

LESENI DALJNOVODNI DROGOVI – ANALIZA VZROKOV ZA PREZGODNJI RAZKROJ NA OBMOČJU SLOVENIJE

WOODEN TRANSMISSION LINE POLES – ANALYSIS OF CAUSES OF PREMATURE DECAY IN SLOVENIA

Miha HUMAR^{1*}, Boštjan LESAR², Nace KREGAR³, Simon DRNOVŠEK⁴

(1) Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, miha.humar@bf.uni-lj.si

(2) Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, bostjan.lesar@bf.uni-lj.si

(3) Bureau veritas, d.o.o. nace.kregar@bureauveritas.com

(4) Bureau veritas, d.o.o. simon.drnovsek@bureauveritas.com

IZVLEČEK

Študija se osredotoča na analizo vzrokov za prezgodnji propad lesenih daljnovodnih drogov v severovzhodni Sloveniji, kjer je bilo zabeleženih več primerov hitrega glivnega razkroja drogov, kljub načrtovani življenjski dobi 30 do 50 let. Drogoi so bili izdelani iz lesa rdečega bora in impregnirani z baker-etanolaminskim biocidnim proizvodom. Namen raziskave je bil oceniti stanje stoječih drogov in preučiti ključne vzroke za njihovo prezgodnjo degradacijo na primeru dveh podrlih drogov. Uporabljene metode vključujejo uporabo rezistografa za določanje razkrojenosti lesa po preseku, izolacija izvrtkov za določanje penetracije in retencije. Poleg tega je bila opravljena mikroskopska in hiperspektralna analiza na vzorcih lesa za natančno karakterizacijo razkroja. Rezultati so pokazali, da je bila impregnacija lesa večinoma nezadostna, kar je vodilo v razširjen razkroj, zlasti na območjih, kjer je v les prodrlo premalo biocidnega proizvoda oziroma ni bila prepojena celotna beljava borovih drogov. Pospešen propad drogov je posledica delovanja gliv rjave trohnobe. Raziskava poudarja potrebo po izboljšani impregnaciji in rednem nadzoru drogov za zagotavljanje njihove življenjske dobe in s tem povezano zanesljivostjo oskrbe z električno energijo.

Ključne besede: daljnovodni drogoi, impregnacija, bakrovi biocidni proizvodi, glivni razkroj, rezistograf, penetracija, retencija

ABSTRACT

The study analyzes the causes of premature failure in wooden power line poles in Slovenia, where multiple cases of rapid fungal decay have occurred despite a projected service life of 30 to 50 years. The poles were made from Scots pine and impregnated with a copper-ethanolamine biocidal product. The objective of the research was to assess the condition of standing poles and investigate the primary causes of premature degradation, using two fallen poles as case studies. The methods employed included resistograph measurements to determine the extent of wood decay across cross-sections, core sampling to determine preservative penetration and retention, and microscopic and hyperspectral analyses of wood samples to precisely characterize the decay. The results revealed that wood impregnation was generally insufficient, leading to extensive decay, particularly in areas with insufficient biocidal retention or where the entire sapwood of the pine poles was not fully impregnated. The accelerated degradation of the poles was attributed to brown rot fungi. The study underscores the need for improved impregnation techniques and regular monitoring to ensure the longevity of the poles and the reliability of the electricity supply.

Key words: power line poles, impregnation, copper-based biocidal products, fungal decay, resistograph, penetration, retention

GDK 831.4:844=163.6
DOI 10.20315/ASetL.136.1

Prispelo / Received: 6. 01. 2025
Sprejeto / Accepted: 9. 03. 2025



1 UVOD

1 INTRODUCTION

Pred industrijsko revolucijo je bila komunikacija na velike razdalje zelo omejena. Stara Kitajska in tudi Evropa sta razvili komunikacijo z dimnimi signali in kresovi na markantnih vzpetinah, ki so opozarjale na grozeče nevarnosti. V Sloveniji so kresovi na vzpetinah opozarjali predvsem na turške vpade (Simoniti 1990).

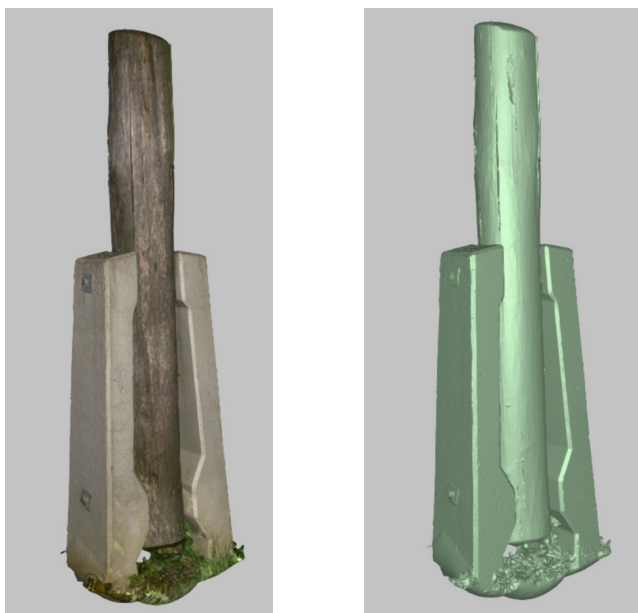
Iz antične zgodovine je znan Phidippides, ki je pretekel razdaljo med Maratonskim poljem in Atenami, da je Atencem oznanil zmago (Griffiths, 2016). Prvi znatni napredek v komunikaciji na daljše razdalje je bil dokumentiran leta 1843, ko je ameriški kongres doniral 30.000 USD Samuelu Morsu, da dokaže, kako lahko na daljšo razdaljo prenese informacijo hitreje kot obstoječe rešitve za prenos informacij (kot na primer Pony

Expres). Morse je najprej razmišljal o podzemnih vodih, a je zaradi tehničnih težav in pomanjkanja časa prvo telegrafsko linijo med Washingtonom in Baltimorem (55 km) napeljal prek telekomunikacijskih drogov. Ta rešitev velja za rojstvo telekomunikacijskih drogov (Bolin in Smith, 2011; Hron in Yazdani, 2011; Thimons, 2014). Razvoj telekomunikacij je omogočil, da informacije med vzhodno iz zahodno obalo ZDA ne potujejo 110 dni, kot ob smrti predsednika Williama Henry Harrisona leta 1841, temveč le nekaj ur leta 1861 (Mulqueen, 2017). Čeprav so bili prvi drogov namenjeni le komunikacijam (telekomunikacijski drogov), so jih kmalu uporabili tudi za prenos električne energije (daljnovodni drogov).

