



PRIMERJAVA MEHANSKIH LASTNOSTI RECENTNEGA IN 400 LET STAREGA LESA EVROPSKEGA MACESNA

COMPARISON OF MECHANICAL PROPERTIES OF RECENT AND 400-YEAR-OLD EUROPEAN LARCH WOOD

Enej Lipovec Zupanc¹, Gorazd Fajdiga^{1*}, Miha Humar¹

UDK: 630*814.7:630*812.7:630*174.7 *Larix decidua*
Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Prispelo / Received: 1. 9. 2021
Sprejeto / Accepted: 19. 9. 2021

Izvleček / Abstract

Izvleček: Les velja za vodilni gradbeni material v zgodovini človeštva. Pred drugimi inženirskimi materiali ima veliko prednosti, kar ga uvršča med vodilne materiale prihodnosti. Zelo pomembno je dejstvo, da les kot naraven material uvrščamo v skupino materialov, ki imajo majhen negativen vpliv na okolje. Poleg tega je njegova predelava energijsko nezahtevna. Zaradi ponovne široke uporabe v gradbeništvu je pomembno dobro poznati in tudi napovedati mehanske lastnosti ter ovrednotiti posledice delovanja biotskih in abiotskih dejavnikov na mehanske lastnosti skozi daljše časovno obdobje. Od tega je odvisna tudi varnost starejših zgradb. Tako smo ob priložnosti primerjali mehanske lastnosti svežega evropskega macesna (*Larix decidua*) in okoli 400 let starega macesna, odvzetega iz Ruardove graščine na Stari Savi na Jesenicah. V okviru tega prispevka smo ovrednotili statično upogibno trdnost in vpliv cikličnih obremenitev na obnašanje stare in sveže posekane macesnovine. Vpliva staranja na upogibno trdnost nismo potrdili. Rezultati utrujanja lesa kažejo, da je star les prenesel približno 18-krat manj obremenitvenih ciklov kot recentni les macesna.

Ključne besede: les, macesen, utrujanje, Ruardova graščina, star les

Abstract: Wood has been the leading building material throughout the history of mankind. Wood has several advantages over other construction materials, which also makes it one of the most promising materials of the future. The environmental aspect also plays a major role today, as wood is a natural, renewable resource whose processing is very energy-intensive. Due to its repeated and widespread use in construction, the prediction of mechanical properties and their change over time is also very well known, as the overall safety of all buildings also depends on it. Therefore, we compared the mechanical properties of fresh European larch (*Larix decidua*) and 400-year-old larch found in the Ruard manor house on the Stara Sava in Jesenice, where the renovation of the Upper Sava Museum is currently underway. In order to predict what will happen to the fresh wood over the long term, it is necessary to expose the wood to the same conditions, i.e. to change it with dynamic loads or material fatigue. The effect of aging on flexural strength has not been confirmed. Fatigue results show that old wood withstood about 18 times fewer load cycles than recent larch wood.

Keywords: wood, European larch (*Larix decidua*), fatigue, Ruard's Mansion, old wood.

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Les velja za prevladujoč gradbeni material skozi celotno zgodovino človeštva. Začetki njegove rabe segajo v prazgodovino, kjer se je sprva uporabljal za gradnjo šotorov, kolib, že več tisočletij poznamo tudi hiše, grajene iz lesa (Kaplan et al., 2009; Čufar & Velušček, 2002). V 20. stoletju

se je uporaba lesa v gradbene namene zmanjšala, saj so v ospredje prihajali novi materiali z boljšimi mehanskimi lastnostmi. V zadnjem obdobju v vse več novogradnjah uporabljajo les kot osnovni gradbeni material v kombinaciji z drugimi materiali (beton, steklo, kovine ...). V 21. stoletju lesena gradnja doživlja renesanso (Kitek Kuzman et al., 2018). Predvsem zaradi vedno večje okoljske zavesti se oziramo k obnovljivim virom, kamor sodi tudi les. Drugi pomemben razlog je povezan z razvojem novih kompozitov kot je križno lepljen les, lameliran les, slojnat furnirni les (LVL) ... (Čufar et al., 2017). Pri rabi lesa v gradbeništvu so poleg

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

* e-mail: gorazd.fajdiga@bf.uni-lj.si; +386 1 3203 619

ustrezne naravne odpornosti pomembne predvsem mehanske lastnosti (Sotayo et al., 2020). Pri dimenzioniranju konstrukcij so to statične mehanske lastnosti (upogibna trdnost, natezna trdnost, tlačna trdnost ...). Pri načrtovanju sodobnih konstrukcij v osprednje vedno bolj prihajajo tudi dinamične mehanske lastnosti materiala.

V gradbeništvu so leseni konstrukcijski elementi v glavnem podvrženi kvazistatični obremenitvi z majhno spremembo obremenitve skozi čas. V takšnih aplikacijah je nosilnost konstrukcije odvisna od statične trdnosti lesa. V primerih, kjer so konstrukcijski elementi pogosto izpostavljeni neugodnim okoljskim razmeram (npr. veter) ali dinamičnemu okolju (npr. vibracije ali ponavljajoče se mehanske obremenitve), lahko pride do porušitve konstrukcijskega elementa zaradi utrujanja materiala. Zaradi ponavljajočih se dinamičnih obremenitev se v gradivu pojavijo trajne deformacije, razpoke in lomi že pri nižjih nivojih napetosti kot bi se to zgodilo pri statični obremenitvi. Dinamična trdnost gradiva je zaradi pojava utrujenosti pri dinamičnih obremenitvah lahko tudi za 20 % do 60 % nižja v primerjavi s statično trdnostjo (Glodež et al., 2006). Eno prvih študij, povezanih z utrujanjem lesa, je izvedel Wood (Wood, 1951), ki je predstavil tako imenovano "Madisonovo krivuljo" kot razmerje med napetostjo in trajanjem obremenitve. V zadnjih letih je bilo opravljenih in objavljenih tudi veliko raziskav na temo utrujanja lesa.

