

# TEHNIČNA IN ESTETSKA ŽIVLJENJSKA DOBA LESA

## TECHNICAL AND AESTHETIC SERVICE LIFE OF WOOD

Miha HUMAR<sup>1</sup>, Boštjan LESAR<sup>2</sup>, Davor KRŽIŠNIK<sup>3</sup>

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

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

(3) Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, davor.krzisnik@bf.uni-lj.si

### IZVLEČEK

Les na prostem je izpostavljen delovanju biotskih in abiotskih dejavnikov razkroja. V naravi so ti procesi zaželeni, kadar pa les uporabljamo v komercialne namene, želimo razkroj čim bolj upočasniti. V primeru razvrednotenja lesa pa moramo lesene elemente zamenjati. Lesene izdelke praviloma menjamo zaradi estetskih razlogov ali nedoseganja tehničnih zahtev. V tem prispevku opisujemo najpomembnejše mehanizme in razloge za razgradnjo lesa na prostem, naravno odpornost lesa in sodobne rešitve za zaščito. Na koncu so predstavljeni ključni rezultati o obnašanju lesa na terasi lesenega modelnega objekta na Oddelku za lesarstvo. Terasa ponazarja podobno izpostavitve kot mostovi, pohodne površine oziroma streha, zato je primerna kot odličen prikaz obnašanja lesa na prostem.

**Ključne besede:** les, odpornost lesa, življenjska doba lesa, razkroj, barvne spremembe, lesne glive

### ABSTRACT

In outdoor applications wood is exposed to biotic and abiotic degradation factors. These processes are essential for carbon circulation. However, if wood is used in commercial applications, these processes need to be slowed down as much as possible. When wood is degraded, it has to be replaced. In general, wooden elements are replaced for aesthetic reasons or due to the failure to meet technical requirements. This paper describes the most important mechanisms of wood degradation in outdoor applications. Special emphasis is given to the natural durability of wood and state-of-the-art preservation solutions. In addition, key results on the performance of the wooden on the decking of a study object in Ljubljana are presented. The decking represents a similar exposure to that of bridges, outdoor flooring or roofs, and therefore can be used as a model for the assessment of the performance of wood used outdoors.

**Key words:** wood, durability, service life, decay, colour changes, wood inhabiting fungi

GDK 84--013.8(045)=163.6

DOI 10.20315/ASetL.121.3

Licensed CC BY-SA 4.0

Prispelo / Received: 29. 10. 2019

Sprejeto / Accepted: 4. 2. 2020

## 1 UVOD

### 1 INTRODUCTION

Materiali na osnovi lesa so CO<sub>2</sub> nevtralni in obnovljivi. Tudi zato jih uvrščamo med okolju prijazne materiale. Raznolike lesne vrste in kompoziti omogočajo široko paleto ustvarjalnih in estetskih alternativ materialom z večjimi okoljskimi vplivi, tako med proizvodnjo kot tudi med uporabo in po koncu življenjske dobe. Med uporabo so les in leseni izdelki izpostavljeni številnim okoljskim vplivom, ki delujejo na les. Za materiale na osnovi lesa so nihajoča vlažnost in biološki dejavniki, kot so plesni, glive modrivke in razkrojevalke pogosto kritičen dejavnik, ki vpliva na življenjsko dobo lesa. To je še posebej pomembno pri aplikacijah, kot so fasadne obloge, terase, stavbno pohištvo, vrtno pohištvo, ograje itd., ki so v rabi na prostem in so izpostavljeni različnim okoljskim vplivom (Isaksson in sod., 2014). Napovedovanje življenjske dobe, analiza celotnih stroškov objekta ter estetika lesa in na lesu osnovanih materia-

lov so bistvenega pomena za njihovo promocijo in večjo uporabo v gradbenem sektorju. Žal večina evropskih lesenih vrst nima naravno odpornega lesa (CEN, 2017). Kar 90 % lesne zaloge v Sloveniji ima les, ki ga uvrščamo v najnižji 4 in 5 razred odpornosti. Zaščitni ukrepi so zato neizogibni pri uporabi na prostem, kjer je les izpostavljen vremenskim vplivom ali je celo v stiku s tlemi. Te tehnike vključujejo: uporabo biocidov, vodo-odbojnih sredstev in površinskih premazov, konstrukcijsko zaščito, razvoj nove generacije kompozitov ... Odpornost lesa na različne dejavnike staranja je vedno kombiniran učinek toksičnih ali inhibitornih sestavin na eni strani in strukturnih, anatomskih ali kemičnih načinov hidrofobnosti, ki je eden najpomembnejših dejavnikov. Poleg tega je treba upoštevati, da se videz lesa v življenjskem obdobju spreminja. Lastniki se pogosto odločijo za menjavo izdelka ali posameznega elementa zaradi spremembe videza, kljub temu da še vedno opravlja svojo tehnično funkcijo. Čas, ko element ali izdelek

ustreza estetskim zahtevam lastnika imenujemo estetska življenjska doba, ki je pogosto odločilen kriterij za menjavo lesa in lesnih izdelkov (Meyer-Veltrup in sod., 2017). Ker je estetska življenjska doba zelo subjektivna in odvisna od posameznika, je ne moremo natančno napovedati. V nasprotju z estetsko življenjsko dobo je tehnična življenjska doba povsem objektivna. Ta termin označuje čas, ko les (oziroma lesni izdelki) opravlja svojo funkcijo in ustreza tehničnim zahtevam.

## 2 DEJAVNIKI RAZKROJA LESA

### 2 WOOD DEGRADATION

Les je na prostem izpostavljen delovanju biotskih in abiotskih dejavnikov razkroja. V naravi so ti procesi zaželeni in nujno potrebni. Kadar les uporabljamo v gospodarske namene, želimo te procese v čim večji meri upočasniti. Razkrojnih procesov namreč ni mogoče povsem ustaviti. Abiotski dejavniki so dejavniki nežive narave, kot so npr. vremenski in kemijski vplivi (slika 1). Vremenski pojavi vplivajo na življenjsko dobo lesa in lahko povzročajo visoke stroške vzdrževanja lesa in lesnih izdelkov. Atmosferski kisik, padavine in posledično izpiranje aktivnih učinkovin, temperaturna nihanja in sončna svetloba povzročajo razmeroma majhne in počasne poškodbe lesa v primerjavi z ognjem. Les začne spreminjati svojo barvo že takoj po izpostavitvi vplivom okolja, saj dobro absorbira ultravijolično svetlobo. Zaradi vpliva sončne svetlobe se na površini začno specifične fizikalne in kemijske reakcije, povezane s procesi fotodegradacije. Predvsem UV svetloba in njajoča vlažnost lesa lahko vplivata tudi na pojav razpok na površini lesa, skozi katere vstopa voda, ki posredno vpliva na razvoj gliv v lesu. Z vidika estetske življenjske dobe je prav barvna stabilnost naravnega lesa med najpomembnejšimi lastnostmi, ki vplivajo na nakupno odločanje (Žlahtič in Humar, 2016, 2017).

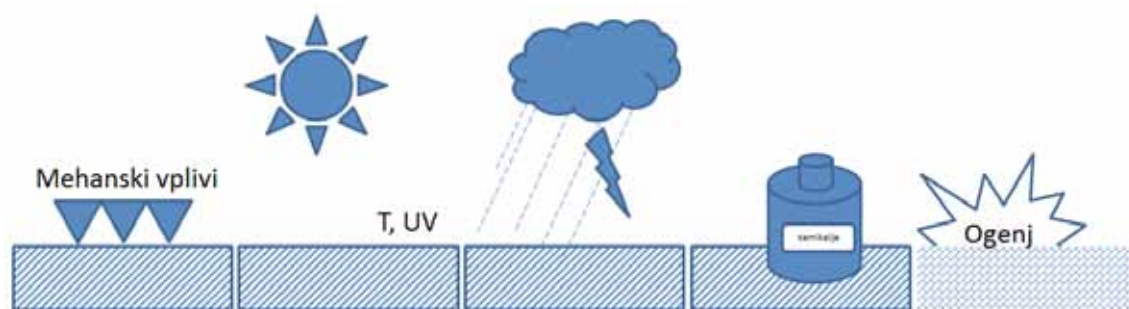
UV svetloba (valovne dolžine med 100–400 nm) je energijsko najintenzivnejši, očesu nevidni del sončne svetlobe. Pod njenim vplivom poteka fotodegradacija lesa. Vidna svetloba, ki jo opazimo s človeškim očesom

(valovne dolžine 400–750 nm), prodre v les do globine 200  $\mu\text{m}$  (Feist in Hon, 1984). Vidna svetloba krajših valovnih dolžin (med 100 nm in 400 nm) lahko prodre v les do globine 75  $\mu\text{m}$ . Prav slednji spekter svetlobe ima največji vpliv na fotodegradacijo. Kljub temu, da UV svetloba dosega samo 5 % energije v sončni svetlobi, ima močan vpliv na fotokemične reakcije na površini lesa (Feist in Hon, 1984; Hon, 2001). Pri vrednotenju barvnih sprememb in posledic delovanja UV sevanja moramo upoštevati, da verižne reakcije, ki jih sproži sevanje UV, segajo bistveno globlje, kot sega neposreden vpliv UV svetlobe.

Na UV svetlobo lesa so občutljive vse komponente, najbolj lignin. Lignin v povprečju absorbira 80 % do 95 % UV svetlobe. Od 5 % do 20 % absorpcije lahko pripišemo celulozi in hemicelulozam, največ 2 % ekstraktivom (Norrstrom, 1969). UV svetloba, ki se absorbira v lesu, povzroči fotokemijske reakcije, ki najprej vodijo do diskoloracije, kasneje pa do vedno bolj intenzivne fotodegradacije (Hon, 2001). Proces fotooksidacijske degradacije lesa vključuje depolimerizacijo polimernih verig in oksidacijo lignina. V končni stopnji fotodegradacija vodi do slabšanja fizikalnih, kemijskih in bioloških lastnosti (odpornosti lesa) lesa (Lesar in sod., 2011).