Trenutno je v uporabi vsaj milijarda telekomunikacijskih in daljnovodnih drogov, od tega 185 milijonov v ZDA (Thimons, 2014) in 800 milijonov v Evropi (Ribera in sod., 2017). V Nemčiji namestijo okoli 250.000 novih lesenih drogov letno. Po drugi strani v Sloveniji vgradimo med 5000 do 10.000 drogov na leto. V Evropi uporabljamo dve tehnološki rešitvi za vgradnjo drogov. Nekateri drogov so vgrajeni neposredno v zemljo, drugi pa na drogovnjake ali pa so vpeti v klešče in tako odmaknjeni od tal. Prvi so vgrajeni v četrtem razredu uporabe (v stiku z zemljo), drugi pa v tretjem (nad zemljo), kot ga definira standard EN 335 (CEN, 2013). V četrtem razredu uporabe v našem podnebnem pasu les ogrožajo predvsem glive bele, rjave in mehke trohno-be ter bakterije, v tretjem razredu pa le glive razkrojevalke (Schmidt, 2006). Poleg gliv in bakterij drogove lahko poškodujejo še lesni insekti in ptice. Ravno ptice (detli in žolne) povzročajo vedno več škode na telekomunikacijskih in daljnovodnih drogovih (Mulqueen,

2017). V zadnjem desetletju se uvaja nova rešitev za zaščito drogov v stiku z zemljo. Najbolj izpostavljen del drogov ovijajo v pločevino iz zlitine bakra in cinka, ki preprečujeta navlaževanje in delujeta biocidno na morebitne glive in bakterije (Makuvek in sod., 2007).

Les v zunanjih razmerah je izpostavljen razkroju. Razkroja lesa ne moremo preprečiti, temveč ga lahko le upočasnimo (Humar in sod., 2022). V ta namen uporabljamo biocidne proizvode, ki jih z vakuumsko-tlačnimi postopki vnesemo v les. V Sloveniji lahko uporabljamo le biocidne proizvode, ki so priglašeni na Uradu za kemikalije Republike Slovenije in pred tem registrirani na Evropskem uradu za kemikalije (ECHA). V skladu z relevantnimi standardi se pričakuje, da je z biocidnimi proizvodi prepojena celotna beljava droga (NWPC, 2023). Drogovi v Evropi so praviloma izdelani iz lesa rdečega bora (*Pinus sylvestris*), črnega bora (*Pinus nigra*) ali lesa navadne smreke (*Picea abies*). Po svetu se za izdelavo impregniranih drogov vedno pogosteje uporablja tudi les plantažiranih evkaliptov (*Eucalyptus grandis*) in les ameriške duglazije (*Pseudotsuga menziesii*) (de Paz in sod., 2019). Če so drogov izdelani iz smrekovega lesa, morajo biti v spodnjem delu vrezani, da se izboljša penetracija aktivnih učinkovin v dele, ki so najbolj izpostavljeni (Winandy in sod., 2023). Zaradi aspiracije pikenj (Bolton in Petty, 1977), ki preprečuje penetracijo biocidnih proizvodov v les, brez vrezovanja ne moremo doseči penetracije, ki je potrebna za ustrezno dolgo življenjsko dobo lesa v stiku z zemljo (Brischke in sod., 2021). Ker je vrezovanje tehnološko zahteven proces, se za drogove v Sloveniji in Evropi uporablja predvsem borov les, kjer ni problemov s penetracijo, saj ima le ta velik delež beljave, ki je dobro



Slika 1: 3D model droga, vpetega v klešče



Fig. 1: 3D model of a utility pole secured in concrete clamps

impregnabilna. Alternativa impregniranemu lesu so naravno odporne lesne vrste. Žal teh v Evropi močno primanjkuje. V Evropi imamo na voljo le dve lesni vrsti, ki sodita v prvi do drugi razred odpornosti, kot ga določa standard EN 350 (CEN, 2016), in sicer: robinija – *Robinia pseudoacacia* in domači kostanj – *Castanea sativa*. Ker je zaloga teh lesnih vrst v slovenskih kot tudi evropskih gozdovih omejena, je večina telekomunikacijskih in daljnovidnih drogov izdelana iz impregniranega lesa (ZGS, 2021). Drogovi v Sloveniji so pogosto vpeti v klešče ali postavljeni na drogovnjak (slika 1), da se s tem zmanjša izpostavljenost razkroju.

Prva komercialno uspešna rešitev za impregnacijo telekomunikacijskih in daljnovidnih drogov je bila razvita leta 1933 v Indiji, ko je tamkajšnji vladni raziskovalec Sonti Kamesan razvil vodotopen biocidni proizvod na osnovi bakrovih, kromovih in arzenovih spojin. Kromove spojine so omogočile vezavo bakrovih in arzenovih učinkovin v les. Bakrove učinkovine so delovale kot fungicid, arzenove pa kot insekticid in sekundarni fungicid. Ta pripravek je bil ključna rešitev za zaščito lesa na prostem v 20. stoletju (Richardson, 1993; Preston, 2000). Zaradi strupenosti so arzenove in kromove spojine za zaščito lesa v EU prepovedali (Humar in sod., 2006), v ZDA pa močno omejili (Freeman in McIntyre, 2008). Namesto teh pripravkov so se za zaščito lesa v ogrožajočih razmerah uveljavili baker-etanolaminski pripravki (Thaler in sod., 2013; Wang in sod., 2013; Mbitnkeu Fetnga Tchebe in sod., 2020).

Učinkovitost baker-etanolaminskih pripravkov ni primerljiva s klasičnimi pripravki CCA (pripravki na osnovi Cu, Cr in As) in CCB (pripravki na osnovi Cu, Cr in B). Zahteve za impregnacijo lesa opišemo s tremi parametri, in sicer: vrsto biocidnega proizvoda, globino penetracije, izraženo v mm, in retencijo oziroma navzemom, izraženim v kg/m^3 aktivnih učinkovin v impregniranem delu lesa. Na primer, za zaščito lesa v tretjem razredu uporabe je bilo dovolj 4 kg/m^3 CCA, v četrtem razredu pa 6 kg/m^3 CCA. Ker je biocidni proizvod CCB manj učinkovit kot CCA, ga moramo za uporabo v četrtem razredu v les vnesti več, in sicer kar 8 kg/m^3 CCB (Willeitner, 2001). V standardu SIST EN 14229:2011 (Konstrukcijski les – Leseni drogov za nadzemne vode) (CEN, 2011) je v točki 5.7.2. zapisano, da mora biti les zaščiten s pripravki, ki zadoščajo zahtevam za četrti razred uporabe. Najbolj zanesljive podatke o zahtevani retenciji baker-etanolaminskih proizvodov najdemo v bazah skandinavskega sistema NTR (Nordic Wood Preservation Council) (NWPC, 2023). V dokumentih tega organa lahko razberemo zahtevane retencije za vse ključne biocidne proizvode v Evropi. Na primer, zahtevana retencija za baker-eta-

nolaminski proizvod Tanalith E je 20 kg/m^3 za četrti razred in 10 kg/m^3 za tretji razred uporabe. Primerljive vrednosti so podane tudi za Korasit KS2 (20 kg/m^3 – UC4; 12 kg/m^3 – UC3) in Wolmanit CX8 (18 kg/m^3 – UC4; 9 kg/m^3 – UC3) (NWPC, 2023). Ne glede na tip priprava se pri drogovi pričakuje, da bo prepojena celotna beljava. Pri tem je treba upoštevati, da je minimalna širina beljave vsaj 25 mm (CEN, 2007b), sicer je verjetnost razkroja prevelika. Vedno večja nevarnost za drogeve so tudi na baker tolerantne glive (Humar in sod., 2005; Karunasekera in sod., 2017). Zaradi pojava na baker tolerantnih gliv je bilo v zadnjih desetih letih treba dvigniti priporočene retencije (Humar in sod., 2018). Poleg baker-etanolaminskih pripravkov se za zaščito drogovi predvsem v ZDA uporabljajo še kreozotno olje, pentaklorofenol (PCP) in bakrov nafenat (Smith, 2023). Te rešitve v skladu z direktivo o biocidnih proizvodih niso dovoljene v Evropski uniji (EC, 2000). Raba lesa za telekomunikacijske drogeve ima dolgo tradicijo. Les je v primerjavi z alternativnimi rešitvami (jeklo, beton, aluminij ...) relativno poceni, z bistveno ugodnejšim ogljičnim odtisom (de Paz in sod., 2019).

