secondary xylem , leaf traits , and the ectomycorrhizal community under optimal growth conditions. Trees, 38, 3: 637-653, <https://doi.org/10.1007/s00468-024-02502-z>

Pučko M., Grebenc T., Božič G., Brus R., Kraigher H. 2005. Identification of types of ectomycorrhizae on seedlings in a beech provenance trial. Zbornik gozdarstva in lesarstva, 75: 87-104

Robson T. M., Alia R., Božič G., Clark J., Forstreuter M., Gömöry D., Liesebach M., Mertens P., Rasztoivits E., Zitová M., von Wühlisch G. 2011. The timing of leaf flush in European beech (*Fagus sylvatica* L.) saplings. In: Genetic resources of European beech (*Fagus sylvatica* L.) for sustainable forestry: proceedings of the COST E52 Evaluation of beech

genetic resources for sustainable forestry, Final Meeting, 4-6 May 2010, Burgos, Spain.

Robson T.M., Garzón M.B. Božič, G, Kraigher, H., et al. (2018). BeechCOSTe52 Database. <https://zenodo.org/record/1240931#.W2hso8KxVaR>.

Madrid: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, 22, 61-79.

Robson T.M., Garzón M.B. Božič, G, Kraigher, H., et al. 2018. Phenotypic trait variation measured on European genetic trials of *Fagus sylvatica* L. Scientific data. 31. Jul. 2018, vol. 5, str. 1-7, zvd, tabele. ISSN 2052-4463. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.149>, DOI: 10.1038/sdata.2018.149

Robson M. T., Garzón M. B., Miranda R. A., Egidio D. B., Bogdan S., Borovics A., Božič G., Brendel O., Clark J., De Vries S. M. G., Delehan I. I., Ducouso A., Fady B., Fennessy J., Forstreuter M., Frýdl J., Geburek T., Gömöry D., Hauke-Kowalska M., Huber G., Ibañez J. I., Ioniță L., Ivanković M., Hansen J. K., Kóczán-Horváth A., Kraigher H., Lee S., Liesebach M., Mátyás C., Mertens P., Muhs H. J., Novotný P., Parnuța G., Paule L., Picardo A., Rasztoivics E., Rogge M., Stener L. G., Sułkowska M., Urban O., Von Wuehlisch G., Vendramin G. G., Vettori C., Wesoly W. 2018. Phenotypic trait variation measured on european genetic trials of *fagus sylvatica* L. Scientific Data, 5: 1-7, <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.149>

Železnik P., Westergren M., Božič G., Eler K., Bajc M., Helmisaaric, Heljä-Sisko Horvathd A., Kraigher H. 2019. Forest Ecology and Management Root growth dynamics of three beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances. Forest Ecology and Management, 431, 1 January 2019: 35-43, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.06.024>

KLJUČNE BESEDE:

provenienčni poskus, *Fagus sylvatica*, primerjalne raziskave, prilagoditveni potencial

ZAHVALE:

Prispevek je nastal v okviru ARIS (P4-0107, 58170), JGS, in projekta HE OptFORESTS.

CC BY SA · DOI 10.20315/SFS.191.04

Izolacija rizosfernih bakterij in gliv bukve (*Fagus sylvatica* L.) in jelke (*Abies alba* Mill.) ter testiranje izolatov na rastlinam koristne lastnosti

Robert Logar¹, Tina Unuk Nahberger¹

¹ Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, SI-1000 Ljubljana

E-naslov: robert.logar@gozdis.si

POUDARKI:

- Iz rizosfere navadne bukve (*Fagus sylvatica* L.) in navadne jelke (*Abies alba* Mill.) smo izolirali bakterijske in glivne seve kot potencialne rastlinam koristne mikroorganizme.
- Izolati so bili ovrednoteni glede na izbrane rast spodbujajoče (PGP) lastnosti, povezane z dostopnostjo hranil, hormonsko regulacijo in odzivom rastlin na stres.
- Preliminarni rezultati predstavljajo osnovo za izbor avtohtonih sevov in oblikovanje mikrobnih konzorcijev za nadaljno inokulacijo sadik.

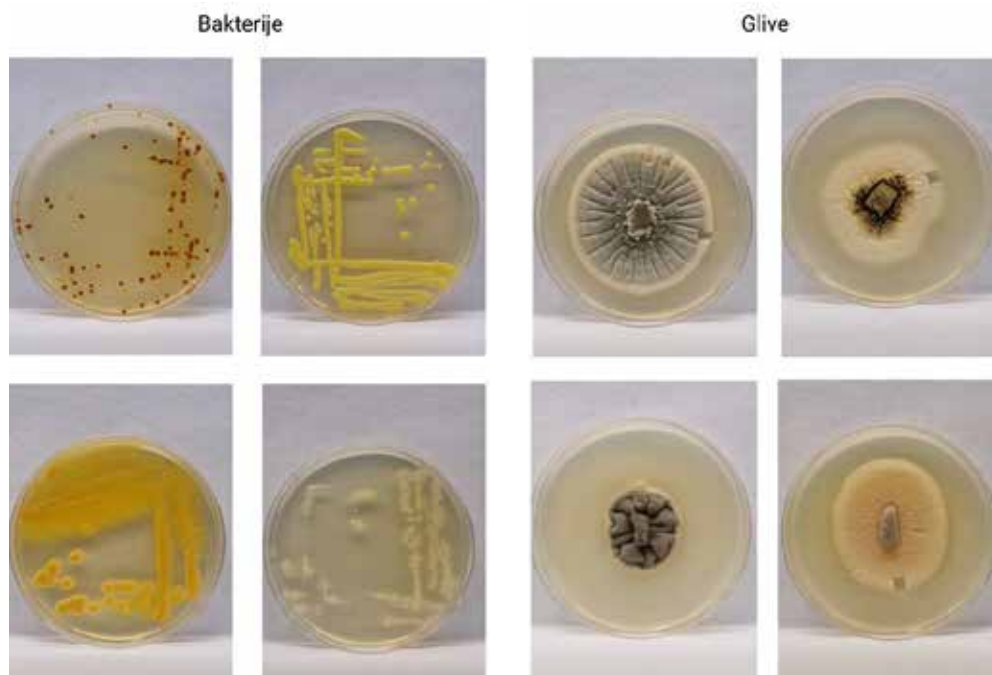
VSEBINA:

Obnova gozdov je kompleksen proces, na katerega vplivajo številni biotski in abiotski dejavniki. V zadnjih letih je uspešna obnova gozdov vse zahtevnejša, saj so sadike gozdnega drevja po sadnji izpostavljene večjim podnebnim nihanjem, predvsem pogostejšim in intenzivnejšim sušam (Sanchez-Cruz in sod., 2020; Ahangar in sod., 2012). Ena od možnosti za izboljšanje kakovosti gozdnih sadik in povečanje njihovega preživetja v fazi prilagajanja na okoljske razmere po presaditvi, je inokulacija z avtohtonimi mikroorganizmi (Su in sod., 2017; Castillo-Arguero in sod., 2014). Rastlinam koristni mikroorganizmi – (PGPM) lahko izboljšajo dostopnost hranil, zmanjšajo vpliv abiotskega in biotskega stresa ter spodbudijo zgodnjo rast rastlin. Uporaba takšnih mikroorganizmov lahko prispeva k razvoju vitalnejših gozdnih sadik in posledično k večjemu preživetju po sadnji (Lucas Garcia in sod., 2004). V gozdarstvu je uporabnost PGPM še razmeroma slabo raziskana. Razvoj in uporaba avtohtonih bakterijskih in glivnih inokulantov, predstavlja eno izmed bolj obetavnih metod, zaradi njihove prilagojenosti na lokalne rastišče razmere (Rostamikia in sod., 2016; São José in sod., 2019; Pugnaire in sod., 2025).

S tem namenom smo v naši raziskavi, v bukovo-jelovem gozdu na območju Turjaka, izolirali bakterijske in glivne seve iz rizosfere navadne jelke (*Abies alba* Mill.) in navadne bukve (*Fagus sylvatica* L.). Vzorce tal z drobnimi koreninami in rizosferno zemljo smo odvzeli s sondo za vzorčenje tal. V laboratoriju smo iz vzorca zemlje ločili drobne korenine in iz teh z homogenizacijo pripravili suspenzije vzorcev. Različne serijske redčitve smo v treh ponovitvah nacepili na selektivna gojišča, natančneje na triptikaza-sojin agar (TSA) za izolacijo bakterij ter krompirjev dekstrozni agar (PDA) za izolacijo gliv. Morfološko različne kolonije oziroma micelije smo z zaporednim precepljanjem prenašali na sveža gojišča, do pridobitve čistih kolonij (Slika 1).

Izbrane bakterijske in glivne izolate smo nato testirali na prisotnost rastlinam koristnih lastnosti. Produkcijo indol-3-ocetne kisline (IAA) smo preverjali s Salkowskim reagentom, pri čemer razvoj rožnate do rdečkaste barve nakazuje potencialno sposobnost tvorbe IAA (Slika 2). IAA kot rastlinski hormon vpliva predvsem na razvoj koreninskega sistema, tvorbo stranskih korenin in s tem na sposobnost rastlin za privzem vode in hranil (Glick, 2020).

Slika 1: Čiste kulture bakterij in gliv izolirane iz rizosfere bukve in jelke.

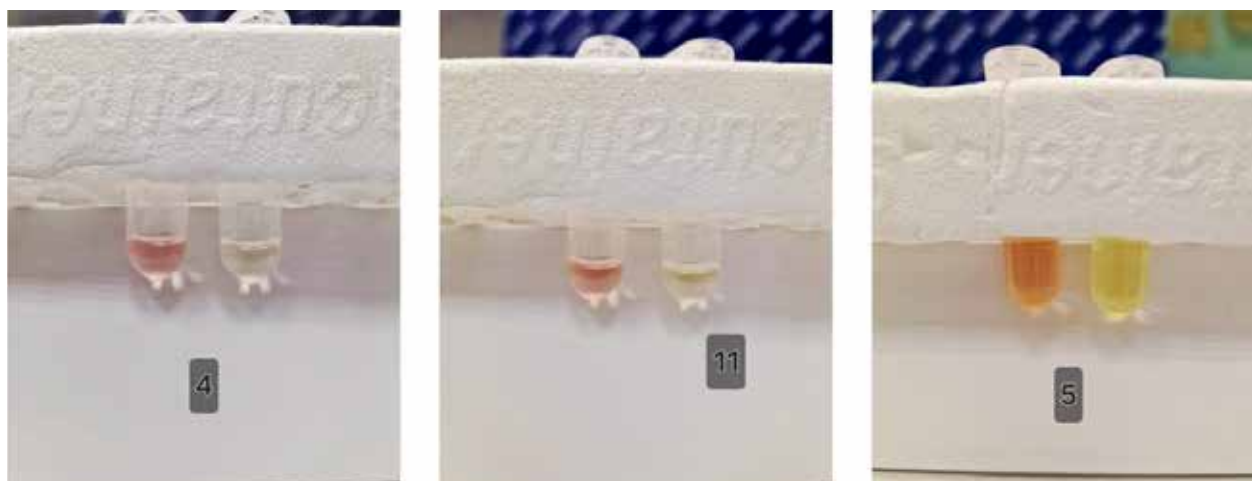


Aktivnost 1-aminociklopropan-1-karbonske kisline (ACC) deaminaze smo preverjali z sposobnostjo rasti izolatov na DF-minimalnem gojišču z ACC kot edinim virom dušika. Kot pozitiven rezultat smo opredelili rast na ACC gojišču, ki je bila boljša kot na negativni kontroli brez dodanega dušika in primerljiva z rastjo na pozitivni kontroli z dostopnim drugim virom dušika. Takšen odziv nakazuje, da lahko izolat uporablja ACC kot vir dušika (Slika 3). Mikroorganizmi s to sposobnostjo, potencialno zmanjšajo nastajanje stresnega etilena v rastlinah in s tem omilijo negativne učinke abiotičnega stresa, kot sta suša ali presaditveni šok (Diniz in sod., 2025).

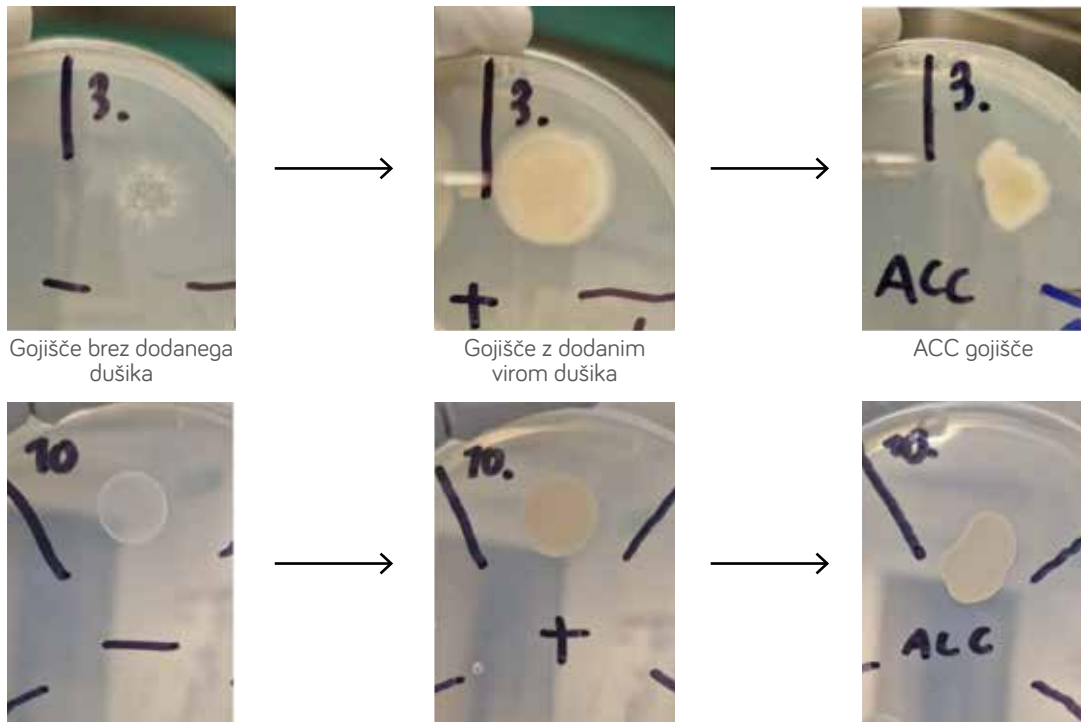
Solubilizacijo fosfata smo preverjali na NBRIP gojišču, kjer nastanek čistih con okoli kolonij oziroma micelijev nakazuje sposobnost mobilizacije težje dostopnih oblik fosforja (Slika 4a). Ta lastnost je pomembna, ker je fosfor v tleh pogosto prisoten v rastlinam slabo dostopnih oblikah, mikroorganizmi pa ga lahko pretvorijo v dostopnejše oblike in z tem povečajo privzem le tega.

Produkcijo sideroforov smo ugotavljali na CAS gojišču, kjer pojav rumeno-oranžnih con okoli kolonij kaže na sposobnost vezave železa (Slika 4b). Siderofori mikroorganizmom omogočajo pridobivanje železa v tleh, hkrati pa lahko z vezavo železa zmanjšajo njegovo dostopnost nekaterim patogenim mikroorganizmom.

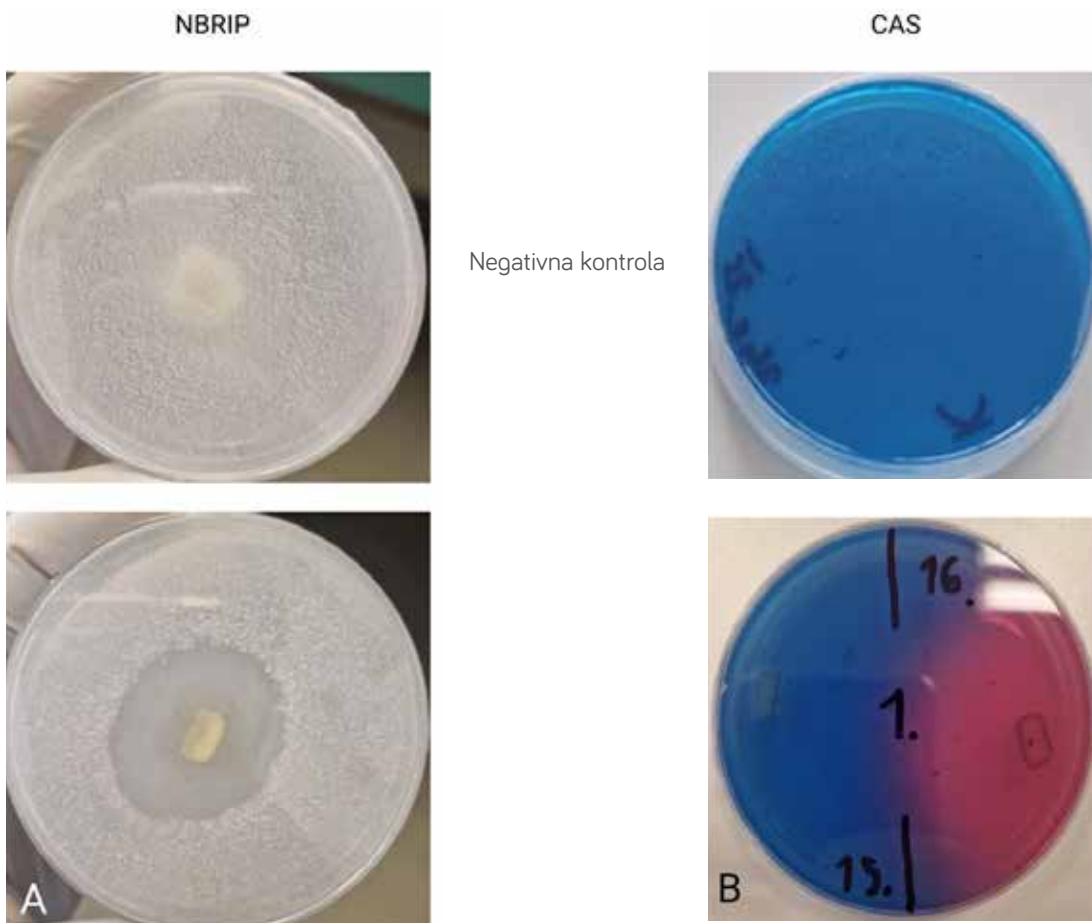
Slika 2: Test sposobnosti produkcije IAA izoliranih bakterij in gliv. Desne epruvete predstavljajo kontrolne vzorce, za primerjavo z izolati v levih epruvetah.



Slika 3: Primerjava rasti izolatov na različnih gojiščih.



Slika 4: Testa solubilizacije fosfata in produkcije sideroforov.



Preliminarni rezultati kažejo, da izbrani bakterijski in glivni izolati iz rizosfere bukve in jelke izkazujejo funkcionalni potencial, povezan z rast spodbujajočimi lastnostmi. Po opravljenih testih, bomo potencialno rast spodbujajoče bakterijske in glivne seve molekularno identificirali s sekvenciranjem 16S rRNA gena (bakterije) in ITS regije (glive). Združljivost potencialnih sevov bomo z laboratorijskimi pristopi preverili in oblikovali različne kombinacije bakterijskih in glivnih izolatov z namenom ugotavljanja njihovega morebitnega sinergijskega učinka. V zaključnem koraku bo sledilo inokulacija sadik bukve in jelke z izbranimi posameznimi sevi ali mikrobnimi konzorciji.

Pri interpretaciji rezultatov je treba upoštevati, da pozitivni odzivi v laboratorijskih testih kažejo na funkcionalni potencial izolatov, ne dokazujejo pa še njihovega neposrednega vpliva na rast in preživetje sadik v drevesnicah ali naravnem okolju. Učinki rastlinam koristnih mikroorganizmov so namreč pogosto odvisni od gostiteljske rastline, sestave mikrobnega konzorcija in specifičnih okoljskih razmer. Kljub temu imajo avtohtoni, iz lokalnega okolja izolirani mikroorganizmi velik potencial, saj so prilagojeni razmeram ciljnega rastišča. Takšen pristop podpira razvoj lokalno prilagojenih mikrobnih inokulantov kot možnega orodja za izboljšanje uspešnosti obnove gozdov (Pugnaire in sod., 2025; Xing in sod., 2024).

LITERATURA IN VIRI:

Ahangar, A., Dar, G. H., Ahangar, A., Bhat, Z. A., 2012. Growth response and nutrient uptake of blue pine (*Pinus wallichiana*) seedlings inoculated with rhizosphere microorganisms under temperate nursery conditions. *Annals of Forest Research*, 55, 217–227. <https://doi.org/10.15287/afr.2012.62>

Castillo-Argüero, S., Martínez-Orea, Y., Barajas-Guzmán, G., 2014. Establecimiento de tres especies arbóreas en la cuenca del río Magdalena, México. *Botanical Sciences*, 92, 309–317.

Diniz, F. V., Scherwinski-Pereira, J. E., Costa, F. H. S., Carvalho, C. M., 2025. Effects on plant physiology in response to inoculation of growth-promoting bacteria: systematic review. *Brazilian Journal of Biology*, 85. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.287279>

García, J. A. L., Domenech, J., Santamaría, C., Camacho, M., Daza, A., Mañero, F. J. G., 2004. Growth of forest plants (pine and holm-oak) inoculated with rhizobacteria: relationship with microbial community structure and biological activity of its rhizosphere. *Environmental and Experimental Botany*, 52, 239–251.

Glick, B. R., 2020. Modulating phytohormone levels. V: Glick, B. R. (ur.), *Beneficial plant-bacterial interactions*. Springer,

Switzerland, 139–180. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44368-9_5

Pugnaire, F., Díaz-Santiago, E., Hurtado-Martínez, M., et al., 2025. Microbial effects and home-field advantage in holm oak (*Quercus ilex*) germination. *Ecosphere*, 16. <https://doi.org/10.1002/ecs2.70251>

Rostamikia, Y., Kouchaksaraei, M. T., Asgharzadeh, A., 2016. Effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) and cold stratification on seed germination and early growth of *Corylus avellana* L. *Austrian Journal of Forest Science*, 4, 337–352. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8661-7_63

Sánchez-Cruz, N. D., Meza-Contreras, J. C., Escalante, F. M., Macías-Rodríguez, M. E., Salcedo-Perez, E., González-García, Y., 2020. Phosphate solubilization and indole-like compounds production by bacteria isolated from forest soil with plant growth promoting activity on pine seedlings. *Geomicrobiology Journal*, 37, 909–918.

São José, J. F. B., Volpiano, C. G., Vargas, L. K., Hernandez, M. A. S., Lisboa, B. B., Schindwein, G., 2019. Influence of hot water on breaking dormancy, incubation temperature and rhizobial inoculation on germination of *Acacia mearnsii* seeds. *Australian Forestry*, 82, 157–161. <https://doi.org/10.1080/00049158.2019.1636350>

Su, P., Tan, X., Li, C., Zhang, D., Cheng, J., Zhang, S., Zhou, X., Yan, Q., Peng, J., Zhang, Z., Liu, Y., Lu, X., 2017. Photosynthetic bacterium *Rhodospseudomonas palustris* GJ-22 induces systemic resistance against viruses. *Microbial Biotechnology*, 10, 612–624. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12704>

Xing, W., Gai, X., Xue, L., Chen, G., 2024. Evaluating the Role of Rhizosphere Microbial Home-Field Advantage in *Betula luminifera* Adaptation to Antimony Mining Areas. *Science of the Total Environment*, 912. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169009>

KLJUČNE BESEDE:

rizosfera, rastlinam koristni mikroorganizmi, bukev, jelka, obnova gozdov

ZAHVALE:

Raziskava je bila financirana v okviru raziskovalnega programa P4-0107 Gozdna biologija, ekologija in tehnologija (ARIS), sheme Mladi raziskovalci na podlagi pogodbe PSF-MR-0404, dodeljene RL (ARIS št. 61229), ter Javne gozdarske službe / Gozdarskega inštituta Slovenije (MKGP).

Projekt EARTHONE in pilotna ploskev na Krasu: spremljanje prehoda rabe tal, talnih procesov, vegetacije in tokov ogljika v submediteranskem krasu

Nataša Šibanc¹, Gal Oblišar¹, Mitja Ferlan², David Fabjan³,
Konzorcij Projekta Earthone, Tine Grebenc¹

1 Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana

2 Kmetijski inštitut Slovenije, Hacquetova ulica 17, 1000 Ljubljana

3 CEDARS, d.o.o., Linhartova 5, 1000 Ljubljana

E-naslov: tine.grebenc@gozdis.si

IZVLEČEK:

Prispevek predstavlja zasnovo pilotne lokacije na območju slovenskega krasa v projektu EARTHONE (*Environmental Analysis and Resilience for Transformative Human-Optimized Natural Environments*), ki je usmerjen v spremljanje vplivov rabe tal in sprememb rabe tal na tla, pestrost talne mikrobiote, vegetacijo, mikroklimo, fenologijo in ogljikove tokove. Slovenski pilot je umeščen na območje Črnotič oziroma Podgorskega Krasa, kjer se v isti krajini pojavljajo odprti (aktivni) pašniki in travniki, zaraščajoče se površine ter manjši gozdni sestoji s puhastim hrastom (*Quercus pubescens*). Zaradi plitvih, skeletnih in prostorsko zelo heterogenih kraških tal je območje izrazito občutljivo na sezonsko sušo, kljub razmeroma visoki letni količini padavin. Raziskava izhaja iz dveh hipotez: (i) da sukcesijski prehod od odprte rabe proti gozdu spremeni mikroklimo, talno vlažnost, organsko snov in tokove CO₂ ter da (ii) različne oblike rabe in opuščanja vplivajo na rastlinsko sestavo, talno biološko aktivnost in fenološke odzive. Predvidene meritve vključujejo talne analize, vegetacijske popise, fenokamere, mikroklimatske senzorje, meritve tokov toplogrednih plinov (CO₂) ter analize talnega mikrobioma. Pilot bo prispeval k razumevanju kompromisov med ohranjanjem odprtih kraških habitatov in dopuščanjem naravne sukcesije.

IZVLEČEK:

This contribution presents the design of the Slovenian Karst pilot within the EARTHONE project (*Environmental Analysis and Resilience for Transformative Human-Optimized Natural Environments*), which focuses on the effects of land use and land-use change on soils, soil biodiversity, vegetation, microclimate, phenology and carbon fluxes. The Slovenian pilot is located in the Črnotiče Podgorski Kras area, where open pastures and meadows, woody-encroached areas and *Quercus pubescens* forest stands occur within the same landscape. Due to shallow, stony and spatially heterogeneous karst soils, the system is highly sensitive to seasonal drought despite relatively high annual precipitation. The study is based on two hypotheses: first, that the successional transition from open grassland or pasture through woody encroachment to forest modifies microclimate, soil moisture, soil organic matter and CO₂ flux dynamics; and second, that different land-use and abandonment stages affect plant composition, soil biological activity and phenological responses. The planned monitoring includes soil analyses, vegetation surveys, phenology cameras, microclimate sensors, greenhouse-gas flux measurements and soil microbiome analysis. The pilot will support the assessment of trade-offs between conserving open karst habitats and allowing natural succession.

UVOD:

Spremembe rabe tal in pokrovnosti pomembno vplivajo na podnebni sistem, delovanje ekosistemov, biotsko raznovrstnost, zaloge ogljika, vodni režim, kroženje hranil ter emisije in ponore toplogrednih plinov (Foley et al., 2005; IPCC, 2019; Marques et al., 2019). V Evropi so ti procesi izrazito heterogeni: poleg intenziviranja kmetijske rabe so pogosti tudi opuščanje tradicionalne rabe, zaraščanje pašnikov, razvoj sekundarnih gozdov in uvajanje agrogozdarskih sistemov (Schulp et al., 2008; Hempel et al., 2025). Projekt EARTHONE (*Environmental Analysis and Resilience for Transformative Human-Optimized Natural Environments*) obravnava te povezave v sektorju LULUCF ter razvija harmoniziran metodološki okvir, ki združuje terenske meritve, senzorska omrežja, daljinsko zaznavanje, podatkovne platforme, modeliranje scenarijev in podporo odločanju (earthone-project.eu).

Projekt vključuje pilotna območja v Španiji, Grčiji, Italiji, Hrvaški, Sloveniji in Severni Makedoniji, ki zajemajo agrogozdarske sisteme, sadovnjake, mokrotne travnike in pašnike, kraške površine v zaraščanju ter intenzivno sadjarsko pridelavo. Skupni raziskovalni okvir pilotov predstavljajo izboljšani ukrepi rabe tal oziroma ILUMs

(*Improved Land Use Measures*), kot so pogozdovanje, kmetijsko-gozdarski sistemi, učinkovitejša raba gnojil ter trajnostno upravljanje pašnikov in kmetijskih površin. Slovenski pilot obravnava dolgoročen proces opuščanja tradicionalne rabe in naravnega zaraščanja v submediteranskem kraškem prostoru, kjer se na območju Črnotič oziroma Podgorskega Krasa prepletajo odprti pašniki in travišča, zaraščajoče se površine, grmiščne faze ter gozdni sestoji s puhastim hrastom (*Quercus pubescens*; Ferlan et al., 2011; Mrak et al., 2021). Zaradi plitvih, skeletnih in prostorsko heterogenih tal ter izrazite občutljivosti na poletno sušo je območje primerno za preučevanje povezav med sukcesijo, mikroklimo, talnimi razmerami, biološko aktivnostjo tal in tokovi ogljika (Ferlan et al., 2011; Ferlan, 2013; Mrak et al., 2025a).

Raziskava temelji na dveh hipotezah. Prva predpostavlja, da prehod od odprtega kraškega travišča prek faze zaraščanja do gozda s puhastim hrastom povzroči merljive spremembe v mikroklimi, talni vodni dinamiki, talni organski snovi, tokovih CO₂ ter talnem mikrobiomu. Druga predpostavlja, da različne oblike sedanje rabe, opuščanja rabe in naravnega zaraščanja vplivajo na

Slika 1: Razporeditev raziskovalnih ploskev slovenskega pilota EARTHONE na območju Črnotič. Ploskve predstavljajo gradient rabe tal in sukcesije od pašnika in travnika prek zaraščanja do gozda; oranžni krog označuje položaj eddy covariance stolpa.



rastlinsko sestavo, strukturo vegetacije, biološko aktivnost tal in fenološko dinamiko vegetacije. Pričakovane razlike med odprtimi, zaraščajočimi se in gozdnimi ploskvami bodo preverjene z vegetacijskimi indeksi, meritvami talne vlage in temperature, popisi vegetacije, analizami tal, spremljanjem tokov toplogrednih plinov ter analizami talnega mikrobioma.

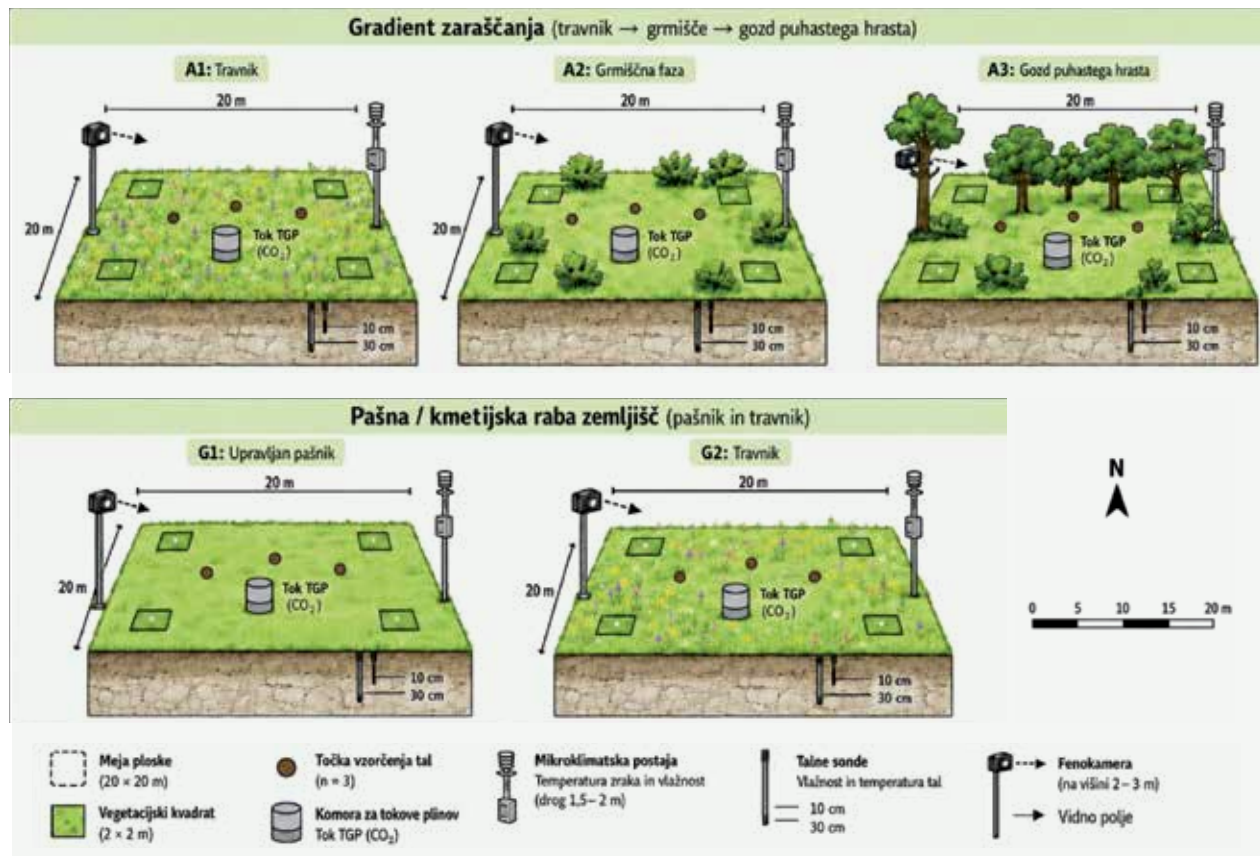
MATERIAL IN METODEDE:

Slovenski pilot je umeščen na območje Podgorskega Krasa v neposredni bližini vasi Črnotiče v jugozahodni Sloveniji (45°32'36.5"N 13°55'00.2"E; slika 1), na nadmorski višini 400–430 m. Območje je razvito pretežno na paleocensko-eocenskem apnencu, z lokalnimi flišnimi vključki. Podnebje je submediteransko do submediteransko-kontinentalno, z vplivom burje, sezonsko vodno omejitvijo in vegetacijsko dobo od pomladi do jeseni. Povprečna letna temperatura znaša približno 10,5–11,8 °C, letna količina padavin pa približno 1.300–1.370 mm (Ferlan et al., 2011; Ferlan, 2013; Mrak et al., 2021). Kljub razmeroma visoki količini padavin je sistem občutljiv na poletno sušo, predvsem zaradi plitvih, skeletnih in hidrološko heterogenih tal ter neenakomerne

celoletne razporeditve padavin. Na apnencu prevladujejo rendzični leptosoli, na flišnih vključkih pa globlja evtrična kambična tla (Ferlan et al., 2011; Mrak et al., 2021). Pretekla in mestoma še prisotna čezmerna paša in opuščanje tradicionalne rabe sta oblikovala današnji mozaik odprtih travišč, zaraščajočih se površin in sekundarnih gozdnih sestojev (Ferlan et al., 2011; earthone-project.eu).