Fotodegradacija lignina privede do tvorbe prostih radikalov in nastanka obarvanih nizko molekularnih spojin, ki se izpirajo s površine lesa. Prosti radikali reagirajo s kisikom in tvorijo karbonilne in karboksilne kromoforne skupine (Hon, 2001), ki so odgovorne za nastanek barvnih sprememb (Ayadi in sod., 2003). Barvne spremembe so posledica sprememb kromofornih skupin v ligninu, ki so značilne tako za listavce kot iglavce. Za iglavce je dokaj značilno, da se zaradi izpostavitve svetlobi obarvajo rumeno. Pri lesu listavcev so barvne spremembe nekoliko bolj kompleksne in se jih ne da opisati enoznačno (George in sod., 2005).

Poleg sončne svetlobe in temperature imata zelo pomemben vpliv na fotodegradacijo tudi kisik in voda (Deka in sod., 2008). Voda katalizira številne radicalske procese razgradnje in spira rjave razgradne



**Slika 1:** Abiotski dejavniki razkroja lesa (Žlahtič Zupanc, 2017)

**Fig. 1:** Abiotic factors of wood degradation (Žlahtič Zupanc, 2017)



**Slika 2:** Siva, razpokana površina je posledica delovanja vremenskih vplivov (foto: Miha Humar)

produkte iz lesa. Rjavi razgradni produkti so ostanki fotodegradiranega lignina. Zato les, ki je izpostavljen padavinam in sevanju UV, posivi, les, ki ga razkrajajo samo žarki UV, pa porumeni ali porjavi. Siva barva je posledica povišanega deleža celuloze na površini lesa, saj so padavine izprale razgradne produkte s površine lesa. Po več letih izpostavitve les dobi patino, ki je navadno zaznamujeta siva barva in groba struktura površine (slika 2). V nasprotju z razširjenim ljudskim prepričanjem siva patina nima vpliva na odpornost lesa in lesa ne ščiti pred razkrojem (Kržišnik in sod., 2018a). Površino vremenskim vplivom izpostavljene ga lesa lahko do določene mere razgradijo tudi ose. Ose uporabijo zunanji sloj lesa, ki ga sestavlja večinoma le celuloza, za izdelovanje osirja (Slika 3).



**Slika 3:** Osa nabira celulozo s površine lesa, izpostavljenega vremenskim razmeram (foto: Davor Kržišnik)

**Fig. 2:** The grey, cracked surface is the result of weathering (photo: Miha Humar)

V ugodnih razmerah lahko les postane hrana za številne organizme, ki so sposobni eno ali več sestavin lesa razgraditi do stopnje, ki jo lahko presnovijo. Med biotskimi dejavniki razkroja največjo škodo povzročajo glive z razkrojem celičnih sten lesa, zaradi česar se zmanjšajo mehanske lastnosti, masa in posledično tudi uporabnost lesa. Zato je še posebej pomembno, da s primerno zaščito preprečimo ali omejimo ugodne razmere za rast in delovanje gliv.

Glive so večcelični organizmi, ki po svoji raznovrstnosti presegajo rastline. Schmidt (2006) navaja, da na svetu obstaja 1,6 milijona gliv, med njimi je do zdaj opisanih zgolj 120.000 vrst. Ne glede na dejansko število gliv je jasno, da je kraljestvo gliv zelo obsežno. Glive so heterotrofni organizmi s celično steno iz hitina.

**Fig. 3:** Wasp collecting cellulose from the surface of weathered wood (photo: Davor Kržišnik)

Glive sestavljajo nitaste strukture, ki jih imenujemo hife; preplet hif, ki sestavlja podgobje, imenujemo micelij. Glive, ki živijo na lesu ali se z njim prehranjujejo, spadajo v tri debla: Ascomycota, Basidiomycota in Deuteromycota.

Glive razkrojevalke lesa lahko glede na njihovo delovanje in končni učinek, ki ga povzročajo na lesu (preglednica 1), v grobem delimo na: glive, ki les obarvajo (glive modrivke in plesni), in glive, ki povzročajo trohnobo (glive bele trohnobe, glive rjave trohnobe in glive mehke trohnobe) (Pečenko, 1987). Glive, povzročiteljice obarvanja lesa, se prehranjujejo s škrobom v parenhimskih celicah beljave in obarvajo les z izločanjem melanina (Zink in Fengel, 1989) (slika 4) in s tem vplivajo predvsem na videz lesa. Ker pomodreli les izgubi del svoje estetske vrednosti, ga ne moremo uporabiti v vseh aplikacijah (Gobakken in Vestøl, 2012). Delovanje gliv modrivk se največkrat kaže v modrem, sivem ali črnem obarvanju. Modrenje povzroča od 100 do 250 vrst gliv, ki jih praviloma uvrščamo v debla Ascomycota in Deuteromycota. Najpogostejše glive modrivke so *Aureobasidium pullulans*, *Sclerophoma pithyophila*, *Rhinoctadiella atrovirens*, *Cladosporium sphaerospermum* ... (Schmidt, 2006). Ker glive modrivke praviloma ne razgrajujejo celuloze ali lignina, ne vplivajo na mehanske lastnosti lesa. Večinoma prodirajo skozi stene celic prek naravnih medceličnih povezav - pikenj, redkeje skozi odprtine, ki jih naredijo same. Prenašajo se s sporami z vetrom ali jih s seboj prenašajo insekti, ki živijo v skorji ali beljavi dreves (Kržišnik in sod., 2018b). Podobno kot glive modrivke tudi plesni povzročajo obarvanja lesa, ki se pojavlja samo na površini. Glede na specifično barvo konidijev, najpogosteje povzročajo črno (*Aspergillus niger*) ali zeleno obarvanje (*Penicillium* spp., *Trichoderma* spp.).

Razkroj lesa se v ugodnih razmerah začne z okužbo s sporami, konča pa se, ko je les popolnoma razkrojen - mineraliziran. V začetni fazi razkroja glive prodirajo v lumne celičnih sten in ga fizično osvojijo. V tej stopnji navadno še ne opazimo izgube mase lesa. Zato to stopnjo navadno imenujemo tudi nevidno. Ko razkroj napreduje, se pojavijo rahle diskoloracije in spremembe v

teksturi lesa. To fazo razkroja imenujemo zgodnja faza. V tej stopnji je razkroj opazen, vendar ne očitno. Pojavi se tudi prva občutna izguba mase. Stopnji, ko prvič brez težave prepoznamo razkrojen les, pravimo vmesna stopnja razkroja. V tej stopnji les še ohrani svoje strukturne lastnosti. Med seboj še lahko prepoznamo posamezne drevesne vrste. V zadnji fazi les popolnoma izgubi svojo prvotno teksturo.

Glive, ki povzročajo rjavo trohnobo, spadajo med najpogostejše in najbolj destruktivne uničevalce lesa. Med razkrojem glive močno oslabijo mehanske lastnosti lesa, predvsem natezno trdnost. Glive rjave trohnobe razkrajajo predvsem hemiceluloze in celulozo, medtem ko ostane lignin skoraj nedotaknjen. Razkrojen les potemni, razpoka in izgubi skoraj vso trdnost (slika 5). Mikroorganizmi, ki okužijo celico, lahko prodrejo v celico prek celične stene mehansko ali z razgradnjo celične stene. Slednje je znano za glive, ki s pomočjo ustreznih encimov hidrolizirajo ali oksidirajo sestavine celične stene. V začetnih fazah razkroja hife prodirajo iz celice v celico prek pikenj, prevajalnih elementov in parenhima. Kasneje si z razgradnjo celične stene same ustvarjajo prehode. Najbolj tipične glive, ki povzročajo rjavo trohnobo, so: kletna goba (*Coniophora puteana*), siva hišna goba (*Serpula lacrymans*), bela hišna goba (*Antrodia vaillantii*), (*Oligoporus placenta*), tramovki (*Gloeophyllum trabeum*) in (*Gloeophyllum saepiarium*), luskasta nazobčenka (*Lentinus lepideus*) in hrastova labirintnica (*Daedalea quercina*). Taksonomsko gledano rjavo trohnobo najpogosteje povzročajo glive iz debla Basidiomycota. Glive rjave trohnobe pogosteje razkrajajo les iglavcev kot les listavcev. Zaradi kompleksne tridimenzionalne zgradbe, hidrofobnosti in naključnega premeženja enot lignina, ki so povezane z različnimi tipi kemijskih vezi, večina organizmov ne more razgraditi lignina (Fengel in Wegener, 1989). Po delovanju gliv rjave trohnobe je lignin praviloma le modificiran in ni razgrajen na osnovne, fenilpropanojske enote (slika 5). Les se obarva rjavo zaradi razkroja celuloze in hemiceluloz, posledično se začnejo sproščati notranje napetosti in les značilno razpoka (prizmatična trohnoba) (Pečenko,

**Preglednica 1:** Poškodbe, ki jih povzročajo lesne glive na lesu

| Skupine gliv, povzročiteljic poškodb                      | Glive presnavljajo  | Vrsta poškodbe                 |
|---|---|--------------------------------|
| Glive, ki les obarvajo<br>(Ascomycota, Deuteromycota ...) | Snovi v celičnih lumnih, produkte fotodegradacije, prah na površini, vsebino parenhimskih celic | Obarvanje lesa                 |
| Glive razkrojevalke<br>(Basidiomycota in Ascomycota)      | Lignin in celulozo  | Bela trohnoba                  |
| Glive razkrojevalke<br>(Basidiomycota in Ascomycota)      | Predvsem celulozo   | Rjava trohnoba                 |
| Glive »mehke« trohnobe<br>(nepopolne glive in Ascomycota) | Celulozo (predvsem v S2 plasti stene)   | »Mehka« trohnoba<br>(soft rot) |

**Table 1:** Damage caused by wood inhabiting fungi on wood



**Slika 4:** Temni melaminski pigmenti na površini pomodrelega lesa. Les je bil 18 mesecev izpostavljen vremenskim razmeram na terenskem polju Oddelka za lesarstvo (površina  $256 \mu\text{m} \times 256 \mu\text{m}$ ) (foto: Miha Humar).