Za razliko od kovin ali polimerov ima les zelo nehomogeno strukturo. Les je povsem naraven biološki material z značilnim priraščanjem, je anizotropen, zato na njegovo trdnost vpliva veliko parametrov kot so: smolni kanali, zavrtost vlaken, reakcijski les, gostota, vlažnost lesa (Gorišek, 2009). Poleg tega je neodporen les ob neprimerni zaščiti ali pomanjkljivem vzdrževanju podvržen hitrejšemu propadanju zaradi delovanja gliv in insektov, v primerjavi s konkurenčnimi (netrajnostnimi) materiali kot sta na primer jeklo in beton. Zato je eden od predpogojev za uporabo lesa v trajnejših objektih poznavanje njegovega obnašanja v daljšem časovnem obdobju tudi v primeru delovanja biotskih in abiotskih dejavnikov razkroja. Upoštevati je treba, da se les kot biološki material s starostjo spreminja.

Za načrtovanje sodobnih varnih konstrukcij je tako nujno poznati statične in dinamične obremenitve ter predvsem odziv materiala na te obremenitve

(napetosti in posledično deformacije). V praksi seveda ne želimo, da pride do zloma, saj ima lahko to katastrofalne posledice (porušitev zgradbe, izguba funkcije elementa, razpoke na stenah ...).

V konstrukcijske namene se v srednji Evropi najpogosteje uporablja les navadne smreke (*Picea abies*), bele jelke (*Abies alba*), različnih borov (*Pinus* ssp.) in evropskega macesna (*Larix decidua*). Macesnovina se uporablja za fasadne in talne obloge, leseno kritino, okna in konstrukcijski les (Humar et al., 2020). Evropski macesen (*Larix decidua*) je razširjen v gorskem svetu v srednji Evropi, Alpah in tudi Karpatih. Macesen spada med iglavce, ima debelo skorjo in zraste tudi do 40 metrov visoko. Je ena izmed redkih vrst iglavcev, ki jim jeseni iglice odpadejo (Brus, 2012). Jedrovina macesna je rdečkaste barve in ima izrazit smolnat vonj (Čufar, 2006). Jedrovino macesna uvrščamo med srednje odporne lesne vrste. Standard SIST EN 350 (CEN, 2016) ga glede na odpornost lesa uvršča v 3. do 4. odpornostni razred na petstopenjski lestvici, kjer razred 1 predstavlja zelo odporne, razred 5 pa zelo občutljive lesne vrste (Lesar et al., 2008).

Predstavljen študij primera temelji na primerjavi mehanskih lastnosti konstrukcijskih elementov iz macesnovega lesa (*Larix decidua*). V okviru raziskave smo primerjali statične in dinamične mehanske lastnosti okoli 400 let starega macesnovega lesa in nedavno posekanega in ustrezno osušenega (recentnega) lesa macesna. Star les smo pridobili iz Ruardove graščine na Jesenicah.

2 MATERIAL IN METODE

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 ODVZEM MATERIALA

2.1 COLLECTION OF MATERIAL

V raziskavi smo uporabili vzorce jedrovine evropskega macesna (*Larix decidua*), pridobljene iz stropa Ruardove graščine, ki stoji na Stari Savi na Jesenicah. Po nekaterih virih mineva že skoraj pol tisočletja od samega začetka Ruardove graščine; natančneje se omenja letnica 1538, ko se je italijanska rodbina Bucelleni preselila in zgradila graščino ter fužino poleg nje. Z letom 1954 je le-ta postala muzej in do leta 1990 je v graščini deloval Tehniški muzej Železarne Jesenice, z letom 1991 je postala sedež medobčinskega Gornjesavskega muzeja Je-

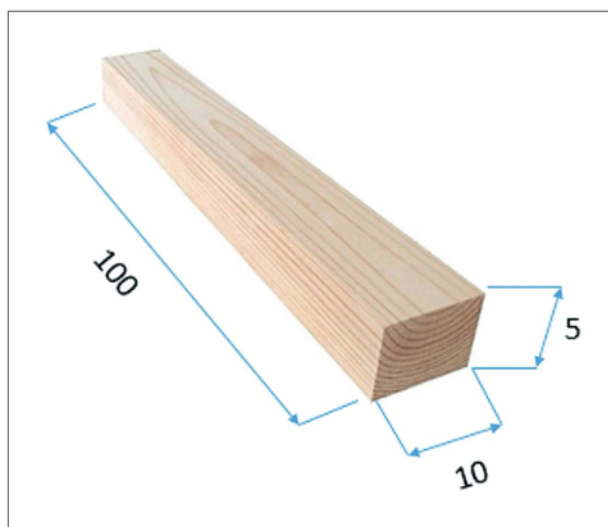
senice (Dnevnik.si). Na podlagi podatkov konzervatorskega načrta in literaturnih virov sklepamo, da je raziskani les star okoli 400 let (Mugerli, 2016). Zaradi premajhnega števila branik oziroma onesnaženosti z dimnimi plini organskega izvora dendrokronološka ali radiokarbonska datacija ni bila mogoča. Na graščini trenutno potekajo obnovitvena dela zaradi dotrajanosti zgradbe. Tako smo tudi mi dobili priložnost in poleg ostalih raziskav, ki potekajo, izvedli trenutno, v kateri primerjamo statične in dinamične mehanske lastnosti lesa macesna. Vzorce recentnega lesa macesna smo pridobili z območja Jezerskega. Širina branik obeh vzorcev je primerljiva. Za raziskavo smo uporabili le les jedrovine.