Zasnova pilota temelji na primerjavi glavnih tipov rabe tal in sukcesijskih stopenj. V raziskovalnem protokolu so opredeljene naslednje ploskve (Slika 2) A1 – kraško travišče kot odprta referenčna površina, A2 – zaraščajoča se površina oziroma grmiščna faza, A3 – gozd s prevladujočim puhastim hrastom (gozd), G1 – upravljani pašnik in G2 – travnik. Prve tri kategorije tvorijo sukcesijski gradient, namenjen predvsem preverjanju vpliva zaraščanja na mikroklimo, tla in ogljikove tokove, primerjava pašnika in travnika pa omogoča presojo vpliva sedanje oziroma nedavne rabe tal. Ploskve so zasnovane kot standardizirane raziskovalne enote s stalnimi mesti za vegetacijske popise, vzorčenje tal, meritve tokov toplogrednih plinov, mikroklimatsko spremljanje, talne sonde in fenološko opazovanje.

Slika 2: Shema vzorčenja na slovenskih kraških ploskvah. Prikazani so vegetacijski kvadrati, talna vzorčna mesta, komore za meritve tokov toplogrednih plinov, mikroklimatski senzorji, talne sonde in fenokamere (slika: ChatGPT).



Talne analize bodo obsegale fizikalne, kemijske in biološke kazalnike, vključno s talno organsko snovjo oziroma organskim ogljikom, pH, električno prevodnostjo, teksturo, volumensko gostoto, skupnim dušikom, dostopnim fosforjem, kationsko izmenjalno kapaciteto in vsebnostjo karbonatov. Posebna pozornost bo namenjena talni vlagi in temperaturi, saj sta ključni za razumevanje sezonske aktivnosti vegetacije, mikrobni procesov, razgradnje organske snovi in ogljikovih tokov.

Vegetacijsko spremljanje bo temeljilo na popisih vaskularnih rastlin na stalnih kvadratih (slika 2). Beleženi bodo vrstna sestava, skupna pokrovnost vegetacije, deleža golih tal in opada, grmovna plast ter obnova drevesnih vrst. Takšen pristop bo omogočil primerjavo odprtih, zaraščajočih se in gozdnih ploskev ter presojo, ali se spremembe rabe tal odražajo predvsem v vrstni sestavi, strukturi vegetacije ali v razvoju lesne komponente. Fenološko spremljanje bo potekalo z uporabo fenokamer. Te bodo nameščene na stalnih mestih in usmerjene nad osrednji del ploskve, kar bo omogočilo izračun vegetacijskih oziroma zelenostnih indeksov ter spremljanje sezonske dinamike vegetacije.

Meritve toplogrednih plinov bodo usmerjene predvsem v tokove CO₂. Ob meritvah bodo zabeleženi temperatura tal in zraka, talna vlaga ter stanje vegetacije, kar bo omogočilo povezovanje plinskih tokov z mikroklimatskimi in vegetacijskimi razmerami. Mikroklimatsko spremljanje bo zajemalo zvezne meritve temperature zraka, relativne vlage ter temperature in vlage tal.

Z analizami talnega mikrobioma bomo ovrednotili spremembe v biološki aktivnosti tal vzdolž gradienta rabe in zaraščanja. Te bodo temeljile na visokozmogljivem sekvenciranju (HTS/metabarkodiranje) talnih vzorcev in rizosfere. Za glivne združbe bo uporabljen marker ITS2, ki omogoča oceno celotne glivne diverzitete ter ugotavljanje dominantnih ekoloških skupin, kot so saprotrofne, patogene, arbuskularno mikorizne in ektomikorizne glive. Poseben poudarek bo namenjen mikoriznim združbam, saj ektomikorizne glive pri puhastem hrastu (*Quercus pubescens*) pomembno prispevajo k privzemu vode in hranil, zunajkoreninski micelij pa je lahko pomemben za delovanje dreves v plitvih in sušnih kraških tleh (Mrak et al., 2021; Mrak et al., 2025b). Arbuskularno mikorizne glive bodo posebej pomembne za odprte travniške in pašne ploskve, kjer prevladuje zeliščna vegetacija, medtem ko bodo ektomikorizne glive ključne za razumevanje zaraščajočih se in gozdnih ploskev. Vzporedno bodo analize bakterijskih in glivnih združb, predvidoma na osnovi

ribosomalnih markerjev, omogočile oceno bakterijskih in glivnih skupin, povezanih z razgradnjo organske snovi, kroženjem dušika, mineralizacijo hranil in odzivi na sušo. Primerjava glivnih, mikoriznih in bakterijskih združb med pašnikom, travnikom, zaraščanjem in gozdom bo omogočila vzpostavitev povezav med rabo tal, sukcesijsko stopnjo, talnimi lastnostmi, vodno dostopnostjo in biološko aktivnostjo tal.

REZULTATI IN DISKUSIJA:

Ker je slovenski pilot v zgodnji fazi izvajanja, v prispevku ne predstavljamo končnih rezultatov, temveč raziskovalno zasnovano, izhodiščno stanje in pričakovani interpretacijski okvir. Pomembna prednost območja Podgorskega Krasa je obstoječa raziskovalna podlaga, ki vključuje mikrometeorološke meritve ogljikovih tokov z metodo eddy covariance na odprtem travišču in zaraščajoči se oziroma gozdni površini. Dosedanje raziskave so pokazale, da se odprti in zaraščajoči se kraški sistemi razlikujejo v bruto primarni produkciji, ekosistemski respiraciji in neto izmenjavi CO₂, pri čemer imajo sezonska porazdelitev padavin, poletna suša, temperatura in fenološki razvoj vegetacije pomembno vlogo pri letni ogljikovi bilanci (Ferlan et al., 2011; Ferlan, 2013).

Pričakujemo, da bo primerjava ploskev vzdolž gradienta pašnik oziroma travišče – zaraščanje – gozd (slika 3) omogočila boljše razumevanje, kako naravna sukcesija spreminja mikroklimo, dinamiko talne vode, organsko snov v tleh, strukturo vegetacije, tokove toplogrednih plinov ter talni mikrobiom. Zaraščanje lahko poveča nadzemno lesno biomaso, količino opada in senčenje tal, vendar njegov vpliv na talni ogljik in izmenjavo CO₂ verjetno ne bo enoznačen. V plitvih, skeletnih in prostorsko heterogenih kraških tleh so odzivi močno odvisni od globine tal, kamnitosti, vodne dostopnosti in mikrorastiščnih razmer. Pri razlagi tokov CO₂ bo potrebna dodatna previdnost zaradi karbonatnega ozadja, saj lahko k izmerjenemu CO₂ poleg koreninske in mikrobne respiracije prispevajo tudi anorganski karbonatni procesi (Plestenjak et al., 2012).

Pomemben prispevek slovenskega pilota bo vzpostavitev povezave nadzemnih in podzemnih kazalnikov ekosistemskega delovanja. Vegetacijski popisi, fenološko spremljanje, meritve talne vlage in temperature ter analize talnega mikrobioma bodo omogočili presojo, ali so spremembe v rabi tal povezane predvsem s spremembami rastlinske sestave, strukture vegetacije, talne biološke aktivnosti ali z njihovo kombinacijo. Posebej pomembne bodo analize glivnih in bakterijskih združb, vključno z arbuskularno mikoriznimi glivami na odprtih travniških in

Slika 3: Sukcesijske stopnje slovenskega kraškega pilota: pašnik (levo zgoraj), travnik (desno zgoraj), zaraščanje (levo spodaj) in gozd (desno spodaj). *Slika N. Šibanc*



pašnih ploskvah ter ektomikoriznimi glivami v zaraščajočih se in gozdnih stadijih. Predhodne raziskave na območju so pokazale, da so ektomikorizne združbe puhastih hrastov občutljive na sušo in da se njihova vitalnost, vrstna sestava in zunajkoreninski micelij lahko spreminjajo glede na okoljske razmere (Mrak et al., 2021; Mrak et al., 2025a; Mrak et al., 2025b).

Podatki slovenskega pilota bodo vključeni v širši podatkovni okvir projekta EARTHONE, ki povezuje terenske meritve, senzorske podatke, daljinsko zaznavanje in modeliranje scenarijev rabe tal. Takšna zasnova omogoča primerjavo slovenskega kraškega sistema z drugimi evropskimi piloti, čeprav se ti razlikujejo po podnebjju, zgodovini rabe in načinu upravljanja. Primerljivost ne temelji na enakosti ploskev, temveč na harmoniziranem merilnem okviru, skupnih kazalnikov in standardiziranih protokolih (earthone-project.eu). Pričakovani rezultati bodo pomembni za presojo kompromisov med ohranjanjem odprtih kraških habitatov in dopuščanjem prostora naravni sukcesiji. Odprta travišča in pašniki so pomembni za biotsko raznovrstnost in krajinsko pestrost, zaraščajoče se površine pa lahko prispevajo k večji lesni biomasi, spremenjeni mikroklimi in potencialno

večji vezavi ogljika. Slovenski pilot bo s ponovljivimi meritvami omogočil na aktualnih podatkih utemeljeno presojo teh procesov ter prispeval k oblikovanju kazalnikov za spremljanje tal, vegetacije, mikrobioma in ogljikovih tokov v submediteranskih kraških ekosistemih. Rezultati bodo uporabni za gozdarstvo, naravovarstveno načrtovanje, upravljanje kraških zemljišč ter širše razumevanje odpornosti sredozemskih in submediteranskih krajin na podnebne spremembe.

LITERATURA IN VIRI:

Ferlan, M., 2013. The use of micro-meteorological methods for the monitoring of the carbon fluxes in karst ecosystems. Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani.

Ferlan, M., Alberti, G., Eler, K., Batič, F., Miglietta, F., Zaldej, A., Simončič, P., 2011. Comparing carbon fluxes between different stages of secondary succession of a karst grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 140, 199–207.

Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Snyder, P.K., 2005. Global consequences of land use. *Science* 309, 570–574.

Hempel, S., Herzog, F., Batáry, P., Öckinger, E., Knop, E., 2025. The impact of abandonment and intensification on the biodiversity of agriculturally marginal grasslands – a systematic review. *Basic and Applied Ecology*, 9-18.

IPCC, 2019. *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*.

Marques, A., et al., 2019. Increasing impacts of land-use on biodiversity and carbon-sequestration driven by population and economic growth. *Nature Ecology & Evolution* 3, 628–637.

Mrak, T., Šibanc, N., Brailey-Jones, P., Štraus, I., Gričar, J., Kraigher, H., 2021. Extramatrical mycelium and ectomycorrhizal community composition of *Quercus pubescens* in a Sub-Mediterranean stress-prone environment. *Frontiers in Forests and Global Change* 4, 599946.

Mrak, T., Unuk Nahberger, T., Maksimović, O., Kraigher, H., Ferlan, M., 2025a. Experimental drought results in a decline of ectomycorrhizae of *Quercus pubescens* Willd. *Trees* 39, 4.

Mrak, T., Brailey-Crane, P.A., Šibanc, N., Martinović, T., Gričar, J., Kraigher, H., 2025b. Mycelial communities associated with *Ostrya carpinifolia*, *Quercus pubescens* and *Pinus nigra* in a patchy Sub-Mediterranean Karst woodland. *Mycorrhiza* 35, 46.

Plestenjak, G., Eler, K., Vodnik, D., Ferlan, M., Čater, M., Kanduč, T., Simončič, P., Ogrinc, N., 2012. Sources of soil CO₂ in calcareous grassland with woody plant encroachment. *Journal of Soils and Sediments* 12, 1327–1338.

Schulp, C.J.E., et al., 2008. Impacts of land-use change on biodiversity: an assessment of agricultural biodiversity in the European Union. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 124, 68–82.

KLJUČNE BESEDE:

Quercus pubescens, talni ogljik, toplogredni plini, fenologija, pilotna študija

KEY WORDS:

Quercus pubescens, soil carbon, greenhouse gases, phenology, pilot plot

ZAHVALE:

Prispevek je nastal v okviru projekta EARTHONE, ki je financiran iz programa Evropske unije Horizon Europe, št. pogodbe 101181825, ARIS P4-0107, J4-10171 in IO-0012. Avtorji se zahvaljujejo partnerjem konzorcija EARTHONE (<https://earthone-project.eu/partners/>), sodelavcem Gozdarskega inštituta Slovenije, lastnikom oziroma upravljavcem zemljišč ter terenskim sodelavcem za podporo pri zasnovi in izvajanju slovenskega pilotnega območja.

CC BY SA · DOI 10.20315/SFS.191.06

Medletna variabilnost značilnosti lesa in floema vrst, ki sobivajo: *Fraxinus ornus*, *Quercus pubescens* in *Ostrya carpinifolia*

Jožica Gričar¹, Klemen Eler², Saša Ogorevc¹, Debojit Chanda³, Sarkiri Kro⁴, Mohendra Thapa⁴, Polona Hafner¹, Peter Prislan¹

1 Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

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

3 Arya Vidyapeeth College, Guwahati, Assam, India

4 Diphu Government College, Karbi Anglong, Assam, India

POUDARKI:

- Anatomija lesa in floema drevesnih vrst, ki sobivajo, ponuja dragocene informacije o tem, kako se različne drevesne vrste soočajo s podnebnimi spremembami in prilagajajo strukturo prevodnih tkiv lokalnim vremenskim razmeram.
- V obdobju 2019–2021 smo proučili in primerjali širino letnih prirastkov lesa in floema in velikosti prevodnih elementov ranega lesa in ranega floema pri listavcih, ki sobivajo na Podgorskem krasu: mali jesen (*Fraxinus ornus*), puhasti hrast (*Quercus pubescens*) in črni gaber (*Ostrya carpinifolia*).
- Ugotovili smo, da analizirane spremenljivke lesa in floema pri preučevanih drevesnih vrstah kažejo različne sezonske trende glede na lokalne vremenske razmere.
- Med vrstami so bile v vseh letih opažene statistično značilne razlike v velikostih prevodnih elementov lesa in floema, kar kaže na velike razlike v izračunani hidravlični prevodnosti med drevesnimi vrstami.
- Visoka medletna variabilnost in vrstno specifična občutljivost ksilema in floema na padavine in temperaturo potrjujeta visoko plastičnost in različne strategije debelinske rasti preučevanih drevesnih vrst, ki zagotavljajo optimalno delovanje v lokalnih vremenskih razmerah.

HIGHLIGHTS:

- The xylem and phloem anatomy of co-existing tree species provides valuable information on how different tree species face climate change and adjust their vascular structure to local weather conditions.
- We examined and compared annual ring widths and conduit size in earlywood and early phloem in *Fraxinus ornus*, *Quercus pubescens* and *Ostrya carpinifolia* in a sub-Mediterranean site Podgorski kras in the period 2019–2021.
- We found that phloem increment widths and conduits in earlywood and early phloem in the studied tree species showed different trends in terms of interannual variability and in relation to local weather conditions.
- Statistically significant differences were observed among species across all years for the size of xylem and phloem conduits and the hydraulic conductivity of earlywood vessels, which indicates great differences in the calculated hydraulic conductivity among the tree species.
- High interannual variability and species-specific sensitivity of xylem and phloem traits to precipitation and temperature confirm high plasticity and different radial growth strategies of the studied tree species to ensure optimal functioning under local weather conditions.

UVOD:

Obsredozemske pokrajine Slovenije, kamor prištevamo tudi Podgorski kras, zaznamujejo suha in vroča poletja ter dokaj mile zime (Brečko Grubar in sod. 2020). Pričakuje se, da bodo drevesa in gozdni ekosistemi na tem območju zaradi podnebnih sprememb in z njimi povezanih pogostejših ekstremnih vremenskih dogodkov in naravnih nesreč, kot so suše, gozdni požari in vročinski valovi, pod velikim pritiskom v naslednjih desetletjih (Köhl in sod. 2020). Anatomija lesa in floema drevesnih vrst, ki sobivajo, ponuja dragocene informacije o tem, kako se različne drevesne vrste soočajo s podnebnimi spremembami in prilagajajo strukturo prevodnih tkiv lokalnim vremenskim razmeram. V obdobju 2019–2021 smo proučili in primerjali širino letnih prirastkov lesa in floema in velikosti prevodnih elementov ranega lesa in ranega floema pri malem jesenu (*Fraxinus ornus*), puhastem hrastu (*Quercus pubescens*) in črnem gabru (*Ostrya carpinifolia*) (Gričar in sod. 2026). Raziskavo smo opravili na Podgorskem krasu, kjer se je delež izbranih vrst listavcev v zadnjih desetletjih povečal, predvsem na račun zaraščajočih površin travnikov in pašnikov (Ferlan in sod. 2016).

MATERIALI IN METODEDE:

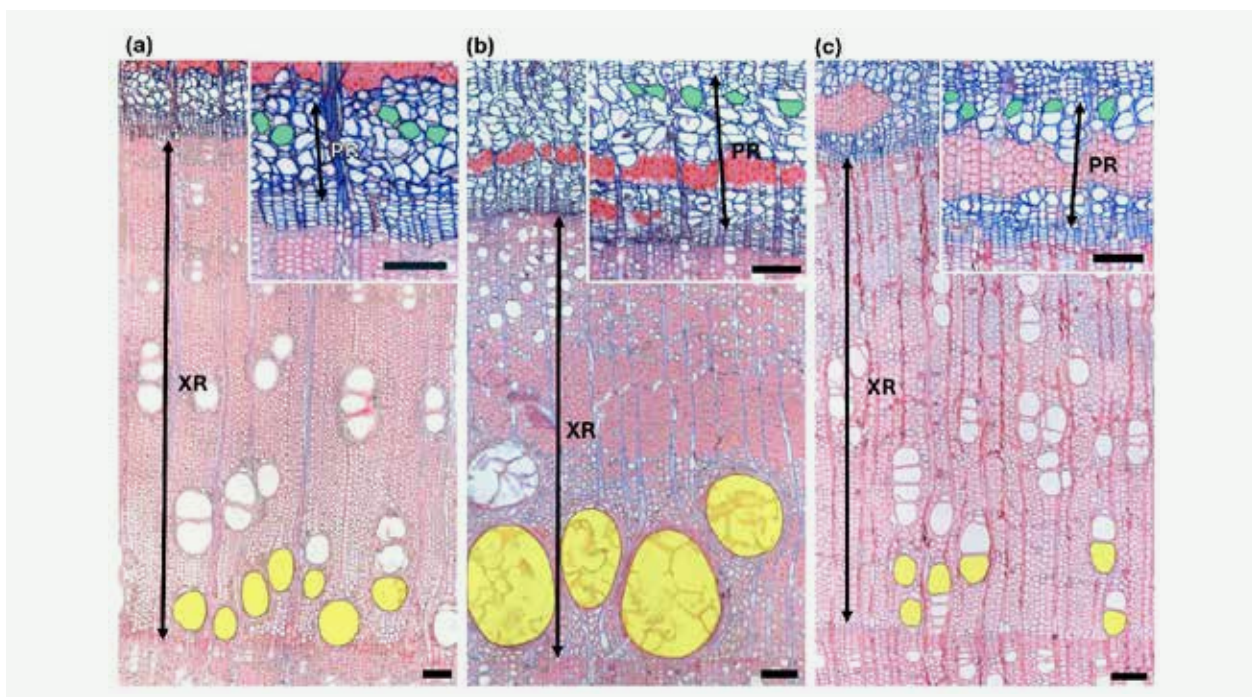
Raziskavo smo izvedli na območju Podgorskega krasa v JZ delu Slovenije (45°32'31"N, 13°54'45"E, 420–430 m a.s.l.), kjer prevladuje submediteransko podnebje, za katerega so značilna vroča in suha poletja, pozimi je pogosta burja s

periodično snežno odejo. Za to območje so značilne lesnate rastline srednje in pozne sukcesije, pri čemer so puhasti hrast (*Quercus pubescens* Willd.), navadni jesen (*Fraxinus ornus* L.) in črni grob (*Ostrya carpinifolia* Scop.) prevladujoče listopadne drevesne vrste, ki rastejo v čistih ali mešanih sestojih.

Pogoste visoke temperature in pomanjkanje padavin poleti na Podgorskem krasu vodijo v nastanek suše, ki je za tamkajšnjo vegetacijo omejujoč dejavnik. V obdobju 2019–2021 je letna količina padavin preseгла 1100 mm z najmanjšo količino v letu 2021 (1147 mm), ko je padlo 26,8 % oz. 19,7 % manj padavin kot v letih 2019 in 2020. Vremenske razmere v obdobju debelinske rasti (maj–avgust) so bile primerljive v letih 2019 in 2021. V letih 2019 in 2021 sta bila najsušnejša meseca z mesečnimi padavinami pod 50 mm marec in junij, najbolj moker mesec pa je bil maj (> 150 mm). V letu 2020 je bil najbolj suh mesec april, najbolj moker pa junij. Povprečna mesečna temperatura je preseгла 20°C v obdobju junij–avgust v letih 2019 in 2021, v letu 2020 pa se je to zgodilo v obdobju julij–avgust. Podnebne podatke smo pridobili z bližnje klimatske postaje Agencije za okolje RS (ARSO).

V obdobju 2019–2021 smo vsako leto spomladi, pred začetkom rastne sezone, izbrali po šest dreves vsake vrste. V 7-10 dnevni intervalih smo v prsni višini izbranih dreves s Treforjem (Rossi et al. 2006) odvzeli mikroizvrtke premera

Slika 1: Prečni prerezi preparatov lesa in floema pri (a) *Fraxinus ornus*, (b) *Quercus pubescens* in (c) *Ostrya carpinifolia*. Lumni merjenih trahej ranega lesa so označeni z rumeno; lumni sitastih cevi ranega floema pa z zeleno barvo. XR – najmlajša lesna branika; PR – najmlajša floemska branika. Daljica = 100 µm



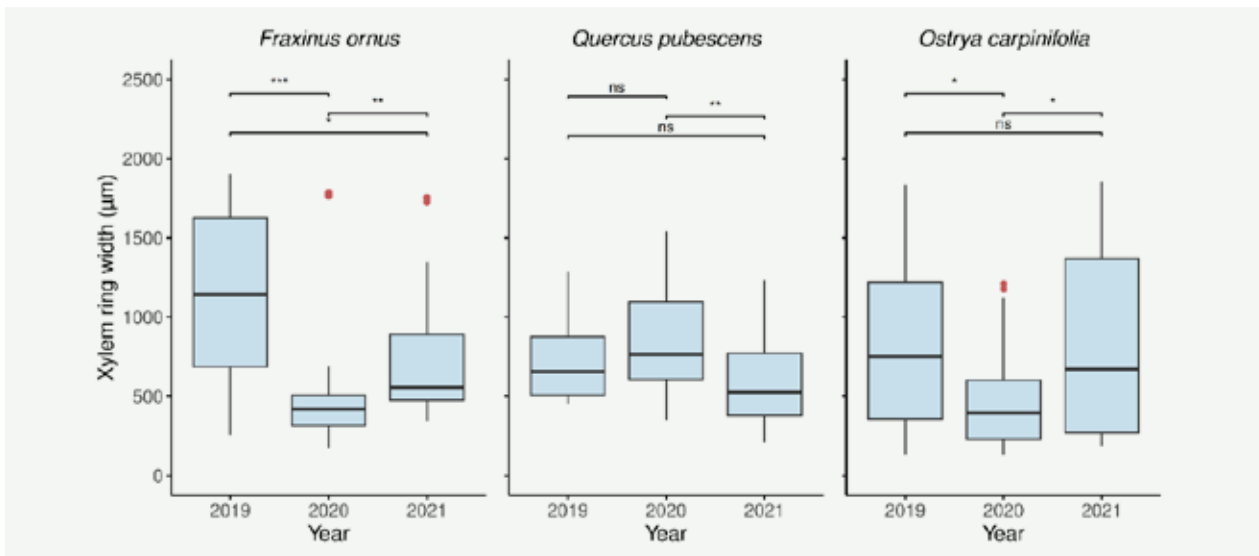
2,4 mm za analize sezonskega razvoja floemske in lesne branike. V Laboratoriju za anatomijo lesa na Gozdarskem inštitutu Slovenije smo po ustaljenem postopku pripravili prečne prereze tkiv (Prislan in sod. 2022). Iz vzorcev, odvzetih ob koncu vsake rastne sezone (avgust–september), smo za anatomske analize popolnoma oblikovanih lesnih in floemskih tkiv izbrali dva preparata, na katerih smo izmerili širine lesnih in floemskih prirastkov ter velikosti desetih naključno izbranih trahej ranega lesa ter sitastih cevi ranega floema (Slika 1). Za traheje smo izračunali teoretično prevodnost. Vse statistične analize so bile opravljene v okolju R (package nlme) (R Core Team 2024).

REZULTATI:

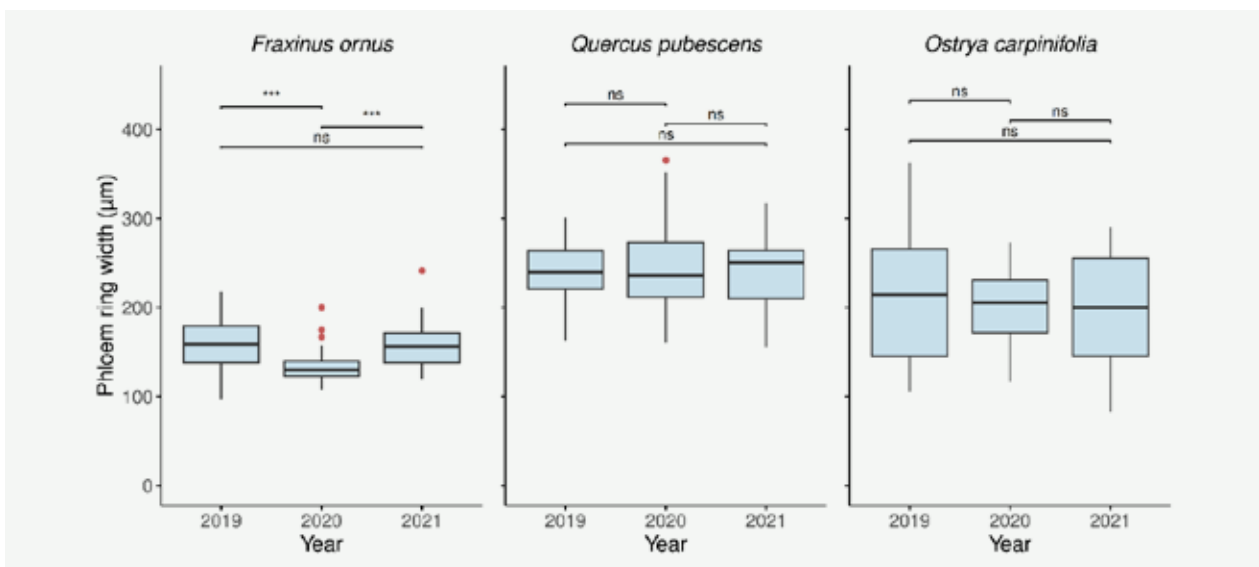
V lesu so bile povprečne vrednosti širine prirastkov v vseh treh analiziranih letih največje pri *F. ornus* in najmanjše pri *O. carpinifolia* (Slika 2). Poleg tega se je širina lesnih prirastkov med vrstami v analiziranih letih razlikovala.

V floemu so bile povprečne vrednosti širine prirastkov v vseh treh letih največje pri *Q. pubescens* in najmanjše pri *F. ornus* (Slika 3). Z izjemo *O. carpinifolia* in *Q. pubescens* v letu 2019 so bile v vseh drugih primerih statistično značilne razlike v širinah floemskih prirastkov med vrstami v analiziranih letih. V vseh primerih je bil lesni prirastek širši od floemskega, in sicer v povprečju za 79,0 % pri *F. ornus*, 62,8 % pri *Q. pubescens* in 66,0 % pri *O. carpinifolia*.

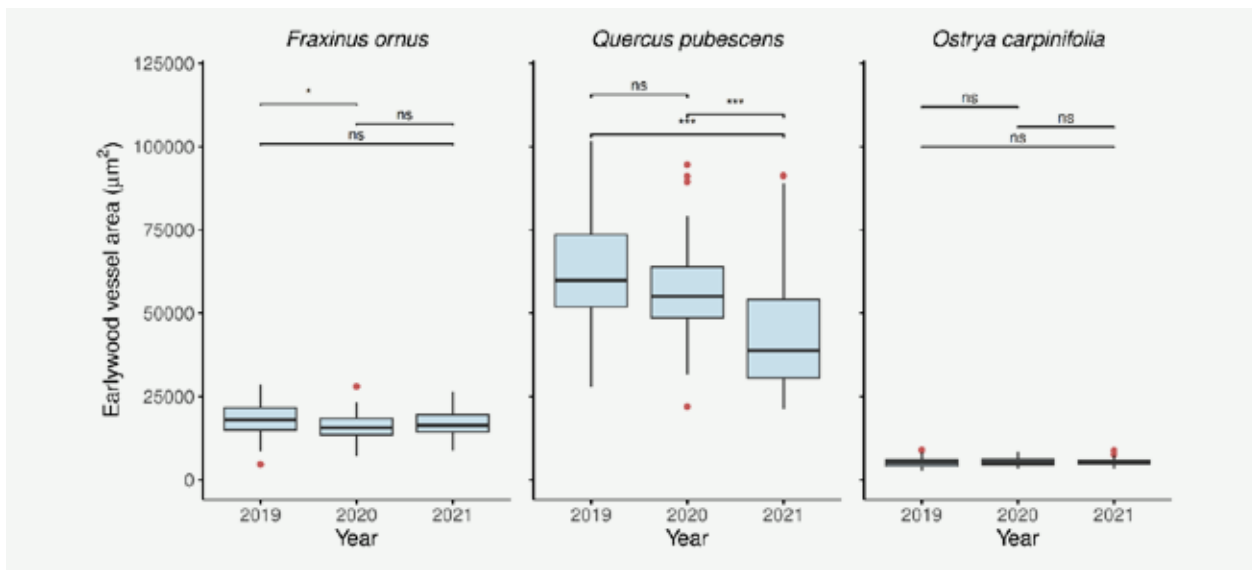
Slika 2: Širine letnih prirastkov lesa pri *Fraxinus ornus*, *Quercus pubescens* in *Ostrya carpinifolia* na Podgorskem krasu v obdobju 2019–2021. Stopnja značilnosti: ns = ni statistično značilno, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.



Slika 3: Širine letnih prirastkov floem pri *Fraxinus ornus*, *Quercus pubescens* in *Ostrya carpinifolia* na Podgorskem krasu v obdobju 2019–2021. Stopnja značilnosti: ns = ni statistično značilno, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.



Slika 4: Površina lumnov trahej ranega lesa pri *Fraxinus ornus*, *Quercus pubescens* in *Ostrya carpinifolia* na Podgorskem krasu v obdobju 2019–2021. Stopnja značilnosti: ns = ni statistično značilno, *p < 0,05, **p < 0,01, ***p < 0,001.

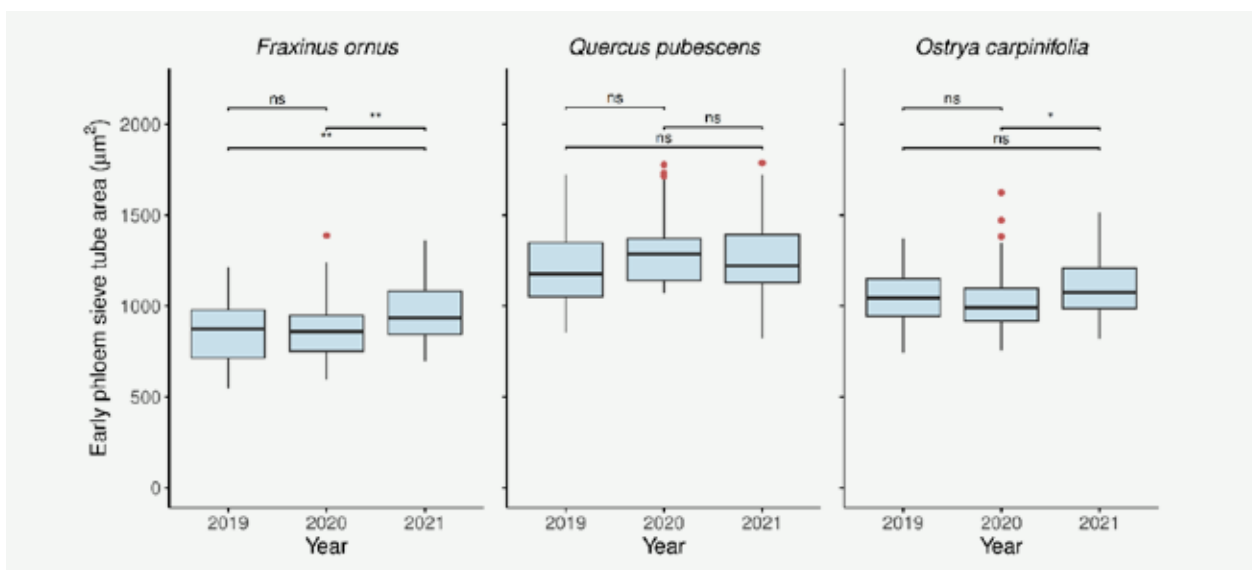


V lesu so bile izmerjene največje traheje ranega lesa pri *Q. pubescens* in najmanjše pri *O. carpinifolia* (Slika 4), medtem ko smo največje sitaste cevi ranega floema zabeležili pri *Q. pubescens* in najmanjše pri *F. ornus* (Slika 5). V povprečju so bile traheje ranega lesa pri *Q. pubescens* 67,4 % oziroma 89,9 % večje kot pri *F. ornus* oziroma *O. carpinifolia*.

27,7 % večje kot pri *O. carpinifolia* in *F. ornus*. Razlike v velikosti lesnih in floemskih prevodnih elementov so bile opažene pri vseh treh vrstah, pri čemer so bile traheje ranega lesa značilno večje kot sitaste cevi ranega floema, in sicer za 94,7 % pri *Q. pubescens*, 97,6 % pri *F. ornus* in 80,0 % pri *O. carpinifolia*.

Sitaste cevi ranega floema so bile največje pri *Q. pubescens* in najmanjše pri *F. ornus* (Slika 5). Sitaste cevi ranega floema so bile pri *Q. pubescens* v povprečju 15,7 % oziroma

Slika 5: Površina lumnov sitastug cevi ranega floema pri *Fraxinus ornus*, *Quercus pubescens* in *Ostrya carpinifolia* na Podgorskem krasu v obdobju 2019–2021. Stopnja značilnosti: ns = ni statistično značilno, *p < 0,05, **p < 0,01, ***p < 0,001.