**Fig. 4:** Dark melamine pigments on the surface of blue-stained wood. The wood has been exposed to weathering on the test field of the Department of Wood Science and Technology (area of  $256 \mu\text{m} \times 256 \mu\text{m}$ ) for 18 months (photo: Miha Humar).

1987). Ker v naravi glive rjave trohnobe pogosteje okužijo iglavce kot listavce, vlada prepričanje, da te glive na splošno lažje razkrajajo les iglavcev kot les listavcev (Cowling, 1961). Vendar je bilo z laboratorijskimi testi dokazano, da so glive rjave trohnobe prav tako sposobne razkrajati listavce (Green in Highley, 1997). Dokazali so, da med vzorci beljave s približno enako gostoto ni bilo opaziti statistično značilnih razlik v razkroju med izpostavitvijo glivam tramovkam, beli hišni gobi in luskasti nazobčenki. Pogostejšo okužbo iglavcev z rjavo trohno bo lahko pripišemo kemični sestavi lesa. Iglavci namreč vsebujejo več mananov kot listavci, ki imajo večji delež ksilanov. Glive rjave trohnobe najprej učinkoviteje razgradijo manane kot ksilane. Zato lahko domnevamo, da so glive rjave trohnobe na iglavcih bolj konkurenčne in jih kolonizirajo pred glivami bele trohnobe. V laboratoriju, v sterilnih razmerah, nimajo konkurence, zato ni bistvene razlike med njimi (Green in Highley, 1997).

Popolne razgradnje lignina so sposobne glive bele trohnobe, ki imajo edinstveno sposobnost popolne depolimerizacije lignina do ogljikovega dioksida in so edini organizmi, ki lahko razgradijo vse komponente ole-

senele celične stene (Zabel in Morell, 1992). Glive bele trohnobe so najpogostejše povzročiteljice razkroja lesa na prostem, predvsem na lesu listavcev. Poleg lignina v večji ali manjši meri razkrajajo tudi celulozo in hemiceluloze. Les je zaradi oksidativnega razkroja lignina svetlejši, zato to vrsto razkroja imenujemo bela trohnoba. Večinoma jih uvrščamo med Basidiomycote (prostotrosnice), redko se pojavijo tudi predstavnice Ascomycot (zaprtotrosnice) (Schmidt, 2006). Glive bele trohnobe lignina se praviloma ne uporabljajo kot vir energije in ogljika. Razgradnja ligninskega matriksa je potrebna, da glive oziroma njihovi encimi pridejo do celuloze in hemiceluloz, ki jih lignin obdaja in so za druge organizme nedostopni (Sánchez, 2009). Poznamo dva tipa bele trohnobe, sočasno ali simultano (sočasna razgradnja lignina in celuloze) in selektivno (selektivna razgradnja lignina) (Zabell in Morrell, 1992). Posebna oblika bele trohnobe je piravost, pri kateri nastajajo črne črte ali lise, s katerimi se različne vrste ali nekompatibilni miceliji iste vrste ločijo med seboj. Linije so posledica fenolnih oksidaz, s katerimi se glivne snovi ali snovi gostiteljskega lesa pretvarjajo v melanin (Schmidt, 2006).



**Slika 5:** Prizmatično razpokan in rjavo obarvan les je značilen za razkroj z glivami rjave trohnobe (foto: Miha Humar)

**Fig. 5:** Prismatically cracked and brown-coloured wood is characteristic of decomposition by brown rot fungi (photo: Miha Humar)

Za rast gliv so poleg substrata potrebni še naslednji dejavniki: kisik, nekoliko kisle razmere (pH med 4,0 in 5,5), ugodne temperature in dovolj visoka vlažnost lesa. Različne študije o glivah razkrojevalkah lesa so pokazale, da je minimalna vlažnost lesa, primerna za razkroj, odvisna od vrste glive in se praviloma giblje od okoli 25 % do 30 % (območje nasičenja celičnih sten) (Johansson, 2014). Številni avtorji (npr. Zabel in Morell, 1992; Stienen in sod., 2014; Meyer in Brischke, 2015) so v raziskavah dokazali, da glive lahko kolonizirajo, navlažijo in nato razkrajajo vzorce lesa tudi z vlažnostjo, nižjo od območja nasičenja celičnih sten, če je le v bližini vir vode. Dokazali so, da se je v skrajnih primerih micelij razrašal po lesu s 17,4-odstotno vlažnostjo. Optimalna temperatura za delovanje gliv se giba med 20 °C in 30 °C (Teodorescu in sod., 2017). Glive sicer lahko razkrajajo les v območju med 3 °C in 40 °C. Pri nižjih temperaturah zmrzne voda, pri višjih pa pride do denaturacije proteinov. Temperaturo in vlažnost lesa lahko skupaj opišemo kot klimo v materialu (ang. material climate). To bi bilo treba obravnavati kot glavni parameter pri napovedovanju življenjske dobe lesa (Brischke in sod., 2008; Isaksson in Thelandersson, 2013; Pouska in sod., 2016). Ti dejavniki se lahko v veliki meri razlikujejo tudi v območju posameznega lesenega izdelka oziroma zgradbe zaradi oblikovanja, izdelave in interakcije med posameznimi elementi izdelka (Gobakken in sod., 2008; Van Acker in sod., 2015).

### 3 NARAVNA ODPORNOST LESA

#### 3 NATURAL DURABILITY OF WOOD

Velik vpliv na delovanje gliv ima tudi vrsta lesa. Naravna odpornost (ang. natural durability) je v najširšem pomenu definirana kot odpornost lesa proti delovanju fizikalnih, kemijskih ali bioloških dejavnikov (Dinwoodie, 2000). Ker je delovanje biotskih dejavnikov razkroja hitrejša, najpogosteje ta termin razumemo kot odpornost proti delovanju gliv in insektov. Nedavni modeli jasno kažejo, da je življenjska doba lesa na prostem (3. razred uporabe SIST EN 350) odvisna od prirojene oziroma inherentne odpornosti, ki je lahko posledica biološko aktivnih ekstraktivov in/ali biocidov in sposobnosti, da les ostane suh (Van Acker in sod., 2003; Meyer-Veltrup in sod., 2017). Na naravno odpornost lesa vplivajo še številni drugi dejavniki, na primer starost drevesa, njegov geografski izvor in rastne razmere (Freitag in Morrell, 2001; Kutnik, 2013). V jedrovini so ekstraktivi, ki praviloma izboljšajo odpornost proti glivam, insektom in drugim mikroorganizmom (Kirker in sod., 2013; Valette in sod., 2017; Belt in sod., 2018). Nasprotno je vsebnost biološko aktivnih ekstraktivov v beljavi in v manj odpornih lesnih vrstah nižja. Nekateri ekstraktivi so biološko aktivni, drugi spodbujajo rast gliv (škrob in hranljive snovi), tretji vplivajo le na dinamiko vlaženja lesa (npr. smole in lignani) (Vahtikari in sod., 2017). Zaradi raznolikosti ekstraktivov je njihov vpliv težko kvantificirati, zato je treba vpliv vseh ekstraktivov znotraj ene lesne vrste obravnavati kot celoto (Stirling in sod., 2017). Števil-

**Preglednica 2:** Razvrstitev najpomembnejših komercialnih lesnih vrst v razrede odpornosti v skladu s standardom SIST EN 350 (2017). Podatki se nanašajo na jedrovino. Beljava vseh lesnih vrst sodi v 5. razred odpornosti. V prvi razred sodijo najbolj odporne lesne vrste, v peti pa lesne vrste, ki so najbolj dovzetne za razkroj.

**Table 2:** Classification of the most important commercial wood species into durability classes according to EN 350 (2017). Data refer to the heartwood. The sapwood of all wood species belong to the 5<sup>th</sup> durability class. The first class includes the most durable wood species, and the fifth durability class contains the wood species that are most susceptible to decomposition

| Lesna vrsta<br>Wood species | Razredi odpornosti / Durability class |    |    |    |    |
|-----------------------------|---------------------------------------|----|----|----|----|
|                             | 1.                                    | 2. | 3. | 4. | 5. |
| <i>Robinia pseudoacacia</i> |                                       |    |    |    |    |
| <i>Castanea sativa</i>      |                                       |    |    |    |    |
| <i>Taxus baccata</i>        |                                       |    |    |    |    |
| <i>Quercus robur</i>        |                                       |    |    |    |    |
| <i>Juglans regia</i>        |                                       |    |    |    |    |
| <i>Larix decidua</i>        |                                       |    |    |    |    |
| <i>Quercus cerris</i>       |                                       |    |    |    |    |
| <i>Pinus sylvestris</i>     |                                       |    |    |    |    |
| <i>Abies alba</i>           |                                       |    |    |    |    |
| <i>Ulmus spp.</i>           |                                       |    |    |    |    |
| <i>Picea abies</i>          |                                       |    |    |    |    |
| <i>Acer spp.</i>            |                                       |    |    |    |    |
| <i>Betula spp.</i>          |                                       |    |    |    |    |
| <i>Carpinus betulus</i>     |                                       |    |    |    |    |
| <i>Tilia spp.</i>           |                                       |    |    |    |    |
| <i>Poplar spp.</i>          |                                       |    |    |    |    |
| <i>Fagus sylvatica</i>      |                                       |    |    |    |    |

ne raziskave so pokazale, da je vsebnost ekstraktivov odvisna od lokacije v deblu, z naraščajočim deležem od sredine jedrovine proti obrobju, kjer je koncentracija ekstraktivov praviloma tudi najvišja (Stirling in sod., 2017; Stirling in Morris, 2011).