Na območju Slovenije je bilo leta 2024 zabeleženih več razmeroma hitrih porušitev elektro drogovi. Drogovi, z načrtovano življenjsko dobo med 30 in 50 let (European Committee for Standardization, 2010), so se porušili po 3 do 5 letih. O podobnih izzivih so v preteklosti poročali tudi iz Nemčije in Švice (Ribera in sod., 2017). Poročila navajajo, da približno 10 % vgrajenih drogovi propade prej kot v 10 letih. Glede na upoštevano ceno vgradnje droga med 1600 € in 2000 € so to veliki stroški. Poleg tega trhlji drogovi ogrožajo tudi mimoidoče in zaposlene, ki opravljajo vzdrževalna dela. Namen tega članka je oceniti stanje izbranih daljnovidnih drogovi po nekaj letih uporabe in oceniti ključne vzroke za prehitro propad in podati priporočila, da se temu v prihodnje izognemo.

2 MATERIALI IN METODE

2 MATERIALS AND METHODS

Raziskavo smo opravili na dveh lokacijah v Sloveniji, in sicer Lokaciji A (ravnic) in Lokaciji B (gričevje) (preglednica 1). Drogovi so bili postavljeni na kmetijskih površinah, pašnikih, travnikih in poljih (slika 2). Preiskali smo 17 stojnih mest, en sveže impregniran drog na skladišču in dva droga, ki sta se podrli po petih oziroma devetih letih uporabe (slika 3).

Na dvajsetih drogovi smo opravili 122 meritev z rezistografom (IML PD500). Naprava rezistograf temelji na beleženju upora pri vrtanju. Z drobnim svedrom premera 2 mm v les izvrtamo luknjico in pri tem bele-



Slika 2: Daljnovidni drog A (levo) in vgradnja daljnovidnih drogov v betonske klešče (desno N drog)

žimo upor pri vrtanju. Če naprava ne zabeleži upora, to pomeni, da je les močno razkrojen. Metoda temelji na tem, da se za vrtanje luknje v razkrojen les uporabi manj energije kot za vrtanje v zdrav les (Kržišnik in sod., 2019; Wang in sod., 2005). Podatke smo podrobneje analizirali s programsko opremo Free Resi Proces-



Fig. 2: Double A-type pole (left) and installation of single N-type poles into concrete clamps (right)

sor (Downes in sod., 2018; Schimleck in sod., 2019). Rezistografska analiza je standardna in uveljavljena metoda, ki jo izkušeni strokovnjaki uporabljajo za oceno razkrojenosti lesa in lesnih konstrukcij.

Iz stoječih analiziranih drogov smo odvzeli 35 izvrtkov in jih uporabili za določanje penetracije in re-



Slika 3: Trhla drogova na skladišču



Fig. 3: Degraded utility poles in the storage yard

Preglednica 1: Analizirani drogovi

Stojno mesto št. Location no.	Tip droga* Pole type	Daljinovod Transmission line	Letnik droga Production year	Leto postavitve Installation year	Proizvajalec droga Producer
5	N	Daljinovod B	2018	2020	Podjetje A
40	N	Daljinovod B	2019	2019	Podjetje A
62	N	Daljinovod B	2019	2019	Podjetje A
63	N	Daljinovod B	2017	2019	Podjetje B
55	N	Daljinovod A	2018	2019	Podjetje A
56	N	Daljinovod A	2018	2019	Podjetje A
57-A	A	Daljinovod A	2018	2019	Podjetje A
57-B	A	Daljinovod A	2018	2019	Podjetje A
58	N	Daljinovod A	2008	2009	Podjetje B
59	N	Daljinovod A	2018	2019	Podjetje A
60	N	Daljinovod A	2018	2019	Podjetje A
61	N	Daljinovod A	2018 ali 2019	2019	Podjetje A
63-A	A	Daljinovod A	2018	2019	Podjetje A
63-B	A	Daljinovod A	2018	2019	Podjetje A
65	N	Daljinovod A	2020	2020	Podjetje A
66	N	Daljinovod A	2019	2019	Podjetje A
67	N	Daljinovod A	2019	2019	Podjetje A
68	N	Daljinovod A	2020	2020	Podjetje A
69	N	Daljinovod A	2018	2019	Podjetje A
nov	—	Skladišče	2022	—	Podjetje A

*N – samostojen drog

*A – dvojni drog, v obliki črke A

tencije. Izvrtke smo izolirali s pomočjo votlega svedra. Na skladišču daljinovodnih drogov smo podrobneje analizirali tudi dva podrta daljinovodna droga. Iz prvega smo izolirali pet kolotov debeline 5 cm na višinah 10 cm, 20 cm, 80 cm, 3 m in 7 m od spodnjega roba. Na drugem smo izolirali tri reprezentativne kolute in jih uporabili za nadaljnje analize. Kolute smo v laboratoriju preslikali z laboratorijskim optičnim čitalnikom in hiperspektralno kamero. Hiperspektralna analiza je bila opravljena z visoko resolucijskim skenerjem ClydeHSI Hyperion A3 (ClydeHSI, Škotska) z uporabo hiperspektralnih kamer za vidno in bližnjo infrardečo (VNIR; 400-1000 nm, $\Delta\lambda = 3$ nm) ali infrardečo (SWIR; 900-2500 nm, $\Delta\lambda = 10$ nm) valovno dolžino. Nato je bila opravljena analiza podatkov z uporabo analize glavnih komponent (PCA). Hiperspektralno slikanje je napredna slikovna tehnika, ki omogoča zajemanje spektralne informacije o vzorcu pri različnih valovnih dolžinah, hkrati pa ohranja prostorsko porazdelitev. Rezultat hiperspektralnega slikanja je slika pri različnih valovnih dolžinah, s čimer je na voljo spektralna informacija o vzorcu.