DISKUSIJA:

Naša raziskava medletne variabilnosti širin lesnih in floemskih prirastkov ter velikosti prevodnih elementov ranega lesa in ranega floema pri treh listavcih, ki sobivajo na Pogorskem krasu, je pokazala vrstno-specifične razlike v analiziranih lesnih in floemskih parametrih (Gričar in sod. 2026). Strukturne prilagoditve lesa in floema odražajo fenotipsko plastičnost drevesnih vrst, kar jim omogoča prilagajanje lokalnim razmeram in premagovanje različnih stresnih dogodkov (Valladares et al. 2007). V izbranem submediteranskem okolju so naravne motnje, kot so suše in požari, zelo pogoste in imajo lahko različne učinke na strukturo lesa in floema (Kirapostolou in Petit 2018, Sevanto et al. 2018, Gričar et al. 2020), kar vpliva na dolgoročno delovanje dreves in njihovo odpornost na različne stresorje. Navkljub veliki medletni variabilnosti v velikosti prevodnih elementov ter širini lesnih in floemskih prirastkov smo pri izbranih listavcih zaznali dva vzorca: (1) prirastki ksilema so bile v vseh primerih širši od floema in (2) traheje ranega lesa so bile značilno večje od sitastih cevi ranega floema.

Naše ugotovitve so še posebej pomembne za floem, saj takšnih podatkov kritično primanjkuje. Pri izbranih drevesnih vrstah so vzorci debelinske rasti in anatomija lesnih in floemskih tkiv v povezavi z okoljskimi razmerami na splošno slabo poznani, ker je gospodarska vrednost teh vrst trenutno zelo omejena, kar še posebej velja za *F. ornus* in *O. carpinifolia*. So pa vrste pomembne z ekološkega vidika. Zaradi podnebnih sprememb se bo njihov delež v srednji Evropi najverjetneje povečal, saj se predvideva širitev sredozemskih gozdnih tipov v omenjena območja (Buras in Menzel 2019). Zato so nove informacije o variabilnosti strukture prevodnih tkiv lesa in floema pri različnih vrstah eden izmed ključnih korakov k bolj celostnemu razumevanju njihove prevodne učinkovitosti in sposobnosti prilagajanja lokalnim okoljskim spremembam, vključno z ekstremnimi vremenskimi dogodki.

LITERATURA IN VIRI:

Brečko Grubar V in sod. 2020. Opredelitev in meje Sredozemlja v Sloveniji po mnenju prebivalcev slovenske Istre. V: Lazar I in sod. (ur.). Mikro in makro : pristopi in prispevki k humanističnim vedam ob dvajsetletnici UP Fakultete za humanistične študije : 1. knjiga. Koper: Založba Univerze na Primorskem:359–377.

Buras A in Menzel A. 2019 Projecting tree species composition changes of European forests for 2061–2090 under RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios. *Frontiers in Plant Science* 9.

Ferlan M in sod. 2016. Carbon and water flux patterns

of a drought-prone mid-succession ecosystem developed on abandoned karst grassland. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 220:152-163.

Gričar J in sod. 2020. Post-fire effects on development of leaves and secondary vascular tissues in *Quercus pubescens*. *Tree physiology* 40(6): 796-809.

Gričar J in sod. 2025 Dataset of xylem and phloem traits of *Fraxinus ornus*, *Quercus pubescens* and *Ostrya carpinifolia* from Podgorski Kras (Slovenia) in the period 2019–2021. Completed scientific research data collection. Ljubljana: Slovenian Forestry Institute. <https://dirros.openscience.si/lzpisGradiva.php?lang=slv&id=24453>

Gričar J in sod. 2026. Year-to-year variability in xylem and phloem traits of co-existing *Fraxinus ornus*, *Quercus pubescens* and *Ostrya carpinifolia*. *Tree physiology* 46: tpag005.

Kirapostolou N in Petit G. 2018. Similarities and differences in the balances between leaf, xylem and phloem structures in *Fraxinus ornus* along an environmental gradient. *Tree Physiology* 39:234-242.

Köhl M in sod. 2020. State of Europe's Forests 2020. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe - FOREST EUROPE Liaison Unit Bratislava, Bratislava.

Prislan P in sod. 2022. Sample preparation protocol for wood and phloem formation analyses. *Dendrochronologia* 73:125959.

R Core Team. 2024. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>

Rossi S in sod. 2006. Trephor: a new tool for sampling microcores from tree stems. *IAWA Journal* 27:89 - 97.

Sevanto S in sod. 2018. Is desiccation tolerance and avoidance reflected in xylem and phloem anatomy of two coexisting arid-zone coniferous trees? *Plant, Cell & Environment* 41:1551-1564.

Valladares F in sod. 2007. Ecological limits to plant phenotypic plasticity. *New Phytologist* 176:749-763.

KLJUČNE BESEDE:

puhasti hrast, mali jesen, črni gaber, traheja, sitasta cev, Podgorski kras, listavci

ZAHVALA:

Raziskava je bila financirana s strani ARIS v okviru raziskovalnih programov P4-0430 (JG, PP), P4-0085 (KE) in P4-0107 (PH) ter projektov J4-9297 (JG, PH, KE), J4-

4541 (JG, SO), J4-50130 (SO) in J7-50231 (PP). Delo DC, SK and MT je bilo financirano s strani Edupacked Chief Minister's Green Fellowship Programme 2024-25 (an initiative by the Pollution Control Board of Assam, India). Avtorji prispevka se zahvaljujejo Gregorju Skobernetu in Andreji Vedenik z Gozdarskega inštituta Slovenije za pomoč na terenu in v laboratoriju.

RAZPOLOŽLJIVOST PODATKOV:

Podatki, na katerih temelji predstavljen članek (Gričar in sod. 2026), so na voljo v repozitoriju DiRROS na naslovu (<https://doi.org/10.20315/Data.0012>) (Gričar in sod. 2025).

CC BY SA · DOI 10.20315/SFS.191.07

Kronologije širin branik borov in hrastov v Sloveniji: podlaga za analizo vplivov podnebnih sprememb na kakovost lesa

Polona Hafner¹, Jožica Gričar¹, Luka Krajnc¹, Gregor Skoberne¹,
Saša Ogorevc¹, Peter Prislan¹

¹ Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana

E-naslov: polona.hafner@gozdis.si

POUDARKI:

- Na enajstih rastiščih borov in hrastov v Sloveniji smo vzpostavili dendrokronološke kronologije štirih drevesnih vrst, ki pokrivajo zmerno-celinska in sub-mediteranska rastna območja.
- Razvite kronologije tvorijo osnovo za celostno preučevanje vplivov okoljskih sprememb na rast in lastnosti lesa ter za oceno prilagoditvene sposobnosti izbranih vrst v razmerah naraščajočega okoljskega stresa.

HIGHLIGHTS:

- At eleven pine and oak sites in Slovenia, dendrochronological chronologies were established for four tree species, covering temperate continental and sub-Mediterranean growth regions.
- The developed chronologies provide a basis for a comprehensive assessment of the impacts of environmental change on tree growth and wood properties, as well as for evaluating the adaptive capacity of selected species under increasing environmental stress.

UVOD:

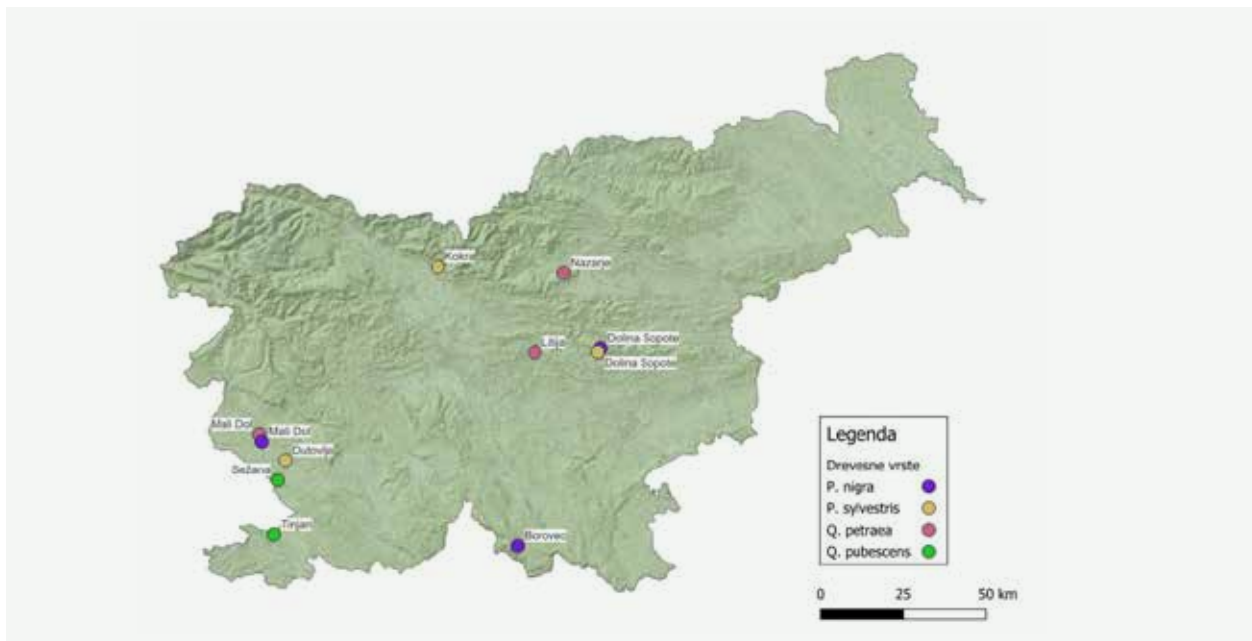
Bori in hrasti so v srednji Evropi predlagani kot perspektivne nadomestne vrste za smreko, ki je pod vse večjim pritiskom podnebnih sprememb (Abbas et al., 2016). Med hrastovimi vrstami graden (*Quercus petraea*) kot mezofilna vrsta uspeva na zmernocelinskih rastiščih, medtem ko je puhavec (*Quercus pubescens*) kot kserofilna vrsta prilagojen sušnim sub-mediteranskim razmeram. Kljub ekološki in gospodarski pomembnosti so njihove rastne značilnosti in lastnosti lesa v razmerah naraščajočega okoljskega stresa slabo raziskane. Podnebne spremembe vplivajo na strukturo lesa, kar se neposredno odraža v fizikalno-mehanskih lastnostih in kakovosti lesa (Blohm et al., 2016). Ker so rastni odzivi drevesnih vrst prostorsko raznoliki in močno pogojeni z lokalnimi talnimi in klimatskimi razmerami, je za celostno razumevanje njihove prilagoditvene sposobnosti nujno preučevanje več vrst na različnih rastiščih. Zanesljive informacije o ravnih značilnostih teh vrst so ključne za oceno njihove prilagoditvene sposobnosti in

gozdnogospodarsko načrtovanje v razmerah podnebnih sprememb (Hanewinkel et al., 2013).

METODE:

Za preučevanje odziva rasti borov in hrastov na okoljske razmere smo analizirali širine branik dreves na enajstih rastiščih v Sloveniji. Vzorčenje je zajelo tri rastišča rdečega bora (*Pinus sylvestris*) - Utovlje, Sopota in Kokra, tri rastišča črnega bora (*Pinus nigra*) - Sopota, Mali Dol in Borovec, tri rastišča gradna (*Quercus petraea*) - Litija, Nazarje in Mali Dol ter dve rastišči puhastega hrasta (*Quercus pubescens*) - Sežana in Tinjan (Slika 1). Na vsakem rastišču smo vzorčili 15 dreves ter s prirastoslovnim svedrom odvzeli po dva izvrtka. Vzorce lesa smo v laboratoriju poskenirali s sistemom ATRICS (Levanič, 2008), izmerili z uporabo programov Coorecorder in CDendro (Maxwell & Larsson, 2021) ter datirali s programom PAST-5 (SCIEM). Nadaljnjo analizo kronologij smo izvedli v programskem okolju R z uporabo knjižnice dplR (Bunn, 2008).

Slika 1: Karta lokacij vzorčenih dreves



REZULTATI IN DISKUSIJA:

Analiza širin branik na enajstih rastiščih je omogočila vzpostavitev kronologij širin branik za štiri drevesne vrste. Statistične značilnosti kronologij, vključno z izraženim populacijskim signalom (EPS) in povprečno medserijsko korelacijo (R_{bar}), so prikazane v Tabeli 1, kronologije pa na Sliki 2.

Večina kronologij dosega zadosten signal kakovosti ($EPS > 85$), kar potrjuje njihovo zanesljivost za nadaljnje dendroekološke analize (Wigley et al., 1984). Puhasti hrast dosega najvišje vrednosti EPS in R_{bar} med vsemi analiziranimi vrstami, kar je skladno z ugotovitvami primerljivih študij za to vrsto na sub-mediteranskih rastiščih v zahodni Sloveniji (Krajnc et al., 2024). Gradén izkazuje

Slika 2: Lokalne kronologije za štiri analizirane drevesne vrste

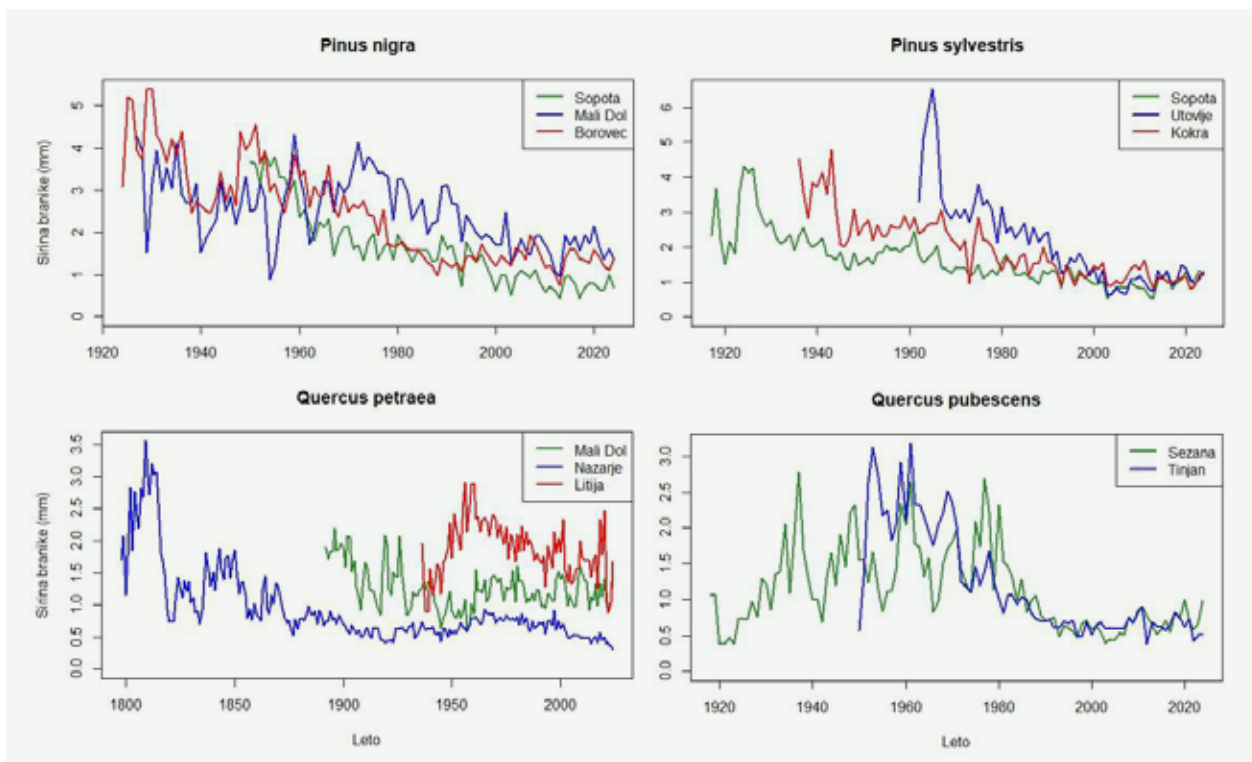


Tabela 1:

DV	LOKACIJA	ŠT. DREVES	RAZPON	STAROST	EPS	RBAR
<i>Pinus nigra</i>	Sopota	14	1950-2024	74	94,4	0,55
	Mali Dol	13	1927-2024	97	91,6	0,50
	Borovec	12	1924-2024	100	80,9	0,26
<i>Pinus sylvestris</i>	Utovlje	12	1962-2024	62	91,4	0,47
	Sopota	14	1917-2024	107	88,9	0,36
	Kokra	14	1936-2024	88	91,2	0,46
<i>Quercus petraea</i>	Mali Dol	14	1892-2024	132	89,5	0,38
	Nazarje	14	1803-2023	220	86,2	0,36
	Litija	13	1936-2024	88	85,8	0,32
<i>Quercus pubescens</i>	Sezana	13	1918-2024	106	93,4	0,52
	Tinjan	13	1950-2024	74	92,0	0,47

najnižje vrednosti Rbar, kar odraža visoko individualno variabilnost rasti, skladno z ugotovitvami za to vrsto v širši regiji (Čufar et al., 2008; Mészáros et al., 2022).

Kronologije črnega bora dosegajo visoke vrednosti EPS na večini rastišč, kar je skladno z ugotovitvami za to vrsto na sub-mediteranskih rastiščih v zahodni Sloveniji (Krajnc et al., 2024). Za črni bor v zahodno-balkanski regiji je bila dokumentirana visoka kakovost kronologij in skupni regionalni signal (Poljanšek et al., 2012). Nižja medserijska korelacija rdečega bora z alpskega rastišča Kokra v primerjavi s sub-mediteranskima rastiščema Sopota in Utovlje odraža klimatsko različnost tega območja, kar je skladno z ugotovitvami za rdeči bor vzdolž klimatskih gradientov v srednji Evropi (Hartl-Meier et al., 2014).

LITERATURA IN VIRI:

Abbas, D. in sod., 2016. Forestry for a low-carbon future: Integrating forests and wood products in climate change strategies. FAO.

Blohm, S. in sod., 2016. Physical and mechanical properties of young Douglas fir, European larch and black locust. *Drewno* 95(197): 41–47.

Bunn, A.G., 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26(2): 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>

Čufar, K. in sod., 2008. Common climatic signals affecting oak tree-ring growth in SE Central Europe. *Trees* 28(5): 1267–1277. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1032-8>

Hanewinkel, M. in sod., 2013. Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest

land. *Nature Climate Change* 3(3): 203–207. <https://doi.org/10.1038/nclimate1687>

Hartl-Meier, C. in sod., 2014. Climate sensitivity of mountain pine at elevational extremes after a long-term decrease in summer precipitation. *Climate Research* 60(2): 119–132. <https://doi.org/10.3354/cr01228>

Jandl, R. in sod., 2019. Productivity of alpine forests in a changing climate. *Annals of Forest Science* 76(2): 48. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0822-4>

Krajnc, L., Hafner, P., Gričar, J., 2024. Examining post-drought recovery in three sub-Mediterranean species: some trees not affected while some never recover. *Forest Ecology and Management*.

Levanič, T., 2008. ATRICS – A new system for image acquisition in dendrochronology. *Tree-Ring Research* 63(2): 117–122.

Maxwell, R.S., Larsson, L.A., 2021. CDendro and CooRecorder. Cybis Elektronik & Data AB.

Mészáros, I. in sod., 2022. Long-term radial growth and climate-growth relationships of *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus cerris* L. in a xeric low elevation site from Hungary. *Dendrochronologia* 75: 125988. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125988>

Poljanšek, S. in sod., 2012. A 435-Year-Long European Black Pine (*Pinus nigra*) Chronology for the Central-Western Balkan Region. *Tree-Ring Research* 68(1): 31–44. <https://doi.org/10.3959/2011-71>

Wigley, T.M.L. in sod., 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23(2): 201–213.

KLJUČNE BESEDE:

širine branik, podnebne spremembe, kakovost lesa, rastiščne razmere

ZAHVALE:

Raziskava je bila izvedena v okviru projektov J4-4541 in J4-50130 ter raziskovalnih programov P4-0430 in P4-0107, ki jih financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS). Zahvaljujemo se sodelavcem Zavoda za gozdove za pomoč pri izbiri lokacij ter zasebnim lastnikom in podjetju Slovenski državni gozdovi d.o.o. za dovoljenje za izvedbo vzorčenja.

CC BY SA · DOI 10.20315/SFS.191.08

Variabilnost širine branik in lesno-anatomskih parametrov pri dobu, gradnu in njihovih hibridih v Sloveniji

Peter Prislan¹, Polona Hafner¹, Gregor Skoberne¹, Saša Ogorevc¹, Jožica Gričar¹

¹ Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana

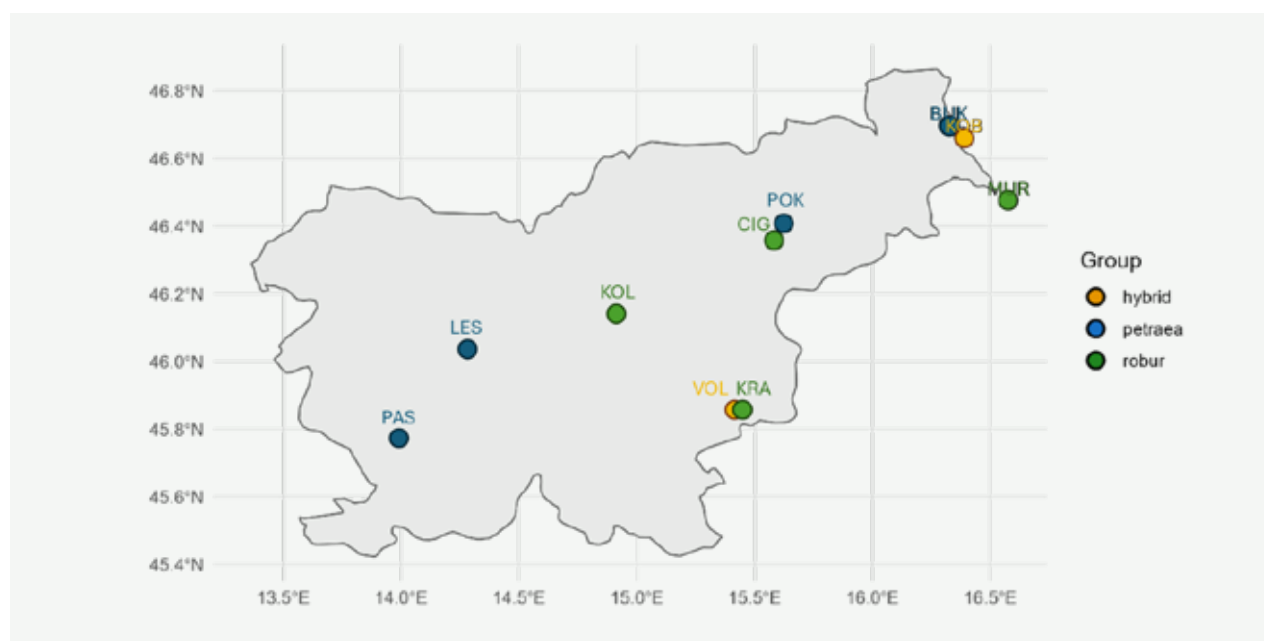
E-naslov: peter.prislan@gozdis.si

UVOD:

Dob (*Quercus robur*) in graden (*Quercus petraea*) sta ekološko in gospodarsko pomembni vrsti hrasta v Sloveniji. Zaradi podnebnih sprememb in naraščajočih temperatur se pričakuje, da se bo njun delež v slovenskih gozdovih povečeval, saj veljata za vrsti, ki se razmeroma dobro prilagajata toplejšim razmeram (Buras & Menzel, 2019). Poleg gospodarskega pomena imata pomembno vlogo tudi pri ohranjanju biotske raznovrstnosti in stabilnosti gozdnih ekosistemov. Razumevanje variabilnosti lesno-anatomskih parametrov, kot so širina branik, velikost prevodnih elementov in delež prevodne površine, je ključno

za oceno odzivnosti dreves na okoljske dejavnike (Fonti & Jansen, 2012). Pri tem imajo pomembno vlogo tako razlike med rastišči kot tudi variabilnost med posameznimi drevesi in med leti. Ker bodo učinki podnebnih sprememb prostorsko raznoliki, so zanesljive informacije o variabilnosti in prilagoditvenih odzivih hrastov ključne za razumevanje njihove prihodnje produktivnosti, vitalnosti in kakovosti lesa. Namen študije je bil raziskati kronologije lesno-anatomskih značilnosti na desetih hrastovih sestojih v Sloveniji, in sicer na štirih semenskih sestojih doba, štirih sestojih gradna ter dveh mešanih (hibridnih) sestojih (Slika 1).

Slika 1: Lokacije izbranih hrastovih sestojev; z rumeno sta označena mešana sestoja (Volčje - VOL in Kobilje - KOB); z zeleno sestoji doba (Cigonca - CIG, Krakovski gozd - KRA, Murska šuma - MUR, Kolovrat - KOL) in modro sestojev gradna (Pasji rep - PAS, Pokošje - POK, Koreno-les - LES, Bukovnica - BUK).



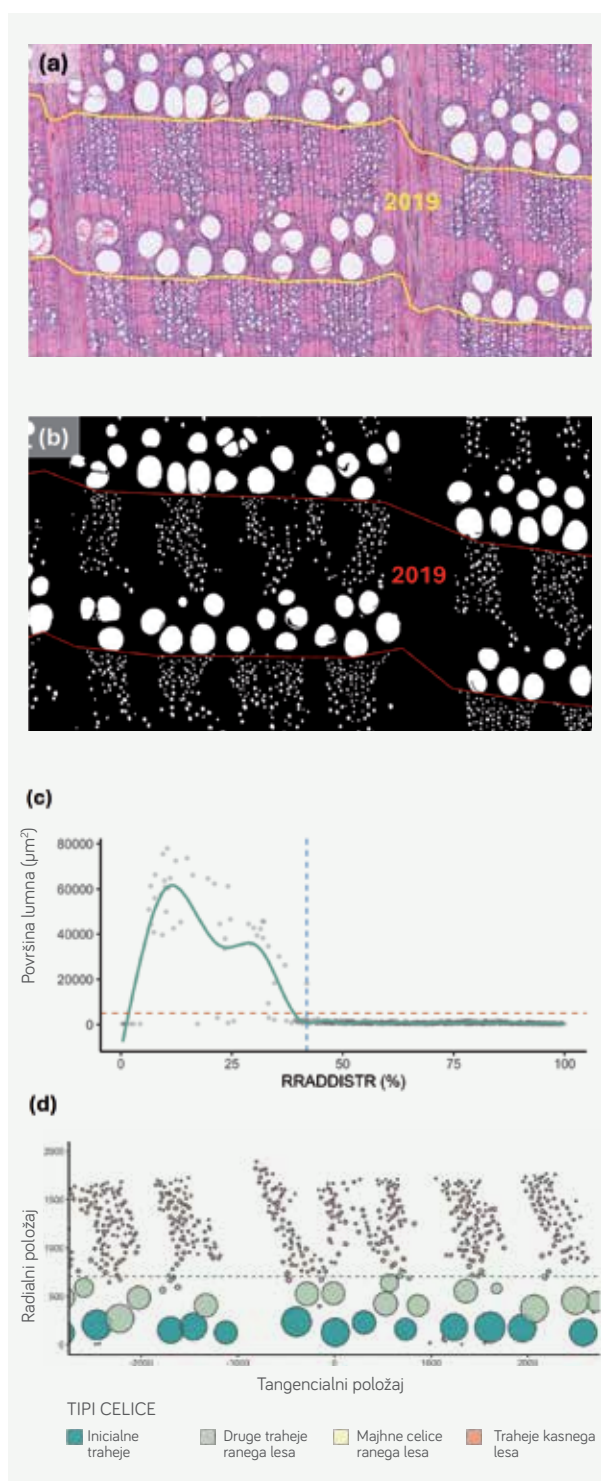
MATERIALI IN METODE:

Za namene anatomskih raziskav smo za vsako lokacijo (Slika 1) izbrali po pet izvrtkov, ki smo jih razrezali na 5–6 cm dolge segmente ter iz njih izdelali trajne preparate prečnih prerezov po postopku, kot ga opisuje Prisljan in sod. (2022) ali Arnič in sod. (2021). Izdelane preparate smo digitalizirali z uporabo sistema za mikroskopsko skeniranje Hamamatsu NanoZoomer pri 40-kratni povečavi. Skeniranje je omogočilo pridobitev visoko ločljivih digitalnih slik celotnih prečnih prerezov z enakomerno osvetlitvijo kar je zagotovilo primerljivost med vzorci. Digitalne slike smo analizirali s pomočjo sistema za analizo slike (Image Pro Plus) ter programa ROXAS (von Arx et al., 2016). Znotraj vsake letne prirastne plasti smo za obdobje 1960–2023 izvedli podrobne meritve morfoloških značilnosti posameznih trahej, vključno s premerom, površino lumnov ter drugimi geometrijskimi parametri, ki opisujejo dimenzije in razporeditev prevodnih elementov.

Kvantitativne anatomske podatke, izvožene iz programa ROXAS, smo analizirali v okolju R. Podatki na ravni celic in branik so bili najprej združeni v enoten podatkovni niz za posamezno drevo in leto, pri čemer smo preverili morebitna podvajanja meritev ter zagotovili konsistentnost med podatki na ravni celic in pripadajočimi podatki o širini branike. Vsako izmerjeno celico smo znotraj branike razporedili glede na njen radialni položaj in velikost v štiri skupine: (I) inicialne traheje ranega lesa, ki predstavljajo prvi venec trahej ranega lesa, (II) ostale traheje ranega lesa, (III) majhne celice ranega lesa (celice s površino lumna manjšo od $500 \mu\text{m}^2$) ter (IV) traheje kasnega lesa (Slika 2).

Na podlagi podatkov iz programa ROXAS in opravljene klasifikacije celic smo izdelali kronologije lesno-anatomskih parametrov; t.j. parametri širine branik (MRW – povprečna širina branike, ERW – širina ranega lesa in LRW – širina kasnega lesa), površine trahej (IMLA – povprečna površina inicialnih trahej, EMLA – trahej ranega lesa, LMLA – trahej kasnega lesa), število prevodnih elementov (CD – povprečno število prevodnih celic na površinsko enoto v braniki in RCTA – odstotek prevodne površine v braniki, v ranem – E_RCTA in L_RCTA – kasnem lesu), hidravlične lastnosti trahej (npr. Dh_mean – povprečni hidravlični premer trahej v braniki, L_Dh_mean – hidravlični premer inicialnih trahej) ter teoretična hidravlična prevodnost (K_s – hidravlična prevodnost branike, K_{s_EW} – hidravlična prevodnost ranega lesa in K_{s_LW} – hidravlična prevodnost kasnega lesa). Standardizacijo kronologij oziroma odstranjevanje starostnih in dolgoročnih trendov smo izvedli v programskem okolju R z uporabo funkcije `detrend()` iz paketa `dplR` (Bunn, 2008).

Slika 2: Primer analize slike s programom ROXAS (a,b) ter določanje meje med ranim in kasnim lesom (b) ter klasifikacija celic znotraj branike (c).



Za analizo korelacij med lesno-anatomskimi parametri smo uporabili standardne kronologije. Za vse kombinacije parametrov smo izračunali Pearsonove korelacijske koeficiente, statistično značilnost pa smo preverili s pripadajočim p-testom. Za oceno stabilnosti povezav med parametri smo korelacijske analize izvedli ločeno za vsako

rastišče, nato pa smo za vsako povezavo preverili, na koliko rastiščih je bil korelacijski koeficient $r > 0,75$ in statistično značilen ($p < 0,001$).

Razlike med rastišči za izbrane lesno-anatomske parametre smo ovrednotili z uporabo linearnih mešanih modelov (LMM). Posamezni anatomske parametri so bili uporabljeni kot odvisne spremenljivke, rastišče pa je bilo vključeno kot fiksni dejavnik, medtem ko smo variabilnost med drevesi upoštevali kot naključni učinek.

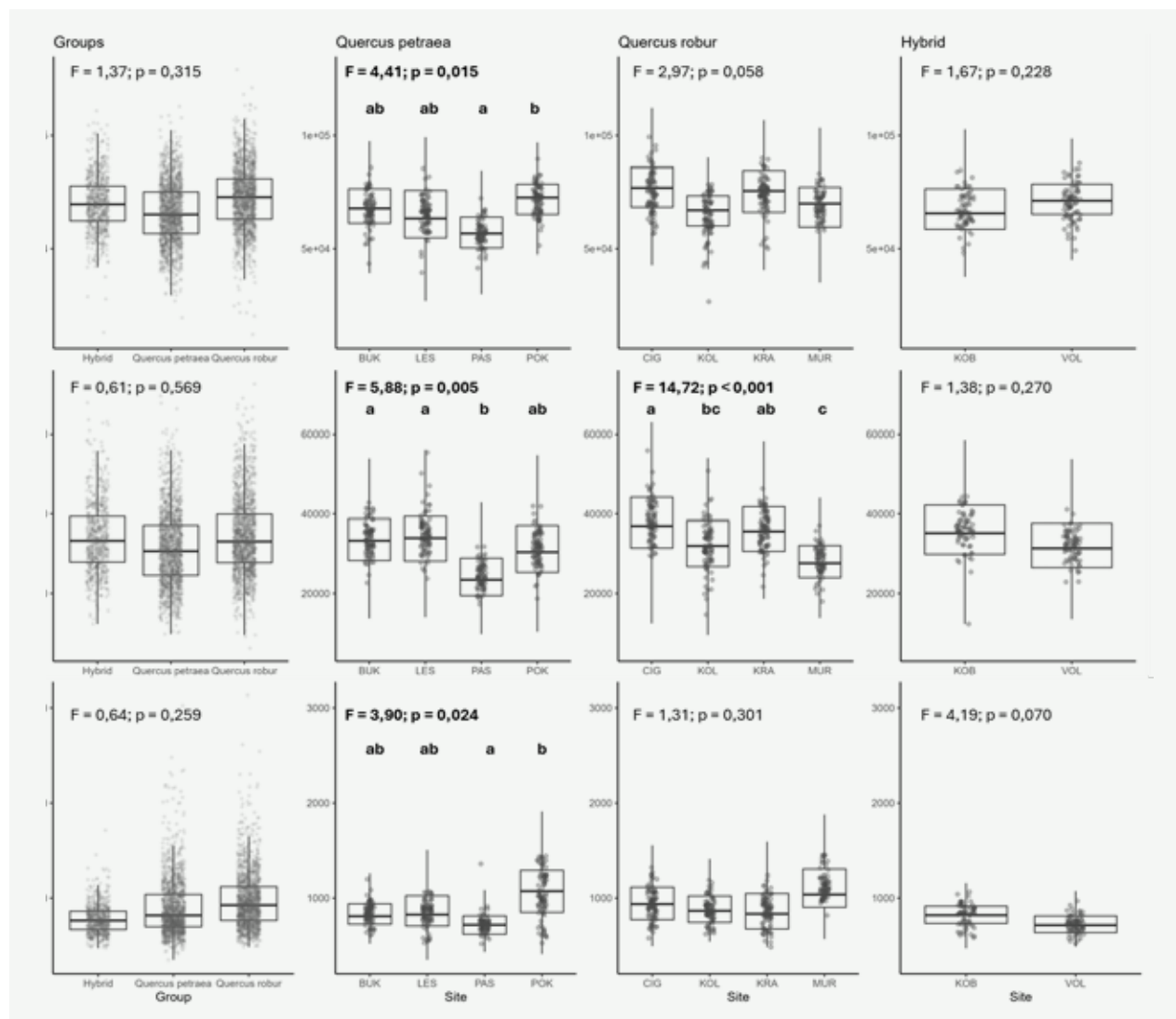
REZULTATI IN RAZPRAVA:

Med vrstami ni bilo statistično značilnih razlik v širini branik (MRW) ($F = 0,47$; $p = 0,641$). Prav tako razlike med rastišči

gradna ($F = 1,69$; $p = 0,202$) in hibridov ($F = 0,49$; $p = 0,500$) niso bile statistično značilne. Nasprotno pa so se širine branik med rastišči doba statistično značilno razlikovale ($F = 5,49$; $p = 0,007$). Kljub odsotnosti statistično značilnih razlik v večini primerov opisna statistika kaže na precejšnje razlike v debelinski rasti hrastov med rastišči. Pri gradnu so se povprečne vrednosti MRW gibale od 1389 μm (LES) do 2069 μm (POK), pri dobu pa od 1563 μm (CIG) do 2559 μm (MUR). Podobni vzorci so bili opaženi tudi pri širinah ranega (ERW) in kasnega lesa (LRW). Splošna odsotnost statistično značilnih razlik v MRW, ERW in LRW med vrstami in rastišči je verjetno posledica velike variabilnosti znotraj rastišč ter omejenega števila dreves.