Že v zgodnji strokovni literaturi je mogoče najti različne podatke o naravni odpornosti lesa. Prvi podatki o tej tematiki in predvideni življenjski dobi lesa v slovenskem jeziku so zapisani v Kmetijskih in rokodelskih novicah iz leta 1893 (Terpežnost ..., 1893). Do nedavnega je večina delitev lesa v razrede odpornosti temeljila na podlagi strokovnih ocen in subjektivnih mnenj. Pri razvrstitvi lesa v razrede odpornosti so pogosto politični in ekonomski pritiski prevladali nad strokovnimi argumenti. Šele leta 2017 je bil sprejet prvi standard, ki je razdelil les v razrede odpornosti na podlagi poizkusov, ki so potekali v kontroliranih razmerah v laboratorijih in predvsem na terenskih poljih. Tako standard SIST EN 350 (CEN, 2017) les razvršča v pet razredov odpornosti. V prvi razred sodijo najbolj odporne lesne vrste, v peti pa lesne vrste, ki so najbolj dovzetne za razkroj (preglednica 2).

Med najbolj odporne slovenske komercialne lesne vrste sodita jedrovina kostanja in robinije. Obeh lesnih vrst je v Sloveniji relativno malo. Predvsem robinija se uvršča med najpomembnejše lesne vrste na Madžarskem in je zato komercialno dobavljiva lesna vrsta. Podobno tudi kostanj za drogove uvažamo iz Hrvaške in

Bosne. Najpomembnejši slovenski lesni vrsti, smreka in bukev, ki sestavljata več kot 60 % lesne zaloge v gozdovih, imata zelo slabo odporen les. Ena izmed večjih sprememb, povezanih s prej omenjenim standardom, je razvrstitev jedrovine macesna in hrasta. Macesnov les je uvrščen v tretji do četrti razred odpornosti, hrastov les v drugi do četrti. To pomeni, da je spekter uporabe lesa obeh lesnih vrst zelo zmanjšan. V skladu s tem standardom ne smemo uporabljati niti lesa hrasta niti macesna v stiku z zemljo za izgradnjo mostov ... Če les uporabimo v neprimernih aplikacijah, je projektant odgovoren za vso materialno škodo, ki nastane ob morebitni porušitvi neprimerno projektirane zgradbe. Razlog za razvrstitev hrastovine v nizke razrede odpornosti je povezan z veliko spremenljivostjo kemijske in anatomske zgradbe lesa. Del variabilnosti lahko povežemo s širino branik. Znano je, da je odpornost hrastovine z branikami, ki so ožje od 1 mm, primerljiva z odpornostjo bukovine. V ožjih branikah prevladujejo traheje z velikimi lumni, ki ne zagotavljajo ustreznih mehanskih lastnosti. V laični in tudi strokovni javnosti se pogosto navaja, da na odpornost lesa zelo vpliva tudi čas sečnje, vendar se doslej z laboratorijsko ali terensko raziskavo še nikomur ni posrečilo dokazati vpliva časa sečnje ali luninih men na odpornost lesa (Torelli, 2005; Špiler, 2015). Dopuščamo možnost, da razlika obstaja, vendar je z dostopnimi metodami ne moremo dokazati. Nenazadnje v jedrovini v času poseka ni živih

parenhimskih celic niti drugih, ki bi se lahko odzvale na zunanje dražljaje.

Ena od prednosti standarda SIST EN 350 (2017) je, da omogoča razvrstitev lesa iz posameznih geografskih območij oziroma lesa s specifičnimi lastnostmi (gostota, širina branik ...) v višje razrede odpornosti. V zadnjem obdobju je veliko aktivnosti povezanih z boljšo razvrstitvijo macesna, ki uspeva na višjih legah. Znano je, da ima les iglavcev, ki raste počasneje, boljše mehanske in nekatere fizikalne lastnosti kot les iglavcev, ki raste hitreje. Vzrok za to se skriva v večjem deležu kasnega lesa v braniki počasi rastočih dreves in bolj homogeni zgradbi. Drugo vprašanje, povezano s počasi rastočim drevesom, je, kako parametri vplivajo na odpornost oziroma življenjsko dobo lesa. Večina lesenih izdelkov v zunanji uporabi ni izpostavljena stiku z zemljo, ampak v 2., 3.1. in 3.2. razredu uporabe, zato je poleg naravne odpornosti lesa pomembna tudi sposobnost lesa, da ostane suh (Blom in Bergström, 2006; Brischke in sod., 2014). Zaradi sekundarnih sprememb tkiv (anatomske in kemične zgradbe) je beljava večine lesnih vrst bolj permeabilna kot jedrovina. Beljava se zato med padavinskimi dogodki hitreje navlaži, pije več vode in dlje časa ostane vlažna. Ne le zaradi manjše vsebnosti ekstraktivov, temveč tudi zaradi manjše odpornosti proti navlaževanju je beljava lesa bolj dovzeta za razkroj kot jedrovina (slika 6).

Na sposobnost lesa, da sprejema in oddaja vodo, vplivajo hidrofobne sestavine in številne anatomske lastnosti lesa, lahko jih izboljšamo z modifikacijo celične stene ali z impregnacijo z vodoodbojnimi sredstvi (Banks, 1973; Sedighi Moghaddam, 2015). Zato je poleg naravne odpornosti lesa treba še upoštevati

sposobnost lesa, da ostane suh (po zaslugi anatomskih značilnosti in vsebnosti smol ter olj), odpornost proti staranju in nastanek površinskih razpok, ko les razvrščamo v odpornostne razrede. Med vsemi temi lastnostmi je najtežje oceniti odpornost proti staranju in pojav površinskih razpok.

#### 4 ŽIVLJENJSKA DOBA LESA

##### 4 SERVICE LIFE OF WOOD

Življenjska doba lesa (ang. service life of wood) je obdobje (v letih), v katerem les ohrani mehanske lastnosti in stabilnost, ki so zahtevane za določen izdelek. Življenjska doba lesa je v največji meri odvisna od odpornosti lesa, ki je posledica kemijske in fizikalne sestave nezaščitenega, modificiranega ali z biocidnimi pripravki obdelanega lesa. V osnovi ločimo dve obliki življenjske dobe lesa: tehnično ali funkcionalno (to je čas, ko izdelek opravlja svojo funkcijo) in estetsko (čas, ko izdelek zadostuje estetskemu merilu). Danes je glavni razlog za zamenjavo izdelkov pogosto njegov videz oziroma zastarelost. Izdelek pogosto zamenjamo veliko prej, preden je to potrebno z vidika uporabnosti in tehničnih lastnosti (Brischke in sod., 2006; Lesar in Humar, 2010).

Problematika določanja življenjske dobe lesa je že relativno stara. To opisuje že članek o trpežnosti stavbnega lesa iz Kmetijskih in rokodelskih novic (Terpežnost ..., 1893). V Evropi od leta 1988 problematiko življenjske dobe lesa in lesnih kompozitov v Evropi obravnava Evropska direktiva o gradbenih proizvodih (European Construction Products Directive, CPD 89/106/EEC), ki v aneksu I podaja zahteve za mehansko odpornost, trdnost in varnost med uporabo. Prav



**Slika 6:** Beljava smrekove podnice je po padavinskem dogodku bolj vlažna in zato bolj dovzeta za glivni razkroj kot jedrovina (foto: Miha Humar)

**Fig. 6:** Spruce sapwood has higher moisture content than spruce heartwood after a rain event (photo: Miha Humar)



tako jo zahtevajo vsi, od arhitektov, načrtovalcev, tesarjev, gradbenikov in zavarovalniške družbe. Eurocode (CEN, 2002) kot orientacijo postavlja naslednje okvirne življenjske dobe; 10 let začasne konstrukcije, 50 let za gradbene konstrukcije in 100 let za monumentalne gradbene konstrukcije in mostove. Te vrednosti so nastavljene za posamezne zgradbe, ne glede na uporabljene materiale. Podatek o življenjski dobi lesa postaja vedno pomembnejši predvsem zaradi razvoja informacijskega modeliranja gradenj BIM (ang. Building Information Modeling). Pri pripravi kakovostnih projektov morajo projektanti že v fazi načrtovanja predvideti stroške vzdrževanja in življenjsko dobo posameznih komponent stavbe.

Na življenjsko dobo lesa vpliva več dejavnikov. Klima ima še posebno pomembno vlogo, vendar je treba razlikovati različne klimatske ravni. Razlikujemo med makro klimo - določajo jo lokalni vremenski podatki določenega kraja, lokalno klimo z lokalnimi razmerami (na primer senca, vetrovna lega ...) in mikro klimo, kjer se razmere kažejo v konstrukciji. Kot je bilo že opisano, ima na razvoj gliv v lesu velik vpliv tudi klima materiala (vlažnost in temperatura lesa) (Brischke in sod., 2006).

## 5 ZAŠČITA IN TERMIČNA MODIFIKACIJA LESA

### 5 WOOD PROTECTION AND MODIFICATION

Kadar les ni dovolj naravno odporen proti biotskim in abiotskim dejavnikom razkroja v okolju, kjer ga želimo uporabiti, ga moramo dodatno zaščititi. Največkrat se uporabljajo biocidni proizvodi. Vedno bolj se uveljavlja tudi nebiocidna zaščita (Hill, 2006; Žlahtič in sod., 2015). Z različnimi postopki les naredimo bolj

vodoodbojen, manj higroskopen, oziroma se spremeni njegova kemijska struktura tako, da ga insekti in glive ne prepoznajo več kot možen vir hrane (Humar, 2008; Pohleven, 2008).

Za zaščito lesa na prostem, še posebej v 4. razredu uporabe, se v veliki večini uporabljajo biocidni proizvodi na osnovi bakrovih spojin, ker so zelo učinkoviti proti glivam, bakterijam in algam že v relativno nizkih koncentracijah, medtem ko so za višje rastline in živali relativno neškodljivi (Preston, 2008).