Iz izoliranih kolotov smo izrezali sredinski del. Vzorce smo posušili v laboratorijskem sušilniku Kam-

Table 1: Analyzed utility poles

bič pri 103 ± 2 °C do absolutno suhe mase. Vzorcem smo določili maso in jo primerjali z volumnom. Gostoto smo določali na preseku drogov za zunanjih 15 mm, 30 mm, preostalo beljavo in jedrovino. Na istih segmentih smo določili tudi retencijo bakrovih učinkovin v les. Vsebnost bakrovih učinkovin v vzorcih smo določali z rentgenskim fluorescenčnim spektrometrom (XRF TwinX, Oxford Instruments). Meritve so bile opravljene s PIN-detektorjem ($U = 26$ kV, $I = 112$ μ A, $t = 360$ s).

Posamezne vzorce in izvrtke lesa smo preiskali tudi z digitalnim mikroskopom. Mikroskopsko analizo smo napravili z digitalnim mikroskopom Olympus DSX1000 (Olympus, Tokio, Japonska). Analizirali smo površino izbranih vzorcev in prečni prerez. Pred mikroskopsko analizo smo prečno ksilotomsko ravnino poravnali z drsnim mikrotomom GSL 1 (Künten, Švica). Analizo smo naredili z mešano osvetlitvijo (svetlo in temno polje).

Ker gre za študij primera, so možnosti statistične analize omejene. V smiselni primerih smo izračunali povprečne vrednosti s pomočjo programa Microsoft Excel, v večini primerov pa podajamo vse izmerjene vrednosti, zato agregiranje podatkov v povprečja ni smiselno.

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

3 RESULTS AND DISCUSSION

Na terenu smo analizirali 17 stojnih mest in en položen drog v skladišču. Povzetki meritev so razvidni iz preglednice (preglednica 2). Stojna mesta so bila dveh tipov, 2 x A-drog, 15 x N-drog. Iz rezistografskih krivulj smo s pomočjo programske opreme izračunali gostoto zunanjih 5 centimetrov droga (Downes in sod., 2018; Schimleck in sod., 2019). Povprečna gostota borovega lesa je bila 428 kg/m³, kar je v skladu z literaturnimi podatki (300...490...860 kg/m³) (Wagenführ, 2014). Gostota borovih drogov niha med 314 kg/m³ (povprečna gostota droga št. 59) in 551 kg/m³ (povprečna gostota droga št. 57-A). Pri analizi teh podatkov je treba upoštevati, da se gostota nanaša na zunanji pet centimetrov oboda, ki je najbolj impregniran in tako zaščiten pred razkrojem. Gostota posredno kaže na kakovost lesa. Les z nižjo gostoto ima slabše mehanske lastnosti kot les z višjo gostoto (Gryc in sod., 2011). Poleg tega nizka gostota posredno nakazuje tudi razkroj. Glive razgradijo lesno maso in s tem znižujejo gostoto lesu (Schmidt, 2006). Ta povezava je lepo razvidna tudi

Preglednica 2: Največja in povprečna razkrojenost analiziranih drogov

Stojno mesto št. Location no.	Ocenjena gostota (kg/m ³) Estimated density (kg/m ³)	Največji delež razkrojenega preseka Maximum degraded cross-section	Povprečni delež razkrojenega preseka Average degraded cross-section	Povprečna penetracija (mm) Average penetration (mm)	Razred penetracije Penetration class	Koncentracija Cu (mg/kg) Cu concentration (mg/kg)	Ocena retencije biocidnega proizvoda (kg/m ³) Estimated retention (kg/m ³)
5	388	77,8%	54,6%	50	NP5	1.555	9,5
40	402	12%	3%	55	NP5	1.555	9,5
62	480	7,4%	1,9%	20	NP3	1.555	9,7
63	399	14,3%	4,8%	10	NP3	2.720	17,0
55	438	0,0%	0,0%	20	NP3	1.951	12,0
56	511	0,0%	0,0%	13	NP3	1.951	12,0
57-A	551	47,6%	34,2%	30	NP4	2.347	14,4
57-B	444	0,0%	0,0%	33	NP4	2.347	14,5
58	357	45,8%	19,3%	10	NP3	1.872	11,6
59	314	60,0%	30,5%	20	NP3	1.872	11,6
60	449	30,8%	8,3%	10	NP3	2.687	16,7
61	338	50,0%	10,0%	60	NP5	2.687	16,7
63-A	379	37,5%	19,3%	20	NP3	1.699	10,6
63-B	421	26,1%	5,2%	30	NP4	1.699	10,6
65	417	10,0%	2,5%				
66	507	25,0%	6,3%	39	NP5	2.297	14,4
67	437	28,6%	13,5%				
68	453	7,1%	1,2%	45	NP5	2.907	18,3
69	455	12,5%	2,5%	43	NP5	2.907	18,3
nov	411	0,0%	0,0%	38	NP4	2.297	14,5

Z vijolično so označene vrednosti penetracije, ki ne ustrezajo zahtevam NP5.

Z rdečo so označene retencije, ki ne ustrezajo zahtevam za 4. razred uporabe.

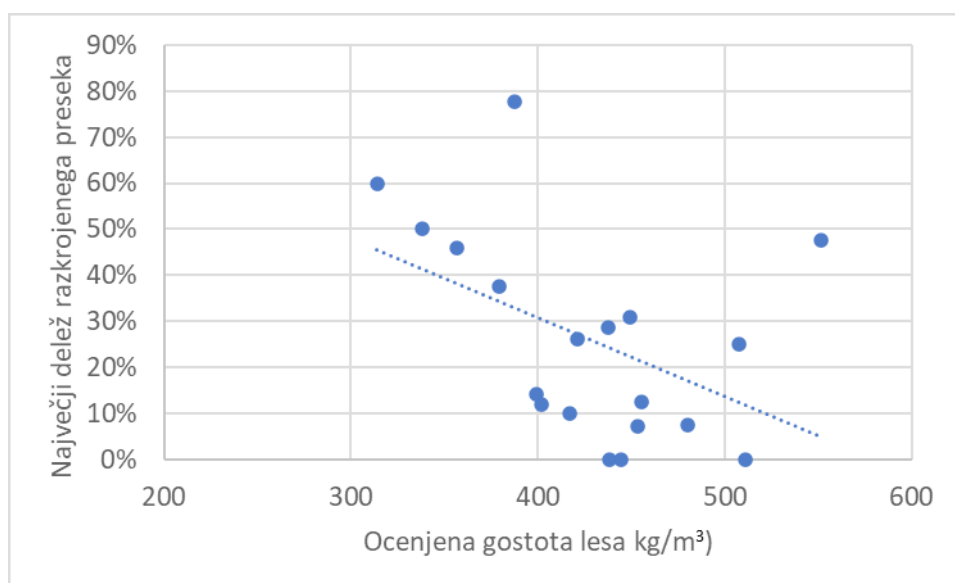
Z zeleno so označeni drogovi, ki so ponekod tako razkrojeni, da se lahko predčasno porušijo.

iz primerjave med razkrojenostjo preseka in ocenjeno gostoto, določeno z uporovnim vrtnjem (slika 4).

Vsaj minimalno razkrojenost smo z uporovnim vrtnjem določili kar na 16 od 19 analiziranih stoječih drogov. Največja razkrojenost preseka je nihala med 7,1 % in skoraj 78 %, kar pomeni, da je bil slednji drog tik pred porušitvijo.