Pri gradnu (*Quercus petraea*) so se vrednosti površine

Slika 3: Primerjava povprečnih površin trahej med skupinami (hibridi, *Quercus petraea* in *Q. robur*) ter med rastišči znotraj posameznih skupin za inicialne traheje ranega lesa (IMLA), rane traheje ranega lesa (EMLA) in traheje kasnega lesa (LMLA). Točke predstavljajo letne vrednosti. Prikazane vrednosti F in p izhajajo iz linearnih mešanih modelov (LMM), ki vključujejo leto in drevo kot naključna učinka. Različne črke označujejo statistično značilne razlike med rastišči na podlagi Bonferronijevih primerjav ($p < 0,05$).



inicialnih trahej (IMLA) gibale od približno 57.764 μm^2 (PAS) do 72.364 μm^2 (POK), pri dobu (*Quercus robur*) pa od 66.886 μm^2 (KOL) do 78.320 μm^2 (CIG). Povprečna površina trahej ranega lesa (EMLA) je bila približno 40–60 % manjša od površine inicialnih trahej (IMLA), medtem ko je bila površina trahej kasnega lesa (LMLA) več kot 98 % manjša. Med parametri površine trahej nismo zaznali statistično značilnih razlik med skupinami (tj. *Q. petraea*, *Q. robur* in hibridi). Nasprotno pa so se v nekaterih primerih pokazale statistično značilne razlike med rastišči znotraj posameznih skupin. Pri IMLA so bile statistično značilne razlike med rastišči zaznane pri gradnu ($F = 4,41$; $p = 0,015$), medtem ko pri dobu ($F = 2,97$; $p = 0,058$) in hibridih ($F = 1,67$; $p = 0,228$) razlike niso bile statistično značilne. Pri EMLA so bile razlike med rastišči statistično značilne tako pri gradnu ($F = 5,88$; $p = 0,005$) kot tudi pri dobu ($F = 14,72$; $p < 0,001$), pri LMLA pa le pri gradnu ($F = 3,90$; $p = 0,024$) (Slika 3). Rezultati kažejo, da na velikost trahej, zlasti v ranem lesu, pomembno vplivajo razmere na rastišču, pri čemer se vpliv razlikuje tudi med vrstami.

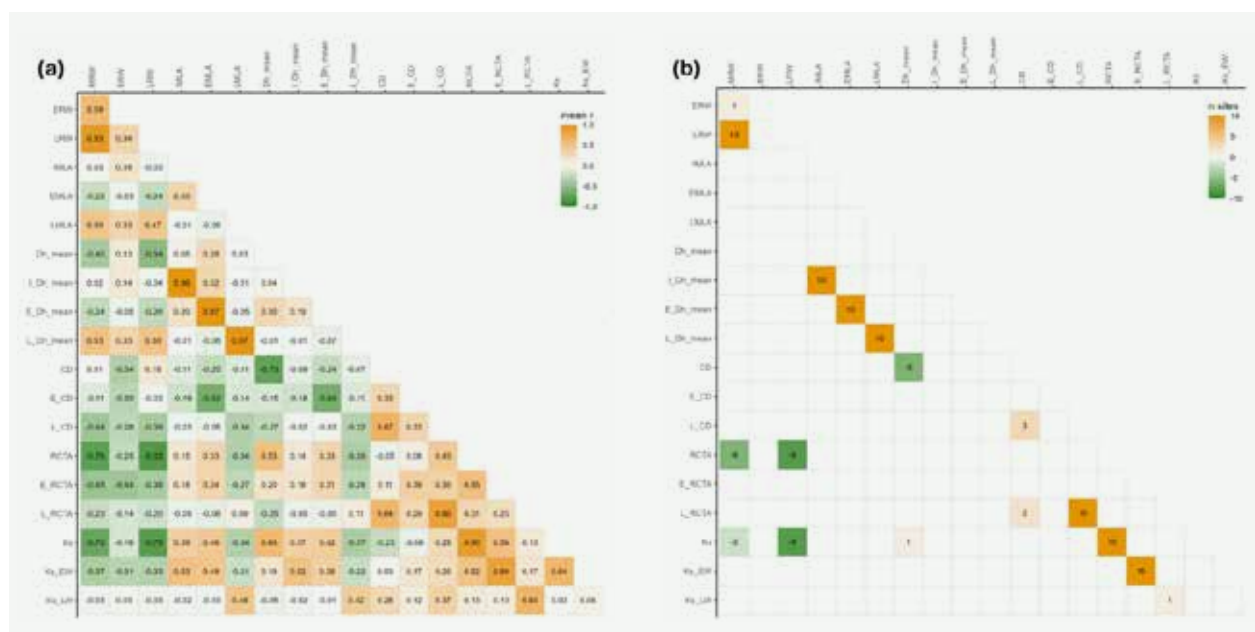
Delež prevodne površine (RCTA) se je v braniki pri gradnu gibal približno med 14,0 % (rastišče PAS) in 18,5 % (rastišče LES), pri dobu pa med 16,3 % (rastišče KOL) in 22,6 % (rastišče CIG). Delež prevodne površine je bil pričakovano višji v ranem lesu (E_RCTA; približno 19–26 %) in izrazito nižji v kasnem lesu (L_RCTA; približno 3–6 %). Med skupinami vrst ni bilo statistično značilnih razlik ($p > 0,05$ v vseh primerih). Značilne so bile razlike med rastišči (lokacijami) posameznih

vrst, predvsem pri dobu. RCTA in E_RCTA sta se med rastišči doba značilno razlikovala (RCTA: $F = 10,40$; $p < 0,001$, E_RCTA: $F = 5,27$; $p = 0,008$). V primeru gradna se je med rastišči značilno razlikoval L_RCTA ($F = 5,39$; $p = 0,007$). Pri hibridih med rastišči ni bilo statistično značilnih razlik pri nobenem od obravnavanih parametrov.

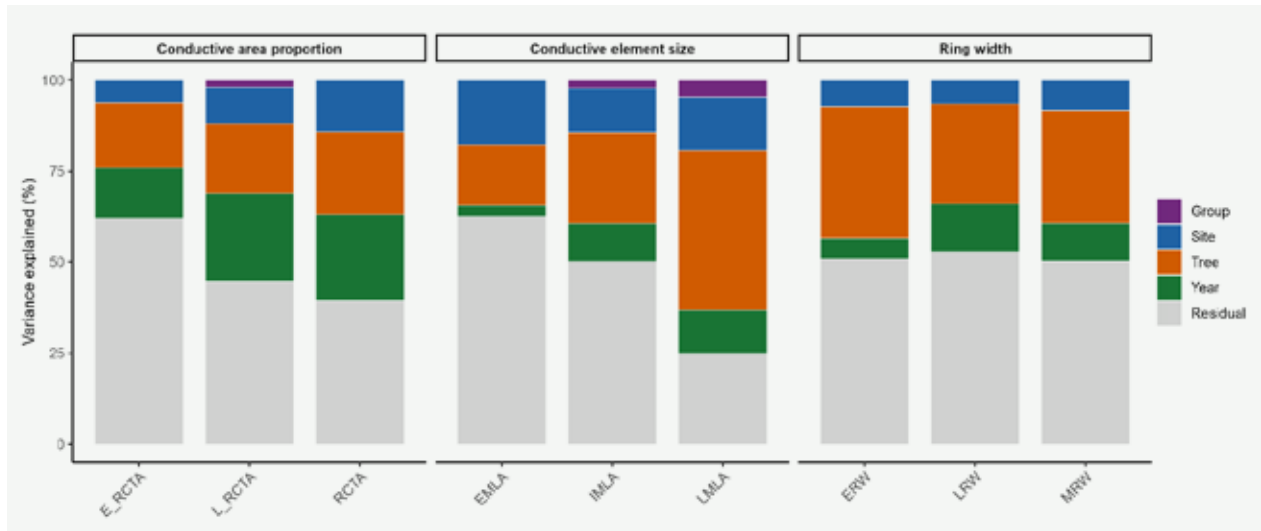
Analiza korelacij standardnih kronologij je pokazala značilne zveze med več lesno-anatomskimi parametri (Slika 4). Najizrazitejša je bila pozitivna zveza med MRW in LRW, ki je bila statistično značilna na vseh analiziranih rastiščih. Značilne so bile tudi zveze med parametri, ki opisujejo velikost prevodnih elementov. Korelacije med IMLA in I_Dh_mean, EMLA in E_Dh_mean ter LMLA in L_Dh_mean so bile statistično značilne na vseh rastiščih. Pozitivne zveze, ki so bile značilne na vseh rastiščih, so bile tudi med L_RCTA in L_CD, Ks in RCTA ter Ks_EW in E_RCTA. Negativne zveze na večini rastišč so bile zaznane med RCTA in LRW ter med Ks in LRW.

Analiza porazdelitve variance je pokazala, da med skupinami vrst (*Q. petraea*, *Q. robur* in hibridi) praktično ni bilo razlik ($ICC \approx 0$ v večini primerov). Glavnino pojasnjene variance so prispevali dejavniki na ravni posameznih dreves, rastišč in let, pri čemer je velik delež variance (približno 40–60 %) ostal nepojasnen. Pri širinah branik ter ranega in kasnega lesa je največji delež variance pojasnila variabilnost med drevesi (27–36 %), sledila pa je medletna variabilnost (6–13 %) in vpliv

Slika 4: Zveze med analiziranimi lesno-anatomskimi parametri na podlagi standardnih kronologij. (a) Korelacijska matrika s povprečnimi Pearsonovimi korelacijskimi koeficienti (r) med parametri, izračunanimi kot povprečje vseh rastišč. (b) Število rastišč, na katerih je bil korelacijski koeficient večji od 0,75 in statistično značilen ($p < 0,001$); pozitivne zveze so označene z oranžno, negativne pa z zeleno.



Slika 5: Ocenjena varianca posameznih dejavnikov (rastišče, drevo, leto) ter nepojasnjena varianca za izbrane lesno-anatomske parametre: širina branik (MRW), širina ranega lesa (ERW), širina kasnega lesa (LRW), površina trahej (IMLA, EMLA, LMLA) ter delež prevodne površine (RCTA, E_RCTA, L_RCTA), izračunana na podlagi linearnih mešanih modelov.



rastišča (6–8 %). Pri parametrih velikosti trahej je prav tako pomemben delež variance povezan z razlikami med drevesi (do 44 % pri LMLA) ter rastiščem (≈ 12 –18 %), medtem ko je vpliv leta manj izrazit (≈ 3 –12 %). Pri deležu prevodne površine so pomemben delež variance pojasnili tako rastišče (≈ 6 –14 %) kot drevo (≈ 18 –23 %) in leto (≈ 14 –24 %) (Slika 5). Pri nekaterih parametrih (npr. RCTA, L_RCTA) je bil vpliv leta primerljiv ali celo večji od vpliva drevesa, kar kaže na večjo občutljivost hidravličnih lastnosti na medletno variabilnost.

LITERATURA IN VIRI:

Arnič, D., Gričar, J., Jevšenak, J., Božič, G., von Arx, G., & Prislan, P. (2021). Different Wood Anatomical and Growth Responses in European Beech (*Fagus sylvatica* L.) at Three Forest Sites in Slovenia. *Frontiers in Plant Science*, 12(1551). doi:10.3389/fpls.2021.669229

Bunn, A. G. (2008). A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26(2), 115–124. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>

Buras, A., & Menzel, A. (2019). Projecting Tree Species Composition Changes of European Forests for 2061–2090 Under RCP 4.5 and RCP 8.5 Scenarios. *Frontiers in Plant Science*, 9. doi:10.3389/fpls.2018.01986

Fonti, P., & Jansen, S. (2012). Xylem plasticity in response to climate. *New Phytologist*, 195(4), 734–736. doi:10.1111/j.1469-8137.2012.04252.x

Prislan, P., del Castillo, E. M., Skoberne, G., Špenko, N., & Gričar, J. (2022). Sample preparation protocol for wood and phloem formation analyses. *Dendrochronologia*, 125959. doi:<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125959>

von Arx, G., Crivellaro, A., Prendin, A. L., Cufar, K., & Carrer, M. (2016). Quantitative wood anatomy - practical guidelines. *Frontiers in Plant Science*, 7. doi:10.3389/fpls.2016.00781

KLJUČNE BESEDE:

hrastovi sestoji, graden, dob, lesni prirastki, kvantitativna lesna anatomija

ZAHVALE:

Avtorji prispevka se zahvaljujemo sodelavcem Zavoda za gozdove za pomoč pri izbiri lokacij, zasebnim lastnikom in podjetju Slovenski državni gozdovi d.o.o. za dovoljenje izvedbe vzorčenja. Pripravo prispevka so omogočili Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS), raziskovalna programa P4-0430 in P4-0107 ter projekta: J4-4541 in J4-50130.

CC BY SA · DOI 10.20315/SFS:191.09

Odzivanje gozdno-lesnega sektorja na ujme v alpsko-jadranski regiji: analiza izkušenj in prilagoditvenih strategij lesnopredelovalnih podjetij v Sloveniji in Furlaniji – Julijski krajini

Polona Hafner¹, Jožica Gričar¹, Peter Prislan¹, Luka Krajnc¹, Michele Missoni², Eleonora Provenzale², Stefania Silvestri³, Bernard Likar⁴, Erika Valentinčič⁴, Boštjan Lesar⁵, Eli Krežič⁵, Miha Humar⁵

1 Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

2 Legno Servizi Forestry Cluster FVG, Via Divisione Garibaldi 8, 33028 Tolmezo, Izalija

3 Cluster Legno, Aredo e Sistema Casa FVG SRL Consortile, Via Stretta 20, 33044 Manzano, Italija

4 Lesarski grozd, Dimičeva ulica 13, 1000 Ljubljana

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

E-naslov: polona.hafner@gozdis.si

POUDARKI:

- Podnebno pogojeni ekstremni dogodki (vetrolom, žledolom, podlubniki) vse bolj motijo delovanje gozdno-lesnih vrednostnih verig v alpsko-jadranski regiji, kar potrjuje analiza podjetij v Sloveniji in Furlaniji – Julijski krajini.
- Lesnopredelovalna podjetja se na motnje večinoma odzivajo reaktivno, z omejenimi tehnološkimi prilagoditvami, ob izraziti odvisnosti od iglavcev in pomanjkanju dolgoročnih strategij.
- Ugotovitve izpostavljajo potrebo po sistematičnem krepljenju odpornosti sektorja, vključno z diverzifikacijo virov, izboljšanjem upravljanja tveganj ter razvojem strateških pristopov prilagajanja.

HIGHLIGHTS:

- Climate-driven extreme events (windthrow, ice storms, bark beetle outbreaks) are increasingly disrupting forest-based value chains in the Alpine-Adriatic region, as confirmed by an analysis of companies in Slovenia and Friuli Venezia Giulia.
- Wood-processing companies mainly respond to these disturbances reactively, with limited technological adaptation, a strong dependence on conifer species, and a lack of long-term strategies.
- The findings highlight the need for a more systematic strengthening of sector resilience, including resource diversification, improved risk management, and the development of strategic adaptation approaches.

UVOD:

Podnebne spremembe predstavljajo enega najpomembnejših izzivov za gozdne ekosisteme in z njimi povezane sektorje v Evropi. V alpsko-jadranski regiji, ki obsega zahodno Slovenijo in Furlanijo - Julijsko krajino (FJK), se v zadnjih desetletjih izrazito povečujeta pogostost in intenzivnost ekstremnih

vremenskih pojavov, kot so vetrolomi, žledolomi, snegolomi in gradacije podlubnikov. Posledice ujm v kratkem času vnašajo v sistem velike količine poškodovanega lesa, motijo ustaljene dobavne verige, znižujejo kakovost lesnih sortimentov in povzročajo izrazita cenovna nihanja.

Gozdno-lesni sektor ima v obeh regijah ključno gospodarsko, okoljsko in družbeno vlogo. Lesnopredelovalna industrija se sooča z dvojnimi pritiskom: naraščajočimi količinami poškodovanega lesa po ujmah in postopnim zmanjševanjem razpoložljivosti kakovostnih sortimentov v vmesnih obdobjih. Kljub temu ostaja empirično znanje o tem, kako podjetja zaznavajo motnje in razvijajo strategije prilagajanja, razmeroma omejeno. Pričujoči prispevek naslavlja to vrzel z analizo izkušenj podjetij iz obeh regij v okviru projekta **WoodInnovate - Naslavljanje podnebnih izzivov preko valorizacije lesa poškodovanega v ujmah v Alpsko-Jadranski regiji**. Cilji prispevka so analizirati vplive ujma na poslovanje podjetij, primerjati odzive med regijama ter predstaviti priporočila za krepitev odpornosti sektorja.

METODE:

Raziskava temelji na strukturiranih intervjujih z lesno-predelovalnimi podjetji iz Slovenije in FJK, izvedenih septembra in oktobra 2025 z vprašalniki po elektronski pošti, telefonskimi intervjuji in osebnimi pogovori. Skupno je bilo vključenih 18 podjetij, 7 iz Slovenije in 11 iz FJK. Vzorec iz FJK vključuje pretežno mikro in mala gozdarska ter žagarska podjetja, skoncentrirana v gorskih območjih regije (Val Canale, Karnija, predgorje), z letnimi predelovalnimi zmogljivostmi 450 - 13.000 m³ in povprečno sedmimi zaposlenimi. Slovenska v raziskavo vključena podjetja so po tipu in velikosti bolj heterogena in zajemajo žagarska podjetja, proizvajalce MDF plošč in specializirane predelovalce listavcev z zmogljivostmi od 5.000 do 300.000 m³/leto.

Vprašalnik je bil strukturiran v tri tematske sklope: (1) profil podjetja in položaj v vrednostni verigi, (2) izkušnje z ekstremnimi dogodki ter vplivi na predelavo in tržne razmere ter (3) zaznavanje tveganj in strategije prilagajanja. Zbrani anketni odgovori so bili pregledani, vsebinsko analizirani ter interpretirani v luči podatkov o ujmah (ZGS, 2025; BAUSINVE, 2024).

REZULTATI:

PROFILI PODJETIJ IN POLOŽAJ V VREDNOSTNI VERIGI

Anketirana podjetja zasedajo različne položaje v gozdno-lesni vrednostni verigi. V FJK prevladujejo majhna, prostorsko vpeta gozdarska in žagarska podjetja, usmerjena v primarno predelavo smreke, jelke in macesna. Kratke dobavne verige, ki temeljijo na lokalnih gozdnih virih, so njihova prednost, hkrati pa omejujejo prilagodljivost v razmerah izrednih motenj, ko regionalni sistem ni zmožen hkratnega obvladovanja in predelave velikih količin poškodovanega lesa. Vzorec slovenskih podjetij je bolj heterogen: zajema žagarska podjetja, proizvajalce plošč in specializirane predelovalce listavcev z

razpršenimi nabavnimi viri, ki v nekaterih primerih segajo čez mejo (Hrvaška, Italija). Kljub temu je večina pretežno odvisna od slovenskih gozdov (90-100 % surovine), kar jih v celoti izpostavlja motnjam v domačih gozdovih.

IZKUŠNJE Z UJMAMI: VPLIVI NA PREDELAVO IN TRŽNE RAZMERE

Vplivi na količino in kakovost lesa

Anketirana podjetja iz obeh regij poročajo o podobnih vzorcih. Po ujmah pride do izrazitega povečanja količin poškodovanega lesa na trgu, ki mu v naslednjih sezonah sledi zmanjšanje razpoložljivosti kakovostnih sortimentov. V FJK je bil ta vzorec posebej izrazit po neurju Vaia (oktober 2018) in kasnejši gradaciji podlubnika Ips typographus, ki je trajala do leta 2024. V Sloveniji so primerljive učinke povzročili žledolom leta 2014, vetrolom leta 2017 in zaporedni izbruhi podlubnikov v obdobju 2015–2023.

Kakovost poškodovanega lesa je v obeh vzorcih tesno vezana na čas od poškodbe do spravila in predelave. Les, pravočasno spravljeno iz gozda in vključen v predelavo, je po lastnostih primerljiv s svežim nepoškodovanim. Ob zamudah pride do modrivosti beljave, povečanja napak in izgub pri predelavi. Podjetja poudarjajo, da je bukovina posebej občutljiva in ni primerna za daljše skladiščenje na prostem. Delež lesa iz sanitarnih sečenj v predelavi se med anketiranci razlikuje. V FJK znaša povprečno 30 %, trend je naraščajoč. V slovenskem vzorcu je delež lesa iz sanitarne sečnje nižji, pri čemer podjetja, usmerjena v plemenite listavce, navajajo okoli 10 %.

Motnje v oskrbnih tokovih in organizacija dela

Nobeno od anketiranih podjetij ni poročalo o popolni zaustavitvi obratovanja, je pa večina zaznala motnje v usklajevanju sečenj, spravila in transporta. V slovenskem vzorcu je bila izpostavljena specifična dinamika. Sanitarna sečnja je imela prednost pred redno načrtovano sečnjo, kar je povzročilo začasni presežek sortimentov nižjih kakovostnih razredov in hkrati zmanjšanje razpoložljivosti kakovostne hlodovine, na kateri podjetja temeljijo osnovno proizvodnjo. Gozdarska podjetja iz FJK poročajo o povečanih tveganjih za varnost pri delu na strmih terenih z nestabilnimi poškodovanimi drevesi. Pomanjkanje usposobljenih delavcev je skupni izziv obeh regij, ki neposredno vpliva na hitrost sanitarnih sečenj in stopnjo kakovostne degradacije lesa.

Tržne razmere in cenovna dinamika

Vsa anketirana podjetja poročajo o izraziti cenovni nestabilnosti v obdobjih ujma: začetno znižanje cen ob povečani ponudbi poškodovanega lesa je nadomestilo kasnejše zvišanje ob zmanjšanju razpoložljivosti kakovostnih sortimentov. V FJK so bile presežne količine po neurju Vaia preusmerjene pretežno

na avstrijski in slovenski trg po znižanih cenah. Ekonomski učinki so bili v celoti negativni, z naraščajočimi stroški predelave in zmanjšano dobičkonosnostjo. Poškodovan les pri večini ni bil prepoznan kot tržna priložnost. Segment predelave je odločilni dejavnik, saj so podjetja, usmerjena v energetske les in nižje sortimente, lažje premagovala tržne ovire, medtem ko so se proizvajalci konstrukcijskega lesa soočali z omejeno možnostjo vključitve poškodovanega lesa, ki pogosto ne izpolnjuje tehničnih specifikacij.

Tehnološke prilagoditve

Tehnološke prilagoditve so bile v obeh regijah minimalne. V FJK so se osredotočile na organizacijsko-operativne ukrepe (varnost pri delu, prilagoditev delovnih procesov), eno podjetje pa je omenilo preventivno toplotno obdelavo lesa za zmanjšanje tveganj, povezanih s ksilofagnimi insekti. V Sloveniji so bile v ospredju organizacijske prilagoditve, npr. preusmeritev nabave, prilagoditev delovnega časa in začasno skladiščenje. Naložb v specializirano opremo za predelavo poškodovanega lesa ni poročalo nobeno podjetje, z izjemo enega slovenskega podjetja, ki navaja tekoče naložbe v nove predelovalne kapacitete.

ZAZNAVANJE TVEGANJ IN STRATEGIJE PRILAGAJANJA

Upravljanje tveganj

Stopnja zaznave podnebnih tveganj se med podjetji v obeh regijah razlikuje. Del podjetij v FJK vetrolome in gradacije podlubnikov razume kot naravno dinamiko, drugi kot kazalnik širše podnebne nestabilnosti. V slovenskem vzorcu je razpon podoben, eno podjetje je navedlo, da »ni zaskrbljeno, saj so ujme redke«, medtem ko druga opozarjajo na naraščajočo pogostost ekstremnih pojavov. Skupna ugotovitev obeh vzorcev je, da načrti za upravljanje tveganj predstavljajo izjemo, saj se večina podjetij s kritičnimi situacijami sooča reaktivno, na podlagi izkušenj in kratkoročnih prilagoditev, brez scenarijskih analiz ali strukturiranih ocen tveganj.

Obstoječe strategije prilagajanja

Obstoječi prilagoditveni ukrepi so v obeh regijah pretežno operativne narave. V FJK podjetja navajajo pospešeno odprodajo presežnih količin lesa po nižjih cenah, začasno preusmeritev na tuje trge ter organizacijske prilagoditve pri sečnji in spravilu. V slovenskem vzorcu prevladujejo podobni ukrepi in sicer preusmeritev nabave, prilagoditev delovnega časa in začasno skladiščenje. Skupna značilnost je odsotnost naložb v specializirano opremo za predelavo poškodovanega lesa, z izjemo enega slovenskega podjetja, ki navaja tekoče naložbe v nove predelovalne kapacitete.

Načrtovane strategije prilagajanja

Dolgoročne prilagoditvene strategije so v zgodnji fazi oblikovanja. Najpogosteje omenjeni ukrepi so razpršitev dejavnosti, uvajanje alternativnih drevesnih vrst za zmanjšanje odvisnosti od smreke ter naložbe v posodobitev opreme in nove tržne segmente. Del podjetij v obeh regijah nima jasno opredeljene dolgoročne usmeritve. Pomanjkanje usklajenega systemskega pristopa je skupna slabost, zlasti pri manjših podjetjih, kjer obseg potrebnih naložb presega lastne finančne zmogljivosti. Kot ključne oblike zunanje podpore podjetja navajajo finančne spodbude, poenostavitev regulativnih postopkov in dostop do strokovnih informacij.

RAZPRAVA:

SKUPNE STRUKTURNE RANLJIVOSTI IN REGIONALNE RAZLIKE

Primerjalna analiza razkriva skupen vzorec strukturnih ranljivosti v obeh regijah in sicer reaktivno upravljanje tveganj, omejene tehnološke prilagoditve, izrazita odvisnost od iglavcev in pomanjkanje formaliziranih dolgoročnih strategij. Ti vzorci kažejo, da je prilagoditvena sposobnost sektorja systemsko omejena, ne zgolj na ravni posameznih podjetij. Razlike med regijama so opazne v strukturi podjetij in obsegu motenj. V FJK prevladujejo majhna, prostorsko vpeta podjetja z omejeno zmogljivostjo za obvladovanje velikih količin lesa po ujmah. V analizo vključena podjetja v Sloveniji so v povprečju večja in bolj razpršena, a prav tako brez sistematičnih strategij prilagajanja. Med anketiranimi podjetji v nobeni regiji ni bilo zaslediti organiziranega, vnaprejšnjega načrtovanja odziva na ujme.

POMEN ČASOVNEGA DEJAVNIKA PRI OHRANJANJU VREDNOSTI LESA

Ena ključnih ugotovitev je osrednja vloga časa pri ohranjanju vrednosti poškodovanega lesa. Podjetja iz obeh regij potrjujejo, da pravočasno spravilo in predelava (v roku nekaj tednov po ujmi) bistveno zmanjšata izgube kakovosti lesa. Zamude, ki izhajajo iz logističnih omejitev, pomanjkanja delovne sile ali zasičenosti predelovalnih kapacitet, vodijo v progresivno degradacijo. Po treh mesecih od poškodbe les pogosto ni več primeren za konstrukcijsko predelavo. Prednostna sanitarna sečnja na dostopnih lokacijah, nadzorovano sproščanje lesa na trg in usklajevanje predelovalnih zmogljivosti so ključni mehanizmi, ki jih sektor brez ustreznih institucionalnih okvirov ne more zagotoviti samostojno.

VLOGA ČEZMEJNEGA SODELOVANJA

Podobnost vzorcev motenj in strukturnih ranljivosti v obeh regijah nakazuje, da je razvoj skupnih mehanizmov odzivanja nujen. Čezmejni transport lesa v kriznih razmerah, kar deloma

že poteka (npr. izvoz presežkov iz FJK v Slovenijo po neurju Vaia), bi z ustrezno koordinacijo postalo bolj sistematično in ekonomsko učinkovito. Skupne platforme za izmenjavo podatkov, usklajevanje sanitarnih sečenj in stabilizacijo tržnih razmer so področja z jasnimi dodanimi potencialom. Izkušnje po neurju Vaia v FJK kažejo, da je nekoordinirano sproščanje presežnih količin lesa eden ključnih dejavnikov cenovnega zloma, ki ga je mogoče omiliti z vnaprej dogovorjenimi mehanizmi usklajevanja.

UGOTOVITVE IN PRIPOROČILA

Analiza izkušenj 18 lesnopredelovalnih podjetij iz Slovenije in FJK razkriva skupen vzorec odzivanja na ujme: reaktivnost, odsotnost formaliziranih strategij in izrazita odvisnost od iglavcev. Ujme motijo predelovalne tokove, znižujejo kakovost lesa in povzročajo cenovna nihanja z negativnimi finančnimi učinki. Tehnološke prilagoditve so omejene, dolgoročno prestrukturiranje ostaja redkost, sistemska pripravljenost na ujme pa je nizka v obeh regijah.

Na podlagi ugotovitev so bila tak oblikovana naslednja priporočila:

- vzpostavitev čezmejnih mehanizmov usklajevanja za mobilizacijo lesa;
- finančne spodbude za vlaganja v fleksibilno predelovalno infrastrukturo in skladiščne kapacitete;
- skupne platforme znanja za izmenjavo podatkov in dobrih praks;
- poenostavitev regulativnega okvira ter
- programe usposabljanja za obdelavo poškodovanega lesa in varnost pri delu po ujmah.

Omejitve analize je majhen vzorec ($n = 18$) in kvalitativna narava podatkov. Prihodnje raziskave bi morale vključiti večji reprezentativni vzorec, spremljanje odzivov in kvantitativen ekonomski model izgub vrednosti vzdolž gozdno-lesne verige.

LITERATURA IN VIRI:

BAUSINVE, 2024. Inventario fitopatologico forestale regionale – Stato fitosanitario delle foreste del Friuli Venezia Giulia. ERSA – Agenzia regionale per lo sviluppo rurale, Udine.

Battisti, A., 2023. Clima e abete rosso: una difficile convivenza. *L'Italia forestale e montana* 78, 69–76. <https://doi.org/10.36253/ifm-1104>

Bernardinelli, I., Bassi, C., 2024. BAUSINVE 2024 – Inventario fitopatologico forestale regionale. ERSA – Agenzia regionale per lo sviluppo rurale, Udine.

Chirici, G., Giannetti, F., Travaglini, D., Nocentini, S., Francini, S., D'Amico, G., Borghetti, M., Bottai, L., Orlandini, S., Maselli, F.,

Gozzini, B., 2019. Stima dei danni della tempesta “Vaia” alle foreste in Italia. *Forest@ – Journal of Silviculture and Forest Ecology* 16, 3. <https://doi.org/10.3832/efor3070-016>

Kolšek, M., 2017. Slovenian forest health three years after the catastrophic ice storm from 2014, in: *Proceedings of the 13th Slovenian Conference on Plant Protection with International Participation*. Plant Protection Society of Slovenia, Rimske Toplice, pp. 230–236.

Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., Wild, J., Ascoli, D., Petr, M., Honkaniemi, J., Lexer, M.J., Trotsiuk, V., Mairota, P., Svoboda, M., Fabrika, M., Nagel, T.A., Reyer, C.P.O., 2017. Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change* 7, 395–402. <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>

Skudnik, M., Krajnc, L., Kušar, G., Pintar, A.M., 2025. Poročilo o rezultatih 1. cikla nacionalne gozdne inventure Slovenije 2020–2024. Gozdarski inštitut Slovenije, Ljubljana.

Straže, A., Gornik Bučar, D., Kropivšek, J., 2023. Identifikacija verig vrednosti v slovenskem gozdno-lesnem biogospodarstvu. *Les/Wood* 72, 21–34. <https://doi.org/10.26614/les-wood.2023.v72n01a02>

Veselič, Ž., Grecs, Z., Kolšek, M., Oražem, D., Matijašič, D., Beguš, J., 2015. Žled v slovenskih gozdovih in njihova sanacija. *Ujma* 29, 188–195.

Zavod za gozdove Slovenije, 2019. Načrt sanacije gozdov, poškodovanih v žledolomu in gradaciji podlubnikov 2014–2019. Zavod za gozdove Slovenije, Ljubljana.

KLJUČNE BESEDE:

gozdno-lesna vrednostna veriga, ujme, sanitarna sečnja, prilagajanje, lesnopredelovalna industrija, alpsko-jadranska regija

ZAHVALA:

Prispevek je nastal v okviru projekta WoodInnovate, ki ga sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija–Slovenija. Avtorji se zahvaljujejo vsem anketiranim podjetjem za sodelovanje ter Zavodu za gozdove Slovenije, LegnoFVG in regionalnim gozdarskim službam FJK za posredovanje podatkov.