Obdelava lesa s suspenzijami in emulzijami voskov upočasni dinamiko pretoka vode v kapilarah in bistveno poveča dimenzijsko stabilnost lesa, ki je izpostavljen visoki relativni zračni vlažnosti ali tekoči vodi in tako onemogoči začetek razkroja (Humar in sod., 2017). Rapp in sodelavci (2005) so ugotovili, da je les, obdelan z voskom, pokazal povečano tlačno trdnost in trdoto. Suspenzije voskov z zaščitnimi sredstvi na vodni osnovi se uporabljajo tudi, da se zmanjša pojavljanje površinskih razpok in za izboljšanje videza obdelanega lesa na prostem (Sivrikaya in sod., 2017). Številni naravni voski tvorijo tanko plast na površini obdelanega lesa in delujejo kot membrana Gore-tex (slika 7). Naravni voski so skoraj nestrupeni in se uporabljajo v različne namene, kot na primer v kozmetiki (Lesar in Humar, 2011).

Druga možna nebiocidna zaščita lesa je termična modifikacija. Namen tega postopka je spremeniti higroskopskost lesa z uporabo visokih temperatur (običajno 180 °C–230 °C) v anoksičnih razmerah. Uporaba povišane temperature povzroči verigo reakcij, ki se pokažejo v fizikalnih in kemičnih spremembah mate-



**Slika 7:** Z voskom obdelana površina lesa deluje hidrofobno. Termično modificiran strešnik modelnega objekta Oddelka za lesarstvo je obdelan z voskom (foto: Miha Humar)

**Fig. 7:** The wax treated surface of the wood is hydrophobic. Thermally modified shingles on the roof of the study object at the Department of Wood Science and Technology (photo: Miha Humar)



**Slika 8:** Z naraščanjem temperature modifikacije postaja modificirani les smreke bolj temno rjave barve (foto: Miha Humar)

**Fig. 8:** Increased modification temperature results in darker brown colour of thermally modified wood (photo: Miha Humar)

riala. Če je postopek skrbno nadzorovan, lahko spremembe relevantnih lastnosti širijo spekter rabe lesa in ne omejujejo njegove uporabe. Od množice opisanih postopkov modifikacije lesa je termična modifikacija komercialno najbolj napredna in je že dolgo znana kot metoda za izboljšanje dimenzijske stabilnosti lesa in povečanje njegove odpornosti (Hill, 2006). Termično modificirani les najlaže spoznamo po njegovi rjavi barvi. Intenziteta rjave barve narašča s temperaturo modifikacije (slika 8).

## 6 POVZETEK OPAZOVANJ NA MODELNEM OBJEKTU ODDELKA ZA LESARSTVO

### 6 SUMMARY OF WOOD PERFORMANCE ON STUDY OBJECT AT DEPARTMENT OF WOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY

Na vrtu Oddelka za lesarstvo smo postavili modelni objekt (slika 9), ki je zgrajen v skeletni zasnovi. Terasa objekta je izdelana iz letev preseka  $2,5 \times 5,0 \text{ cm}^2$ . Za

izdelavo terase so izbrani različni materiali, ki se uporabljajo v lesni gradnji. Vzorci so polradialni, branike so z vzdolžno površino tvorile kot  $45 \pm 15^\circ$ . Ves les je izviral iz osrednje Slovenije. Terensko polje na Oddelku za lesarstvo v Rožni dolini v Ljubljani leži na pretežno senčni in zatišni legi (310 m nm.v.) v 3.2 razredu izpostavitve (na prostem, nepokrito, pogosto močenje) (CEN, 2013). Objekt je bil postavljen poleti 2013, konec oktobra 2013 smo dokončali teraso. V različnih časovnih obdobjih smo ovrednotili barvo in razkroj lesa (Kržišnik, 2019).

V vzorce smo namestili senzorje za spremljanje vlažnosti lesa. Vlažnost lesa določamo z električno upornostno metodo. V ta namen uporabljamo izolirane jeklene elektrode, ki merijo električno upornost v sredini vzorcev (slika 10). V vzorce smo na sredino tangencialne ploskve pod kotom  $10^\circ$  na razdalji 32 mm privijačili 2 vijaka iz nerjavnega jekla premera 3,9 mm (Bauhaus Profi Depot, Nemčija), ki smo ju predhodno izolirali z



**Slika 9:** Videz modelnega objekta za spremljanje življenjske dobe lesa. Objekt, ki stoji na vrtu Oddelka za lesarstvo, je bil postavljen poleti 2013, konec oktobra 2013 smo dokončali teraso (foto: Miha Humar).

**Fig. 9:** Visual appearance of the study object for monitoring service life. The object was built on the field test site of the Department of Wood Science and Technology in October 2019 (photo: Miha Humar).

**Preglednica 3:** Izbrani materiali, ki smo jih uporabili za fasado in teraso modelnega objekta v Ljubljani

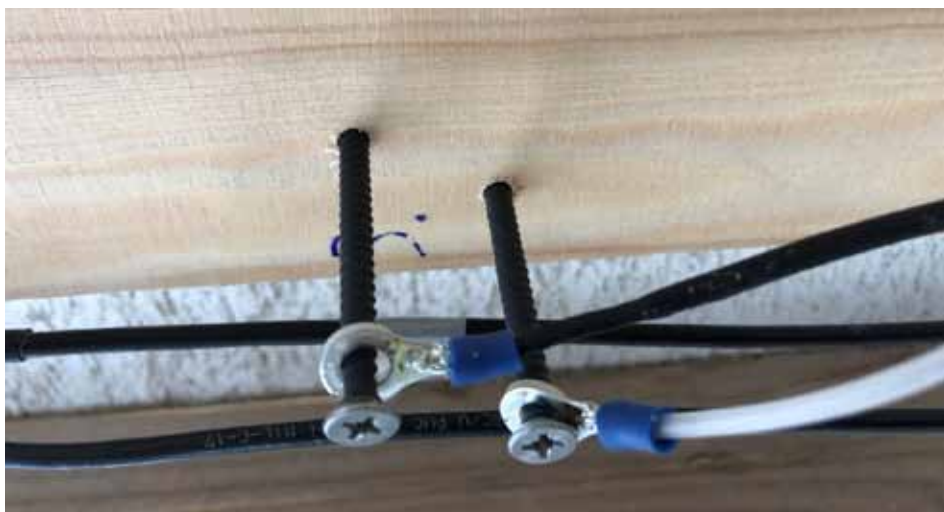
| Kratice / Abbreviation | Lesna vrsta / Wood species               |  |  |  |   |  |                                 | Obdelava / Treatment                          |  |  |
|------------------------|--|--|--|--|---|--|---------------------------------|---|--|--|
|                        | Navadna smreka<br>( <i>Picea abies</i> ) | Rdeči bor - beljava<br>( <i>Pinus sylvestris</i> ) | Rdeči bor - jedrovina<br>( <i>Pinus sylvestris</i> ) | Evropski macesen<br>( <i>Larix decidua</i> ) | Navadna bukev<br>( <i>Fagus sylvatica</i> ) | Domači kostanj<br>( <i>Castanea sativa</i> ) | Hrast<br>( <i>Quercus sp.</i> ) | Termična modifikacija<br>Thermal modification | Impregnacija z voskom<br>Wax treatment | Impreg. z Cu-etanolaminskim pripravkom<br>Cu-ethanolamine impregnation |
| PA                     | PS                                       | PH   | LD   | FS   | CS  | Q  | TM                              | NW  | CE                                     |  |
| PA                     | x  |  |  |  |   |  |                                 |   |  |  |
| PA-NW                  | x  |  |  |  |   |  |                                 | x   |  |  |
| PA-CE                  | x  |  |  |  |   |  |                                 |   | x                                      |  |
| PA-TM                  | x  |  |  |  |   |  | x                               |   |  |  |
| PA-TM-NW               | x  |  |  |  |   |  | x                               | x   |  |  |
| PS                     |  | x  |  |  |   |  |                                 |   |  |  |
| PH                     |  |  | x  |  |   |  |                                 |   |  |  |
| LD                     |  |  |  | x  |   |  |                                 |   |  |  |
| FS                     |  |  |  |  | x   |  |                                 |   |  |  |
| CS                     |  |  |  |  |   | x  |                                 |   |  |  |
| Q                      |  |  |  |  |   |  | x                               |   |  |  |

**Table 3:** Selected materials used for the facade and decking of the study object in Ljubljana

univerzalno toploskrčljivo cevjo - DERAY®-H. Na vijake smo pritrdili elektrode in jih povezali z merilno opremo. Vlažnost smo ugotavljali v sredini, saj se večina gliv navadno razvije v osrednjem delu vzorcev, zato je to mesto najpomembnejše. Električno upornost smo merili vsakih dvanajst ur z merilno opremo Gigamodul (Scantronik, Nemčija) in jo beležimo z zapisovalci podatkov Thermofox (Scantronik, Nemčija). Vzporedno z vlažnostjo beležimo tudi temperaturo na površini vzorcev. Iz podatkov o električni upornosti in temperaturi lesa smo izračunali vlažnost lesa, kot to opisujeta Lampen (2012) in Kržišnik (2019).

Ocenjevanje razkroja vzorcev je potekalo vsako leto med petnajstim septembrom in petnajstim oktobrom. Vsak vzorec smo si natančno ogledali in ocenili stopnjo razkroja v skladu s standardom EN 252 (CEN, 2015), z ocenami med 0 (popolnoma zdrav les) in 4 (popolnoma trhel les) (preglednica 4).