2.2 VZORCI IN POSTOPKI

2.2 SAMPLES AND PROCEDURES

S krožnim žagalnim strojem smo vzorce nažagali na okvirne dimenzije ($100 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$) ter jih uravnovesili v laboratorijski klimi z relativno zračno vlažnostjo 65 % in temperaturo 23 °C.

Po končanem procesu uravnovešenja smo vzorcem določili dimenzijo in maso ter izračunali gostoto zračno suhega lesa. Skupaj smo pripravili 60 čistih macesnovih vzorcev. 30 vzorcev je bilo izdelanih iz referenčne recentne macesnovine, drugih 30 pa je bilo izdelanih iz lesa macesna, ki je izviral iz Ruardove graščine. Iz vsake skupine smo izbrali 5 vzorcev in jim določili upogibno trdnost in pridobili podatek o sili, potrebni, da se vzorec poruši. Na podlagi petih meritev smo nato izračunali



Slika 1. Dimenzije preskušanca

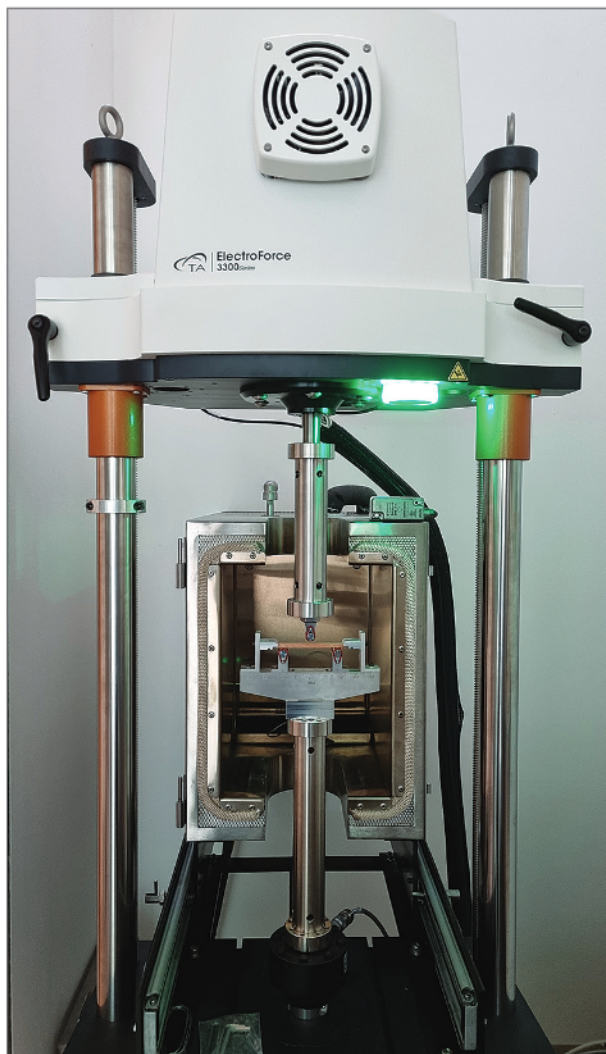
Figure 1. Dimensions of the test piece

povprečje, ki smo ga uporabili za nadaljnje utrujanje materiala. Upogibno trdnost smo določili v skladu s standardom EN 310 (CEN, 1993).