CC BY SA · DOI 10.20315/SFS.191.10

Potencial prostorskih informacij hiperspektralnega oslikovanja za prepoznavanje lesnih vrst

Luka Kopač¹, Miha Humar¹

¹ Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

E-naslov: luka.kopac@bf.uni-lj.si, miha.humar@bf.uni-lj.si

POUDARKI:

- Z uporabo transformacije glavnih komponent je mogoče pretvoriti HSI slike v RGB format in jih vdelati s pomočjo konvolucijske nevronske mreže v nabor informativnih značilnic, ki kodirajo teksturo lesnih vrst.
- Nenadzorovani modeli zmanjšanja dimenzionalnosti, kot sta t-SNE in hierarhično grupiranje na osnovi kosinusne razdalje, ne zagotavljajo dovolj velike moči ločevanja za posamične lesne vrste.
- Glede na teksturo se posamične vrste razvrščajo v večje skupine na osnovi anatomije (iglavci, difuzno porozni listavci ter venčasto porozni listavci), kjer je razločevanje bolj enostavno.
- Logistična regresija omogoča klasifikacijo na osnovi prostorske informacije HSI z dokaj visoko točnostjo – 85,2 %, kjer so napačne razvrstitve predvsem med anatomsko podobnimi vrstami.

UVOD:

Les je kot široko razširjen material z relativno enostavno obdelavo skozi celotno človeško zgodovino služil različnim namenom. Ker nastaja kot naravno tkivo različnih drevesnih vrst, ima lahko zelo raznolike lastnosti, odvisne od izvora in rastnih pogojev (Rowell, 2012). Izbira ustreznih lesnih vrst je zato ključna glede na predvideno uporabo. Zaradi občutljivosti lesa na biotske in abiotske dejavnike razkroja se je ohranil le manjši delež zgodovinskih lesenih predmetov. Za pravilno umestitev teh predmetov v zgodovinski kontekst je pomembno določiti lesno vrsto, kar prispeva tudi k postopkom konserviranja in restavriranja (Lo Monaco idr., 2018). Pri tem so posebej zaželeni neporušni in neinvazivni postopki, zlasti kadar gre za edinstvene in dragocene predmete. Napredne slikovno-spektroskopske tehnike, kot je hiperspektralno oslikovanje (HSI), v kombinaciji z algoritmi strojnega učenja, lahko pomembno prispevajo k takšnim prizadevanjem (Ma idr., 2019).

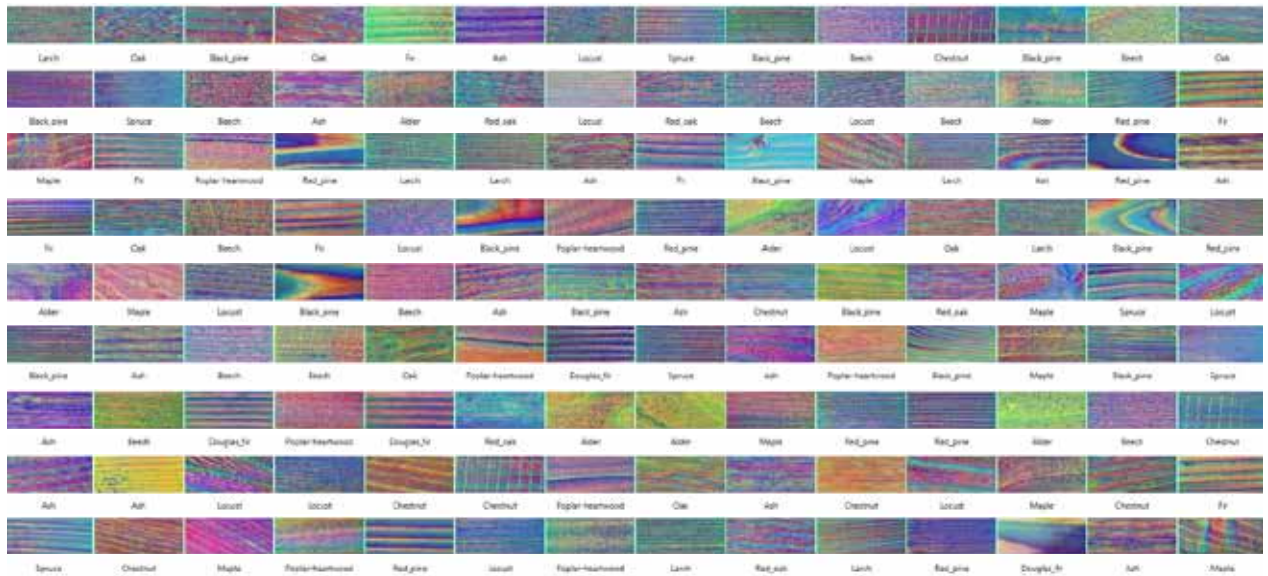
HSI združuje bližnje-infrardečo (NIR) spektroskopijo in slikanje, kar omogoča vpogled v prostorsko razločene kemijske informacije. Namesto običajne klasifikacije na osnovi spektrov je bil cilj te raziskave izkoristiti dopolnilne prostorske informacije, ki predstavljajo teksturo lesa.

Takšen pristop bi lahko izboljšal identifikacijo lesnih vrst na osnovi HSI pri kompleksnejših problemih.

PODATKI:

Na voljo smo imeli 45 vzorcev za vsako izmed 15 ključnih evropskih lesnih vrst, ki so ekonomsko najbolj pomembne v Slovenskem prostoru. Dve prečni površini (50 mm × 25 mm) vsakega vzorca sta bili uporabljene v analizi. Zajem podatkov je bil izveden s potisno-skenirnim HSI sistemom (ClydeHSI, Clydebank, Združeno kraljestvo), ki vključuje dva volfram-halogen reflektorja, kamero za kratkovalovno infrardeče območje (SWIR) s spektralnim razponom 1000–2500 nm in povprečno spektralno ločljivostjo 5 nm ter premično mizo za vzorce. Odstranili smo ozadje nastalih podatkovnih kock, nato pa uporabili analizo glavnih komponent (PCA) za zmanjšanje dimenzionalnosti podatkov z izvornih 288 spektralnih pasov na 3 kanale, ki so bili osnova za RGB sliko. Druga glavna komponenta je predstavljala rdeči kanal, tretja zeleni kanal in četrta modri kanal. Opisana priprava podatkov je bila izvedena v programskem jeziku Python. Rezultat tega procesa je bilo 90 RGB slik na posamezno lesno vrsto (Slika 1).

Slika 1: Naključen podzorec uporabljenih RGB slik



METODE:

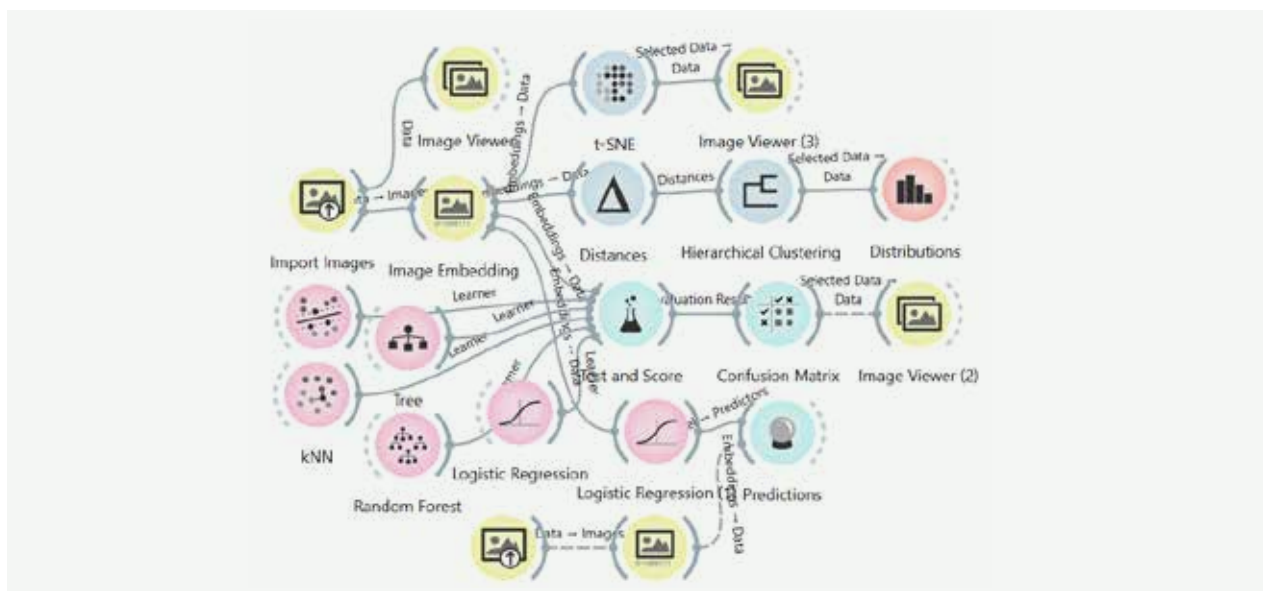
Za nadaljnjo obdelavo podatkov je bila uporabljena programska oprema Orange, namenjena podatkovnemu rudarjenju, strojnemu učenju in vizualizaciji podatkov. Slike so bile v Orange naložene z gradnikom »Import images« in preverjene z gradnikom »Image viewer«. Nato so bile posredovane skozi ključni sloj »Image embedding«, ki z uporabo konvolucijske nevronske mreže pretvori slike v nabor informativnih značilnic. V tej raziskavi je bil uporabljen model »InceptionV3«.

Za združevanje slik na podlagi novih značilnic je bila uporabljena metoda t-porazdeljenega stohastičnega vlaganja sosedov (t-distributed stochastic neighbour embedding – t-SNE). Vzporedno so bile izračunane kosinusne razdalje, ki

so bile nato uporabljene v gradniku »Hierarchical clustering«, rezultati pa so bili zaradi velikega števila slik vizualizirani s porazdelitvami po gručah dendrograma.

Za klasifikacijo je bilo uporabljenih več modelov strojnega učenja: podporni vektorski stroj (SVM), enostavno odločitveno drevo, naključni gozd, k-najbližjih sosedov (kNN) in logistična regresija. Njihova uspešnost je bila ocenjena z gradnikom »Test and score« z navzkrižno validacijo z 10 pregibi, za najboljši model pa je bila izdelana tudi matrika zmede. Logistična regresija je bila dodatno uporabljena za napoved vzorcev beljave topola, ki zaradi svoje teksturne podobnosti jedrovini iste vrste niso bili vključeni v učni nabor podatkov. Celoten potek dela v okolju Orange je prikazan na Sliki 2.

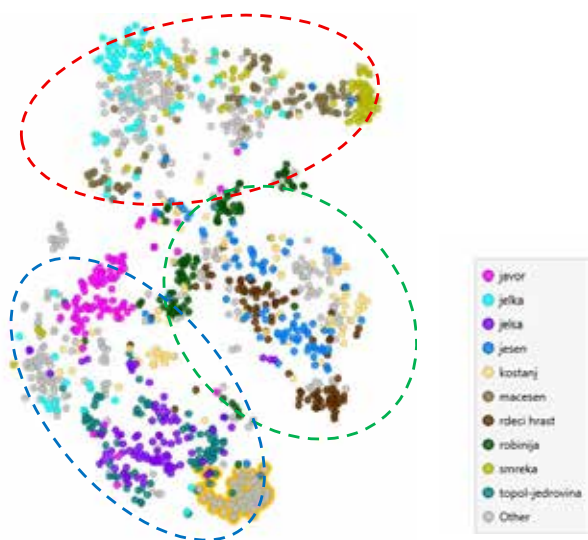
Slika 2: Proces dela v okolju Orange



REZULTATI:

Gruče večine lesnih vrst pri transformaciji v dvo-dimenzionalen t-SNE prostor, niso bile jasno ločene (Slika 3). Pri nekaterih vrstah, kot so bukev (siva, označena na sliki), javor (roza) in smreka (svetlo zelena), je bila pretvorjena teksturna informacija bolj edinstvena kot pri drugih vrstah. Predvidevali smo da te vrste omogočajo bolj enostavno razločitev od drugih. Kljub temu je ločevanje gruč sledilo anatomskim razredom lesnih vrst. Razvidni so bili trije glavni razredi: iglavci, difuzno porozni listavci in venčasto porozni listavci.

Slika 3: t-SNE transformacija v 2D prostor



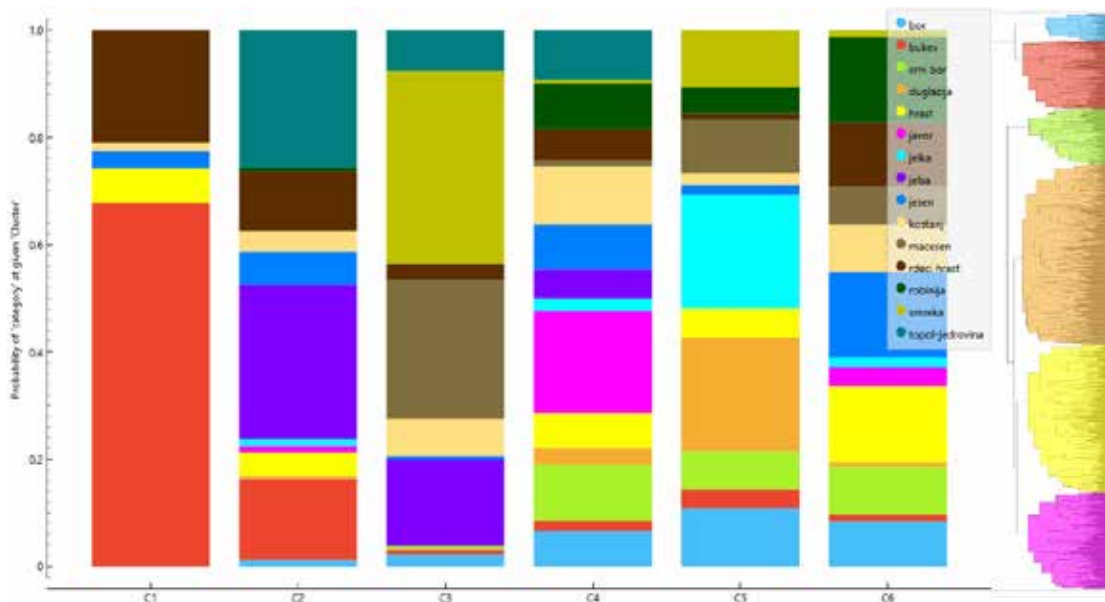
Iglavci (rdeča elipsa), kot so smreka, jelka in macesen, so se združevali bližje skupaj pri višjih vrednostih osi y na grafu t-SNE. Venčasto porozni listavci (zelena elipsa), kot so jesen, kostanj in rdeči hrast, so bili umeščeni v osrednji del, med iglavce in difuzno porozne listavce (modra elipsa), kot so javor, jelša in topol, ki so imeli nižje vrednosti osi y. Nekatere vrste so bile očitno teksturno bolj podobne vrstam iz drugih razredov. Tekstura javorja se je na primer izkazala za bolj podobno nekaterim venčasto poroznim vrstam kot difuzno poroznim vrstam.

Z uporabo dendrograma na podlagi kosinusnih razdalj med podatkovnimi vektorji in ustrezne mejne vrednosti smo razdelili podatke v šest gruč. Vsaka gruča je vsebovala več različnih vrst, ki so bile ponovno grupirane predvsem na podlagi anatomskih podobnosti v glavne razrede (Slika 4). V tem primeru so bile difuzno in venčasto porozne vrste listavcev pogosto v istih gručah in je razlikovanje izpostavilo predvsem razlike med iglavci in listavci.

Prva gruča (C1) je vsebovala predvsem bukev, ki ima dokaj izrazite teksturne značilnosti, kot na primer zrcala. Ta gruča je vključevala tudi hrast, rdeči hrast in nekaj primerkov jesena ter kostanja. Druga gruča (C2) je vključevala predvsem topol, jelšo in bukev. Tretja gruča (C3) je vsebovala iglavce, kot sta smreka in macesen, vključene pa so bile tudi nekatere vrste listavcev. Preostale tri gruče (C4, C5 in C6) so bile bistveno bolj raznolike po sestavi in so vsebovale tudi večje število vzorcev, kar je razvidno tudi na dendrogramu (skupaj 997 vzorcev v primerjavi s 353 v prvih treh gručah).

Za klasifikacijo na podlagi vdela ve slik je bilo preizkušenih več modelov. Najboljšo klasifikacijsko natančnost, 85,2 %, smo dosegli z uporabo logistične regresije, kar je bilo pričakovano, saj vdela va z nevronske mreže pripravi podatke posebej

Slika 4: Porazdelitev lesnih vrst po gručah (levo) in dendrogram (desno)



Slika 5: Matrika zmede - logistična regresija

	bor	bukev	crni bor	duglazija	hrast	javor	jelka	jelsa	jesen	kostanj	macesen	rdeci ...	robinija	smreka	topol...	Σ
bor	58	0	10	2	0	0	6	1	0	1	6	0	0	6	0	90
bukev	1	83	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	3	0	1	90
crni bor	9	0	71	3	0	0	2	0	0	2	3	0	0	0	0	90
duglazija	3	0	4	80	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	90
hrast	0	1	0	0	82	0	0	0	1	3	0	2	1	0	0	90
javor	0	1	2	0	0	83	0	2	2	0	0	0	0	0	0	90
jelka	8	0	2	2	0	1	60	0	1	0	3	0	0	5	0	90
jelsa	0	0	0	0	0	2	0	81	0	1	0	0	0	0	6	90
jesen	0	0	0	0	1	0	1	0	77	5	1	2	2	0	1	90
kostanj	1	0	1	0	2	6	0	0	4	69	0	0	6	0	1	90
macesen	4	0	2	3	0	0	1	0	0	1	77	0	0	2	0	90
rdeci ...	0	0	0	0	5	0	0	1	1	1	0	81	1	0	0	90
robinija	0	0	0	0	1	0	0	0	1	4	0	1	83	0	0	90
smreka	5	0	2	0	0	0	4	0	1	1	4	0	0	73	0	90
topol...	0	1	0	0	0	0	1	2	0	1	0	0	0	85	0	90
Σ	89	86	94	90	91	92	85	89	88	89	94	86	96	87	94	1350

za to vrsto klasifikacije. Matrika zmede za klasifikacijo z logistično regresijo je prikazana na Sliki 5.

Največ napačnih razvrstitev je bilo pri rdečem boru, jelki in kostanju, kjer je model nepravilno klasificiral več kot 20 vzorcev. Za najbolj teksturno razločene vrste so se izkazale bukev, duglazija, hrast, javor, jelša, rdeči hrast, robinija in topol, pri katerih je bilo pravilno razvrščenih 80 ali več od skupno 90 vzorcev. Večina napačnih razvrstitev se je pojavila med pričakovano podobnimi vrstami; na primer, nekateri vzorci rdečega bora so bili napovedani kot drugi iglavci (črni bor, duglazija, jelka, macesen ali smreka).

SKLEPI:

Raziskava je pokazala, da je za klasifikacijo lesnih vrst mogoče uporabiti dopolnilne prostorske oziroma teksturne informacije, ki jih zagotavlja hiperspektralno oslikovanje. Razvrščanje z uporabo metode t-SNE ali hierarhičnega združevanja na podlagi kosinusnih razdalj ni imelo dovolj ločilne moči za natančno razlikovanje posameznih vrst, čeprav je bilo ločevanje med iglavci, difuzno poroznimi listavci in venčasto poroznimi listavci bolj izrazito. Logistična regresija se je izkazala za uspešnejšo, saj je pri 10-kratni navzkrižni validaciji dosegla klasifikacijsko natančnost 85,2 %. Kot kaže matrika zmede, je bila večina vrst pravilno napovedana, pri čemer so se napačne razvrstitve večinoma nanašale na anatomsko podobne vrste. Kljub temu se je potrebno zavedati, da je tovrstna identifikacija lesnih vrst občutljiva na stanje površine, ki vključuje obdelavo, biotski ter abiotski razkroj in onesnaženost površine. V nadaljevanju bi bilo smiselno združiti modele klasifikacije na osnovi spektralnih in prostorskih podatkov hiperspektralne podatkovne kocke ter tako doseči višje točnosti identifikacije lesnih vrst v kompleksnih predmetih kulturne dediščine.

LITERATURA IN VIRI:

Lo Monaco, A., Balletti, F., & Pelosi, C. (2018). WOOD IN CULTURAL HERITAGE PROPERTIES AND CONSERVATION OF HISTORICAL WOODEN ARTEFACTS. In *European Journal of Science and Theology* (Vol. 14, Issue 2).

Ma, T., Inagaki, T., Ban, M., & Tsuchikawa, S. (2019). Rapid identification of wood species by near-infrared spatially resolved spectroscopy (NIR-SRS) based on hyperspectral imaging (HSI). *Holzforschung*, 73(4), 323–330. <https://doi.org/10.1515/hf-2018-0128>

Rowell, R. M. (Ed.). (2012). *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b12487>

KLJUČNE BESEDE:

Hiperspektralno oslikovanje, identifikacija, tekstura lesa, lesne vrste

ZAHVALE:

Avtorji se zahvaljujejo za finančno podporo Slovenski raziskovalno inovacijski agenciji (ARIS) v okviru raziskovalnih projektov J7-50231 (GROWTH) in J7-50226 (NextGen HS), raziskovalnega programa P4-0015 (Les in lignocelulozni kompoziti) ter infrastrukturnih centrov (IC LES PST 0481-09 in IO-E012 E-RIHS). Prav tako se zahvaljujejo za podporo projekta Slo-Ita Interreg WoodInnovate, projektu MATRES (VIP Univerza v Ljubljani, ARIS, RSF-A, SN-ZRD/22-27/510) ter projektu Teaming CoE GreenHer.

Ocena modelov globokega učenja za razvrščanje gozdnih lesnih sortimentov po tržni vrednosti na podlagi slik

Matevž Triplat¹, Žiga Lukancič¹, Vasja Kavčič¹

¹ Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana

E-naslov: matevz.triplat@gozdis.si (M.T.); ziga.lukancic@gmail.com (Ž.L.); vasja.kavcic@gozdis.si (VK)

POUDARKI:

- Prepoznavanje drevesnih vrst, gozdnih lesnih sortimentov in ocena njihove kakovosti ter vrednosti na terenu s pomočjo slik ponuja velik potencial za uporabo v gozdarstvu.
- Študija obravnava temo razvrščanja gozdnih lesnih sortimentov po tržni vrednosti z uporabo programske opreme za rudarjenje podatkov Orange iz niza podatkov slik, zbranih na dražbi lesa v Slovenij Gradcu.
- Rezultati kažejo natančnost pri razvrščanju tržne vrednosti (40 %–55 %). Ti izsledki poudarjajo obetavnost globokega učenja za identifikacijo vrst, hkrati pa kažejo na potrebo po nadaljnjih metodoloških izboljšavah za povečanje zanesljivosti razvrščanja vrednosti, kar ima praktičen vpliv na operativno gozdarstvo in vrednostne verige bioekonomije.

IZVLEČEK:

Prispevek obravnava uporabo modelov globokega učenja oziroma slikovnih vgraditev za razvrščanje gozdnih lesnih sortimentov (v nadaljevanju sortimentov) glede na tržno vrednost. Analiza temelji na slikah sortimentov, posnetih na 17. licitaciji vrednejših sortimentov lesa v Slovenij Gradcu, ter na pripadajočih podatkih o drevesni vrsti, dimenzijah, prostornini in doseženi prodajni ceni. Sortimenti štirih bolje zastopanih drevesnih vrst (evropski macesen, navadna smreka, hrast graden in gorski javor) so bile vrednosti preračunane na m³ in razvrščene v tri vrednostne razrede: nižji kvartil, srednji razred ter zgornji kvartil. Za analizo je bilo uporabljeno programsko okolje Orange. Slike so bile najprej pretvorjene v vektorje značilnosti z vnaprej naučenim modelom Inception v3, nato pa je bila klasifikacija izvedena z logistično regresijo in 10-kratno stratificirano navzkrižno validacijo. Rezultati kažejo zmerno uspešnost razvrščanja. Najvišja natančnost je bila dosežena pri evropskem macesnu in hrastu gradnu, približno 55 %, najnižja pa pri navadni smreki, približno 40 %. Rezultati potrjujejo, da analiza slik lahko prispeva k avtomatiziranemu vrednotenju sortimentov, vendar trenutna metodologija še ne omogoča zanesljive operativne uporabe brez dodatnih podatkov, izboljšav modelov in vključitve drugih informacij o sortimentih. Študija je pomembna, ker odpira vprašanje, ali je mogoče tržno vrednost lesa vsaj deloma napovedovati iz slikovnih podatkov. Hkrati jasno pokaže, da je vrednost sortimentov odvisna od številnih dejavnikov, ki jih sama slika pogosto ne zajame dovolj dobro, na primer notranjih napak, porekla, dimenzij, kakovostnega razreda, ponudbe in povpraševanja ter posebnosti licitacijskega trga.

UVOD:

Analiza slik se vsakodnevno uporablja na številnih področjih in ima velik potencial tudi v gozdarstvu. Od nizkocenovnega ocenjevanja prostornine dreves na podlagi posameznih slik [1], do digitalizacije operativnih procesov s podatki o posameznih drevesih [2] ter natančnim merjenjem premera in oblike debla [3]. Uporaba tehnik globokega učenja nudi možnost avtomatizirane,

prilagodljive in natančnejše klasifikacije drevesnih vrst in napak [4,5]. Poleg tega analiza slik, zlasti z uporabo modelov globokega učenja, odpira nove možnosti za sledljivost lesa, saj omogoča identifikacijo sortimentov na podlagi slik čel v različnih pogojih po sečnji, osvetlitvi in kotih [6,7].

V več študijah so računalniški vid in globoko učenje uspešno uporabili za prepoznavanje lesa in dreves. Grondin

in sod. [9] so na primer uporabili nadzorovano globoko učenje od začetka do konca za zaznavanje dreves in oceno premera v gozdovih, pri čemer so dosegli 90,4-odstotno natančnost zaznavanja dreves, 87,2-odstotno natančnost segmentacije ter centimetrovsko natančnost pri ocenjevanju ključnih točk.

Globoko učenje je uporabno pri sledljivosti sortimentov in določanju drevesnih vrst. Metode globokega učenja so bile uporabljene tudi pri ocenjevanju kakovosti površine žaganega lesa [8]. Podobno so bile tehnike globokega učenja uporabljene za analizo CT-slik sortimentov [4]. Holmström et al. [10] so prikazali ponovno identifikacijo sortimentov na podlagi slik čel, posnetih v različnih časovnih obdobjih po sečnji ter pri različnih svetlobnih pogojih in pod različnimi koti. Vihlman et al. [7] pa so ocenjevali modele globokega učenja za identifikacijo sortimentov smreke in bora na podlagi slik.

Medtem ko so prejšnje študije tehnike globokega učenja uporabljale predvsem za prepoznavanje drevesnih vrst, pa uporaba globokega učenja za razvrščanje sortimentov po tržni vrednosti s pomočjo analize slik zahteva nadaljnje raziskave [8]. Študija zapolnjuje to vrzel s preučevanjem, ali lahko orodje za analizo podatkov Orange oceni vrednost sortimentov na podlagi slik s terena. Cilj raziskave je napredek pri praktičnih uporabah orodij za prepoznavanje slik v gozdarstvu, zlasti za razvrščanje po vrednosti.

METODA:

Opis vzorca

V študiji smo uporabili slike sortimentov, posnete leta 2023 na 17. licitaciji vrednejših sortimentov lesa v Slovenji Gradcu [11]. Organizatorji licitacije so zagotovili bazo podatkov, ki zajema ključne lastnosti sortimentov, vključno s premerom, dolžino, prostornino, drevesno vrsto, številom ponudb in zmagovalno ponudbo. Podatki o sortimentih so bili pridobljeni iz kataloga sortimentov [12].

Slike so bile posnete z različnimi fotoaparati (Nikon D7000, iPhone 11 Pro in Canon PowerShot G3X), kar je omogočilo ločljivosti 4928 × 3264, 3024 × 4032 in 3648 × 5472 pikselov. V programu Adobe Lightroom so bile slike obdelane le v smislu organizacije datotek in obrezovanja do robov sortimentov, tako je vsaka fotografija vsebovala celoten sortiment, ki je bil na sredini slike in na njej v celoti zajet.

Sortimenti štirih drevesnih vrst so bili razvrščeni po tržni vrednosti: navadna smreka, hrast graden, evropski macesen in gorski javor. V analizo razvrščanja po vrednosti

so bile vključene le številčno zadostno zastopane vrste, da je bila mogoča zanesljiva razdelitev v kvartile na podlagi vrednosti in zagotovljena zanesljiva zmogljivost modela. Znotraj vsakega niza posameznih drevesnih vrst so bile slike razdeljene v kvartile na podlagi vrednosti na m³, nato pa so bili sortimenti po drevesnih vrstah razvrščeni v mape po kvartilih: 1. kvartil (najnižjih 25 %), združena 2. in 3. kvartila (25 %–75 %) ter 4. kvartil (najvišjih 25 %).

Statistika in metoda

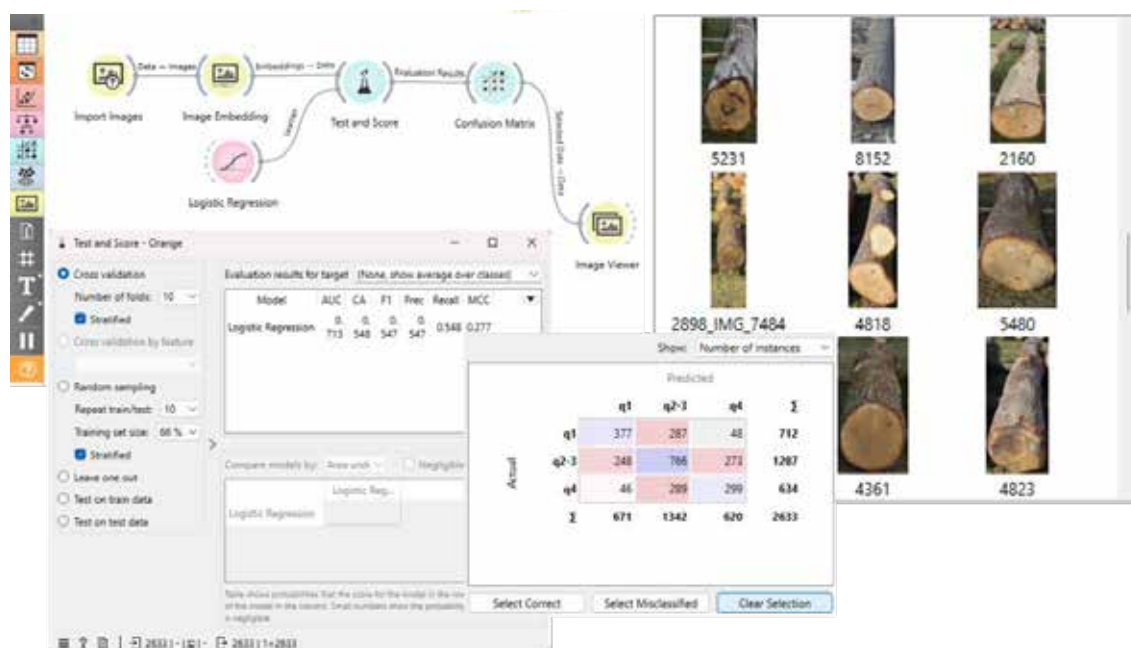
V študiji smo uporabili programsko orodje Orange (različica 3.38.1) [13], ki je brezplačno odprtokodno vizualno programsko orodje [14].

Slika 1 prikazuje potek dela pri razvrščanju slik. Z uporabo pripomočka »Import Images« smo uvozili slike, nato pa jih s pripomočkom »Image Embedding« pretvorili v vektorje, s čimer je nastala podatkovna tabela. Pripomoček »Image Embedding« uporablja aktivacije iz predzadnje plasti vnaprej usposobljene nevronske mreže, da slike predstavlja kot vektorje značilnosti za poteke nadzorovanega strojnega učenja [14]. Ta pristop izkorišča robustno ekstrakcijo značilnosti nevronske mreže za pretvorbo kompleksnih vizualnih podatkov v format, primeren za klasifikacijo in regresijo [15]. Pripomoček »Image Embedding« ponuja različne vnaprej usposobljene vgrajevalce (npr. SqueezeNet, Inception v3, VGG-16, VGG-19, Painters, DeepLoc) in omogoča obdelavo lokalno ali na oddaljenem strežniku. Uporabili smo Inception v3 [14]. Nevronske mreže niso bile usposobljene na tem nizu podatkov, ampak so bile uporabljene kot fiksni izvlečevalci značilnosti, kar je omogočilo učinkovito uporabo tudi z relativno omejenimi podatki. Ni bilo opravljeno nobeno spreminjanje ali natančno prilagajanje uteži mreže.

Postopek analize podatkov se začne z uvozom slik iz lokalne mape. Slike se posredujejo v program Image Embedder, ki je bil nastavljen na model globoke nevronske mreže Inception V3. Vektorsko vgrajevanje posreduje matriko podatkov v navzkrižno validacijo in pošlje rezultate ocenjevanja v widget Confusion Matrix. Widget Confusion Matrix zagotavlja informacije o napačni klasifikaciji. Izbor določene celice v Confusion Matrix sproži pošiljanje teh slik in njihovih deskriptorjev naprej v Image Viewer.

Pripomoček »Test and Score« je nato na vgrajene podatke uporabil logistično regresijo in zagotovil kazalnike uspešnosti, kot so natančnost razvrščanja, površina pod ROC krivuljo, F1-score, natančnost, pokritost in Matthewsov korelacijski koeficient. Te je mogoče nadalje analizirati s pomočjo ROC krivulje ali matrike zamenljivosti. AUC količinsko opredeljuje sposobnost

Slika 1: Potek dela za razvrščanje slik.



modela za razlikovanje med razredi (lestvica 0–1; $\geq 0,8$ kaže na visoko uspešnost). Natančnost klasifikacije (CA) meri delež pravilno klasificiranih primerov, kar odraža, kako tesno se niz napovedi ujema z njihovimi resničnimi vrednostmi. F1-score je harmonična sredina natančnosti in ponovljivosti [16]. Natančnost (Precision) se nanaša na razmerje resničnih pozitivnih primerov med vsemi primeri, napovedanimi kot pozitivni. Ponovljivost (Recall) označuje delež resničnih pozitivnih primerov med vsemi dejanskimi pozitivnimi primeri v nizu podatkov. Matthewsov korelacijski koeficient (MCC) upošteva resnične in lažne pozitivne ter negativne primere in je splošno priznan kot uravnotežena metrika, primerna tudi takrat, ko so porazdelitve razredov zelo neenakomerne.

Za oceno zanesljivosti klasifikacije smo uporabili stratificirano 10-kratno navzkrižno validacijo: nabor podatkov je bil razdeljen na 10 delov. Vsak del je bil enkrat

uporabljen za testiranje, preostali deli pa za usposabljanje. Za testiranje je bila uporabljena logistična regresija z L2-regularizacijo ($C = 1$).