Na terasi smo v več različnih obdobjih merili barvo. Meritve smo na posameznem materialu opravili na vsaj sedmih mestih z napravo EasyCo 566 (Erichsen, Hemer, Nemčija). Barvo vzorcev smo opisali s spremljivkami  $L^*$ ,  $a^*$  in  $b^*$ , nato smo izračunali še spremembo v barvi  $\Delta E$ . Barvni prostor, v katerem se barvne

**Slika 10:** Prikaz senzorjev za spremljanje vlažnosti lesa pred dokončno pritrditvijo (foto: Miha Humar)**Fig. 10:** Mounting of the sensors for wood moisture content monitoring (photo: Miha Humar)

**Preglednica 4:** Ocene razkrojenosti vzorcev (CEN, 2015)

| Ocena | Razvrstitev             | Opis vzorca  |
|-------|-------------------------|--|
| 0     | Ni znakov razkroja      | Na preizkušancu ni zaznavnih sprememb.   |
| 1     | Neznaten razkroj        | Na vzorcu so vidni znaki razkroja, vendar razkroj ni intenziven in je zelo prostorsko omejen:<br>○ spremembe, ki se pokažejo predvsem kot sprememba barve ali zelo površinski razkroj, mehčanje lesa je najpogostejši kazalec, razkroj sega do 1 mm v globino. |
| 2     | Zmeren razkroj          | Jasne spremembe v zmerem obsegu:<br>○ spremembe, ki se kažejo kot mehčanje lesa 1 mm do 3 mm globoko na 1 cm <sup>2</sup> ali večjem delu vzorca.  |
| 3     | Močen razkroj           | Velike spremembe:<br>○ izrazit razkroj lesa 3 mm do 5 mm globoko na velikem delu površine (večje od 20 cm <sup>2</sup> ) ali mehčanje lesa globlje kot 10 mm na površini, večji od 1 cm <sup>2</sup> .   |
| 4     | Povsem razkrojen vzorec | Preizkušanec je zelo razkrojen:<br>○ ob padcu z višine 0,5 m se zlomi.   |

**Table 4:** Decay grades of the decking elements (CEN, 2015)

vrednosti L\*, a\* in b\* nanašajo na pravokotne osi tridimenzionalnega koordinatnega sistema. Enake geometrične razlike v prostoru približno ustrezajo enakim barvnim, torej vizualnim razlikam. Vrednost L\* ponaarja svetlost barve, vrednost a\* rdeče-zelena koordinatno os, vrednost b\* rumeno-modro koordinatno os. Uporaba barvnega prostora CIELAB je trenutno najbolj razširjena, predvsem je priljubljena pri merjenju barve objektov v odbiti ali prepušeni svetlobi.

## 6.1 Klima materiala

### 6.1 Material climate

Ker je podatkov o vlažnostih lesa razmeroma veliko, smo jih povzeli in navedli v preglednici 5. Zaradi narave meritev je najboljšje primerjati mediane in deleže meritev, ko vlažnost presega 25 %. Ta vrednost je določena arbitrarno. Zavedamo se, da je mejna vrednost vlažnosti lesa, ko se pojavi razkroj, lahko tudi nižja, predvsem pri termično modificiranem lesu. Po drugi strani je treba upoštevati, da vlažnost lesa ni homogena, ne na makroskopskem in ne na mikroskopskem nivoju. Najnižjo mediano vlažnosti smo zabeležili pri kostanjevini (CS, 15,6 %), hrastovini (Q, 15,8 %), jedrovini bora (PH, 15,9 %) in smrekovini, obdelani z biocidnim proizvodom Silvanolin (PA-CE, 15,9 %). Razlog za nizko vlažnost jedrovine kostanja in hrasta pripisujemo otiljenju. Tile preprečujejo prodiranje vode po trahejnem omrežju. Pri jedrovini bora navlaževanje v največji meri preprečuje aspiracija pikenj. Dobro obnašanje lesa, prepojenega z bakrovimi pripravki, pripisujemo hidrofobnim dodatkom in dejstvu, da biocidi prepričujejo rast gliv modrivk v lesu. Glive modrivke imajo poleg negativnega vpliva na videz lesa tudi negativen vpliv na permeabilnost. Pomodrelemu lesu se bistveno poslabša odpornost proti navlaževanju. Najvišjo vlažnost smo zabeležili pri beljavi bora (PS, 55,3 %). Za beljavo rdečega bora je značilna dobra permeabilnost. Pri tem materialu je bila kar 84 % časa izpostavitve vlažnost višja od 25 %, meje, ki jo postavljamo za razkroj lesa. Visoko vlažnost smo opazi-

li tudi pri termično modificirani smrekovini. S termično modifikacijo delno porušimo anatomsko strukturo lesa, zato moramo za izboljšanje odpornosti proti navlaževanju termično modifikacijo kombinirati s površinsko zaščito z voski. Termična modifikacija vpliva na sorpcijske lastnosti lesa, voski preprečujejo prodiranje masnega toka vode v les. Iz analize dinamike vlaženja lesa je lepo razvidno, da smo največjo vlažnost zabeležili pozimi, ko je bilo več dežja in talečega snega, les pa se je zaradi nizkih temperatur počasneje sušil. Spomladi se je vlažnost lesa izrazito zmanjšala.

## 6.2 Barvne spremembe izbranih lesnih vrst

### 6.2 Colour changes of selected wood species

Kljub temu da smo začeli s testiranjem jeseni, smo že po enem mesecu na površini lesa opazili prve znake modrenja. Modrenje na terasi je bilo opaziti tako pri neimpregnirani smrekovini in macesnovini kot tudi na smrekovem lesu, impregniranim z voski. Termična modifikacija in impregnacija s Silvanolinom sta v prvem obdobju preprečili modrenje. Kljub poznim jesenskim mesecem in zimi je modrenje lesa napredovalo. Pol leta po izpostavitvi na terasi ni bilo mogoče zanesljivo ločiti modrenja od abiotičnih procesov razgradnje lesa. Edino elementi, izdelani iz impregnirane smrekovine, so ostali nepomodreli.

Kot je razvidno iz grafičnega prikaza (slika 11), je največje barvne spremembe opaziti na začetku. Svetle lesne vrste, kot so smrekovina ali beljava bora, najprej posivijo zaradi delovanja UV žarkov, kasneje pa predvsem zaradi gliv modrivk površina potemni. Barva lesa tudi po šestih letih ni stabilna. Spremembe v zadnjem obdobju so manjše kot v prvih mesecih. Do sprememb prihaja zaradi razgradnje površine, ki jo povzročajo ose, bledenja melamina v poletnih mesecih in razvoja gliv modrivk v vlažnih obdobjih leta (Kržišnik in sod., 2018a). Pri temnejših lesnih vrstah, kot na primer pri termično modificiranem lesu, so barvne spremembe manj izrazite. Ne glede na lesno vrsto in postopek mo-

**Preglednica 5:** Povzetek meritev vlažnosti lesa (u) na terasi modelnega objekta v Ljubljani. Podane so povprečne vlažnosti lesa. Poleg tega sta prikazana še število in delež meritev, ko vlažnost lesa presega 25 %. Meritve so potekale v obdobju med 11. 4. 2014 in 26. 11. 2018 (n = 3381).

| Material<br>Material | Povprečje u (%)<br>Average MC (%) | Mediana u MC (%)<br>Median MC (%) | Število meritev u > 25 %<br>No. of measurements MC > 25% | Delež meritev u > 25 %<br>Percentage of meas. MC > 25% |
|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|--|
| PA                   | 27,9                              | 21,7                              | 1075   | 31,8 %   |
| PA-NW                | 20,1                              | 17,8                              | 838  | 24,8 %   |
| PA-CE                | 16,9                              | 15,9                              | 247  | 7,3 %  |
| PA-TM                | 25,4                              | 25,5                              | 1764   | 52,2 %   |
| PA-TM-NW             | 16,1                              | 12,4                              | 643  | 19,0 %   |
| PS                   | 49,4                              | 55,3                              | 2841   | 84,0 %   |
| PH                   | 19,5                              | 15,9                              | 844  | 25,0 %   |
| LD                   | 19,3                              | 17,8                              | 723  | 21,4 %   |
| FS                   | 27,3                              | 25,7                              | 1747   | 51,7 %   |
| CS                   | 17,3                              | 15,6                              | 608  | 18,0 %   |
| Q                    | 16,6                              | 15,8                              | 370  | 10,9 %   |

**Table 5:** Summary of wood (u) moisture measurements on the decking of the study object in Ljubljana. Average wood moisture content is given. In addition, the number and percentages of measurements when wood moisture content exceeds 25% are provided. The measurements were performed between 11. 4. 2014 and 26. 11. 2018 (n = 3381).

difikacije oziroma zaščite je barva lesa po nekaj letih primerljiva. Les je sive barve in posamezne vrste je težko ločiti med seboj (slika 11). Variabilnost med posameznimi vzorci je pogosto večja od variabilnosti med različnimi vrstami iglavcev.

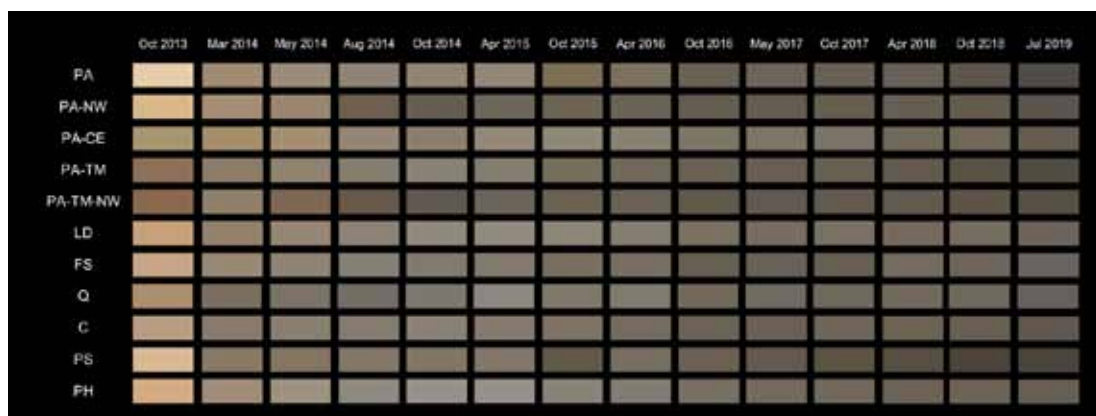
### 6.3 Razkroj izbranih lesnih vrst

#### 6.3 Decay of selected wood species

Poleg gliv modrivk in sončnega sevanja na barvo lesa vplivajo tudi glive razkrojevalke. Pri glivah razkrojevalkah je bolj kot sprememba barve pomembna sprememba mehanskih lastnosti. V praksi se je izkazalo, da pri lesu razkroj pogosteje opazimo s prostim očesom in z uporabo noža kot z mehanskimi testiranj. Razkroj lesa v prvem obdobju ni homogen, zato zdravo tkivo pogosto prekrije padec mehanskih lastnosti.