V nadaljevanju nas je zanimalo, ali je razkrojenost homogena po celotni višini droga (preglednica 3). Najmanjšo razkrojenost smo določili približno 5 cm od pete droga, kljub temu da je peta zelo izpostavljena škropljenju vode. Ključen vzrok za nizko razkrojenost pete je povezan z dobro penetracijo bakrovih učinkovin v aksialni smeri. Les je bolj permeabilen v aksialni smeri kot radialni smeri, zato je ta rezultat pričakovan. Ta rezultat je posreden dokaz za dobro delovanje baker-etanolaminskih pripravkov, s katerimi so bili impregnirani ti daljnovidni drogovi (Freeman in McIntyre, 2008; Humar in Lesar, 2008; Thaler in sod., 2013). Meritve, kjer smo določali vpliv odmaknjenosti od tal na razkrojenost, niso najbolj reprezentativne, saj je bila opravljena le ena meritev. Več jih ni smiselno

Table 2: Maximum and average degradation of the analyzed utility poles



Slika 4: Povezava med razkrojenostjo preseka in ocenjeno gostoto, določeno z uporovnim vrtanjem

Fig. 4: Relationship between cross-sectional decomposition and estimated density determined by resistograph drilling

opraviti, saj vsaka meritev pomeni nevarnost za dodaten vstop gliv v sredico droga. Povprečna stopnja razkrojenosti v odvisnosti od višine je med 10 % (40 cm nad peto) in 15 % (120 cm in 180 cm nad peto). Največjo stopnjo razkrojenosti smo zabeležili 40 cm nad peto (78 %) in 120 cm (72 %). Tu in tam smo tudi v bližini vijakov opazili visoko stopnjo razkroja. Izvrtine skozi drog ne vplivajo pozitivno na življenjsko dobo. V izvrtinah lahko zastaja voda, kar lahko pospeši razkroj. V prihodnje bi bilo zelo smiselno izvrtine v drog napraviti pred impregnacijo, oziroma izvrtine dobro zaliti s koncentriranim baker-etanolaminskim pripravkom.

Kakovost impregnacije označimo z dvema parametroma, globino penetracije in retencijo, ki jo lahko razberemo iz izvrtkov. Nekaj primerov izvrtkov je prikazanih. Iz teh primerov sta razvidni variabilnost uporabljenega lesa in razlika v penetraciji (slika 5). Za daljnovodne droge se zahteva razred penetracije NP5 (CEN, 2007a). Ta razred penetracije je bil tudi zahteva naročnika v javnem naročilu. Pričakuje se, da imajo borovi drogi prepojeno celotno beljavo. Zara-

di boljše zaščite mora biti beljava široka vsaj 25 mm. Ker je jedrovina bora bolj odporna od beljave, je manjša verjetnost, da bi na jedrovini nastal razkroj. Kljub vsemu jedrovina bora ni tako odporna, kot je odporen dobro impregniran les. Naši eksperimentalni podatki kažejo, da je življenjska doba jedrovine rdečega bora 3-krat daljša kot življenjska doba smrekovega lesa, medtem ko impregnacija lesa z baker-etanolaminskimi pripravki podaljša življenjsko dobo za desetkrat (Humar in sod., 2019).

Penetracijo smo določili na 17 postavljenih drogovi in dveh propadlih drogovi na skladišču. Povprečna globina penetracije v analiziranih drogovi je bila 30 mm, največjo penetracijo smo zabeležili pri drogu 61 (60 mm), najmanjšo pa pri drogu 60 (10 mm). Penetracijo, ki ustreza razredu penetracije NP5, smo zabeležili pri šestih drogovi, penetracijo, ki ustreza zahtevam NP4, smo določili pri štirih drogovi, kar osem drogovi pa dosega le zahteve razreda NP3. To pomeni, da ima le 33 % drogovi ustrezno penetracijo NP5, kot jo zahteva standard EN 351-1 (CEN, 2007a) in stanje

Preglednica 3: Največja in povprečna razkrojenost analiziranih drogovi v odvisnosti od višine merjenja

Table 3: Maximum and average cross-sectional degradation of the analyzed utility poles as a function of measurement

Višina meritve Height of measurement	Največji delež razkrojenega preseka Maximum degraded cross-section	Povprečni delež razkrojenega preseka Average degraded cross-section	Število meritev No. of measurements
10 cm	29%	2%	20
20 cm	20%	20%	1
40 cm	78%	10%	17
70 cm	60%	13%	20
100 cm	64%	12%	13
120 cm	72%	15%	21
180 cm	48%	15%	17

stroke. Primeri izvrtkov, ki smo jih uporabili za določanje penetracije in retencije, so razvidni iz spodnjih slik.

tenzivnega razkroja, kar pripisujemo boljši odpornosti jedrovine. Standard SIST EN 350 (CEN, 2016) razvršča



Slika 5: Primeri izvrtkov, odvzeti iz analiziranih drogov (drog 57-A zgoraj, drog 68, sredina in drog 58 spodaj)

Fig. 5: Examples of core samples taken from the analyzed poles (pole 57-A top, pole 68 middle, and pole 58 bottom).

Poleg penetracije je pri impregniranem lesu treba zagotoviti še dobro retencijo (navzem). Za daljnovidne drogov, ki zagotavljajo energetska varnost prebivalstvu, se zaradi zanesljivosti upoštevajo zahteve za četrty razred uporabe (NWPC, 2023). Za impregnirano cono drogov se tako upošteva, da mora v les prodreti med 20 do 24 kg/m³ aktivnih učinkovin baker-etanolaminskih pripravkov. Ker je bilo zaradi slabe penetracije materiala za analizo malo, smo za posamezno analizo združevali vzorce dveh drogov. V drogih je bila določena povprečna retencija 13 kg/m³. Retencija je nihala med 10 in 18 kg/m³ in niti pri enem analiziranem drogu ni dosegala zahtev elektro podjetij v Sloveniji, ki znaša 20 kg/m³ (preglednica 2).

V nadaljevanju smo podrobneje analizirali še preseke predčasno porušanih drogov (preglednica 4). Gostota polomljenih drogov, ki smo jo določali gravimetrično (441 kg/m³), je primerljiva z gostoto, ki smo jo določali iz rezistografskih meritev (428 kg/m³). Gostota zunanjih 15 mm oboda porušanih daljnovidnih drogov je bila 571 kg/m³ (Podjetje A) oziroma 536 kg/m³ (Podjetje B). Ta del je bil tudi najbolj impregniran, zato razkroja ni bilo, kar se kaže v najvišji gostoti. Les pod zunanjim obodom je imel že nižjo gostoto. Najnižjo gostoto smo zabeležili pri drogu Podjetja A, na meji med beljavo in jedrovino (356 kg/m³). Ta del praktično ni bil impregniran, zato je razkroj neodporne beljave lahko hitro napredoval. Relativno nizka je tudi gostota jedrovine, kar pripisujemo juvenilni naravi tega tkiva (Arnič in sod., 2021). Na jedrovini ni bilo zaznati in-

jedrovino bora v 3. do 4. razred odpornosti.