Navedene vrednosti (npr. natančnost razvrščanja, AUC, F1-score predstavljajo povprečno učinkovitost v vseh delih. V zadnjem koraku je bil za vizualizacijo učinkovitosti razvrstitvenih modelov uporabljen widget »Confusion Matrix«, ki prikazuje število pravih pozitivnih, pravih negativnih, napačnih pozitivnih in napačnih negativnih napovedi. Navedene vrednosti temeljijo na združenih napovedih iz postopka navzkrižne validacije.

REZULTATI:

Preglednica 1 prikazuje rezultate razvrščanja sortimentov po vrednosti. Najbolj natančno razvrščanje je bilo doseženo pri evropskem macesnu (55,3 %), sledil pa mu je hrast graden, pri katerem je bilo pravilno razvrščenih

Preglednica 1: rezultati razvrščanja sortimentov po vrednosti.

Podatkovna zbirka	Embedder	Površina pod krivuljo	Natančnost razvrščanja	F1	Natančnost	Prepoznavnost	Matthewsov korelacijski koeficient
Evropski macesen	Inception v3	0.694	0.553	0.553	0.554	0.553	0.319
Navadna smreka	Inception v3	0.568	0.404	0.401	0.400	0.404	0.076
Hrast graden	Inception v3	0.713	0.548	0.547	0.547	0.548	0.277
Gorski javor	Inception v3	0.608	0.452	0.450	0.450	0.452	0.124

1442 od 2634 sortimentov (54,8 %). Najmanj natančno razvrščanje je bilo pri navadni smreki, pri kateri je bilo pravilno razvrščenih 338 od 837 sortimentov (40,4 %).

DISKUSIJA:

V študiji smo preučili izvedljivost strojnega učenja na podlagi slik za ocenjevanje vrednosti sortimentov. Glavni cilj je bil ugotoviti, ali lahko okolje za analizo slik Orange zagotovi natančne in uporabne rezultate za gozdarske naloge, kot je ocenjevanje vrednosti sortimentov. Ta metodologija je temeljila na modelu Inception v3, ki mu je sledila logistična regresija z L2-regularizacijo in 10-kratno navzkrižno validacijo.

Naša študija je presegla okvire preproste klasifikacije, saj je razvrščala zbirko sortimentov na podlagi tržne vrednosti. To je zapletena naloga, ki zahteva natančno razumevanje lastnosti lesa in dinamike trga. Rezultati kažejo, da slikovne značilnosti, pridobljene z vnaprej naučenim modelom globokega učenja, vsebujejo določeno informacijo, povezano s tržno vrednostjo sortimentov. Vendar dosežena natančnost kaže, da sama slikovna informacija v uporabljeni obliki še ne zadostuje za zanesljivo razvrščanje sortimentov po vrednosti.

Podobno so študije, ki uporabljajo prenos znanja za razvrščanje rastlinskih bolezni [17] in prepoznavanje rastlinskih vrst na podlagi vzorcev listnih žil, pokazale zanesljive rezultate, kar potrjuje uporabnost takšnih metod v botaničnem kontekstu [18].

Omejitev te študije je, da temelji na enem samem nizu podatkov, pridobljenem iz licitacije lesa in na vgrajenem modelu, ki je na voljo v okviru programa Orange. Razširitev teh metod na ocenjevanje vrednosti sortimentov ostaja precejšen izziv. Da bi to izboljšali, bi bilo treba v prihodnjih raziskavah preučiti multimodalne pristope, ki združujejo analizo slik z drugimi viri podatkov, kot so 3D-skeniranje, podatki o poreklu ali ročno ocenjevanje napak, s čimer bi izboljšali učinkovitost napovedovanja vrednosti [15]. Poleg tega bo potrebno testiranje na bolj raznolikih in terenskih zbirkah slik, da se potrdi robustnost modela v realnih operativnih pogojih. Poleg uporabe vnaprej usposobljenega modela, kot je Inception v3, ki je bil prvotno usposobljen na splošnih zbirkah podatkov, kot je ImageNet, bi bila obetavna smer razvoja domensko specifičnega modela globokega učenja, usposobljenega neposredno na gozdarskih podatkih, opremljenih z znanimi vrednostmi sortimentov. Tak model bi se lahko naučil podrobnih značilnosti kakovosti lesa in lastnosti sortimentov, ki niso prisotne v splošnih zbirkah podatkov slik, kar bi potencialno omogočilo natančnejšo klasifikacijo na podlagi vrednosti. Čeprav bi ta pristop zahteval sestavo

obsežne, reprezentativne zbirke podatkov o sortimentih z natančno opredeljenimi oznakami vrednosti, bi to predstavljalo pomemben korak k praktični in prilagodljivi rešitvi za avtomatizirano vrednotenje sortimentov.

LITERATURA IN VIRI:

Yu, Z.; Zhang, B.; Ma, T.; Zhang, M.; Wang, S.; He, M.; Ji, W.; Li, H.; Feng, Z.; Wang, Z. Single-image estimation of tree volume via pixel-mapped 3D reconstruction: A low-cost solution using deep learning and curvature segmentation. *Sci. Total Environ.* 2025, 1002, 180420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180420>.

Keefe, R.F.; Zimbelman, E.G.; Picchi, G. Use of Individual Tree and Product Level Data to Improve Operational Forestry. *Curr. For. Rep.* 2022, 8, 148–165. <https://doi.org/10.1007/s40725-022-00160-3>.

Tran, H.; Woeste, K.; Li, B.; Verma, A.; Shao, G. Measuring tree stem diameters and straightness with depth-image computer vision. *J. For. Res.* 2023, 34, 1395–1405. <https://doi.org/10.1007/s11676-023-01600-x>.

Vacek, O.; Gergel, T.; Bucha, T.; Gracovský, R.; Gejdoš, M. Automatic Wood Species Classification and Pith Detection in Log CT Images. *Forests* 2024, 15, 2207. <https://doi.org/10.3390/f15122207>.

Fard, F.H.; Fard, S.H.; Jonoobi, M. A Low-Cost Machine Learning Approach for Timber Diameter Estimation. *arXiv* 2025, arXiv:2507.17219. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.17219>.

Wimmer, G.; Schraml, R.; Hofbauer, H.; Uhl, A. Two-Stage CNN-Based Wood Log Recognition; University of Applied Sciences Salzburg: Salzburg, Austria, 2021; 4p.

Vihlman, M.; Kulovesi, J.; Visala, A. Tree Log Identity Matching using Convolutional Correlation Networks. In *Proceedings of the 2019 Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA)*, Perth, Australia, 2–4 December 2019; pp. 1–8.

Wang, Y.; Zhang, W.; Gao, R.; Jin, Z.; Wang, X. Recent advances in the application of deep learning methods to forestry. *Wood Sci. Technol.* 2021, 55, 1171–1202. <https://doi.org/10.1007/s00226-021-01309-2>.

Grondin, V.; Fortin, J.-M.; Pomerleau, F.; Giguère, P.; Fassnacht, F. Tree detection and diameter estimation based on deep learning. *For. Int. J. For. Res.* 2023, 96, 264–276. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpac043>.

Holmström, E.; Raatevaara, A.; Pohjankukka, J.; Korpunen, H.; Uusitalo, J. Tree log identification using convolutional neural networks. *Smart Agric. Technol.* 2023, 4, 100201. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100201>.

Triplat, M.; Kavčič, V.; Jež, M. Forest Log Assortments Photo Dataset from the 2023 Slovenj Gradec Timber Auction; Slovenian Forestry Institute: Ljubljana, Slovenia, 2025. <https://doi.org/10.20315/Data.0006>.

Katalog Sortimentov, 17. Licitacija Vrednejših Sortimentov Lesa—Wertholzsubmission; Društvo Lastnikov Gozdov Mislinjske Doline, Zveze Lastnikov Gozdov Slovenije: Slovenj Gradec, Slovenia, 2023; 435p.

Demšar, J.; Curk, T.; Erjavec, A.; Gorup, Č.; Hočevar, T.; Možina, M.; Polajnar, M.; Toplak, M.; Starič, A.; Štajdohar, M.; et al. Orange: Data Mining Toolbox in Python. *J. Mach. Learn. Res.* 2013, 14, 2349–2353.

Godec, P.; Pancur, M.; Ilenic, N.; Copar, A.; Strazar, M.; Erjavec, A.; Pretnar, A.; Demšar, J.; Starič, A.; Toplak, M.; et al. Democratized image analytics by visual programming through integration of deep models and small-scale machine learning. *Nat. Commun.* 2019, 10, 4551. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12397-x>.

Achatz, J.; Lukovic, M.; Hilt, S.; Lädach, T.; Schubert, M. Convolutional neural networks for quality and species sorting of roundwood with image and numerical data. *Expert. Syst. Appl.* 2024, 246, 123117. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.123117>.

Shin, S.J.; Kim, H.; Han, S.-T. Comparison of the Performance Evaluations in Classification. *Ijarccce* 2016, 5, 441–444. <https://doi.org/10.17148/ijarccce.2016.5890>.

Sai, N.R.; Rao, T.S.; Kumari, G.L.A. Comparative Study on Reliability of Transfer Learning to Classify Plant-Based Diseases. *Int. J. Eng. Adv. Technol.* 2021, 10, 154–160. <https://doi.org/10.35940/ijeat.F3080.0810621>.

Bharadwaj, B.; Mishra, A.; Bharadwaj, S. Transfer Learning-Based CNN Models for Plant Species Identification Using Leaf Venation Patterns. *arXiv* 2025, arXiv:2509.03729. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2509.03729>.

KLJUČNE BESEDE:

Razvrščanje slik; kakovost lesa; strojno učenje v gozdarstvu.

ZAHVALE:

Zbiranje podatkov za to študijo sta sofinancirala MKGP ter ARIS v okviru projekta V4-2013. Študijo je podprla tudi raziskovalna skupina (P4-0107), ki jo financira ARIS.

Možnosti pridobivanja nanoceluloze z ultra finim mletjem lesne biomase

Kramarič Luka¹, Hrovatič Peter¹, Osolnik Urša¹, Poljanšek Ida¹, Vek Viljem¹, Oven Primož¹

¹ Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Katedra za kemijo lesa in drugih lignoceluloznih materialov

E-naslov: luka.kramaric@bf.uni-lj.si, primoz.oven@bf.uni-lj.si



POUDARKI:

- Celuloza je najbolj razširjen organski polimer na Zemlji in predstavlja potencialen vir za kemijske spojine in materiale z visoko dodano vrednostjo, kot je npr. nanoceluloza
- Nanoceluloza je naraven obnovljiv material prihodnosti z izjemnimi lastnostmi in širokim področjem uporabe
- Znane oblike nanoceluloze so celulozni nanokristali (CNC), celulozne nanofibrile (CNF) in bakterijska nanoceluloza (BNC)
- Lignocelulozne nanofibrile (LCNF) so posebna oblika nanofibrilirane celuloze, pri katerih se lignin v veliki meri ohrani
- Z ultra finim mlinom Masuko je mogoče izolirati lignocelulozne nanofibrile LCNF iz lesne biomase in ostankov industrijske predelave lesa

UVOD:

Gozd in les imata pomembno vlogo v razvoju sodobnega biogospodarstva. Les je obnovljiv vir, ki omogoča razvoj materialov z nižjim okoljskim odtisom in visoko dodano vrednostjo. Svetovni gozdovi, po podatkih Organizacije Združenih narodov za prehrano in kmetijstvo (FAO), letno ustvarijo velike količine (10^9 m³) nove lesne biomase (FAO, 2025), in s tem iz ozračja vežejo več gigaton ogljika (FAO, 2025b). Ob tem neto prirast lesne in druge gozdne biomase ob trenutnih trendih še vedno pomembno presega globalno rabo lesa in lesnih proizvodov, kar pomeni tudi stalen naravni prirast celuloze kot osnovne strukturne komponente lesa. V kontekstu podnebnih sprememb in prehoda v podnebno nevtralno družbo to pomeni, da je celuloza eden redkih materialov, katerih obnavljanje poteka kontinuirano in na globalni ravni. Celulozo se zato umešča med ključne trajnostne surovine krožnega gospodarstva prihodnosti. Učinkovita raba celuloze ter njenih derivatov predstavlja pomemben prispevek k dolgoročni trajnostni rabi gozdnih virov in zmanjševanju odvisnosti od fosilnih surovin.

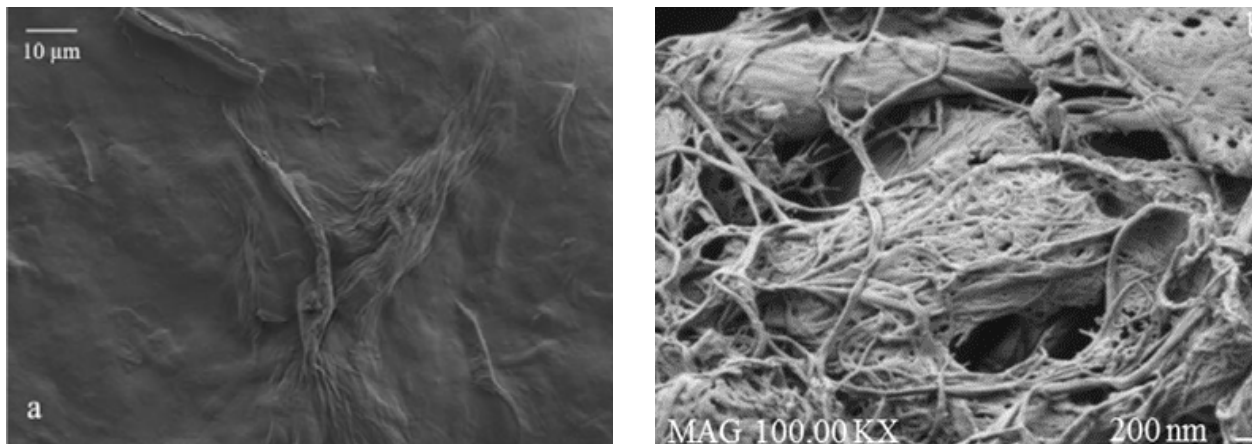
Eden izmed derivatov celuloze je nanoceluloza. Zaradi svoje izjemno majhne velikosti, velike specifične površine in dobrih mehanskih lastnosti je prepoznana kot perspektiven material prihodnosti (Dufresne, 2017). Širok potencial uporabe je poleg

lastnosti glavni razlog za vedno večjo komercialno zanimivost nanoceluloze. Po napovedih Global Market Insights (Nanocellulose Market Size & Share, Growth Analysis Report 2035, b. l.), se bo svetovni trg nanoceluloznih produktov iz zdajšnjih 967 mio. \$, do leta 2035 povečal na 9,5 mrd. \$.

Namen prispevka je predstaviti uporabnost in različne tipe nanoceluloze, postopke pridobivanja ter konceptualno prikazati možnost uporabe ultra finega mlina Masuko za proizvodnjo LCNF iz industrijske žagovine.

Nanoceluloza je skupno ime za materiale na osnovi celuloze, pri katerih je vsaj ena dimenzija v nanometriškem območju (Dufresne, 2017). Uporablja se na številnih področjih. V papirništvu izboljšuje mehanske ter barijerne lastnosti papirja, in zadrževanje polnil. V premazih in lepilih deluje kot naravni reološki modifikator. V farmaciji in zdravstvu se uporablja v obliki suspenzij, hidrogelov in aerogelov (Levanič in sod., 2020). Zaradi dobre biokompatibilnosti je primerna za nosilce zdravilnih učinkovin in tkivni inženiring (Nechyporchuk in sod., 2016). V kombinaciji z drugimi materiali predstavlja alternativo plastični embalaži, predvsem folijam za embalažo živil (Osolnik in sod., 2024). V zadnjem času se povečuje tudi zanimanje za uporabo nanoceluloze v gradbeništvu, kjer se preučuje njen vpliv na

Slika 1: a) Mikroskopska slika embalažnega filma z dodano LCNF (Osolnik in sod., 2024); b) Nanofibrilirana celuloza, (Žepič in sod., 2016)



mehanske lastnosti trajnostnih veziv, bioosnovanih kompozitov in izolacijskih materialov (Nechyporchuk in sod., 2016).

Glede na način pridobivanja in morfologijo razlikujemo več vrst nanoceluloze. Celulozni nanokristali (CNC) so kratki in togi delci z visoko kristaliničnostjo, premerom 3–35 nm in dolžino 200–500 nm. Pridobivajo se predvsem s kislinsko hidrolizo, pri kateri se odstranijo neurejeni-amorfni deli celuloznih verig. Bakterijsko nanocelulozo lahko po t.i. »ground up« principu sintetizirajo bakterijski mikroorganizmi, iz rodu Komagataeibacter oz. Gluconacetobacter. Sestavljena je iz zavitih rebrastih vlaken preseka 3-4 x 70-140 nm in dolžine več µm, ter je zelo čista, vendar proizvodno dražja (Dufresne, 2017). Celulozne nanofibrile (CNF) so dolge (več µm) in fleksibilne fibrile s premerom 5-50 nm, ki nastanejo z mehansko razgradnjo celuloznih makrofibril iz lesnih ali drugih vlaken, pogosto ob pomoči predobdelav (Nechyporchuk in sod., 2016). Imajo visoko razmerje med premerom in dolžino ter elastični modul kar 143 GPa (Dufresne, 2017). Posebno skupino predstavljajo lignocelulozne nanofibrile (LCNF), pri katerih je lignin v veliki meri ohranjen. Prisoten lignin vpliva

na površinske lastnosti materiala in omogoča energetsko ugodnejše postopke pridobivanja. Raziskovanju CNF in LCNF se intenzivno posvečamo na Katedri za kemijo lesa in drugih lignoceluloznih materialov na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete (Osolnik in sod., 2024). Predmet raziskav v teku je predvsem optimizacija procesa pridobivanja nanofibrilirane celuloze iz pogostih domačih lesnih vrst (npr. bukovina in smrekovina), kar bo na kratko predstavljeno v nadaljevanju.

Pridobivanje nanofibrilirane celuloze (NFC): Proces pridobivanja nanofibrilirane celuloze je sestavljen iz večih faz in poteka s kombinacijo kemičnih, encimskih in mehanskih postopkov (Nechyporchuk in sod., 2016), prikazanih na Sliki 2. Mehanski postopki predstavljajo ključni korak pri razvlaknjevanju celične stene. Različne kemične in encimske predobdelave izboljšajo morfologijo končnega produkta in zmanjšajo potrebno energijo za mehansko obdelavo (Nechyporchuk in sod., 2016). Sam proizvodni proces ima veliko parametrov, odvisnih od surovinskega vira in željenih končnih lastnosti CNF.

Slika 2: Shema proizvodnega procesa pridobivanja CNF



Ultra fin mlin Masuko Supermasscolloider MKCA6-5J (Slika 3 levo), je uporaben za mletje materialov v različnih industrijah, npr. v živilstvu in kemični industriji. Na področju nanoceluloze omogoča učinkovito mehansko fibrilacijo celuloznih in lignoceluloznih materialov brez intenzivnih kemičnih predobdelav (Nechyporchuk in sod, 2016). Primeren je za laboratorijsko delo in je sestavljen iz dveh neporoznih keramičnih diskov - rotorja in statorja (Slika 3 - desno). Diska imata rebra in utore, ki med vrtenjem rotorja ustvarjajo tlačne in strižne sile na vlakna, ter rušijo strukturo celične stene. Posledica teh sil je ločitev celuloznih vlaken iz strukture celičnih sten, in njihova cepitev po longitudinalni osi. Mletje se izvaja stopenjsko, pri hitrosti približno 1500 rpm, pri čemer se razmik med diski postopoma znižuje. Slednje omogoča postopno cepitev vlaken v nanofibrile z enakomernim premerom okrog 15nm.

Omenjeni mlin lahko predela tudi lesni prah, žagovino ter druge lesne ostanke do LCNF. Ohranjanje lignina zmanjšuje potrebo po kemičnih obdelavah, znižuje stroške procesa ter povečuje privlačnost postopka za industrijske obrate v gozdno lesni verigi.

LITERATURA IN VIRI:

Dufresne A. 2017. Nanocellulose: From Nature to High Performance Tailored Materials. V: Nanocellulose: From Nature to High Performance Tailored Materials. De Gruyter, <https://doi.org/10.1515/9783110480412>

FAO. 2025. Forest emissions and removals. Global, regional and country trends 1990–2025. Rome, Italy, FAO, <https://doi.org/10.4060/cd7163en>

Levanič J., Poljanšek I., Vek V., Narat M., Oven P. 2020. Chlorhexidine digluconate uptake and release from alkane-crosslinked nanocellulose hydrogels and subsequent antimicrobial effect. *BioResources*, 15, 2: 3458–3472, <https://doi.org/10.15376/biores.15.2.3458-3472>

Nanocellulose Market Size & Share, Growth Analysis Report 2035. Global Market Insights Inc., <https://www.gminsights.com/industry-analysis/nanocellulose-market> (6. maj 2026)

Nechyporchuk O., Belgacem M. N., Bras J. 2016. Production of cellulose nanofibrils: A review of recent advances. *Industrial Crops and Products*, 93: 2–25, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.02.016>

Osolnik U., Vek V., Humar M., Oven P., Poljanšek I. 2024. (Ligno)Cellulose Nanofibrils and Tannic Acid as Green Fillers for the Production of Poly(vinyl alcohol) Biocomposite Films. *Polymers*, 17, 1: 16, <https://doi.org/10.3390/polym17010016>

Slika 3: Ultra fini mlin Masuko (levo), keramična diska za mletje (desno) v laboratoriju za biorafinacijo Katedre za kemijo lesa in drugih lignoceluloznih materialov.



Žepič V., Poljanšek I., Oven P., Čop M. 2016. COST-FP1105: Properties of PLA films reinforced with unmodified and acetylated freeze dried nanofibrillated cellulose. *Holzforschung*, 70, 12: 1125–1134, <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0096>

KLJUČNE BESEDE:

Lesna biomasa, Nanoceluloza, ultra fini mlin Masuko

ZAHVALE:

Avtorji se zahvaljujemo za finančno podporo programski skupini P4-0015 – Les in lignocelulozni kompoziti, ki jo financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS). Prispevek je nastal v okviru CRP projekta V4-2512 Simulacija in optimizacija potencialnih načinov valorizacije lesa slabše kakovosti v Sloveniji, ki ga sofinancirata ARIS in Ministrstvo za gospodarstvo, turizem in šport (MGTŠ), BAPUR.

CC BY SA · DOI 10.20315/SFS.191.13

Izboljšanje adhezije površine lesa z obdelavo z netermično atmosfersko plazmo

Klemen Kotnik¹, Milan Šernek¹

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

E-naslov: klemen.kotnik@bf.uni-lj.si



POUDARKI:

- Zaradi podnebnih sprememb se sestava gozdov spreminja - povečuje se delež listavcev.
- Adhezijo med lepilom in lesom lahko izboljšamo z ustrežno pripravo površine lesa.
- Plazemska obdelava se pogosto uporablja za spreminjanje lastnosti površin materiala.
- Na osnovi rezultatov delaminacije lepilnih spojev lahko trdimo, da ima obdelava s plazmo pred lepljenjem z MUF lepilom vpliv na adhezijo pri bukovih lepljencih.

VSEBINA:

Zaradi večje okoljske ozaveščenosti in splošnega trenda k trajnostni gradnji ter zmanjševanju ogljičnega odtisa postaja les v gradnji vse bolj zanimiva alternativa jeklu in betonu. V gradbeništvu se uporabljajo predvsem iglavci, bodisi kot masiven žagan konstrukcijski les ali kot lepljen lameliran les (GLULAM) in križno lameliran les (CLT). Na tem področju se pojavljajo precejšnje spremembe, saj se sestava gozdov zaradi podnebnih sprememb spreminja in nakazuje večji delež listavcev (Slika 1). To pomeni, da bo potrebno v bližnji prihodnosti za proizvodnjo kompozitov na osnovi lesa uporabiti več listavcev, zato so temeljne raziskave o lepljenju teh lesnih vrst ključnega pomena. Lepljenje ima pomembno vlogo pri lesenih nosilnih konstrukcijah. Če pride do nezadostne adhezije, lahko lepilni spoj zaradi vlage ali toplote popusti ali se celo poruši. Adhezijo med lepilom in lesom lahko izboljšamo z ustrežno pripravo površine lesa, kjer podlage običajno predhodno obdelamo, da povečamo hrapavost in/ali prosto površinsko energijo ter tako zagotovimo boljši oprijem (Frihart & Hunt, 2017).

To dosežemo z uporabo različnih tradicionalnih tehnik, kot sta brušenje in skobljanje. Površine lahko tretiramo s kemikalijami, ki spremenijo kemijsko sestavo površine lesa, ali z raznimi encimi in temelji (Šernek in sod., 2004).

Plazemska obdelava je sodoben pristop k tretiranju površin z namenom izboljšanja adhezije. Reaktivni delci plazme ob stiku s površino materiala povzročajo kemijske

Slika 1: Shema raziskovalnega problema



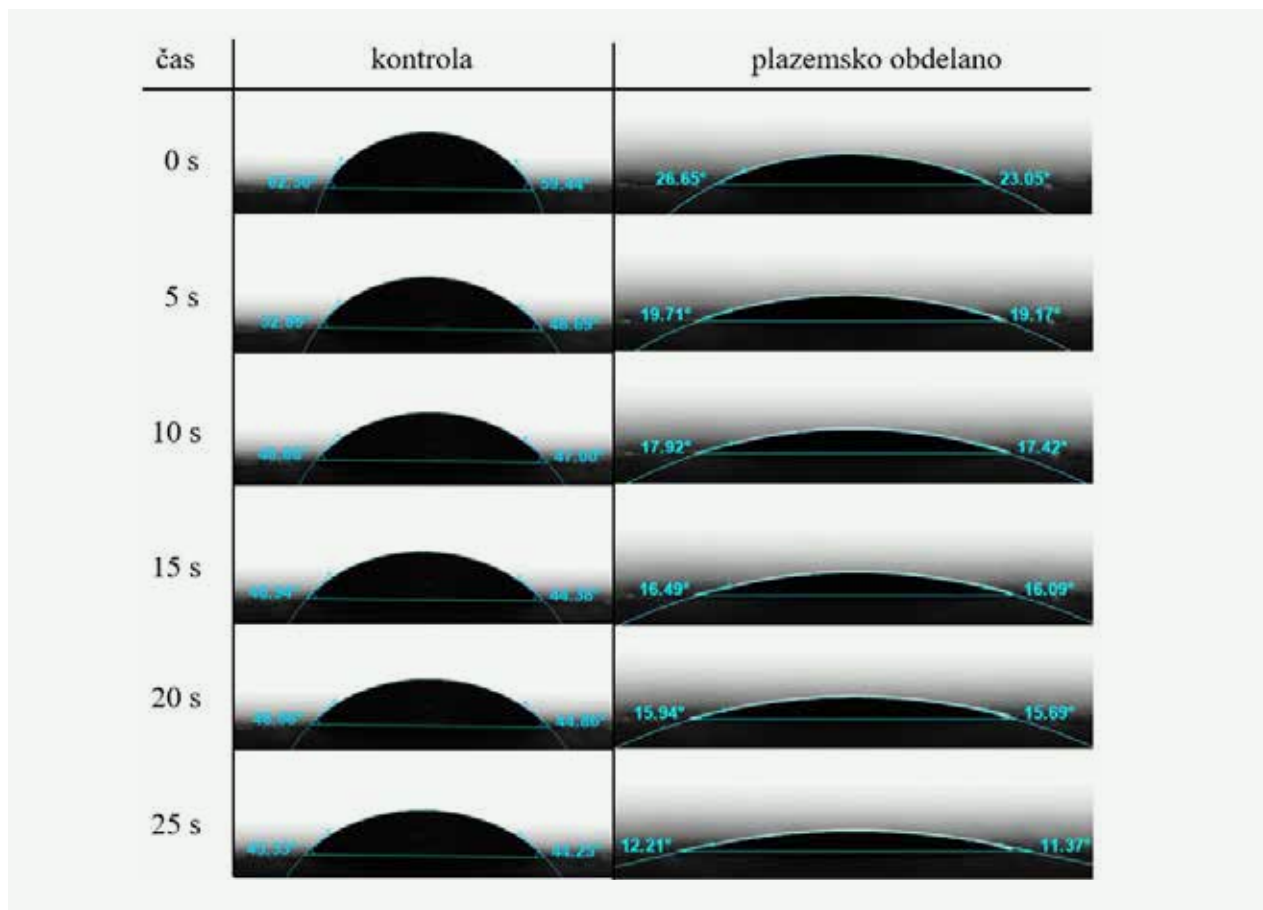
reakcije, ki vodijo do spremembe njegove kemijske sestave (Blanchard in sod., 2009). Plazma ne vsebuje le nabitih delcev, kot so elektroni in ioni, ampak tudi reaktivne radikale (npr. O, H, OH), reaktivne molekule (npr. N₂, O₃) in fotone (Penetrante in sod., 1997). Najbolj očitne spremembe so aktivacija površine lesa, povečanje proste površinske energije, boljša omočitev površine lesa in izboljšana penetracija (absorpcija).

V tej raziskavi smo proučevali vpliv obdelave z netermično plazmo na lepljenje navadne bukve (*Fagus sylvatica* L.) in smreke (*Picea abies* Karst.) z melamin-urea-formaldehidnim (MUF) lepilom. V prvem delu raziskave smo izvedli preizkuse delaminacije, v drugem delu pa dva različna tipa strižnih testov (EN 14080:2013 in EN 302-1:2023). Pri obeh delih raziskave je bila polovica lamel pred lepljenjem obdelana z netermično plazmo, druga polovica pa je ostala neobdelana in je predstavljala kontrolno skupino. Za izdelavo lepljencev smo uporabili les navadne bukve in smreke. Iz celotnega nabora lesa smo izbrali material brez vidnih napak (grče, razpoke, diskoloracije) in s polradialno usmeritvijo vlaken glede na lepilno površino. Plazemska obdelava je potekala s Plasmateat Openair® enoto v podjetju Rogač Plus d. o. o. (Orehova vas, Slovenija). Plazemsko obdelane lamele smo takoj po obdelavi zložili v sestavo lepljencev in jih zaščitili z aluminijasto folijo, da ne bi prišlo do kontaminacije obdelanih površin in minimalne deaktivacije površin. Pred lepljenjem smo na vsaki lameli izmerili kontaktni kot s kapljico destilirane vode na Theta goniometru. Netermična plazemska obdelava je kontaktni kot destilirane vode zmanjšala za 62,6 %, kar kaže na izboljšano omočljivost površine lesa.

Iz izdelanih lamel smo zlepili 12 lepljencev: 4 iz bukovine, 4 iz smrekovine in 4 hibridne, pri katerih sta bili zunanji lameli iz bukovine, notranja pa iz smreke. Kvaliteto lepilnih spojev smo ovrednotili s testiranjem delaminacije in strižne trdnosti v skladu s standardom EN 14080:2013. Naknadno smo izdelali še strižne preizkušance v skladu s standardom EN 302-1:2023. V omenjenem standardu so določeni razredi tretiranja (A1-A5) preizkušancev pred izvedbo strižnega testa. V vsakem razredu tretiranja smo strižno testirali 10 kontrolnih in 10 plazemsko obdelanih preizkušancev. Testiranje strižne trdnosti lepilnih spojev je potekalo na računalniško podprtem univerzalnem testirnem stroju Z100 (Zwick/Roell). Preizkušance smo vstavili v posebno kovinsko čeljust in vsak posamezen lepilni spoj strižno obremenili s hitrostjo 5 mm/min do porušitve. Po porušitvi smo lepilnim spojem vizualno ocenili delež loma po lesu na 10 % natančno (0–100 %).

Netermična plazemska obdelava je kontaktni kot destilirane vode zmanjšala za 62,6 %, kar kaže na izboljšano omočljivost površine lesa (Slika 2). Ugotovili smo, da plazemska obdelava ni bistveno vplivala na strižno trdnost lepilnih spojev pri standardnem testiranju po EN

Slika 2: Rezultati merjenja kontaktnih kotov na bukovih lamelah



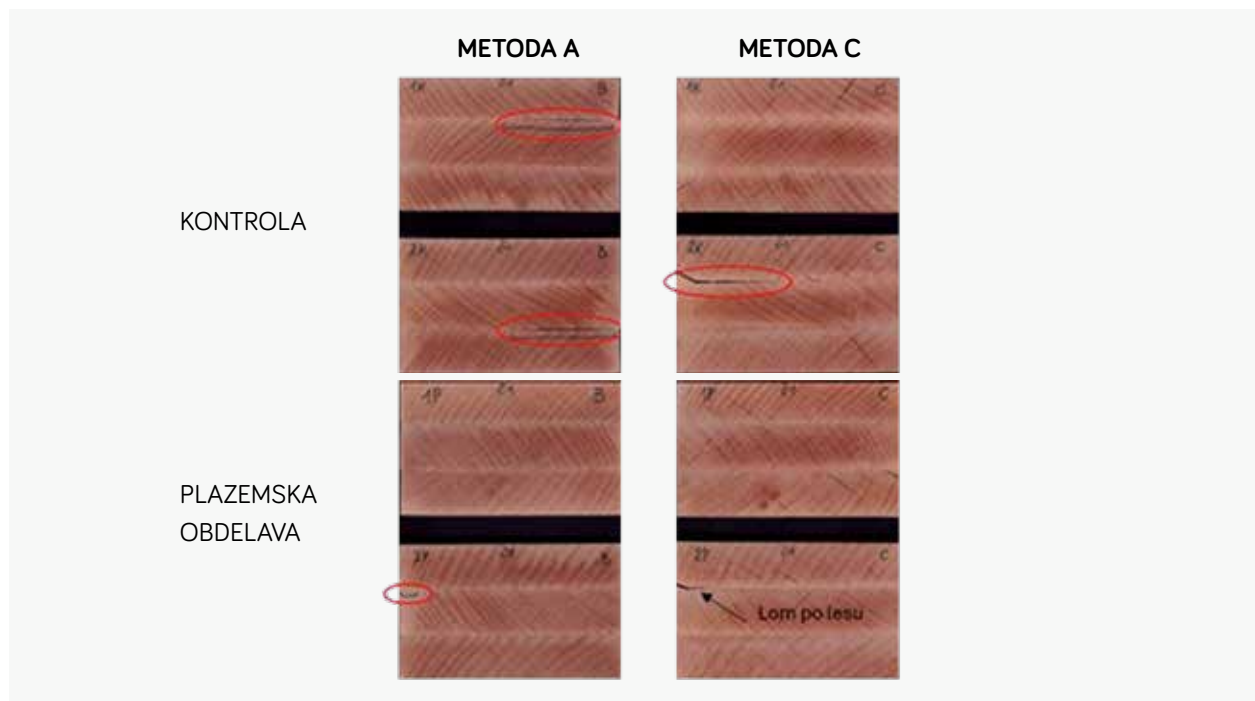
14080:2013. Tako kontrolni kot s plazmo obdelani lepljenci so izkazovali podobne strižne trdnosti znotraj istega tipa nosilca (bukov, smrekov in hibridni), lom lepilnih spojev pa je v večini primerov potekal po lesu. Tudi lepilni spoji, ki so imeli manjši delež loma po lesu, so dosegli predpisano vrednost strižne trdnosti (10 MPa).