2.3 PROCES UTRUJANJA

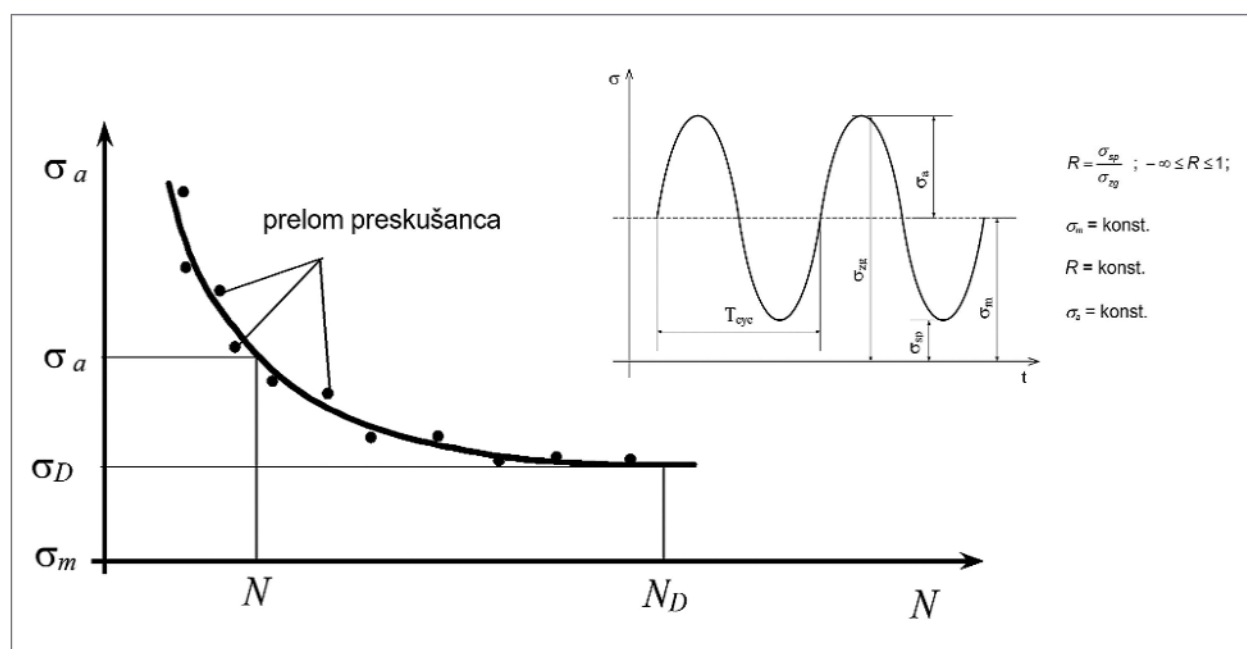
2.3 MATERIAL FATIGUE PROCESS

Krivulje zdržljivosti gradiv dobimo kot rezultat testiranja na preskuševališčih za utrujanje materiala. Takšni preizkusi zahtevajo izredno natančna preskuševališča, ki so odvisna tako od razreda natančnosti uporabljenih merilnih naprav kot tudi od togosti in kakovosti izdelave konstrukcije preskuševališča z vsemi sestavnimi deli. Preskuševališča so lahko namenska, zgrajena za določen tip preskušancev (Fajdiga et al., 2020), ali pa so komercialna. V tej raziskavi so bili statični in dinamični preskusi



Slika 2. Preskuševališče DMA Electroforce 3310 Series III

Figure 2. Test site DMA Electroforce 3310 Series III



Slika 3. Wöhlerjeva krivulja dinamične trdnosti
Figure 3. Wöhler dynamic strength curve

izvedeni na komercialnem preskuševališču DMA Electroforce 3310 Series III.

Dinamična trdnost gradiva je odvisna od vrste vplivnih parametrov (Glodež, 2006). V tej študiji so bili izvedeni tritočkovni upogibni preskusi s faktorjem dinamičnosti obremenitve $R=0$ (razmerje med spodnjo σ_{sp} in zgornjo napetostjo σ_{zg} , slika 3) in frekvenco utrujanja 10 Hz. Velikost obremenitve je bila določena glede na statično porušno silo in je navedena v poglavju z rezultati.

Rezultate preskusov v obliki števila obremenitvenih ciklov N do nastanka razpoke oziroma preloma preskušanca lahko prikažemo v diagramih $\sigma-N$, v tako imenovani Wöhlerjevi krivulji oziroma krivulji dinamične trdnosti gradiva. V tej raziskavi nas je zanimala primerjava rezultatov (število nihajev N do porušitve) med recentnim in starim macesnom in krivulje zdržljivosti niso bile kreirane.

Porušne preskušance smo preiskali z digitalnim mikroskopom Olympus DSX1000. Analizirali smo reprezentativne vzorce iz referenčne in stare macesnovine. Pregled smo izvedli s kombinirano osvetlitvijo s kombinacijo svetlega in temnega polja.

3 REZULTATI IN RAZPRAVA 3 RESULTS AND DISCUSSION

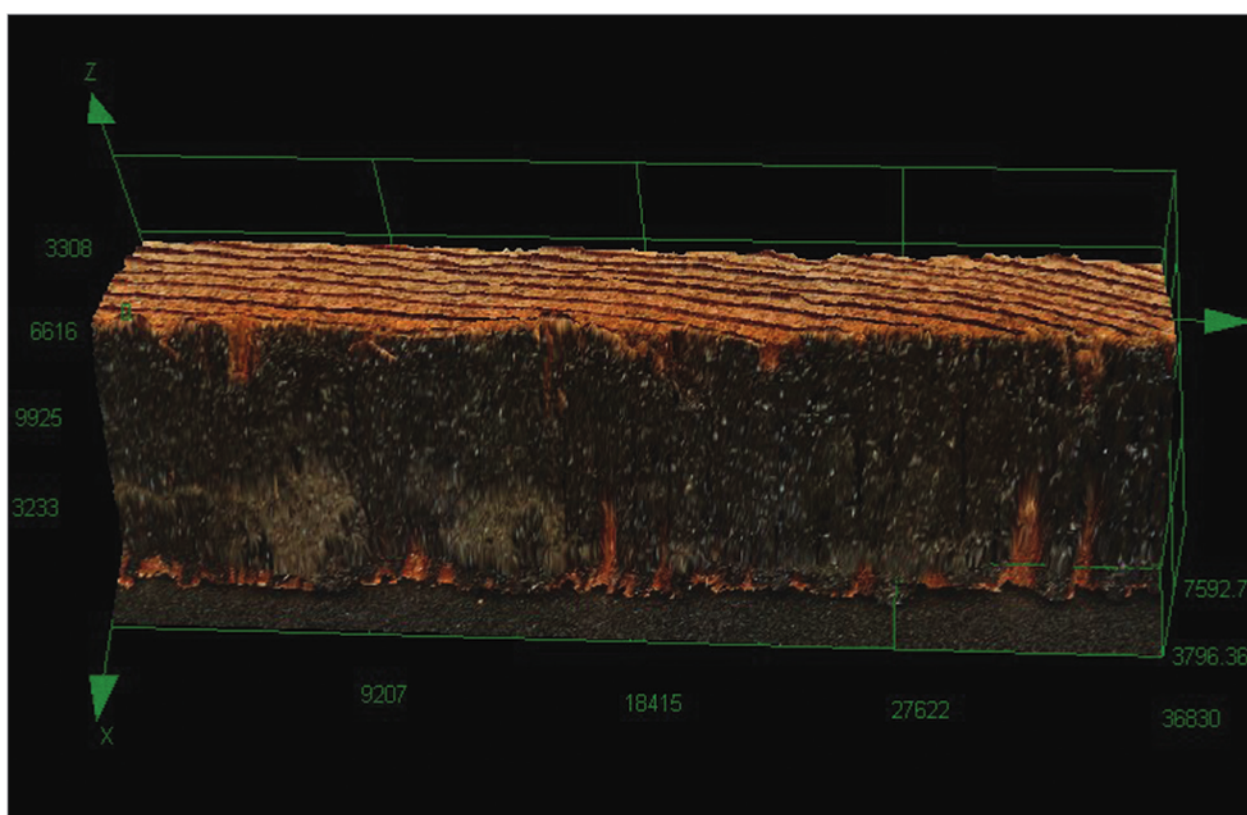
Beljava macesna iz Ruardove graščine je bila močno poškodovana zaradi delovanja insektov (slika 4). Beljavo so poškodovali hišni kozliček (*Hyloterpes bajulus*) in navadni trdoglavec (*Anobium punctatum*). Ta dva lesna škodljivca sodita med terciarne škodljivce, ki poškodujejo suh les. Insekta se prehranjujeta s škrobom v beljavi, jedrovina pa je za te lesne insekte praviloma strupena (Kervina-Hamović, 1990). Do okužbe je prišlo v preteklosti. V času analize insekti niso bili več aktivni.