V prvem letu po izpostavitvi lesa na terasi razkroja ni bilo opaziti na nobenem izmed izpostavljenih ele-

mentov. Prvi razkroj se je pojavil na neodpornih lesnih vrstah (smrekovina, bukovina in beljava bora) po dveh letih izpostavitve elementov na prostem. Razkroj je sčasoma napredoval in tako so bili smrekovi elementi povsem razkrojeni po petih letih izpostavitve. To so bili tudi edini elementi, ki so v celoti razpadli po šestih letih. Tako intenzivnega razkroja nismo opazili pri nobeni drugi lesni vrsti. Prvi razkroj na lesu macesna in jedrovini bora smo zabeležili po treh letih, pri jedrovini hrasta pa po štirih letih izpostavitve. Z rezultati smo potrdili dobro odpornost lesa kostanja. Na jedrovini kostanja po šestih letih ni bilo zaznani znakov razkroja. Dodatek voska je nekoliko upočasnil razkroj lesa na smreki, ni ga pa preprečil. Šest let po izpostavitvi ni bilo razkroja na lesu, ki je bil termično modificiran in impregniran z voski in lesom, ki smo ga pred izpostavitvijo impregnirali z bakrovimi pripravki (preglednica 6). Dobro delovanje bakrovih pripravkov je pričakovano



**Slika 11:** Prikaz barvnih sprememb terase modelnega objekta v Ljubljani v obdobju med oktobrom 2013 in julijem 2019

**Fig. 11:** Presentation of the colour changes of the wooden decking on the study object in Ljubljana between October 2013 and July 2019

**Preglednica 6:** Razkroj posameznih lesnih vrst na terasi modelnega objekta v Ljubljani v obdobju med 2013 in 2019. Ocena 0 označuje nerazkrojeni les, 4 pa povsem razkrojeni les v skladu s standardom SIST EN 252 (CEN, 2015).

| Material | Leto ocenjevanja |      |      |      |      |      |
|----------|------------------|------|------|------|------|------|
|          | 2014             | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
| PA       | 0,0              | 1,0  | 2,4  | 3,7  | 4,0  | 4,0  |
| PA-NW    | 0,0              | 0,0  | 0,2  | 1,1  | 1,9  | 2,7  |
| PA-CE    | 0,0              | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| PA-TM    | 0,0              | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,2  | 0,4  |
| PA-TM-NW | 0,0              | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| PS       | 0,0              | 0,6  | 1,2  | 2,2  | 3,1  | 3,6  |
| PH       | 0,0              | 0,0  | 0,6  | 1,5  | 2,3  | 2,6  |
| LD       | 0,0              | 0,0  | 0,6  | 1,3  | 1,6  | 2,2  |
| FS       | 0,0              | 1,0  | 2,2  | 3,1  | 3,7  | 3,9  |
| CS       | 0,0              | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| Q        | 0,0              | 0,0  | 0,0  | 0,5  | 0,9  | 1,4  |

**Table 6:** The decomposition of selected wood species used for the decking of the study object in Ljubljana between 2013 and 2019. A score of 0 indicates undamaged wood, and 4 indicates completely degraded wood in accordance with EN 252 (CEN, 2015).

in v skladu s pričakovanju. S testi bomo nadaljevali tudi v prihodnje, da bomo spremljali dinamiko razkroja v prihodnjih letih.

## 7 ZAKLJUČKI

### 7 CONCLUSIONS

Izbira lesa za posamezen namen uporabe je zahteven in zelo pomemben proces. Pri tem se moramo v čim večji meri zanašati na evropske standarde in realne podatke s testiranj, ki potekajo tudi v Sloveniji. Pri ekstrapolaciji podatkov iz drugih krajev v Slovenijo je treba vedno upoštevati klimatske razmere. Praviloma je razkroj lesa v na drugih evropskih lokacijah praviloma počasnejši kot v Sloveniji. Analize kažejo, da je za načrtovanje življenjske dobe smiselno uporabljati modele, saj so izkustveni načini napovedovanja življenjske dobe lesenih konstrukcij nezanesljivi. Podatki bodo pomembni za razvoj gozdno-lesne verige v Sloveniji in bodo prispevali k širši in odgovornejši rabi lesa, boljšemu vzdrževanju kulturne dediščine, kar bo vodilo v skupno zadovoljstvo arhitektov, projektantov, gradbincev in v največji meri uporabnikov. Po drugi strani pa apeliramo na financiranje raziskovalnega in razvojnega dela, k financiranju dlje potekajočih raziskav, ki omogočajo vpogled v dolgoročno dogajanje z lesom.

## 8 ZAHVALA

### 8 ACKNOWLEDGEMENTS

Prispevek je rezultat več med seboj povezanih projektov, ki jih je sofinancirala Agencija za raziskovalno dejavnost RS: L4-7547 - Obnašanje lesa in lignoceluloznih kompozitov v zunanjih razmerah, P4-0015 - Programska skupina les in lignocelulozni kompoziti, 0481-09 Infrastrukturni center za pripravo, staranje

in terensko testiranje lesa ter lignoceluloznih materialov (IC LES PST 0481-09). Del raziskav je potekal tudi v okviru projekta Artistic v okviru programa Interreg Central Europe in projektov Razvoj verig vrednosti v okviru razpisov Strategije pametne specializacije; TI-GR4smart (C3330-16-529003) in Woolf.

## 9 POVZETEK

### 9 SUMMARY

During their service life, buildings and building components are exposed to a wide variety of environmental conditions. For wood-based materials, increased wood moisture content and biological factors such as mould, blue-stain and decay fungi are often critical, especially for cladding and decking applications in exterior use conditions. Service life prediction, service life cost analysis and the aesthetic performance of newly available, bio-based building materials are essential for their promotion and increased use in the construction sector. The appearance of bio-based building materials usually changes during their service life. Therefore, the aesthetic service life is often a decisive criterion in these applications.

The service life of different building products and commodities is determined by very different criteria, e.g. colour stability of coated or uncoated surfaces; cracking and checking; the occurrence of moulds, stain or fungal decay; damage by insects or marine borers; and resistance to abrasion and wear. In addition, many other factors, such as solar radiation, surface erosion and mechanical impact, play a role in the service life of wood, which makes it extremely challenging to take into account all of the different factors that can potentially impact the service life of wooden components. In

general, the service life of wood can be categorised into functional (technical) or aesthetic service lives. While in the past the majority of research efforts were focused on functional service life, at the present time, aesthetic service life is gaining importance.

Building Information Modelling (BIM) software packages require information about service life and maintenance intervals for key materials used in the planning phase. This information is required by the European Construction Products Regulations and is needed for performance-based design. The Eurocode provides indicative design working lives of 10 years for temporary structures, 50 years for building structures and 100 years for monumental building structures and bridges. These values are set for objects regardless of the materials used. The expected service life of wooden structures under the given exposure conditions is a key parameter in the selection of materials for construction. Unfortunately, the current European standardization system provides neither information about expected service lives nor a methodology for the service life prediction of wood-based materials and components.

The results of the long-term monitoring of study object at the Department for Wood Science and Technology in Ljubljana clearly show that the model approach taking into account the material-inherent protective properties, the moisture performance and the climate- and design-induced exposure dose of wooden structures also proved to be accurate for assessing the performance of modified and preservative-treated wood. Furthermore, the positive effect of thermal modification and water-repellent treatments on the outdoor performance of the examined materials was evident, as was a synergistic effect between moisture performance and inherent durability.

Since the number of long-term field tests for which corresponding lab decay and moisture dynamic tests have been performed is scarce, it would be useful to sample from longer-running tests for further subsequent validation of the performance of the respective materials tested.

## 10 LITERATURA

### 10 REFERENCES

- Ayadi N., Lejeune F., Charrier F., Charrier B., Merlin A. 2003. Colour stability of heat treated wood during artificial weathering. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61: 221–226.
- Banks W.B. 1973. Water uptake by scots pine sapwood, and its restriction by the use of water repellents. *Wood Science and Technology*, 7: 271–284.
- Belt T., Mollerup F., Hänninen T., Rautkari L. 2018. Inhibitory effects of Scots pine heartwood extractives on enzymatic holocellulose hydrolysis by wood decaying fungi. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 132: 150–156.
- Blom Å., Bergström M. 2006. Untreated Scots pine (*Pinus sylvestris*) and Norway spruce (*Picea abies*) wood-panels exposed out of ground contact in Sweden for two years. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 64: 53–61.
- Brischke C., Bayerbach R., Rapp A.O. 2006. Decay-influencing factors: a basis for service life prediction of wood and wood-based products. *Wood Material Science and Engineering*, 1: 91–107.
- Brischke C., Rapp A.O., Bayerbach R., Morsing N., Fynholm P., Welzbacher C.R. 2008. Monitoring the “material climate” of wood to predict the potential for decay: Results from in situ measurements on buildings. *Building and Environment*, 43: 1575–1582.
- Brischke C., Meyer L., Hesse C., Van Acker J., De Windt I., Van den Bulcke J., Conti E., Humar M., Viitanen H., Kutnik M., Malassenet L. 2014. Moisture dynamics of wood and wood-based products - results from an inter-laboratory test. V: Proceedings IRG Annual Meeting, St George, Utah, USA, 11-15 May 2014. Stockholm, IRG.
- CEN. 2002. EN 1990 Eurocode - Basis of structural design. Brussels, European Committee for Standardization.
- CEN. 2013. EN 335 - Durability of wood and wood-based products - Use classes: definitions, application to solid wood and wood based panels. Brussels, European Committee for Standardization.
- CEN. 2015. European Standard EN 252 - Field test method for determining the relative protective effectiveness of a wood preservative in ground contact. Brussels, European Committee for Standardization.
- CEN. 2017. EN 350 - Durability of wood and wood-based products - Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials. Brussels, European Committee for Standardization.
- Council of the European Communities. 1988. Council Directive of 21 December 1988 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to construction products (89/106/EEC).
- Cowling E.B. 1961. Comparative biochemistry of the decay of sweet-gum sapwood by white-rot fungi. (Technical bulletin, No 1258). Washington, U.S. Department of Agriculture: 79 str.
- Deka M., Humar M., Rep G., Kričej B., Šentjurc M., Petrič M. 2008. Effects of UV light irradiation on colour stability of thermally modified, copper ethanolamine treated and non-modified wood: EPR and DRIFT spectroscopic studies. *Wood Science and Technology*, 42, 1: 5–20.
- Dinwoodie J. 2000. *Timber: its nature and behaviour*. London, E & FN Spon: 257 str.
- Feist W.C., Hon D.N.S. 1984. *Chemistry of Weathering and Protection. V: The chemistry of solid wood*. Advances in chemistry series 207. Rowell R.M. (ur.). Washington, DC, American Chemical Society, 401–451
- Fengel D., Wegener G. 1989. *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. Berlin, New York, Walter de Gruyter.
- Freitag C.M., Morrell J.J. 2001. Durability of a Changing Western Red-cedar Resource. *Wood and Fiber Science*, 33: 69–75.
- George B., Suttie E., Merlin A., Deglise X. 2005. Photodegradation and photo stabilisation of wood - the state of the art. *Polymer Degradation and Stability*, 88, 2: 268–274.
- Gobakken L.R., Mattsson J., Alfredsen G. 2008. In-service performance of wood depends upon the critical in-situ conditions. Case studies. V: IRG Annual Meeting, Istanbul, Turkey, 25-29 May 2008. Stockholm, IRG.
- Gobakken L.R., Vestøl G.I. 2012. Surface mould and blue stain fungi on coated Norway spruce cladding. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 75: 181–186.
- Green III F., Highley T.L. 1997. Mechanism of brown-rot decay: Paradigm or paradox. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 39: 113–124.
- Hill C.A.S. 2006. *Wood modification: chemical, thermal and other processes*. Chichester, John Wiley & Sons.