Penetracija bakrovih učinkovin pri porušanih drogih je bila omejena na zunanjih 15 mm ali manj. Če bi želeli zagotoviti ustrezno kakovost in s tem povezano življenjsko dobo, bi morala biti prepojena celotna beljava. Navzem (retencija) bakrovih učinkovin v impregniran del je nižja od priporočil. Retencija v drogu Podjetja A je bila 14,1 kg/m³, pri drogu iz Podjetja B pa 12,4 kg/m³. Obe retenciji sta prenizki, da bi preprečevali glivni razkroj skozi načrtovano življenjsko dobo drogov.

Mikroskopska analiza je potrdila vizualna opazovanja. V lesu poškodovanih drogov je bilo na več mestih opaziti razkroj (sliki 6 in 7) glivnega micelija (slika 8). Zapončni, sekundarni micelij nakazuje, da so les okužile glive razkrojevalke in ne glive plesni (Zabel in Morrell, 2020). Micelij se razrašča po razpokah, traheidah ... Les je prizmatično razpokal, kot je značilno za rjavo trohnobo (Humar in sod., 2020). Ta mikroskopska analiza potrjuje analizo gostote in XRF meritve. Zunanji sloj, širok med 10 in 15 mm, je impregniran z bakrovimi učinkovinami, zato tam ni opaziti glivnega razkroja. Takoj pod tem slojem in do meje z jedrovino smo zaznali intenziven razkroj. Poleg glivnega razkroja smo opazili še izvrtine lesnih insektov, ki verjetno pripadajo enemu izmed kozličkov.

Poleg mikroskopske smo napravili še hiperspektralno analizo, s katero na preseku lahko vizualiziramo razkroj. Iz te analize se nedvoumno vidi, da ja zunanji obod drogov dobro impregniran in zato nerazkrojen. Nerazkrojena je tudi jedrovina. Vmesni sloj med im-

Preglednica 4: Gostota in navzem baker-etanolaminskih biocidnih proizvodov v tkivih razkrojenih borovih daljnovodnih drogov

Proizvajalec Producer	Analitsko mesto Analytical location	Povprečna gostota [kg/m³] Average density [kg/m³]	Koncentracija Cu (mg/kg) Cu concentration (mg/kg)	Ocena retencije biocidnega proizvoda (kg/m³) Estimated retention (kg/m³)
Podjetje A	Beljava 15 mm	571	2225	14,1
Letnik 2019	Beljava 30 mm	425	302	1,4
	Beljava 40+	365	160	0,6
	Jedrovina	482	0	0,0
Podjetje B	Beljava 15 mm	536	2082	12,4
Letnik 2015	Beljava 30 mm	405	37	0,2
	Beljava 40+	349	0	0,0
	Jedrovina	394	0	0,0

Table 4: Density and uptake of copper-ethanolamine biocidal products in the tissues of degraded Scots pine utility poles



Slika 6: Presek predčasno propadlega drogu – Podjetje A. Kolut je odvzet 2 m pod vrhom droga.

Fig. 6: Cross-section of a prematurely failed pole – Company A. The section was taken 2 m below the top of the pole.



Slika 7: Preseki predčasno propadlega drogu – proizvajalec B. Kolut je bil izoliran sredi droga.

Fig. 7: MCross-section of a prematurely failed pole – Company B. The section was taken from the middle of the pole.



Slika 8: Micelij, razviden na presekih drogov Podjetja A

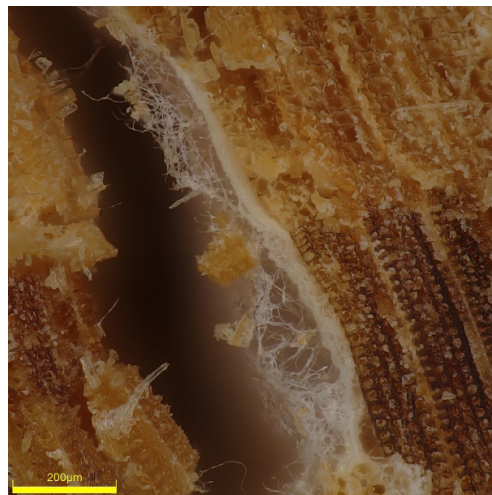
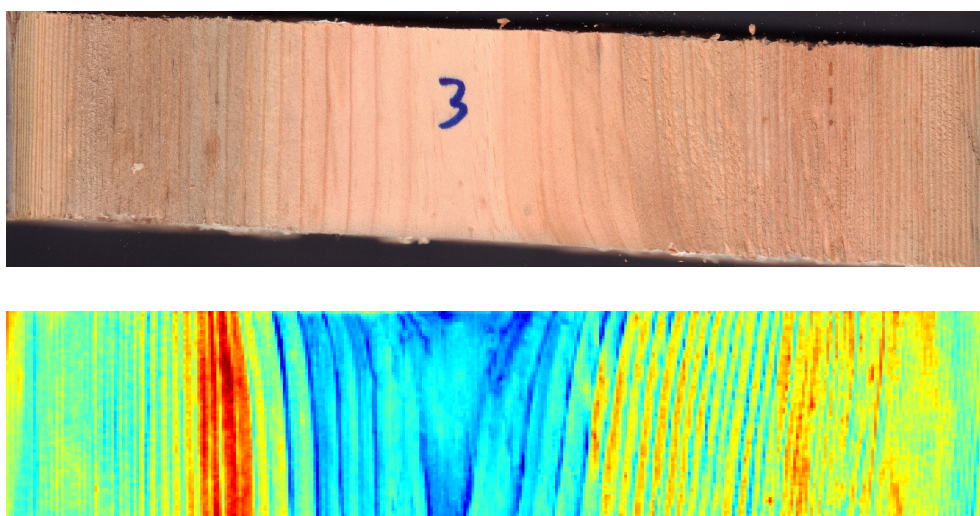


Fig. 8: Mycelium visible on cross-sections of poles from Company A



Slika 9: Slika radialne površine, zajeta z optičnim skenerjem (zgoraj) in hiperspektralno kamero (spodaj). Modra barva označuje jedrovino. Zeleno modri toni označujejo zdrav les beljave, rumeno-rdeči pa trohnobo.

Fig. 9: Radial surface image captured with an optical scanner (top) and a hyperspectral camera (bottom). Blue indicates heartwood, green-blue tones indicate healthy sapwood, and yellow-red tones indicate the presence of decay.

pregnirano beljavo in jedrovino pa je bolj ali manj razkrojen, na kar nakazujejo rumeno rdeči toni (slika 9). V prihodnje bi bilo mogoče razkroj vizualizirati tudi z drugimi tehnikami, kot je na primer 3d tomografija ali MRI oslikovanje.

4 ZAKLJUČKI

4 CONCLUSIONS

Na veliki večini pregledanih daljnovodnih drogov je že nekaj let po vgradnji nastal glivni razkroj. Večino razkroja so povzročile glive rjave trohnobe. Razkroj je pri večini drogov omejen na beljavo. To je vidno iz meritev z rezistografom in iz analize s hiperspektralno kamero.