Površina lesa je bila ožgana (slika 5). Po vsej verjetnosti je ožiganje posledica kurjenja v pritličnih prostorih. Ker so bile deske ožgane le s spodnje strani, menimo, da ožiganje ni bilo namerno. Ožiganje in dimljenje sodi med tradicionalne postopke zaščite lesa, ki do določene mere preprečujejo glivni razkroj in napade insektov (Unger et al., 2001). Glede na to, da je bila beljava močno razkrojena zaradi insektov, smo mnenja, da je v splošnem zadovoljiva ohranjenost lesa predvsem posledica dobre naravne odpornosti macesnove jedrovine.

Primerjali smo rezultate mehanskih testiranj na preskuševališču DMA Electroforce 3310 Series III preskušancev iz 400 let starega lesa macesna iz Ruardove graščine in referenčno macesnovino.



Slika 4. Prečni prerez vzorca macesna iz Ruardove graščine z beljavo, ki so jo poškodovali insekti
Figure 4. Cross-section of a larch sample from Ruard's mansion with the sapwood damaged by insects



Slika 5. Obžgana površina vzorca iz Ruardove graščine
Figure 5. Burnt surface of a sample from Ruard's mansion

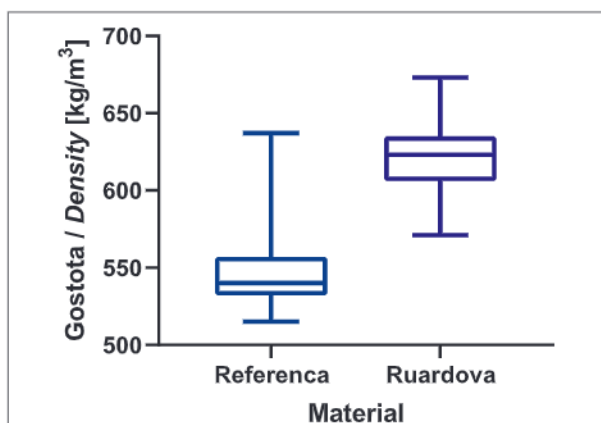
Povprečna gostota zračno suhega lesa preskušancev z Ruardove graščine je 620 kg/m^3 , gostota referenčne macesnovine pa 550 kg/m^3 (slika 6). Ugotovljene gostote lesa so znotraj razpona vrednosti za macesnovino iz literature (Wagenführ, 2007). Visoka gostota zračno suhega lesa je posledica visokega deleža kasnega lesa. Za les naših domačih komercialnih iglavcev je v splošnem značilno, da je gostota lesa obratno sorazmerna s širino branika. Les z ožjimi braniki ima v splošnem večji delež kasnega lesa, višjo gostoto in boljše mehanske lastnosti kot les s širšimi braniki.

Na odpornost lesa širina branika nima statistično značilnega vpliva (Humar, 2013). Višja gostota zračno suhe stare macesnovine se tako odraža tudi v višjem modulu elastičnosti (slika 7) in upogibni trdnosti (slika 8), v primerjavi z referenčno macesnovino. Razlika v gostoti in upogibni trdnosti je statistično značilna ($p < 0.0001$).

Preskušance za test utrujanja smo razdelili v več podskupin glede na silo, s katero smo vzorce utrujali. Faktor dinamičnosti obremenitve je bil za vse preskuse enak $R=0$, prav tako je bila enaka za vse preskuse tudi frekvenca utrujanja in sicer 10 Hz. Prvo skupino smo obremenili s 75 % statične porušne sile, sledili sta še skupini z 80 % in 85 % statične porušne sile, dobljene s statičnimi preskusi (poglavje 2.2.).