- Hon D.N.S. 2001. Weathering and photochemistry of wood. V: Wood and cellulosic chemistry. Hon D.N.S., Shiraishi N. (ur.). 2<sup>nd</sup> ed. New York, Marcel Dekker: 512–546.
- Humar M. 2008. Zaščita lesa - kam gremo? V: Gradnja z lesom - izziv in priložnost za Slovenijo. Kitek Kuzman M. (ur.). Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 102–107.
- Humar M., Kržišnik D., Lesar B., Thaler N., Ugovšek A., Zupančič K., Žlahtič M. 2017. Thermal modification of wax-impregnated wood to enhance its physical, mechanical, and biological properties. *Holzforschung*, 71, 1: 57–64.
- Isaksson T., Thelandersson S. 2013. Experimental investigation on the effect of detail design on wood moisture content in outdoor above ground applications. *Building and Environment*, 59: 239–249.
- Isaksson T., Thelandersson S., Jermer J., Brischke C. 2014. Beständighet för utomhusträ ovan mark: guide för utformning och materialval. (Rapport TVBK-3066). Lund, Lund University, Division of Structural Engineering.
- Johansson P. 2014. Determination of the critical moisture level for mould growth on building materials. Lund, Lunds universitet.
- Kirker G.T., Blodgett A.B., Arango R.A., Lebow P.K., Clausen C.A. 2013. The role of extractives in naturally durable wood species. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 82: 53–58.
- Kržišnik D., Lesar B., Thaler N., Humar M. 2018a. Influence of natural and artificial weathering on the colour change of different wood and wood-based materials. *Forests*, 9, 8: 22.
- Kržišnik D., Lesar B., Thaler N., Humar M. 2018b. Performance of bark beetle damaged Norway spruce wood against water and fungal decay. *Bioresources*, 13, 2: 3473–3486.
- Kržišnik D. 2019. Povezava med laboratorijskimi in terenskimi preizkusi pri vrednotenju življenjske dobe lesa: doktorska disertacija. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani: 222 str.
- Kutnik M. 2013. Focus on the European standardization towards a revision of the EN 350 natural durability standard: a different approach to the inherent resistance and performance of wood and wood-based materials. V: Proceedings IRG Annual Meeting, Stockholm, Sweden, 16–20 June 2013. Stockholm, IRG.
- Lampen S.C. 2012. Aufbau einer Kennlinien-Datenbank für die elektrische Holzfeuchtemessung: Masterarbeit. Hannover, University of Hannover: 110 str.
- Lesar B., Humar M. 2010. Vrednotenje življenjske dobe lesa, zaščitenega z emulzijami voskov in baker etanolaminskimi pripravki v tretjem razredu izpostavitve. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, 93: 23–36.
- Lesar B., Humar M. 2011. Use of wax emulsions for improvement of wood durability and sorption properties. *European Journal of Wood and Wood Products*, 69: 231–238.
- Lesar B., Pavlič M., Petrič M., Sever Škapin A., Humar M. 2011. Wax treatment of wood slows photodegradation. *Polymer Degradation and Stability*, 96: 1271–1278.
- Meyer L., Brischke C. 2015. Fungal decay at different moisture levels of selected European-grown wood species. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 103: 23–29.
- Meyer-Veltrup L., Brischke C., Alfredsen G., Humar M., Flæte P.-O., Isaksson T., Larsson Brelid P., Westin M., Jermer J. 2017. The combined effect of wetting ability and durability on outdoor performance of wood: development and verification of a new prediction approach. *Wood Science and Technology*, 51: 615–637.
- Norrstrom H. 1969. Light absorption properties of pulp and paper component. *Svensk Papperstidn*, 72: 25–38.
- Pečenko G. 1987. Zaščita lesa v praksi. Ljubljana, Zveza društev inženirjev in tehnikov gozdarstva in lesarstva Slovenije, 221 str.
- Pohleven F. 2008. Konstrukcijska zaščita lesa pred škodljivci. V: Kitek Kuzman M. (ur.). Gradnja z Lesom - Izziv in priložnost za Slovenijo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, 312 str.
- Pouska V., Macek P., Zibarová L. 2016. The relation of fungal communities to wood microclimate in a mountain spruce forest. *Fungal Ecology*, 21: 1–9.
- Preston A.F. 2000. Wood preservation - Trends of today that will influence the industry tomorrow. *Forest Products Journal*, 50: 12–19.
- Rapp A.O., Berninghausen C., Bollmus S., Brischke C., Frick T., Haas T., Sailer M., Welzbacher C.R. 2005. Hydrophobierung von Holz - Erfahrungen nach 7 Jahren Freilandtests. V: Beiträge Zur 24. Holzschutz-Tagung Der Deutschen Gesellschaft Für Holzforschung. Leipzig: 157–169.
- Sánchez C. 2009. Lignocellulosic residues: Biodegradation and bioconversion by fungi. *Biotechnology Advances*, 27: 185–194.
- Schmidt O. 2006. Wood and tree fungi: biology, damage, protection and use. Berlin, Springer.
- Sedighi Moghaddam M. 2015. Wettability of modified wood. KTH Royal Institute of Technology.
- Sivrikaya H., Can A., Tümen I., Aydemir D. 2017. Weathering performance of wood treated with copper Azole and water repellents. *Wood Research*, 62: 437–450.
- Stienen T., Schmidt O., Huckfeldt T. 2014. Wood decay by indoor basidiomycetes at different moisture and temperature. *Holzforschung*, 68: 9–15.
- Stirling R., Morris P.I. 2011. New perspectives on the role of extractives in the durability of western redcedar. *Proceedings of Canadian Wood Preservation Association*, 32: 12 str.
- Stirling R., Sturrock R., Braybrooks A. 2017. Fungal decay of western redcedar wood products - a review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 125: 105–115.
- Špiller R. 2015. 4 zlata pravila za trajnostno pripravo lesa. <http://obilje.si/4-zlata-pravila-trajnosti-lesa/> (6. 8. 2017).
- Teodorescu I., Țăpuși D., Erbașu R., Bastidas-Arteaga E., Aoues Y. 2017. Influence of the climatic changes on wood structures behaviour. *Energy Procedia*, 112: 450–459.
- Terpežnost stavbnega lesa. 1893. Kmetске in rokodelske novice.
- Torelli N. 2005. Lunarni les - mit ali resničnost. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, 76: 71–101.
- Vahtikari K., Rautkari L., Noponen T., Lillqvist K., Hughes M. 2017. The influence of extractives on the sorption characteristics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *J. Material Science*, 52: 10840–10852.
- Valette N., Perrot T., Sormani R., Gelhaye E., Morel-Rouhier M. 2017. Antifungal activities of wood extractives. *Fungal Biology Review*, 31: 113–123.
- Van Acker J., Stevens M., Carey J., Sierra-Alvarez R., Militz H., Le Bayon I., Kleist G., Peek R.D. 2003. Biological durability of wood in relation to end-use. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61, 1: 35–45.
- Van Acker J., Van den Bulcke J., De Windt I., Colpaert S., Li W. 2015. Moisture dynamics of modified wood and the relevance towards decay resistance. V: Proceedings of the 8th European Conference on Wood Modification, Helsinki: 44–55.
- Zabel R.A., Morell J.J. 1992. Wood microbiology: decay and its prevention. San Diego, Academic Press.
- Zink P., Fengel D. 1989. Studies on the colouring matter of blue-stain fungi. *Holzforschung*, 43: 371–374.
- Žlahtič M., Thaler N., Humar M. 2015. Water uptake of thermally modified Norway spruce. *Drvna industrija*, 66, 4: 273–279.
- Žlahtič M., Humar M. 2016. Influence of artificial and natural weathering on the hydrophobicity and surface properties of wood. *BioResources*, 11, 2: 4964–4989.
- Žlahtič M., Humar M. 2017. Influence of artificial and natural weathering on the moisture dynamics of wood. *BioResources*, 12, 1: 117–142.
- Žlahtič Zupanc M. 2017. Vpliv izbranih okoljskih dejavnikov na dinamiko vlaženja lesa: doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani: 231 str.