Ključni razlog za pojav trohnobe je neustrezna impregnacija. Celotna beljava pri večini impregniranih drogov ni ustrezno prepojena, prav tako je navzem biocidnih proizvodov v les pri večini analiziranih drogov

prenizek. To je pripeljalo do prehitrega razkroja impregniranih daljnovodnih drogov.

Pojav trohnobe je verjetno pospešilo tudi dejstvo, da so bile izvrtine v drog napravljen po impregnaciji. V izvrtinah je lahko zastajala voda, kar bi lahko pospešilo razkroj drogov.

Pri novih drogovih priporočamo, da se vgrajujejo tako, da je peta vsaj 15 cm nad zemljo. Ker v izvrtinah lahko zastaja voda, to lahko pospeši razkroj. V prihodnje bi bilo zelo smiselno izvrtine v drog napraviti pred impregnacijo, oziroma izvrtine dobro zaliti s koncentriranim baker-etanolaminskim pripravkom.

Za celostno ovrednotenje pomena izvrtin na vlažnost lesa bi bilo smiselno dolgoročno spremljati vlažnost različno vgrajenih drogov.

Smiselno je, da se pred vgradnjo redno opravlja natančna kontrola kakovosti impregnacije, kar bo vodilo

do daljše življenjske dobe drogov in zanesljivejši oskrbi z električno energijo.

Predlagamo, da se droge, kjer razkroj ponekod presega 25 %, zamenja. Kako hitro bo prišlo do porušitve posameznih drogov, ni mogoče napovedati. To je odvisno od zunanjih obremenitev, podnebnih razmer in lastnosti lesa.

Glede na stanje lesa priporočamo redno spremljanje stanja visokonapetostnih drogov (uporovno vrtnje, izolacija izvrtkov), ki so vgrajeni na terenu.

Droge, ki so razkrojene, a je razkroj še omejen, bi bilo smiselno tretirati z biocidnim proizvodom na osnovi aktivne učinkovine Dazomet.

5 SUMMARY

5 POVZETEK

This study examines the factors contributing to the premature decay of wooden utility poles in Slovenia. The primary objective was to evaluate the physical and chemical properties of the poles to identify reasons for their shorter-than-expected service life, which poses significant financial and safety risks. Although traditional wood preservation techniques were employed for these poles, which are expected to last for 30 to 50 years, some failed within just 3 to 5 years of installation. Such premature failures can lead to higher maintenance costs and higher risk of injury to workers and the public.

To conduct the analysis, the research team investigated 17 utility poles in the field and two poles that had previously failed and were subsequently stored for further inspection. Using resistograph measurements, wood density and decay depth were analyzed, with particular focus on the outer wood layers, which are treated with copper-based preservatives to resist fungal decay. Additionally, core samples were taken to measure preservative penetration depth and copper retention levels, and a digital microscope was used for detailed examination of fungal activity and structural damage.

The findings revealed significant variation in wood density, with lower-density poles displaying more advanced decay. Microscopic analysis confirmed the presence of fungal mycelium in decayed areas, specifically brown rot fungi, which are known to degrade wood structure and integrity. The study also showed that preservative penetration was often insufficient, with only the outermost wood layer fully treated, leaving internal areas vulnerable. Furthermore, retention levels of copper-based preservatives did not meet recommended thresholds, indicating potential shortcomings in the application process.

The results underscore that insufficient preservative penetration and retention are the primary factors

driving premature pole decay. The study concludes that current preservation methods are inadequate for ensuring long-term durability and recommends several improvements. These include achieving deeper and more uniform preservative penetration, applying preservatives before drilling mounting holes to prevent water ingress, and conducting regular inspections and timely replacement of decayed poles. Adopting these preventive measures could significantly extend the service life of utility poles and reduce maintenance costs.

6 ZAHVALA

6 ACKNOWLEDGMENTS

Avtorji se zahvaljujejo finančni podpori Javne agencije za raziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS) v okviru raziskovalnih projektov J7-50231 (GROWTH: Rastni potencial in lastnosti lesa izbranih drevesnih vrst različnih provenienc: možnosti zaščite z modifikacijo in izzivi pri odzivanju na podnebne spremembe), J7-50226 (Analitska orodja nove generacije za dediščinsko znanost), raziskovalnega programa P4-0015 (Les in lignocelulozni kompoziti) in Infrastrukturnega centra (IC LES PST 0481-09).

7 LITERATURA

7 REFERENCES

- 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/asel.124.1>.
- Bolin C.A. in Smith S.T. 2011. Life cycle assessment of pentachlorophenol-treated wooden utility poles with comparisons to steel and concrete utility poles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5): 2475–2486. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.01>
- Bolton A.J., Petty J.A. 1977. Variation of susceptibility to aspiration of bordered pits in conifer wood. *Journal of Experimental Botany* 28(4): 935–941. <https://doi.org/10.1093/jxb/28.4.935>
- Brischke C., Alfredsen G., Humar M., Conti E., Cookson L., Emmerich L., Flæte P. O., Fortino S., Francis L., Hundhausen U., Irbe I., Jacobs K., Klamer M., Kržišnik D., Lesar B., Melcher E., Meyer-Veltrup L., Morrell J. J., Norton J., Suttie, E. 2021. Modeling the material resistance of wood—part 2: Validation and optimization of the meyer-veltrup model. *Forests* 12(5). <https://doi.org/10.3390/f12050576>
- CEN. 2007a. EN 351-1 – Durability of wood and wood-based products — Preservative treated solid wood. Part 1: Classification of preservative penetration and retention.
- CEN. 2007b. European Standard EN 351-1 - Durability of wood and wood-based products - Preservative-treated solid wood - Part 1: Classification of preservative penetration and retention.
- CEN. 2011. EN 14229 - Wood poles for overhead lines
- CEN. 2013. European standard EN 335, Durability of wood and wood-based products - Use classes: definitions, application to solid wood and wood-based products.
- CEN. 2016. European Standard EN 350 - Durability of wood and wood-based products. Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials.