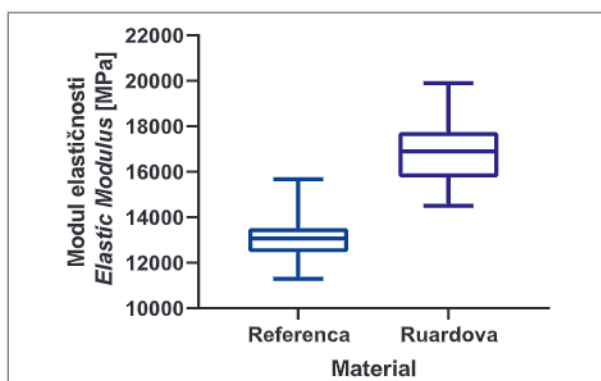
Vsak vzorec smo utrujali do porušitve (slika 9) oziroma do 2.000.000 obremenitvenih ciklov. Utrujali smo 25 vzorcev svežega macesna in 25 vzorcev macesna, pridobljenega z Ruardove graščine. Podatki so se med procesom utrujanja shranjevali v računalniku.

Na sliki 10 so prikazani rezultati utrujanja kontrolnih preskušancev, izdelanih iz lesa recentnega macesna. V prvi skupini petih kontrolnih preskušancev iz recentnega lesa pri 75 % statične porušne sile (225 N) sta dva preskušanca prestala preizkus do 2.000.000 obremenitvenih ciklov. Preskušane, ki se je najhitreje porušil, je dosegel 254.725 obremenitvenih ciklov. V povprečju so vzorci prestali 1.142.049 obremenitvenih ciklov. Pri obremenjevanju z 80 % porušne sile (240 N) so kontrolni vzorci prestali v povprečju 278.495 obremenitvenih ciklov. Tretjo skupino preskušancev smo obremenjevali s 85 % statične porušne sile, ta je za kontrolne preskušance znašala 255 N. Kontrolni vzorci so v povprečju dosegli 112.324 ciklov.



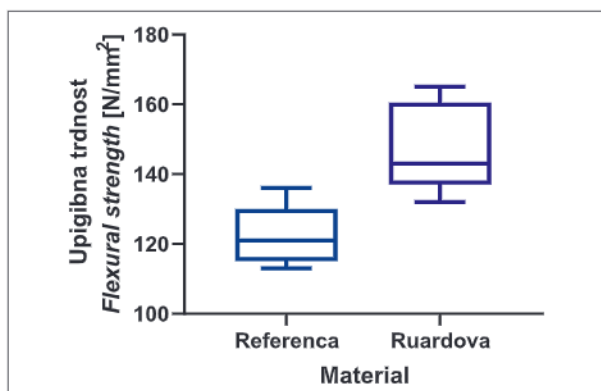
Slika 6. Gostota zračno suhe referenčne in stare macesnovine iz Ruardove graščine

Figure 6. Density of air dried reference and historical larch wood from the Ruard mansion



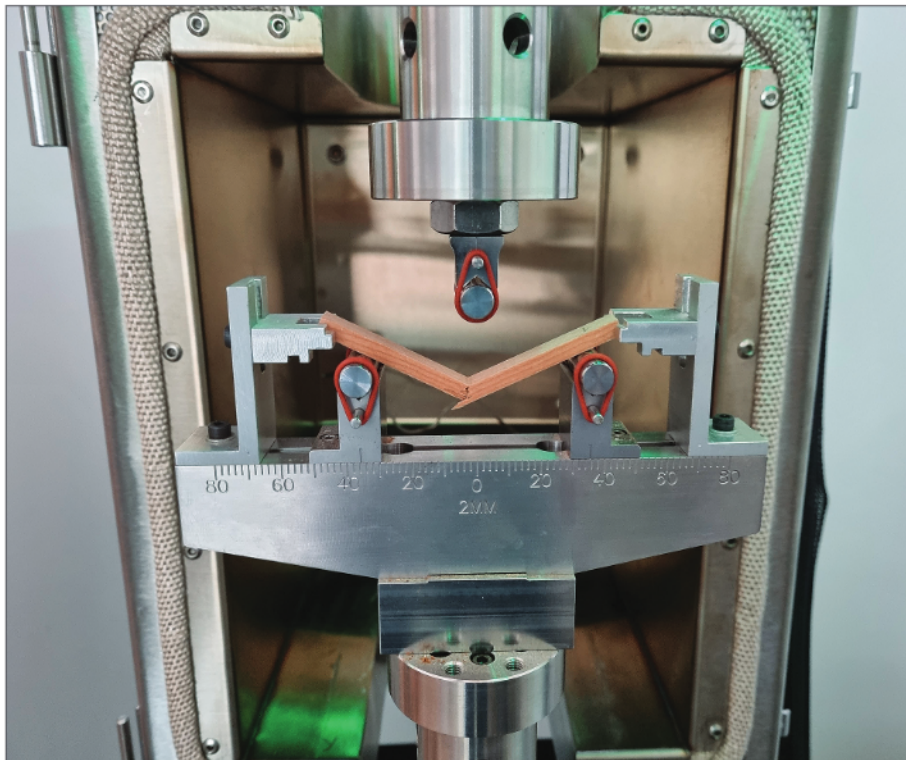
Slika 7. Modul elastičnosti referenčne in stare macesnovine iz Ruardove graščine

Figure 7. Modulus of elasticity of reference and historical larch wood from the Ruard mansion