Ugotovili smo, da so kontrolni smrekovi in hibridni preizkušanci ter vsi preizkušanci, ki so bili pred lepljenjem obdelani s plazmo, ustrezali standardnim zahtevam z vidika delaminacije. Do prekomerne delaminacije je prišlo le pri kontrolnih bukovih preizkušancih, ki so imeli po metodi B celotno delaminacijo nad 25 % (slika 3). Na osnovi rezultatov delaminacije lepilnih spojev lahko trdimo, da ima

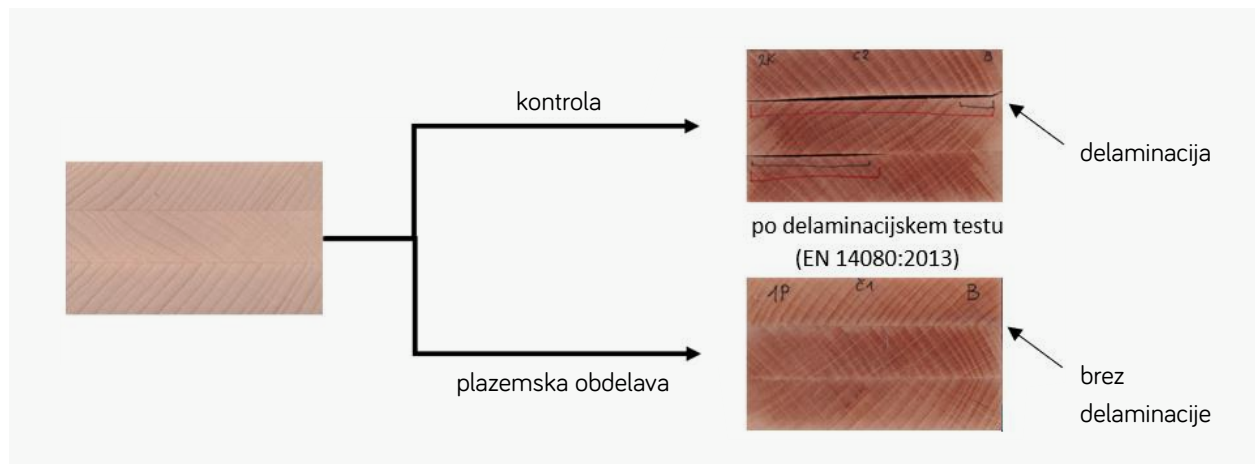
obdelava s plazmo pred lepljenjem z MUF lepilom vpliv na adhezijo pri bukovih lepljencih (slika 4), medtem ko je bilo lepljenje smrekovih in hibridnih lepljencev kakovostno tako z kot brez obdelave površin s plazmo.

Pri strižnih testih po standardu EN 302:2013 smo ugotovili, da je imela plazemska obdelava največji vpliv pri preizkušancih, ki so bili namočeni v hladno ali vrelo vodo (razredi tretiranja A3–A5), kjer je plazemska obdelava značilno izboljšala adhezijo med lesom in lepilom, saj je bila povprečna strižna trdnost večja (slika 5). Statistično značilne razlike so se pokazale pri strižnih testih v razredih A3–A5.

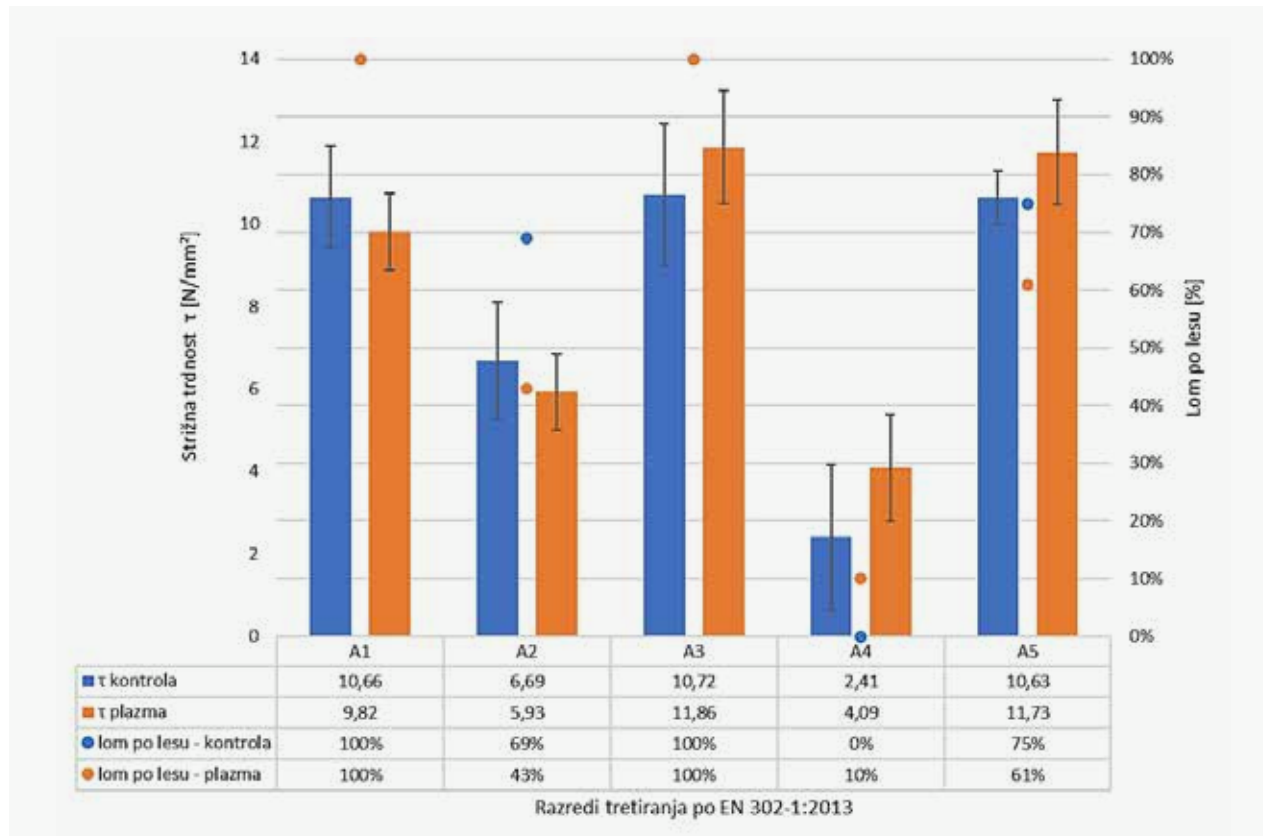
Slika 3: Rezultati delaminacijskega testa po metodi B in C pri bukovih preizkušancih



Slika 4: Delaminacija kontrolnega in plazemsko obdelanega bukovega lepljenca



Slika 5: Rezultati strižnega testa (SIST EN 302-1:2013)



LITERATURA IN VIRI:

Blanchard, V., Blanchet P., Riedl B. (2009). Surface energy modification by radiofrequency inductive and capacitive plasmas at low pressures in sugar maple: An exploratory study. *Wood and Fiber Science*, 41, 3: 245–254

Frihart, C. & Hunt, C. (2017). Adhesives with wood materials : bond formation and performance. <https://www.semanticscholar.org/paper/Adhesives-with-wood-materials%3A-bond-formation-and-Frihart-Hunt/4c87859c793a37332484c4c9ecde9e14d12ddc8d>

Penetrante, B. M., Hsiao, M. C., Bardsley, J. N., Merritt, B. T., Vogtlin, G. E., Kuthi, A., Burkhart, C. P., Bayless, J. R. (1997). Identification of mechanisms for decomposition of air pollutants by non-thermal plasma processing. *Plasma Sources Science and Technology*, 6, 3: 251

Šernek, M., Kamke, F. A., & Glasser, W. G. (2004). Comparative analysis of inactivated wood surfaces. *Holzforschung*, 58(1), 22–31. <https://doi.org/10.1515/HF.2004.004>

KLJUČNE BESEDE:

adhezija, bukev, delaminacija, MUF lepilo, plazma, smreka, strižna trdnost

ZAHVALE:

Prispevek je nastal v okviru raziskovalnega projekta J4-60072, ki ga financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS).

CC BY SA · DOI 10.20315/SFS.191.14

Zamreževanje šelaka s citronsko in fosforno kislino za izboljšanje lepilnih lastnosti

Maks Brus¹, Klemen Kotnik¹, Luka Kramarič¹, Milan Šernek¹

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

E-naslov: maks.brus@bf.uni-lj.si

POUDARKI:

- Zahteve po zmanjšanju emisij formaldehida spodbujajo razvoj naravnih lepil.
- Šelak je naravni poliester, ki ga je mogoče zamrežiti s citronsko kislino, da izpolni zahteve standarda za plastomerna lepila, uporabljena v suhih pogojih (D1).

VSEBINA:

Naraščajoče zahteve po zmanjšanju emisij škodljivih snovi predstavljajo poseben izziv na področju lepil za les. Čeprav imajo sintetična lepila odlične mehanske lastnosti in odpornost proti vodi, jih večina temelji na rakotvornem formaldehidu (urea, melamin, fenol itd.). Alternativa so naravna lepila, ki imajo praviloma nižjo trdnost, predvsem pa bistveno slabšo odpornost proti vodi. Primeri naravnih lepil so taninska, ligninska, proteinska in škrobna lepila ter lepila na osnovi šelaka. Z uporabo zamreževalcev je mogoče izboljšati lastnosti naravnih lepil, pri čemer je treba upoštevati, da morajo biti tudi zamreževalci naravni in netoksični. Šelak je naravni plastomerni poliester, ki ga proizvajajo hrošči *Kerria lacca* in se uporablja kot politurni premaz za različne podlage ter v posebnih primerih kot lepilo. Naše pretekle raziskave so pokazale, da ima dobro trdnost, ki je blizu zahtevam standarda za plastomerna lepila v suhih pogojih (SIST EN 204:2016), vendar je odpornost proti vodi brez dodatnega zamreževanja nizka (Brus et al., 2026). Kot naravni zamreževalec se lahko uporablja citronska kislina (CA), ki je obnovljiva, zdravju neškodljiva in tvori estrske vezi s hidroksilnimi skupinami (Chen et al., 2025; Feng et al., 2014; Šefc et al., 2009). Pogosto se k CA dodaja natrijev hipofosfit (NaH_2PO_2) kot katalizator, ki dehidrira CA v anhidrid in s tem pospeši reakcijo (Feng et al., 2014). V tej raziskavi smo z uporabo različnih analitskih metod (FTIR, DSC, ABES) proučili zamreževanje šelaka s CA kot zamreževalcem in fosforno kislino (H_3PO_4) kot katalizatorjem. Cilj je bil izboljšati mehanske lastnosti v suhem stanju in povečati odpornost proti vodi.

MATERIALI IN METODE:

MATERIALI

Uporabili smo šelak platina (Samson Kamnik d.o.o., Slovenija), citronsko kislino monohidrat (Carlo Erba Reagents SAS, Francija), etanol (Irij d.o.o., Slovenija) in fosforno kislino 85 % (Sigma Aldrich GmbH, Nemčija).

PRIPRAVA LEPILNE MEŠANICE

Lepilno mešanico smo pripravili z raztapljanjem šelaka v etanolu (60 % masni delež), nato pa smo dodali določeno količino zamreževalca (0, 10 in 20 %) ter določeno količino katalizatorja (0; 1,6; 6,7 in 13,3 %).

ZAMREŽEVANJE LEPILNE MEŠANICE

Za določitev učinkovitosti zamreževanja smo tri mešanice (SH, CA20 in CA20P13) segreli v pečici na določeno temperaturo (125, 150 in 175 °C) za določen čas (5, 10, 15, 30 in 60 min). Tako smo kasneje opravili meritve na utrjenem polimeru.

UGOTAVLJANJE KEMIJSKIH SPREMEMB

Za ugotavljanje kemijskih sprememb smo uporabili ATR-FTIR z napravo Perkin Elmer Spectrum Two in UATR nastavkom (PerkinElmer Inc., ZDA). Merilno območje je bilo $650\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$, z ločljivostjo 4 cm^{-1} in 16 posnetki na meritve.

TERMIČNA KARAKTERIZACIJA

Za določitev faznih sprememb in sprememb temperature steklastega prehoda smo uporabili Mettler Toledo DSC1/HP (Mettler Toledo, Švica). Meritve smo izvedli pri normalnem tlaku in nadtlaku 20 bar. Območje segrevanja je bilo od 20 °C do 200 °C s hitrostjo 10 °C/min in pretokom dušika 50 mL/min.

STRIŽNA TRDNOST PRI LEPLJENJU LESA

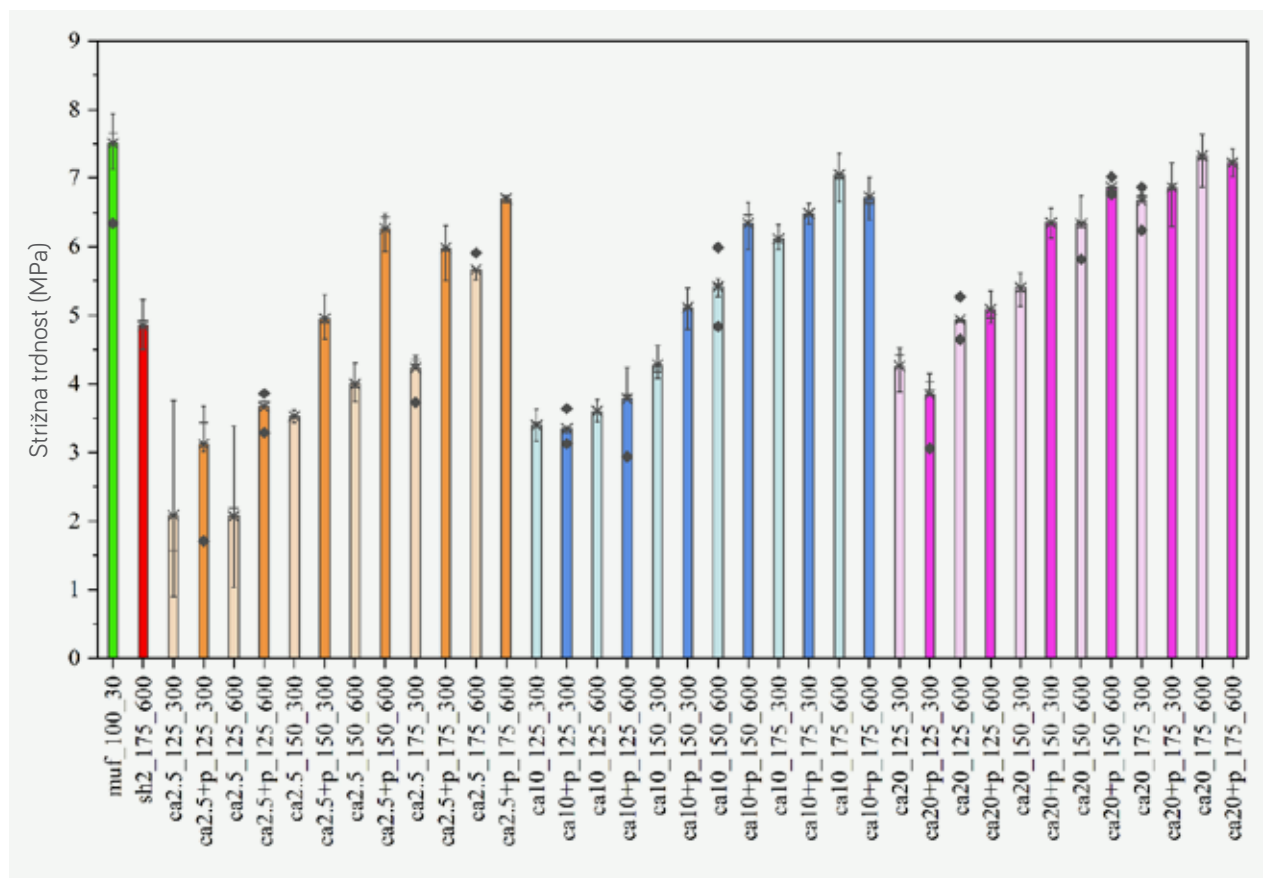
Strižno trdnost spojev z različnimi lepilnimi mešanici smo določali s pomočjo sistema za avtomatizirano vrednotenje strižne trdnosti (ABES). Meritve smo izvedli pri dveh časih (5 in 10 min) ter treh temperaturah (125, 150 in 175 °C) za 9 različnih mešanic in kontrolo. Za 3 najbolj obetajoče kombinacije smo pripravili krivulje rasti strižne trdnosti pri 12 časih (od 15 s do 30 min). Strižno trdnost smo nato validirali z uporabo standardnega preizkusa strižne trdnosti za plastomerna lepila (SIST EN 204:2016 in SIST EN 205:2016).

UGOTOVITVE:

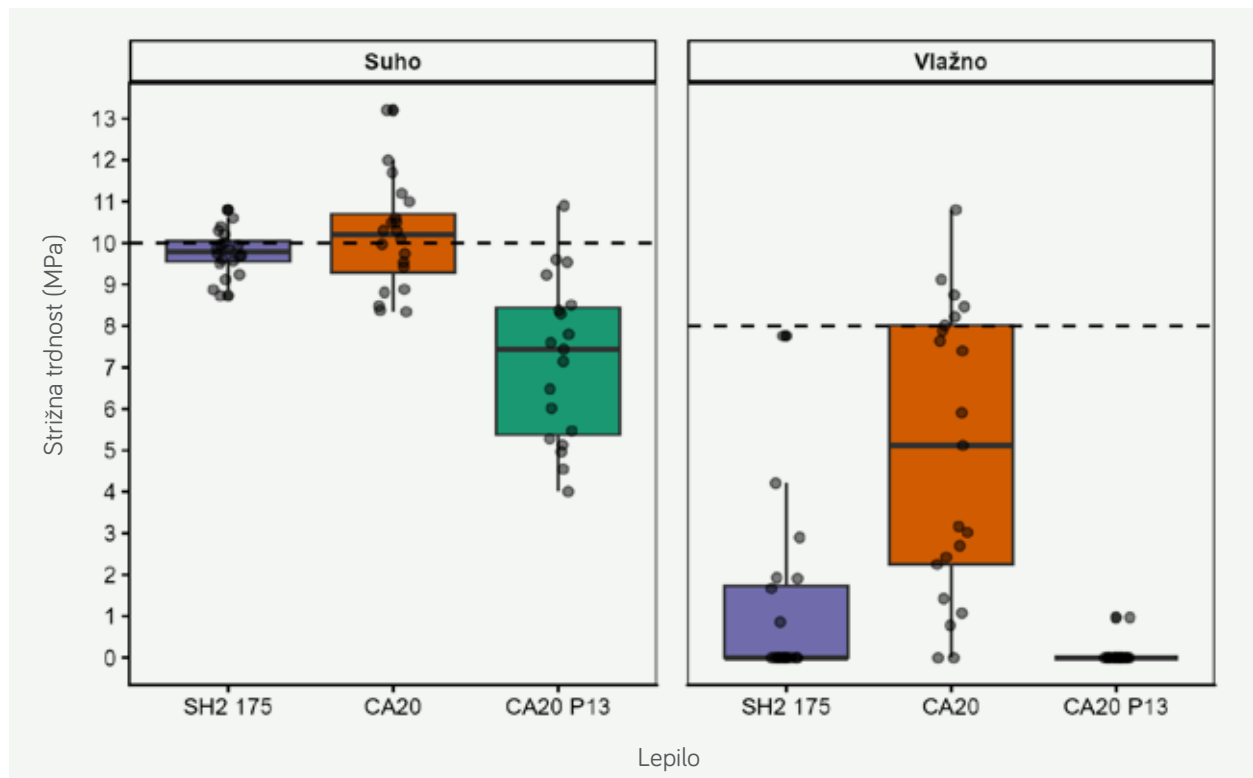
Ugotovili smo, da se z dodatkom CA v različnih koncentracijah povečuje trdnost lepilnega spoja, kar smo povezali z nastankom novih estrskih vezi, potrjenih s FTIR. DSC je pokazal, da z naraščajočo temperaturo zamreževanja narašča tudi temperatura steklastega prehoda, kar potrjuje

nastanek termično obstojnejšega polimera. Z ABES smo ugotovili, da najvišjo trdnost doseže mešanica CA20 (dodatek 20 % citronske kisline k šelaku) pri 175 °C ter da dodatek fosforne kisline povzroči zamreževanje pri nižjih temperaturah (slika 1). Mešanice z dodano fosforno kislino pri enakih pogojih dosežejo višje trdnosti, razen pri času 10 min in temperaturi 150 °C ter 175 °C. Validacija s standardnim testom je pokazala, da ima šelak zamrežen z 20 % CA trdnost nad 10 MPa, kar zadostuje zahtevam za plastomerna lepila v suhih pogojih (D1). Zaznana je bila tudi povečana vodoodpornost v primerjavi s kontrolo (slika 2). Za izboljšanje lastnosti je potrebna optimizacija parametrov lepilne mešanice ob upoštevanju reoloških lastnosti in zagotavljanju ustrezne penetracije lepila.

Slika 1: Strižna trdnost spojev s preklpom iz bukovih furnirjev, zlepljenih z različnimi lepili (MUF – kontrola melamin-urea-formaldehid, SH2 – kontrola šelak, CA-X – šelak z dodanimi X % citronske kisline, CA-X P-Y – šelak z dodanimi X % citronske in Y % fosforne kisline). Meritve prikazujejo rezultate pridobljene z metodo ABES.



Slika 2: Strižna trdnost spojev s preklpom iz bukovih lamel, zlepljenih z različnimi lepili (SH2 – kontrola šelak, CA20 – šelak z dodanimi 20 % citronske kisline, CA20 P13 – šelak z dodanimi 20 % citronske in 13 % fosforne kisline). Priprava 1 se nanaša na suhe pogoje, priprava 2 pa na izpostavljenost vodi po SIST EN 204:2016. Zahteve standarda za posamezno pripravo so označene s črtkano črto.



LITERATURA IN VIRI:

Brus, M., Jones, D., Gerardin, P., & Šernek, M. (2026). Shellac as a Renewable Bio-Based Adhesive for Wood Bonding: Toward Cleaner and Sustainable Material Solutions. *Cleaner Engineering and Technology*, 101194. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2026.101194>

European Committee for Standardization (CEN). (2016). EN 204:2016 – Classification of thermoplastic wood adhesives for non-structural applications. CEN.

European Committee for Standardization (CEN). (2016). EN 205:2016 – Adhesives – Wood adhesives for non-structural applications – Determination of tensile shear strength of lap joints. CEN.

Chen, J., Wu, J., Veldhuis, T., Picchioni, F., Raffa, P., & Koning, C. E. (2025). Mechanistic Study on Citric Acid-Based Esterification: A Versatile Reaction for Preparation of Hydrophilic Polymers. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 13(1), 559–570. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c07569>

Feng, X., Xiao, Z., Sui, S., Wang, Q., & Xie, Y. (2014). Esterification of wood with citric acid: The catalytic effects of sodium hypophosphite (SHP). *Holzforschung*, 68(4), 427–433. <https://doi.org/10.1515/hf-2013-0122>

Šefc, B., Trajković, J., Hasan, M., Katović, D., Bischof Vukušić, S., & Frančič, M. (2009). Dimensional stability of wood modified by citric acid using different catalysts. *Drvna Industrija*, 60(1), 23–26

KLJUČNE BESEDE:

Naravna lepila, lepila za les, šelak, citronska kislina, zamreževanje

ZAHVALE:

Finančno je bila raziskava podprta s strani Javne agencije za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost RS (ARIS) v okviru raziskovalnega programa P4-0015.

CC BY SA · DOI 10.20315/SFS.191.15

Krožno gospodarstvo v pohištvenem sektorju: vsebina in ugotovitve praktičnega priročnika za mala in srednje velika podjetja

Polona Hafner¹, Peter Prislan¹, Erika Valentinčič², Bernard Likar², Jožica Gričar¹

1 Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

2 Lesarski grozd, Dimičeva ulica 13, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-naslov: polona.hafner@gozdis.si

POUDARKI:

- V prispevku je predstavljen Praktični priročnik za uvajanje krožnega gospodarstva v pohištvenem sektorju, ki je bil razvit v okviru projekta FULAR - Novi načini krožnega gospodarstva v pohištveni industriji.
- Priročnik je namenjen malim in srednje velikim podjetjem v pohištveni in lesnopredelovalni dejavnosti v jadransko-jonski regiji.
- Priročnik ponuja celovit pregled konceptov, materialov, digitalnih orodij, poslovnih modelov in smernic za vpeljavo praks krožnih praks. Predstavlja praktično usmerjeno orodje, ki naslavlja dejanske vrzeli v znanju in infrastrukturi, s katerimi se MSP soočajo pri prehodu iz linearnih v krožne poslovne modele.

HIGHLIGHTS:

- The paper presents the Practical Guide for Implementing the Circular Economy in the Furniture Sector, developed within the project FULAR – Shaping new paths towards Furniture circularity
- The guide is intended for small and medium-sized enterprises in the furniture and wood-processing sectors in the Adriatic-Ionian region.
- The guide provides an overview of concepts, materials, digital tools, business models and guidelines for implementing circular practices. It serves as a practice-oriented tool that addresses real gaps in knowledge and infrastructure faced by SMEs when transitioning from linear to circular business models.

UVOD:

Pohištvena in lesnopredelovalna industrija se soočata z naraščajočimi pritiski za spremembo poslovnih modelov. Linearni model »vzemi–izdelaj–porabi–zavrži« postaja ekonomsko in okoljsko nevzdržen. Stroški primarnih materialov naraščajo, dobavne verige so nestabilne, zakonodaja EU se zaostruje, zahteve potrošnikov se spreminjajo. Prehod v krožno gospodarstvo je za sektor, ki temelji na lesu kot obnovljivem biološkem materialu, tako priložnost kot nujnost.

Mala in srednja podjetja (MSP), ki tvorijo jedro pohištvene industrije v jadransko-jonski regiji, se pri tem prehodu

soočajo s specifičnimi izzivi, kot so pomanjkanje strokovnjakov za krožno oblikovanje, nestabilna ponudba sekundarnih materialov, slabo razvita lokalna infrastruktura za zbiranje in razvrščanje odsluženega pohištva ter visoki začetni stroški. V okviru projekta **FULAR - Novi načini krožnega gospodarstva v pohištveni industriji**, sofinanciranega iz programa Interreg IPA ADRION 2021–2027, je bil razvit Praktični priročnik za uvajanje krožnega gospodarstva v pohištvenem sektorju. Prispevek povzema vsebino tega priročnika s poudarkom na operativnih poglavjih.

METODE:

Priročnik je bil razvit na podlagi kombinacije različnih metod. Opravljen je bil sistematični pregled literaturo s področja krožnega gospodarstva in tehnologije lesa ter regulativnih dokumentov EU. V regiji je bila izvedena anketa med MSP in potrošniki z ločenima strukturiranima vprašalnikoma. Vprašalnik za MSP je zbiral podatke o obstoječih praksah, ovirah in potrebah, vprašalnik za potrošnike pa je zajemal nakupne preference in odnos do krožnih storitev. Vzporedno je bilo izvedeno kartiranje regionalnih lesnih vrst in trajnostnih materialov ter analiza inovativnih krožnih poslovnih konceptov v pohištveni industriji po Evropi. Vsebina je bila ovrednotena v konzorciju partnerjev. Ključni selekcijski kriterij pri vseh analitičnih korakih je bila operativna dostopnost za MSP.

REZULTATI:

Konceptualni okvir in vloga lesa

Uvodna poglavja priročnika vzpostavljajo skupni referenčni okvir. Linearni model je opredeljen kot sistem, v katerem se surovine pridobijo, enkrat predelajo in nato odložijo, kar vodi v prekomerno rabo virov in naraščanje odpadkov. Krožno gospodarstvo je opredeljeno kot gospodarski sistem, v katerem se vrednost materialov, komponent in izdelkov ohranja čim dlje. Za pohištveni sektor to pomeni načrtovanje za dolgo življenjsko dobo, popravljivost, modularnost in razstavljivost. Les je v priročniku opredeljen kot obnovljiv, biogeni material z visoko mehansko vrednostjo, ki jo je ob ustrezni zasnovi mogoče ohraniti skozi zaporedne cikle rabe. Načelo kaskadne rabe predvideva, da se les najprej uporabi v aplikacijah z visoko dodano vrednostjo (pohištvo, gradbeni elementi), nato v ploščah na osnovi delcev in vlaken, in šele nazadnje v energetski izrabi. Regulativni sklop povzema ključne politike EU, ki vplivajo na sektor.

Trajnostni materiali

Priročnik obravnava materiale z vidika možnosti vključitve v obstoječe proizvodne procese ali razvoja novih krožnih poslovnih modelov. Za vsak material so podani: priporočena uporaba, ocena krožnega potenciala, konkretna priporočila in kontrolni seznam.

Med regionalnimi drevesnimi vrstami sta kot prednostni opredeljeni bukev (*Fagus sylvatica*) in hrast (*Quercus robur*, *Quercus petraea*). Bukve je široko dostopna in cenovno konkurenčna ter ima dobre mehanske in obdelovalne lastnosti, lesni ostanki iz primarne predelave lesa se učinkovito vključujejo v nadaljnje proizvodne procese. Hrast je naravno trajen les z dolgo življenjsko dobo, ki omogoča večkratno obnovo in vračanje v proizvodne procese.

Priročnik obravnava tudi reciklirane iverne plošče in MDF, lesno-plastične kompozite za zunanje pohištvo, reciklirano plastiko pri enomaterialni zasnovi ter bioosnovana lepila in premaze z nizkimi emisijami HOS, ki pogojujejo možnost recikliranja celotnega sistema.

Posebna pozornost je namenjena lesnim ostankom iz industrijske predelave (žagovina, oblanci, odrezki) in komponentam iz odsluženega pohištva. Te je ob ustreznem ločevanju tokov in oceni stanja mogoče ponovno vključiti v proizvodne procese namesto da postanejo odpadki.

Digitalna orodja

Priročnik razvršča digitalna orodja v tri sklope: programsko opremo, digitalne naprave ter specializirane platforme.

1. Programska oprema vključuje CAD/CAM sisteme za optimizacijo razreza in zmanjšanje odpadkov plošč, LCA-orodja za oceno okoljskega odtisa ter ERP-sisteme za sledenje materialnim tokovom.
2. Med digitalnimi napravami so opisani 3D-tiskalniki za izdelavo nadomestnih delov, IoT-senzorji in RFID oznake za sledenje komponent ter sistemi za skeniranje in razvrščanje lesa po kakovosti.
3. Specializirane platforme zajemajo digitalni potni list izdelka (DPP), platforme za industrijsko simbiozo in tržnice rabljenega pohištva. Priročnik priporoča, da MSP s sledljivostjo začnejo s preprostimi QR-kodami na ravni komponent, kar je cenovno dostopno in hkrati vzpostavlja osnovo za kasnejšo skladnost z zahtevami DPP.

Inovativni krožni poslovni koncepti

Na podlagi pregleda krožnih poslovnih praks v evropskem pohištvenem sektorju priročnik opredeljuje osem krožnih poslovnih konceptov. Za vsak koncept so podani opis, podprti krožni ukrepi po modelu 9R, tržna strategija, ključni pogoji za izvedbo in primer dobre prakse. Koncepti vključujejo:

- najem pohištva namesto prodaje z vključenim servisom in vračanjem;
- oblikovanje za razstavljanje s standardiziranimi spoji in modularnimi elementi;
- mreže delavnic za sistematično obnovo rabljenega pohištva;
- digitalne platforme za nakup in prodajo rabljenega pohištva;
- sledenje sestavi in zgodovini izdelka prek QR- in NFC-oznak;
- uporabo certificiranih, bio-osnovanih ali recikliranih materialov kot temelja blagovne znamke;
- odkup odsluženega pohištva in modularne nadgradnje ter
- ročno izdelavo iz lokalnih ali ponovno uporabljenih materialov kot del ponudbe v višjem cenovnem razredu.

Tržne ugotovitve

Anketa med potrošniki je pokazala, da so trajnost, kakovost in cena najpomembnejši dejavniki pri nakupu pohištva. Potrošniki najpogosteje navajajo hrast kot prednostno drevesno vrsto, pri čemer dajejo prednost masivnemu lesu. Do rabljenega ali prenovljenega pohištva niso odklonilni, a zahtevajo cenovno dostopnost in preverljivo kakovost. Splošnim okoljskim oznakam brez dokazil ne zaupajo. Pričakujejo preprosta in specifična sporočila: certifikat izvora (FSC/PEFC), delež recikliranih materialov, razpoložljivost nadomestnih delov in dostop do popravil. Ko pohištva ne potrebujejo več, ga potrošniki najpogosteje podarijo, prodajo ali premestijo; pogosteje ga zavržejo, kadar ustrezne alternative niso na voljo.

MSP v regiji že izvajajo nekatere krožne prakse, kot so optimizacija razreza, interno zbiranje odrezkov, raba recikliranih panelov in modularnih elementov. Identificirane strukturne ovire so nestabilna ponudba kakovostnih sekundarnih materialov, regulativna kompleksnost, pomanjkanje lokalne infrastrukture za zbiranje in razvrščanje odsluženega pohištva ter visoki začetni stroški. MSP so izrazila potrebo po praktičnih primerih, operativnih smernicah in dostopnem financiranju.

Komunikacija s kupci

Priročnik izpostavlja štiri ključna načela učinkovite komunikacije krožnih lastnosti pohištva: jasnost, preglednost, relevantnost in dostopnost informacij. Evropska zakonodaja na področju okoljskih trditvev vse bolj zahteva, da so okoljske navedbe konkretne, preverljive in podprte z ustreznimi dokazili, kar v praksi omejuje uporabo splošnih in nedokazanih oznak.

Priporočene so specifične in dokazljive trditve, kot so: »les s certifikatom FSC/PEFC«, »plošče z nizkimi emisijami razreda E1«, »nadomestni deli na voljo X let« ali »delež recikliranih materialov X %«.

Kot učinkoviti komunikacijski kanali se izpostavljajo: označevanje na izdelku, QR-kode za dostop do podrobnejših informacij ali digitalnega potnega lista izdelka, kratka navodila za uporabo, vzdrževanje in popravilo ter informativni materiali na prodajnih mestih.

Ovire in priložnosti

Priročnik sistematizira ovire za uvajanje krožnih praks v pohištveni industriji v sedem skupin:

1. infrastruktura in logistika - slabo razviti sistemi zbiranja in povratne logistike;
2. trgi sekundarnih materialov - nestabilna ponudba in variabilnost kakovosti;
3. znanje in veščine - omejen praktični know-how za krožno oblikovanje in procese;

4. povpraševanje - nizka sprejemljivost prenovljenega pohištva med kupci in prevlada cene kot odločitvenega dejavnika;
5. zasnova - mešani materiali in nedomularne konstrukcije otežujejo razstavljanje in popravilo;
6. financiranje - visoki začetni stroški in zaznano tveganje krožnih investicij za MSP;
7. razdrobljenost vrednostnih verig - omejena koordinacija med proizvajalci, oblikovalci, podjetji za recikiranje in javnimi akterji.