- Downes G.M., Lausberg M., Potts B.M., Pilbeam D.L., Bird M., Bradshaw B. 2018. Application of the IML Resistograph to the infield assessment of basic density in plantation eucalypts. *Australian Forestry* 81(3). <https://doi.org/10.1080/00049158.2018.1500676>
- EC. 2000. REGULATION (EU) No 528/2012 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 22 May 2012 concerning the making available on the market and use of biocidal products. *Official Journal of the European Communities* L 269(528): 1–15.
- European Committee for Standardization. 2010. Eurocode - : basis of structural design.
- Freeman B.M.H., McIntyre C.R. 2008. Copper-Based Wood Preservatives. *Forest Products Journal* 58(10523): 6–27.
- Griffiths A.H. 2016. *Phidippides*. V: *Oxford Research Encyclopedia of Classics*. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199381135.013.4955>
- Gryc V., Vavřík H., Horn K. 2011. Density of juvenile and mature wood of selected coniferous species. *Journal of Forest Science* 57(3): 123–130. <https://doi.org/10.17221/18/2010-jfs>
- Hron J., Yazdani N. 2011. Nondestructive Strength Assessment of In-Place Wood Utility Poles. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 25(2): 121–129. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0000136](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000136)
- Humar M., Kržišnik D., Lesar B., Brischke C. 2019. The performance of wood decking after five years of exposure: Verification of the combined effect of wetting ability and durability. *Forests* 10(10). <https://doi.org/10.3390/f10100903>
- Humar M., Lesar B. 2008. Fungicidal properties of individual components of copper-ethanolamine-based wood preservatives. *International Biodeterioration and Biodegradation* 62(1): 46–50. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2007.06.017>
- Humar M., Lesar B., Kržišnik D. 2020. Tehnična in estetska življenjska doba lesa. *Acta Silvae et Ligni* 121: 33–48. <https://doi.org/10.20315/asetl.121.3>
- Humar M., Lesar B., Kržišnik D. 2022. Ocena stanja lesenega kipa Japonski festival Tanake Eisakuja = Assessment of the condition of Japanese Festival, a wooden sculpture by Tanaka Eisaku. *Acta Silvae et Ligni* (127): 1–12. Dostopno na: <https://doi.org/10.20315/ASetL.127.1>
- Humar M., Lesar B., Thaler N., Kržišnik D., Kregar N., Drnovšek S. 2018. Quality of copper impregnated wood in slovenian hardware stores. *Drvna Industrija* 69(2): 121–126. <https://doi.org/10.5552/drind.2018.1732>
- Humar M., Peek R.D., Jermer J. 2006. Regulations in the European Union with emphasis on Germany, Sweden and Slovenia. V: Townsend T. G. in Solo-Gabriele H. ur. *Environmental Impacts of Treated Wood*. 1st Editio. Boca Raton: CRC Press: 520.
- Humar M., Šentjerc M., Amartei S.A., Pohleven F. 2005. Influence of acidification of CCB (Cu/Cr/B) impregnated wood on fungal copper tolerance. *Chemosphere* 58(6): 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.09.031>
- Karunasekera H., Terziev N., Daniel G. 2017. Does copper tolerance provide a competitive advantage for degrading copper treated wood by soft rot fungi? *International Biodeterioration and Biodegradation* 117: 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.12.006>
- Kržišnik D., Brischke C., Lesar B., Thaler N., Humar M. 2019. Performance of wood in the Franja partisan hospital. *Wood Material Science and Engineering* 14(1): 24–32. <https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1438512>
- Makuvek J., Freeman M., McIntyre C. 2007. The Use of PostSaver® Barrier Wraps to Increase Service Life of Wood in Ground Contact: Including Implications for Canada. V: *CWPA Proceedings*. Canadian Wood Preservation Association: 80–88.
- Mbitnkeu Fetnga Tchebe T., Saha Tchinda J.-B., Ngueteu Kamlo A., Chimeni Yomeni D., Cheumani Yona A.M., Ndikontar Kor M. 2020. Efficiency evaluation of Neem (*Azadirachta indica*) oil and copper-ethanolamine in the protection of wood against a subterranean termite attack. *Les/Wood* 69(1): 47–56. <https://doi.org/10.26614/les-wood.2020.v69n01a04>
- Mulqueen A. 2017. *A Natural History of the Wooden Utility Pole*. California Public Utilities Commission. San Francisco. <https://www.cpuc.ca.gov/-/media/cpuc-website/divisions/communications-division/documents/broadband-implementation-for-california/caseworkers/a-natural-history-of-the-wooden-utility-pole-cpuc-2017.pdf>
- NWPC. 2023. Wood preservatives and other wood protection systems approved by the Nordic Wood Preservation Council no. 102. Gregersensvej.
- de Paz L.V.G., Ortega N.F., Rosales M.B. 2019. Assessment of wood utility poles' deterioration through natural frequency measurements. *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 9(1): 53–61. <https://doi.org/10.1007/s13349-018-0314-3>
- Preston A.F. 2000. Wood Preservation. *Forest Products Journal* 50(9): 1–12.
- Ribera J., Schubert M., Fink S., Cartabia M., Schwarze F.W.M.R. 2017. Premature failure of utility poles in Switzerland and Germany related to wood decay basidiomycetes. *Holzforschung* 71(3): 241–247. doi: 10.1515/hf-2016-0134.
- Richardson B.A. 1993. *Wood preservation*. 2nd ed. London, E. & F.N. Spon.
- Schimleck L., Dahlen J., Apilaza L. A., Downes G., Emms G., Evans R., Moore J., Pâques L., Van den Bulcke J., Wang X. 2019. Non-destructive evaluation techniques and what they tell us about wood property variation. *Forests* 10(9). <https://doi.org/10.3390/f10090728>
- Schmidt O. 2006. *Wood and tree fungi: Biology, damage, protection, and use*. Heidelberg Springer-Verlag Berlin. <https://doi.org/10.1007/3-540-32139-X>
- Simoniti V. 1990. Turki so v deželi že: turški vpadi na slovensko ozemlje v 15. in 16. stoletju. Celje, Mohorjeva družba.
- Smith S.T. 2023. CoalTar Distillate (Creosote)-The First and Still Great Choice to Preserve Utility Poles. *Forest Products Journal* 73(1): 1–5. <https://doi.org/10.13073/2376-9637-73.1.1>
- Thaler N., Lesar B., Humar M. 2013. Performance of copper-ethanolamine-impregnated scots pine wood during exposure to terrestrial microorganisms. *BioResources* 8(3): 3299–3308. <https://doi.org/10.15376/biores.8.3.3299-3308>
- Thimons M. 2014. Steel utility poles versus wood. *Steel Times International* 38(3): 37–38.
- Wagenführ R. 2014. *Holzatlas*. 4th ed. Leipzig, Fachbuchverlag.
- Wang W., Zhu Y., Cao J. 2013. Evaluation of Copper Leaching in Thermally Modified Southern Yellow Pine Wood Impregnated with ACQ-D. *BioResources* 8(2): 4687–4701. <https://doi.org/10.15376/biores.8.3.4687-4701>
- Wang X., Wiedenbeck J., Ross R.J., Forsman J.W., Pilon C., Brashaw B.K. 2005. Nondestructive evaluation of incipient decay in hardwood logs. *Technology Review*, 11. http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr162.pdf
- Willeitner H. 2001. Current national approaches to defining retentions in use. *COST E22*.
- Winandy J.E., Hassan B., Morrell J.J. 2023. Review of the effects of incising on treatability and strength of wood. *Wood Material Science and Engineering* 18(2): 42–50. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2028008>
- Zabel R.A., Morrell J.J. 2020. *Wood microbiology : decay and its prevention*. 2nd ed.. Amsterdam, Academic Press.
- ZGS. 2021. Vrstna sestava gozdov Ljubljana, Zavod za gozdove Slovenije. <https://www.gozd-les.com/slovenski-gozdovi/statistika-gozdov/vrstna-sestava>