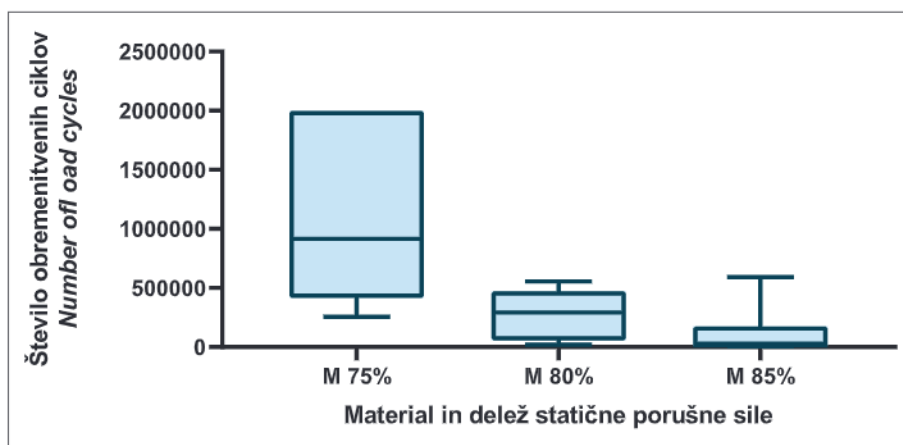


Slika 8. Upogibna trdnost referenčne in stare macesnovine iz Ruardove graščine

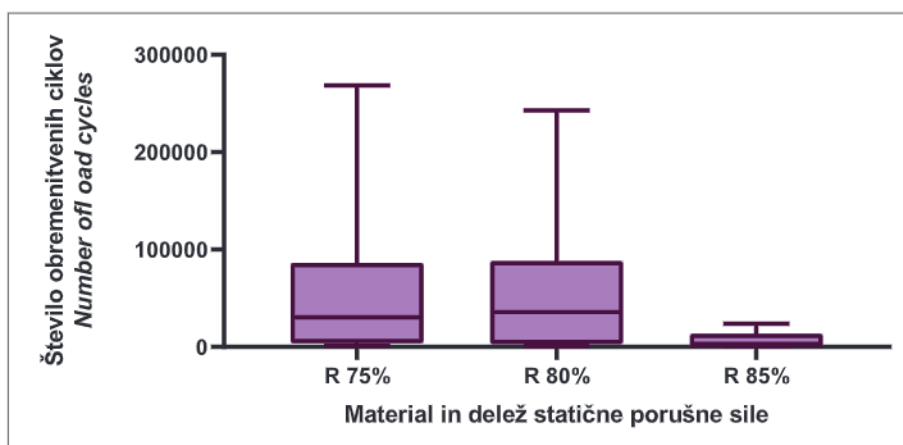
Figure 8. Flexural strength of reference larch and historical larch wood from the Ruard mansion



Slika 9. Porušitev preskušanca pri testu utrujanja
Figure 9. Breakdown of the specimen at fatigue testing



Slika 10. Število obremenitvenih ciklov do porušitve (kontrolni preskušanci iz recentnega lesa macesna)
Figure 10. Number of load cycles to failure (reference larch wood specimens)



Slika 11. Število obremenitvenih ciklov do porušitve (preskušanci macesna iz Ruardove graščine)
Figure 11. Number of load cycles to failure (Ruardmanor larch test specimens)



Slika 12. Prikaz žilavega loma med določanjem upogibne trdnosti (levo) in krhkega loma stare macesnovine po utrujanju (desno).

Figure 12. Demonstration of ductile fracture during determination of flexural strength (left) and brittle fracture of old larch after fatigue (right).

Na sliki 11 so prikazani rezultati utrujanja preskušancev, izdelanih iz lesa macesna iz Ruardove graščine. Povprečno število obremenitvenih ciklov pri utrujanju s 75 % porušne sile (255 N) je znašalo 58.150 obremenitvenih ciklov. Pri obremenjevanju z 80 % porušne sile (272 N) so preskušanci iz Ruardove graščine prestali v povprečju 60.924 ciklov. Tretjo skupino preskušancev smo obremenjevali s 85 % statične porušne sile in sicer je ta znašala 289 N. Število obremenitvenih ciklov do porušitve je v povprečju znašalo 6.266 ciklov. Rezultati kažejo približno 18-krat manj obremenitvenih ciklov, potrebnih za porušitev preskušancev iz starega lesa macesna glede na preskušance iz recentnega lesa.

Iz pridobljenih rezultatov preskusov je razvidno, da so preskušanci iz macesna iz Ruardove graščine bolj odporni na statično obremenitev, saj prenesejo v povprečju za 40 N oziroma za približno 13 % višjo obremenitev kot kontrolni macesnovi preskušanci. Pri dinamičnem obremenjevanju so se veliko bolje izkazali preskušanci iz recentnega macesnovega lesa. Razlika v številu obremenitvenih ciklov, potrebnih za porušitev preskušanca, se je z večanjem obremenitve (glede na upogibno trdnost) med preskušanci iz svežega macesna in preskušanci

iz starega macesna še povečevala. Tudi Schultz et al. (1984) so testirali 300 let star les, vgrajen v strešno konstrukcijo in prišli do podobnih rezultatov.

4 ZAKLJUČKI

4 CONCLUSIONS

Na podlagi meritev lahko potrdimo, da les velja za kakovosten in odporen gradbeni material. Statične mehanske lastnosti starega in referenčnega recentnega lesa so primerljive. Po drugi strani se lesu močno poslabšajo dinamične lastnosti. Star les je bolj dovzeten na dinamične obremenitve kot recentni les. Rezultati utrujanja kažejo, da je star les prenesel približno 18-krat manj obremenitvenih ciklov kot recentni les macesna.