Med identificiranimi priložnostmi so:

- zmanjšanje stroškov materialov z boljšim izkoriščanjem odrezkov in rabo sekundarnih surovin;
- razvoj novih prihodkovnih tokov prek storitvenih modelov, popravil in obnove;
- tržna diferenciacija prek certifikatov in transparentne komunikacije;
- dostop do financiranja EU ob dokazani krožni pripravljenosti ter
- okrepljeno sodelovanje v vrednostnih verigah prek industrijske simbioze.

Praktične smernice za implementacijo

Zadnji sklop priročnika predstavlja neposredno operativno orodje za MSP in obsega tri ključne komponente: zbirko orodij, akcijski načrt v sedmih korakih za MSP ter podporna orodja za krožni prehod.

1. Zbirka orodij vključuje predloge, kontrolne sezname in vzorce dokumentov za zelena javna naročila: register okoljskih kazalnikov, predloge izjav dobaviteljev, kontrolne sezname za zahteve zelenega javnega naročanja, predloge komunikacijskih gradiv ter evidenco dokazil.
2. Akcijski načrt v sedmih korakih za MSP opredeljuje naslednje zaporedje:
 - analiza obstoječega stanja - pregled materialnih tokov, rabe energije, odpadkov in ključnih procesov;
 - prepoznavanje krožnih priložnosti - kje zmanjšati porabo virov, povečati delež recikliranih materialov in uvesti popravila;
 - določitev merljivih ciljev in kazalnikov uspešnosti (KPI);
 - izvajanje ukrepov - začetek na eni produkti liniji;
 - spremljanje napredka in letno poročanje;
 - komunikacija s kupci - uporaba le dokazljivih trditvev;
 - priprava na zelena javna naročila - vzpostavitev zbirke dokazil in standardiziranih izjav.
3. Podporna orodja za krožni prehod MSP vključujejo diagnostično orodje Ready2LOOP za oceno krožne

pripravljenosti po osmih dimenzijah (npr. zasnova, nabava, logistika, digitalizacija, organizacijska kultura), okvir za pripravo krožnih prehodnih načrtov z večfaznim pristopom ter vlogo gospodarskih zbornic kot podpornih institucij, ki nudijo diagnostiko, usposabljanja, pomoč pri dostopu do financiranja in platforme za industrijsko simbiozo.

RAZPRAVA:

Priročnik obravnava celotno vrednostno verigo pohištvene industrije od izbire materialov in faze načrtovanja do digitalnih orodij, poslovnih modelov, tržne komunikacije in praktičnih smernic za implementacijo. Njegova struktura izhaja iz ključnega spoznanja, da krožnega prehoda ni mogoče doseči z enim samim ukrepom. Pohištvo, ki ni zasnovano tako, da ga je mogoče razstaviti, ostane težko popravljivo ne glede na razpoložljivost servisnih mrež. Prav tako sekundarni materiali brez zagotovljene kakovosti in sledljivosti ostajajo omejeno uporabni, tudi če obstajajo ustrezne predelovalne kapacitete.

Rezultati ankete med MSP kažejo, da so podjetja v regiji že delno na poti krožnosti, optimizacija razreza in modularna zasnova sta v praksi že prisotni. Ključni izziv ni pomanjkanje interesa, temveč odsotnost sistematičnih orodij za merjenje, načrtovanje in komunikacijo. Zato je glavni poudarek priročnika na zagotavljanju praktičnih orodij in usmeritev za uvajanje krožnih praks, pri čemer osrednji del za posamezna področja ponuja konkretna priporočila, kontrolne sezname in primere dobrih praks.

V predstavljenem priročniku so združena konceptualna izhodišča, pregled materialov, digitalna orodja, poslovni modeli, tržni vpogledi, komunikacija s kupci, analiza ovir in priložnosti ter praktične smernice za implementacijo. Bukev in hrast sta prepoznana kot ključni drevesni vrsti za razvoj krožnih modelov v regiji. Predstavljenih je osem poslovnih konceptov, od najema pohištva do lokalne krožne obrti, ki ponujajo izvedljive poti za prehod k bolj krožnemu načinu poslovanja. Akcijski načrt v sedmih korakih in zbirka orodij za zelena javna naročila sta zasnovana tako, da ju je mogoče neposredno uporabiti v vsakodnevni praksi podjetij.

Med omejitvami velja poudariti, da so podatki ankete zbrani v specifičnem regionalnem okolju, kjer je krožna infrastruktura manj razvita kot v zahodnoevropskih regijah, kar lahko vpliva na prenosljivost nekaterih priporočil. Hkrati se regulativni okvir EU hitro razvija. Pobude, kot so digitalni potni list izdelka in razširjena odgovornost proizvajalcev, bodo v prihodnjih letih prinesle nove zahteve, ki bodo terjale nadaljnje posodobitve priročnika.

Priročnik je prosto dostopen kot rezultat projekta FULAR in je namenjen podjetjem, podpornim institucijam, izobraževalnim organizacijam ter oblikovalcem politik.

LITERATURA IN VIRI:

European Commission, 2020. A new Circular Economy Action Plan. COM(2020) 98 final. Brussels: European Commission.

European Commission, 2024. Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR). Regulation (EU) 2024/1781. Brussels.

Kirchherr, J., Reike, D. in Hekkert, M., 2017. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232.

UNECE/FAO, 2022. Circularity concepts in forest-based industries. Geneva Timber and Forest Study Paper 49. Geneva: UNECE.

FURN360 Consortium, 2022. Circular business training for the furniture and woodworking sectors. Erasmus+ projekt.

FurnCircle Consortium, 2023. Handbook for facilitating the circular economy transition in the EU furniture industry. <https://furncircle.eu/>

Ntalos G in sod., 2026. Manual: Practical guidelines for circular economy implementation in furniture sector. FULAR - IPA-ADRION00373 - Shaping new paths towards Furniture circularity. 97 str.

KLJUČNE BESEDE:

krožno gospodarstvo, pohištveni sektor, MSP, priročnik, Interreg ADRION, FULAR, trajnostna proizvodnja

ZAHVALA:

Prispevek je nastal v okviru projekta FULAR – Novi načini krožnega gospodarstva v pohištveni industriji (IPA-ADRION00373), ki ga sofinancira Evropska unija prek programa Interreg IPA ADRION 2021–2027.

CC BY SA · DOI 10.20315/SFS.191.16

Nagradni natečaj LES ZA VSE na Oddelku za lesarstvo 2026

Eli Keržič¹, Bojan Gospodarič¹, Drago Vidic¹, Miha Humar¹, Gorazd Fajdiga¹

¹ Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

E-naslov: bojan.gospodaric@bf.uni-lj.si



POUDARKI:

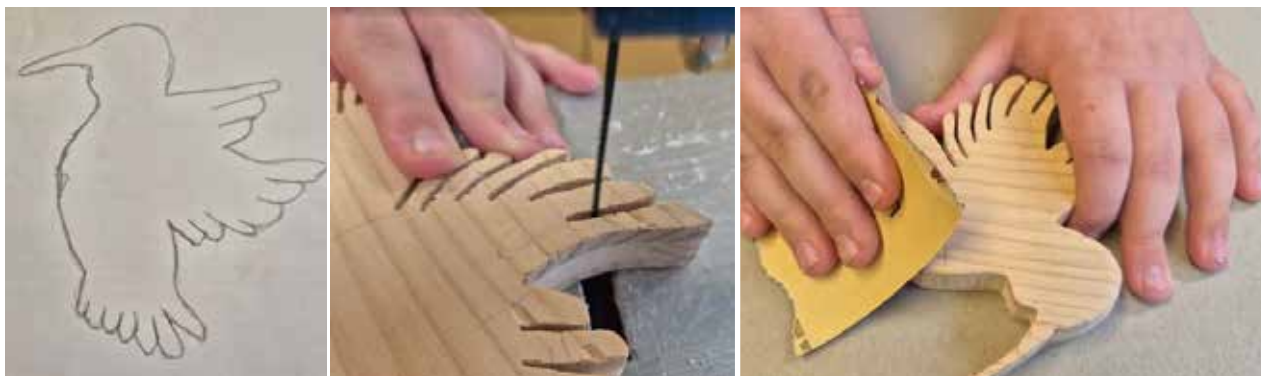
- Natečaj Les za vse je namenjen promociji lesa in ustvarjanja z lesom.
- V letošnji, že 6. izvedbi se mu je pri organizaciji pridružil projekt WoodInnovate, ki se osredotoča se na reševanje izzivov podnebnih sprememb v gozdno lesni verigi znotraj Alpsko Jadranske regije.
- Tokratni natečaj je bil namenjen spodbujanju ustvarjalne rabe lesa, ki je zaradi podnebnih sprememb in škodljivcev izgubil tržno vrednost.
- Na natečaju je sodelovalo 12 osnovnih in 3 srednje šole, ki so skupaj prispevale 25 lesenih ptic in 5 zložljivih stolov.
- Osnovnošolcem in srednješolcem smo skozi praktično delo z lesom približali krožno gospodarstvo in potencialne uporabe lesa nižje kakovosti.

O NATEČAJU:

Les za vse na Oddelku za lesarstvo je natečaj, ki je bil zasnovan z namenom promocije lesa, ustvarjanja z lesom in nenazadnje Oddelka za lesarstvo, Biotehniške fakultete, Univerze v Ljubljani. Natečaj je bil prvič razpisan leta 2020. Organizatorji vsako leto razpišejo novo tematiko natečaja, navadno ločeno za osnovne in srednje šole. Do sedaj se je v okviru natečaja izdelovalo jedilni pribor in pripomočke v kuhinji (2020), šahovske figure (2021), rože iz lesa in pručke (2023), igrače in stojalo za glasbene note (2024) peresnice in namizne lučke (2025).

Na natečaju sodelujejo osnovne in srednje šole iz cele Slovenije. Učenci oz. dijaki pod mentorstvom učiteljev izdelajo v natečaju razpisan izdelek in ga fotografirajo. Fotografijo izdelka skupaj z izjavo o sodelovanju ter dokumentiranim postopkom izdelave (Slika 1) po elektronski pošti pošljejo organizatorju natečaja. Tričlanska strokovna komisija nato oceni kakovost izdelave oz. izvedbo, obliko oz. dizajn in predstavitveno fotografijo izdelka. Med osnovnošolci in srednješolci se ločeno izbere po tri najboljše izdelke, ki se jih razstavi na razstavi Čar lesa.

Slika 1: Sodelujoči morajo poleg predstavitvene fotografije izdelka komisiji posredovati tudi dokumentiran postopek izdelave (Foto: Rok in Jan Škraban)



Predstavitve sodelujočih izdelkov in razglasitev najboljših poteka preko spleta. Vsi sodelujoči prejmejo priznanje za sodelovanje. Poleg tega nagrajenci po pošti prejmejo praktične nagrade za ustvarjanje z lesom ki jih priskrbijo lokalna podjetja. Promocija natečaja poteka na Facebook strani [Les za vse na Oddelku za lesarstvo](#) in Instagram profilu [@leszavse](#).

O VLOGI PROJEKTA WOODINNOVATE:

Projekt WoodInnovate poteka v okviru Interreg Italija–Slovenija. Osredotoča se na reševanje perečih izzivov, ki jih podnebne spremembe povzročajo v gozdno lesni verigi znotraj Alpsko Jadranske regije. Poleg tega spodbuja čezmejno sodelovanje in inovativne pristope k trajnostni rabi lesa. Alpsko-Jadranska regija se namreč vse pogosteje sooča z ekstremnimi vremenskimi pojavi, ki povzročajo obsežne poškodbe gozdov in povečujejo pojavnost

škodljivcev, zlasti lubadarja. S projektom si prizadevamo oceniti vpliv podnebnih sprememb na sestavo gozdov, zaščito tal, zdravje ekosistemov in kakovost lesa. Na ta način prispevamo k prilagajanju podnebnim spremembam, krožnemu gospodarstvu in zmanjšanju rabe primarnih virov.

Eden od glavnih ciljev projekta je tudi valorizacija lesa, ki je zaradi vplivov okolja izgubil tržno vrednost, ter njegovo vključevanje v trajnostne in inovativne izdelke. V ta namen smo se s projektom WoodInnovate pridružili organizaciji natečaja Les za vse. Predlagali smo, da se za izdelavo izdelkov uporabi les, ki je zaradi ekstremnih vremenskih pojavov in škodljivcev izgubil na svoji vrednosti. Šolam smo ponudili, da jim lahko priskrbimo les, poškodovan zaradi lubadarja in obarvan z glivami modrivkami (Slika 2). Izdelke je bilo možno izdelati tudi iz lastnega materiala. Z natečajem smo tako uspeli spodbuditi ustvarjalno in

Slika 2: Poškodovan les zaradi lubadarja in obarvan z glivami modrivkami (Foto: Irinej Curk in Matevž Plevnik)



Slika 3: Predstavitvene fotografije osnovnošolcev



Slika 4: Predstavitvene fotografije srednješolcev



odgovorno rabo lesa nižje kakovosti. Poleg tega smo prek praktičnega dela mladih uspeli okrepiti ozaveščenost o vplivih podnebnih sprememb na gozdove in potencialih trajnostne rabe lesa. S tem projekt nagovarja tako mlajšo publiko kot širšo javnost. Natečaj predstavlja konkreten primer prenosa ciljev projekta WoodInnovate v prakso.

LES ZA VSE 2026:

Letošnji natečaj je že šesti zapored. Kot že omenjeno, se je v tokratni izvedbi k organizaciji natečaja pridružil tudi projekt WoodInnovate. S tem smo natečaju dodali novo trajnostno in vsebinsko dimenzijo. Letošnja tema natečaja je bila izdelava lesenih ptic (osnovne šole) in zložljivih stolov (srednje šole) iz lesa, ki je zaradi ekstremnih vremenskih pojavov in škodljivcev izgubil svojo tržno vrednost. K sodelovanju smo povabili tako slovenske kot tudi italijanske zamejske šole. Udeležencem smo ponudili možnost, da jim priskrbimo les, ki je bil poškodovan zaradi lubadarja in obarvan z glivami modrivkami. Nekatere šole so to možnost izkoristile, ostale so si material priskrbele same.

Skupno je sodelovalo 12 osnovnih in 3 srednje šole. Prejeli smo 25 lesenih ptic (Slika 3) in 5 zložljivih stolov (Slika 4). Udeleženci so s svojo izvirnostjo, inovativnostjo in kakovostjo izvedbe znova potrdili velik ustvarjalni potencial

mladih ter pomen zgodnjega stika z lesom in trajnostnimi vsebinami. Razglasitev rezultatov natečaja Les za vse 2026 je potekala 10. aprila 2026 ob 13.00 prek spletne platforme Webex. Najbolje ocenjeni izdelki so bili nagrajeni s praktičnimi nagradami, ki so jih nagrajenci prejeli po pošti na naslov šole. Predstavitev vseh sodelujočih in nagrajenih izdelkov je dostopna na družbenih omrežjih natečaja Les za vse na Oddelku za lesarstvo ter projekta WoodInnovate.

KLJUČNE BESEDE:

Inovativna in trajnostna raba lesa, les nižje kakovosti, ozaveščanje mladih

ZAHVALA:

Avtorji se zahvaljujemo za finančno podporo programskima skupinama P4 0015 – Les in lignocelulozni kompoziti in P2-0182 - Razvojna vrednotenja, ki ju financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS), ter projektu WoodInnovate, ki ga sofinancira Evropska unija v okviru programa Interreg VI A Italija–Slovenija. Posebna zahvala gre tudi mentorjem, šolam ter podjetjema Lestroj in Energe orodja za podporo in nagrade.

CC BY SA · DOI 10.20315/SFS.191.17



Dejavniki razvoja kompetenc učečih se za trajnostni in digitalni prehod lesarstva

Luka Goropečnik¹, Danijela Makovec Radovan², Jože Kropivšek¹

1 Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

2 Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za pedagogiko in andragogiko

E-naslov: luka.goropecnik@bf.uni-lj.si

POUDARKI:

- Digitalni in trajnostni prehod lesnega sektorja ni odvisen le od tehnološke infrastrukture, temveč predvsem od ustrezno razvitih kompetenc bodočih kadrov.
- Na razvoj oziroma samozaznane digitalne in trajnostne kompetence učečih se v lesarstvu vpliva več dejavnikov, kot so učno okolje, motivacija učečih se za izobraževanje ter njihov interes za digitalne in trajnostne vsebine.
- Vplivne dejavnike lahko krepimo z učnim okoljem, ki podpira avtonomijo, kompetentnost in povezanost učečih se, kar med drugim zahteva poučevanje, osredotočeno na učečega se. Pri tem ima ključno vlogo učitelj, ki z jasnim strukturiranjem učnega procesa, podporo avtonomiji, ustrezno povratno informacijo, spodbujanjem interesa in oblikovanjem podpornih odnosov krepí pogoje za razvoj digitalnih in trajnostnih kompetenc.

UVOD:

Družbeno-ekonomski razvoj je dolgo veljal za eno ključnih razvojnih usmeritev sodobne družbe, ob pričakovanju, da bo rast dohodkov posredno prispevala tudi k reševanju širših družbenih in razvojnih problemov (Vintar Mally, 2020). Vendar se ta pričakovanja niso uresničila, posledice takšnega razvojnega vzorca pa so se pokazale v obsežnih okoljskih pritiskih in dolgoročnih negativnih vplivih na naravne sisteme (UN News, 2021; UNEP in IRP, 2024). Kot odziv na te izzive se je v zadnjih desetletjih uveljavil koncept trajnostnega razvoja, ki je bil formalno opredeljen leta 1987 v Brundtlandovem poročilu Svetovne komisije za okolje in razvoj (WCED, 1987), med ključne globalne razvojne usmeritve pa se je dodatno utrdil s sprejetjem *Agende 2030 za trajnostni razvoj* (UN, 2015).

Vzporedno se je kot eden osrednjih razvojnih konceptov sodobne družbe uveljavila tudi digitalizacija (Rachinger in sod., 2019), ki je omogočila vzpon četrte industrijske revolucije in izrazito preoblikovala gospodarstvo in proizvodne sisteme (Lasi in sod., 2014). Industrija 4.0 temelji na vključevanju kibernetiko-fizičnih sistemov, interneta stvari in računalništva v oblaku, kar omogoča večjo povezanost, avtomatizacijo in podatkovno podprto upravljanje proizvodnih ter poslovnih procesov (Xu in sod., 2018). Digitalizacija odpira možnosti tudi za podporo

trajnostnemu razvoju, saj lahko prispeva k učinkovitejši rabi virov, optimizaciji procesov, razvoju zelenih tehnologij ter spremljanju in zmanjševanju vplivov na okolje (Xu in sod., 2022; Goel in sod., 2024). Vendar digitalni razvoj ni brez okoljskih posledic, saj povečuje potrebe po energiji, vodi in surovinah ter prispeva k nastajanju emisij in e-odpadkov (Zulfiqar in sod., 2023; IDCA, 2025). Zaradi teh izzivov se v zadnjih letih vse bolj uveljavlja koncept Industrije 5.0, ki poleg tehnološkega napredka v ospredje postavlja družbene in okoljske vidike ter krepí vlogo človeka v industrijskih in poslovnih procesih, kjer se tehnologija prilagaja uporabniku in podpira njegovo dobrobit, hkrati pa poudarja trajnostnost in odpornost industrijskih sistemov (Breque in sod., 2021).

Te razvojne usmeritve so pomembne tudi za biogospodarstvo, ki temelji na obnovljivih bioloških virih, vendar lahko zeleni prehod podpira le ob njihovem odgovornem in trajnostnem upravljanju. Povečano povpraševanje po naravnih virih lahko ob neustreznem upravljanju dodatno okrepi pritiske na okolje ter prispeva k preseganju zmogljivosti ekosistemov. Lesarstvo kot eden od konvencionalnih sektorjev biogospodarstva temelji na lesu kot ključni strateški surovini, zato je lesna industrija prepoznana kot pomemben dejavnik pri doseganju ciljev

Evropskega zelenega dogovora in kot sektor z velikim razvojnimi potencialom (Vlada RS, 2021; Lasarte Lopez in Robert, 2025). Kljub razvojnemu potencialu pa lesni sektor pri digitalnem in trajnostnem prehodu zaostaja, nekateri avtorji opozarjajo, da v posameznih segmentih še vedno deluje na ravni, ki je bližje paradigmi Industrije 2.0 (Červený in sod., 2022). Prav tako trajnostnih vidikov rabe lesa ni mogoče razumeti kot samoumevnih. Čeprav je les obnovljiv, biorazgradljiv in nizkoogljiven material, ter se lesni izdelki v primerjavi z drugimi gradbenimi in pohištvenimi materiali pogosto proizvajajo v razmeroma nizkoenergijskih proizvodnih sistemih, njihova proizvodnja in raba še vedno pogosto sledita linearnim modelu (Forrest in sod., 2017; Koch in sod., 2022). Trajnostno ravnanje zahteva celostno obravnavo tehnoloških procesov, dodatnih materialov, življenjskega cikla izdelkov ter postopkov ob koncu njihove življenjske dobe, vključno z možnostmi ponovne uporabe, recikliranja in ustrezne končne obravnave (Oblak in Jošt, 2011). Pokazalo se je, da zelenega in digitalnega prehoda v lesnem sektorju ne omejujejo le finančni, organizacijski, tehnološki in tržni dejavniki, temveč tudi primanjkljaji v kompetencah za odgovorno, kritično in premišljeno uporabo sodobnih tehnologij ter trajnostnih praks (Kropivšek, 2018; Kropivšek in Grošelj, 2020; Muench in sod., 2022). Razvoj digitalnih in trajnostnih kompetenc učečih se je zato trenutno eno ključnih vprašanj izobraževanja v lesarstvu. Pomembno ni le, katere kompetence so vključene v kurikularne dokumente, temveč tudi, kateri dejavniki podpirajo njihov dejanski razvoj. Prispevek predstavlja izbrane ugotovitve doktorske raziskave, s poudarkom na dejavnikih, ki lahko vplivajo na samozaznane digitalne in trajnostne kompetence učečih se v lesarstvu.

METODE:

Podatke smo zbrali z vprašalniki med učečimi se v izobraževalnih programih s področja lesarstva ter med deležniki iz lesne in pohištvene industrije. V raziskavo smo vključili 433 dijakov in študentov zaključnih letnikov na vseh stopnjah formalnega izobraževanja v lesarstvu ter 28 deležnikov iz lesne industrije.

Samozaznane kompetence učečih se smo obravnavali v treh sklopih: ključne digitalne kompetence, ključne trajnostne kompetence ter poklicne digitalne in trajnostne kompetence. Poleg tega smo proučevali izbrane dejavnike, ki bi lahko vplivali na razvoj teh kompetenc, in sicer zaznano učno okolje, motivacijo za izobraževanje ter interes za digitalne in trajnostne vsebine. Učno okolje smo merili z vprašalnikom *What Is Happening In This Class?* (WIHIC), motivacijo z lestvico *Academic Motivation Scale* (AMS), kompetence z instrumenti, oblikovanimi na podlagi

evropskih kompetenčnih okvirov za digitalne in trajnostne kompetence, interes pa na 5-stopenjski Likertovi lestvici. Pri raziskavi učnega okolja smo preverjali vpliv posameznih dejavnikov učnega okolja na samozaznane kompetence z regresijskimi analizami, dodatno pa smo s parnimi t-testi primerjali zaznane dejansko in željeno učno okolje. V sklopu motivacije smo z modeliranjem strukturnih enačb preverjali vpliv motivacije učečih se za izobraževanje z njihovimi samozaznanimi digitalnimi in trajnostnimi kompetencami. Pri interesu pa smo z regresijskimi analizami preverjali, ali večji interes za digitalne in trajnostne vsebine napoveduje višjo samozaznano stopnjo kompetenc ter večji delež kompetenc, ki jih učeči se pripisujejo formalnemu izobraževanju.

POVZETEK IZBRANIH REZULTATOV IN RAZPRAVE:

V tem poglavju povzemamo glavne ugotovitve doktorske raziskave, ki kažejo, da na samozaznane kompetence učečih se na področju digitalizacije in trajnosti vpliva več medsebojno povezanih dejavnikov (Goropečnik in sod., 2025a; Goropečnik in sod., 2026a; Goropečnik in sod., 2026b). Vsi proučevani dejavniki, torej učno okolje, motivacija za izobraževanje in interes za digitalne ter trajnostne vsebine, so se izkazali za vplivne. Pri učnem okolju so kot vplivne dimenzije izstopali učenje z raziskovanjem, vključenost in podpora učitelja, pri čemer so se njihovi neposredni učinki razlikovali glede na posamezne skupine kompetenc. Motivacija za izobraževanje je pozitivno vplivala na vse tri proučevane skupine kompetenc, tj. ključne digitalne kompetence, ključne trajnostne kompetence ter poklicne digitalne in trajnostne kompetence. Pozitiven vpliv na samozaznane kompetence je pokazal tudi interes za digitalne in trajnostne vsebine. Skozi razpravo osvetljujemo spoznanje, da učno okolje ne vpliva le neposredno na samozaznano kompetentnost učečih se, temveč predstavlja tudi okvir, v katerem se oblikujeta in krepija motivacija ter interes. Z vidika pedagoške prakse to pomeni potrebo po učnih situacijah, ki temeljijo na raziskovanju, sodelovanju, aktivni vključenosti in reševanju problemov, hkrati pa učečim se omogočajo ustrezno mero avtonomije in podpore. Takšno učno okolje neposredno podpirajo problemsko, projektno, izkustveno in sodelovalno učenje, zlasti kadar so naloge avtentične ter povezane z resničnimi delovnimi in življenjskimi konteksti.

Motivacijo lahko podpira učno okolje, ki spodbuja avtonomijo, občutek kompetentnosti in povezanost učečih se. Avtonomijo podpira učno okolje in način poučevanja, ki zmanjšuje občutek zunanje kontrole, učečim se omogoča določeno mero izbire ter jim pomaga prepoznati smisel

in osebno vrednost učnih dejavnosti. Kompetentnost se krepi v jasno strukturiranem učnem okolju z razumljivimi pričakovanji, optimalnimi izzivi in razvojno naravnano povratno informacijo, vendar le, če je takšna struktura uresničena na način, ki hkrati podpira tudi avtonomijo učečih se. Povezanost pa podpirajo odnosi, zaznamovani s spoštovanjem, sprejetostjo, skrbjo in občutkom pripadnosti, saj prav ti ustvarjajo socialni okvir, v katerem se motivacija lažje oblikuje, ohranja in ponotranja. Ker ugotovitve kažejo, da je interes učečih se za digitalne in trajnostne vsebine verjetno še v zgodnji razvojni fazi, je odvisen predvsem od zunanjih pobud in ga je treba v izobraževalnem procesu načrtno razvijati. Pri tem imajo pomembno vlogo predvsem učne situacije, ki pritegnejo pozornost učečih se, se navezujejo na njihove obstoječe interese, poudarjajo uporabnost vsebin ter vključujejo novost, možnost izbire, praktično dejavnost, socialno vključenost in povezovanje učne snovi z njihovim življenjem.

Smisel vključevanja digitalnih in trajnostnih kompetenc v izobraževanje v lesarstvu je v obravnavanem kontekstu jasno prepoznaven, saj rezultati naše raziskave kažejo, da deležniki iz industrije na različnih stopnjah izobraževanja od dijakov in študentov pričakujejo ustrezno razvite kompetence za digitalni in trajnostni prehod panoge (Goropečnik in sod., 2024; Goropečnik in sod., 2025b). Ob tem pa izsledki disertacije opozarjajo, da razvoj teh kompetenc oziroma občutka usposobljenosti učečih se ni odvisen zgolj od njihove formalne umestitve v kurikularne dokumente, temveč tudi od pogojev, v katerih se te kompetence dejansko razvijajo. Zaključimo lahko, da je za razvoj digitalnih in trajnostnih kompetenc oziroma samozaznanih kompetenc učečih se v lesarstvu pomembno predvsem poučevanje, osredotočeno na učečega se. Učitelj ima pri tem ključno vlogo, saj prevzema več med seboj povezanih vlog, ki učečim se omogočajo postopno napredovanje k večji samostojnosti in kompetentnosti, učeči se pa morajo postopno prevzemati večjo odgovornost za lastno učenje.

LITERATURA IN VIRI:

Breque M., De Nul L., Petridis A. 2021. Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. Luxembourg, European Commission: Directorate-General for Research and Innovation, Publications Office of the European Union, <https://doi.org/10.2777/308407>

Červený L., Sloup R., Červená T., Riedl M., Palátová P. 2022. Industry 4.0 as an Opportunity and Challenge for the Furniture Industry—A Case Study. Sustainability, 14, 20: 13325, <https://doi.org/10.3390/su142013325>

Forrest A., Hilton M., Ballinger A., Whittaker D. 2017. Circular economy opportunities in the furniture sector. Belgium

Goropečnik L., Makovec Radovan D., Kropivšek J. 2024. Empowering Advancement of Wood and Furniture Sector Through Key Digital and Sustainability Competencies. Drvna industrija, 75, 3: 337-347, <https://doi.org/10.5552/drvind.2024.0165>

Goropečnik L., Makovec Radovan D., Kropivšek J. 2025a. The effect of the learning environment on students' self-perceived digital and sustainability competencies. Revista Española de Pedagogía, 83, 292: 643-668, <https://doi.org/10.9781/rep.2025.389>

Goropečnik L., Makovec Radovan D., Grošelj P., Kropivšek J. 2025b. Gaps Between Students' Self-Perceived Digital and Sustainability Competencies and the Expectations of the Wood & Furniture Industry. Forests, 16, 7: 1194, <https://doi.org/10.3390/f16071194>

Goropečnik L., Kropivšek J., Kristl N., Makovec Radovan D. 2026a. The effect of students' academic motivation on their self-perceived digital and sustainability competencies in wood science and technology education. BioResources, 21, 1: 267-287, <https://doi.org/10.15376/biores.21.1.267-287>

Goropečnik L., Makovec Radovan D., Kristl N., Kropivšek J. 2026b. Students' topic interest and its effect on their self-perceived digital and sustainability competencies and their perceived mode of acquisition. BioResources, 21, 1: 1706-1724, <https://doi.org/10.15376/biores.21.1.1706-1724>

Goel A., Masurkar S., Pathade G. R. 2024. An Overview of Digital Transformation and Environmental Sustainability: Threats, Opportunities, and Solutions. Sustainability, 16, 24: 11079

IDCA. 2025. Global Digital Economy Report 2025. Rockville, MD

Koch V., Mallahnia T., Mouazan E., Steinmetz D., Antov P., Gavrić I., Cañavate G., Fernández Fernández C. 2022. Twin transition in the wood-furniture value chain. State-of-the-art on Environmental Certifications Practices and Industry 4.0 in the Wood and Furniture Sector.

Kropivšek J. 2018. Konceptualni model digitalizacije izobraževanja: Primer visokošolskega izobraževanja v lesarstvu v Sloveniji. Les/Wood, 67, 2: 63-74, <https://doi.org/10.26614/les-wood.2018.v67n02a06>

Kropivšek J., Grošelj P. 2020. Digital Development of Slovenian Wood Industry. Drvna industrija, 71, 2: 139-148, <https://doi.org/10.5552/drvind.2020.1961>

Lasarte Lopez J., Robert M. B. 2025. The EU bioeconomy at a glance: Focus on economic value added, employment and innovation. Spain

Lasi H, Fettke P, Kemper H-G, Feld T, Hoffmann M. 2014. Industry 4.0. Business & Information Systems Engineering, 6, 4: 239-242, <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>

Muench S, Stoermer E, Jensen K, Asikainen T, Salvi M, Scapolo F. 2022. Towards a green & digital future – Key requirements for successful twin transitions in the European Union. Luxembourg, European Commission: Joint Research Centre, Publications Office of the European Union, <https://doi.org/10.2760/977331>

Oblak L, Jošt M. 2011. Methodology for Studying the Ecological Quality of Furniture. Drvna industrija, 62, 3: 171-176, <https://doi.org/10.5552/drind.2011.1038>

Rachinger M, Rauter R, Müller C, Vorraber W, Schirgi E. 2019. Digitalization and its influence on business model innovation. Journal of Manufacturing Technology Management, 30, 8: 1143-1160, <https://doi.org/10.1108/jmtm-01-2018-0020>

UN. 2015. Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development.

UN News. 2021. IPCC report: 'Code red' for human driven global heating, warns UN chief. (UN News). United Nations

UNEP, IRP. 2024. Global Resources Outlook 2024 - Bend the trend: Pathways to a Liveable Planet as Resource Use Spikes. <https://doi.org/https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44901>

Vintar Mally K. 2020. The environmental price of socio-economic development: Worldwide trends from 1990 to 2016. European Journal of Geograph, 11, 2: 137-153, <https://doi.org/10.48088/ejg.k.mal.11.2.137.153>

Vlada RS. 2021. Slovenska industrijska strategija 2021-2030.

WCED. 1987. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland

Xu J, She S, Liu W. 2022. Role of digitalization in environment, social and governance, and sustainability: Review-based study for implications. Frontiers in Psychology, 13, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.961057>

Xu L D, Xu E. L., Li L. 2018. Industry 4.0: state of the art and future trends. International Journal of Production Research, 56, 8: 2941-2962, <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>

Zulfiqar M., Tahir S. H., Ullah M. R., Ghafoor S. 2023. Digitalized world and carbon footprints: does digitalization really matter for sustainable environment? Environmental Science and Pollution Research, 30, 38: 88789-88802, <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28332-z>

KLJUČNE BESEDE:

izobraževanje v lesarstvu, digitalne in trajnostne kompetence, učno okolje, motivacija, interes za vsebine

ZAHVALA:

Avtorji se zahvaljujejo Javni agenciji za znanstveno-raziskovalno in inovacijsko dejavnost RS za podporo v okviru raziskovalnih programov P4-0015 in P5-0174 ter Ministrstvu za visoko šolstvo, znanost in inovacije in instrumentu NextGenerationEU za podporo v okviru projekta ULTRA, ki je del Načrta za okrevanje in odpornost.

CC BY SA · DOI 10.20315/SFS.191.18



Silva
Slovenica



REPUBLIKA SLOVENIJA
**MINISTRSTVO ZA OKOLJE,
PODNEBJE IN ENERGIJO**



REPUBLIKA SLOVENIJA
**MINISTRSTVO ZA KMETIJSTVO,
GOZDARSTVO IN PREHRANO**



Javna agencija za znanstvenoraziskovalno
in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije

Interreg
Italia-Slovenija



Cofinanziato
dall'Unione europea
Sofinanciata
Evropska unija

WoodInnovate



**Sofinanciata
Evropska unija**



**Financiata
Evropska unija**