5 POVZETEK

5 SUMMARY

Wood is considered the most promising building material as its mechanical properties along with the environmental aspect are by far the best compared to other competing materials. Ageing has considerable influence on natural and synthetic pol-

ymers, including wood. In wooden constructions it is therefore important to consider the performance of the material over time. Through a case study, we want to approximate the behaviour of wood used for construction over time. At Ruard's mansion, on the Stara Sava in Jesenice, Slovenia, we were given a unique opportunity to compare the mechanical properties of around 400-year-old larch and recently cut European larch (*Larix decidua*). Ceiling samples were taken from the mansion and compared with samples of recent wood with regard to the three-point bending strength and dynamic sample fatigue. The results showed the old larch wood, which had a higher density than the recent wood, withstood the flexural strength testing better than recent larch (the difference was on average 40N). In the fatigue process, we achieved an average of 1,142,049 cycles at the 75% maximum force of the control larch samples, 278,495 cycles at the 85% maximum force, and 112,324 cycles at the 85% maximum force of the control samples. We repeated the procedure on samples from Ruard's mansion and found that the samples withstood an average of 58,150 load cycles at 75% force, 60,924 cycles at 80% failure, and only 6,266 cycles at 85%. The average number of load cycles for recent wood is as much as 18 times higher compared to old larch from Ruard's mansion.

We can therefore conclude that the static mechanical properties of old and recent larch wood are comparable, while dynamic properties of old larch wood deteriorated strongly, which we have demonstrated with fatigue tests

ZAHVALA

ACKNOWLEDGEMENTS

Prispevek je rezultat več med seboj povezanih projektov, ki jih je sofinancirala Agencija za raziskovalno dejavnost RS: P2-0182-Programska skupina razvojna vrednotenja; P4-0015 - Programska skupina les in lignocelulozni kompoziti, 0481-09 - Infrastrukturni center za pripravo, staranje in terensko testiranje lesa ter lignoceluloznih materialov (IC LES PST 0481-09) in Projekta Woolf-OP20.03520, ki poteka v okviru programa Razvoj verig vrednosti v okviru razpisov Strategije pametne specializacije. Za tehnično pomoč pri pripravi in analizi vzorcev se najlepše zahvaljujemo Blažu Jemcu.

VIRI

REFERENCES

- Brus, R. (2012). Drevesne vrste na Slovenskem. 2. izdaja. Ljubljana: Mladinska knjiga.
- CEN. (1993). EN 310 – Wood Based Panels - Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium, 8.
- 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.
- Čufar, K., & Velušček, A. (2012). Les s koliščarskih naselbin na Ljubljanskem barju in njegov raziskovalni potencial. Les, 64 (3-4), 49-56. <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=68586&lang=slv&prp=dkum:1742412:d1>
- Čufar, K., Gorišek, Ž., Merela, M., Kropivšek, J., Gornik Bučar, D., & Straže, A. (2017). Lastnosti bukovine in njena raba. Les/Wood, 66 (1), 27-39. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2017.v66n01a03>
- Dourado, N., de Moura, M. F. S. F., & de Jesus, A. (2019). Fatigue-fracture characterization of wood under mode I loading. International Journal of Fatigue, 121, 265–271.
- Čufar, K. (2006). Anatomija lesa. Univerzitetni učbenik. Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo.
- Fajdiga, G., Rajh, D., Vidic, D., & Gospodarič, B. (2020). The development of Pneumatic fatigue test rig for wood-based specimens. Forests, 11(11), 1187. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11111187>
- Glođež, S., & Flašker, J. (2006). Dimenzioniranje na življenjsko dobo. Maribor: Pedagoška fakulteta: Fakulteta za strojništvo.
- Gorišek, Ž. (2009). Les: zgradba in lastnosti: njegova variabilnost in heterogenost. Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo.
- Humar, M. (2013). Influence of Norway spruce and European larch heartwood ring-width oextractive content and durability. Drvna Industrija, 64, 2.
- Humar, M., Lesar, B., & Kržišnik, D. (2020). Tehnična in estetska življenjska doba lesa. Acta Silvae et Ligni, 121, 33–48.
- Ilfo, B. (2016). Vpliv staranja na fizikalno-mehanske lastnosti lesa stropne konstrukcije. Diplomsko delo. Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
- Kaplan, J. O., Krumhardt, K. M., & Zimmermann, N. (2009). The prehistoric and preindustrial deforestation of Europe. Quaternary Science Reviews, 28 (27–28), 3016–3034.
- Kervina-Hamović, L. (1990). Zaščita lesa. Ljubljana: Biotehniška fakulteta, VTOZD za lesarstvo.
- Kitek Kuzman, M., Klarić, S., Pirc Barčič, A., Vlosky, R. P., Janakieska, M. M., & Grošelj, P. (2018). Architect perceptions of engineered wood products: An exploratory study of selected countries in Central and Southeast Europe. Construction and Building Materials, 179, 360–370.
- Lesar, B., Humar, M., & Oven, P. (2008). Dejavniki naravne odpornosti lesa in njegova trajnost. Les, 11/12 (60), 408–414.
- Mugerli, M. (2016). Vloga družin Bucelleni in Ruard v gornjesavskem fužinarstvu. Kronika, 463–476.
- Sotayo, A., Bradley, D., Bather, M., Sareh, P., Oudjene, M., El-Houjeiri, I., ... Guan, Z. (2020). Review of state of the art of dowel

Lipovec Zupanc, E., Fajdiga, G., & Humar, M.: Comparison of mechanical properties of recent and 400-year-old European larch wood

laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications. *Developments in the Built Environment*, 1, 100004.

Smith, I., Landis, E., & Gong, M. (2003). *Fatigue and fracture in Wood*. New York: Wiley.

Unger, A., Schniewind, A. P., & Unger, W. (2001). *Conservation of wood artifacts : a handbook*. Berlin: London: Springer.

Wagenführ, R. (2007). *Holzatlas*. Leipzig: Fachbuchverlag.

Wood, L. (1951). *Relation of Strength of Wood to Duration of Loads*. Madison: United States Department of Agriculture.