

**VPLIV NARAVNEGA STARANJA NA IZBRANE FIZIKALNE IN MEHANSKE LASTNOSTI KONSTRUKCIJSKEGA LESA****EFFECTS OF NATURAL AGEING ON SELECTED PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF STRUCTURAL TIMBER**Matjaž Dremelj<sup>1\*</sup>, Aleš Straže<sup>1</sup>UDK 630\*814.1:812  
Pregledni znanstveni članek / *Review scientific article*Prispelo / *Received*: 4.11.2022  
Sprejeto / *Accepted*: 30.11.2022**Izvleček / Abstract**

**Izvleček:** Les je po poseku in uporabi za konstrukcije izpostavljen staranju, ki je med drugim odvisno od pogojev izpostavitve. V času življenjske dobe oz. uporabe je les izpostavljen fotodegradaciji, biodegradaciji, površinskim in notranjim strukturnim spremembam in staranju, ki se kaže v spremembi barve, kemijske sestave, higroskopnosti, dimenzijske stabilnosti ter nekaterih mehanskih lastnosti. Podajamo pregled literature, s posebnim poudarkom vpliva pogojev izpostavitve na spremembe lastnosti lesa ter pregled kemijskih in mikrostrukturnih sprememb ter sprememb barve, sorpcijskih in mehanskih lastnosti. V splošnem so spremembe zaradi staranja lahko zelo počasne in jih je težko ovrednotiti tudi zaradi velike naravne variabilnosti lesnih lastnosti. Poznavanje sprememb v naravno staranem lesu je ključno pri ohranjanju kulturne dediščine. Pri načrtovanju vzdrževanja, konzerviranja ter pri obnovi kulturne dediščine, z upoštevanjem staranja konstrukcijskega lesa bolje razumemo strukturne spremembe, vlažnostna in napetostno-deformacijska stanja lesenih konstrukcij ter interakcije z drugimi gradbenimi materiali.

**Ključne besede:** les, staranje, barva, higroskopnost, dimenzijska stabilnost, sorpcija, mehanske lastnosti

**Abstract:** After harvesting, wood in constructions undergoes an ageing process that depends, among other things, on exposure conditions. During its lifetime wood is subject to photodegradation, biodegradation, surface and internal structural changes, and ageing, which is reflected in changes in colour, chemical composition, hygroscopicity, dimensional stability, and mechanical properties. We present a literature review, with particular emphasis on the influence of exposure conditions on changes in wood properties, chemical and microstructural changes, and changes in colour, sorption, and mechanical properties. In general, ageing-related changes can be very slow and difficult to detect, in part because of the wide natural variability in wood properties. Knowledge of the changes in naturally aged wood is critical for preserving cultural heritage, evaluating the safety of wood structures, and planning their conservation. When planning maintenance, conservation, and restoration of cultural heritage, we can better understand the structural changes, moisture and stress deformation states of wood structures, and interactions with other building materials if we consider the ageing of structural wood.

**Keywords:** wood, ageing, colour, hygroscopicity, dimensional stability, sorption, mechanical properties

**1 UVOD****1 INTRODUCTION**

Les je kot naraven polimerni kompozit med življenjsko dobo oz. uporabo izpostavljen fotodegradaciji, biodegradaciji, površinskim in notranjim strukturnim spremembam in tudi staranju (Kránitz et al., 2016; Turkulin & Živković, 2018). Naravno staranje lesa se večinoma razlaga kot počasen pro-

ces blage termične oksidacije, t.j. v območju naravnega temperaturnega nihanja, kjer je kisik prisoten v zraku ali raztopljen v vodi, in hidrolize zaradi vsebnosti kislin ter vezane vode v lesu (Stamm, 1956; Matsuo et al., 2011). V vlažnih razmerah se lahko s staranjem v lesu v zelo nizkih koncentracijah tvorijo nekatere organske kisline, kot sta 4-metilglukuronska in galaktoronska kislina, a le velika količina

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

\* e-pošta: [matjaz.dremelj@gmail.com](mailto:matjaz.dremelj@gmail.com)

kislin v dovolj dolgem obdobju lahko povzroči tudi razgradnjo celuloze in izgubo mase ter trdnostnih lastnosti (Sundqvist, 2006; Kránitz et al., 2016). Kot posledice staranja lesa so pogosto vidne majhne spremembe v barvi, blage kemijske spremembe, zlasti nižanje deleža hemiceluloz, spremenjena higroskopsnost in dimenzijska stabilnost ter tudi nekatere mehanske lastnosti (Straže et al., 2018). Zaradi higroskopsne narave lesa prihaja v njem do napetosti zaradi nihanja vlažnosti, kljub temu, da je les viskoelastični material (Matsuo et al., 2011; Kránitz, 2014). Poznavanje lastnosti naravno staranega lesa je ključno pri ohranjanju kulturne dediščine, saj les poleg kamna in opeke predstavlja pomemben del konstrukcij v zgodovinskih objektih. Lastnosti staranega lesa so ključne pri razumevanju obnašanja in ocenjevanju varnosti konstrukcij kot tudi pri načrtovanju sanacij starih stavb, poškodovanih zaradi

naravnih ujm, kot je na primer bil potres v Zagrebu marca 2020 (Turkulín, osebna komunikacija).

## 2 SPREMEMBE LASTNOSTI LESA MED NARAVNIM STARANJEM

### 2 CHANGES IN WOOD PROPERTIES DURING NATURAL AGEING

#### 2.1 POGOJI IZPOSTAVITVE IN POSLEDICE

##### 2.1 EXPOSURE CONDITIONS AND CONSEQUENCES

Čeprav ima les v drevesu različno kambijevo starost, odvisno od tega, v katerem letu je nastala posamezna branika, velja, da se staranje lesa začne s posekom drevesa. Spremembe v lesu potekajo zelo počasi in so odvisne od okoljskih mikroklimatskih razmer. V vročem, suhem puščavskem podne-



Slika 1. Del stare strešne konstrukcije cerkve sv. Barbare v vasi Ravnik pri Hotedršici.

Figure 1. Part of the old wooden roof structure of the St. Barbara church located in the village of Ravnik near Hotedrščica.

bju se leseni predmeti in tekstil na osnovi rastlinskih vlaken lahko ohranijo celo več tisočletij, medtem ko njihovo razgradnjo pospešujejo razmere, v katerih uspevajo mikroorganizmi. Razlikujemo dva tipa razmer, v katerih potekajo procesi staranja: anaerobne in aerobne.

Les se lahko zelo dolgo ohrani v anaerobnih razmerah (brez prisotnosti zraka), ki veljajo za lesene predmete, potopljene v vodo ali zakopane v zemljo brez prisotnosti kisika. V takih razmerah se lahko nahajajo temelji stavb, stebri, ladje ipd. Razmere, v katerih je les, ki je potopljen v vodi ali zakopan v zemlji, sprožijo zelo počasen proces fosilizacije, pri katerem se kemijske sestavine celične stene v več tisoč letih pretvorijo v visoko kondenzirane spojine (koalifikacija) ali se nadomestijo z minerali (silicifikacija). V to kategorijo spada subfosilni les debel močvirskih hrastov, ki se v mokrem okolju lahko ohranijo več tisoč let (Pearson et al., 2014; Rede et al., 2022) in les različnih predmetov z Ljubljanskega barja, kot je les s koliščarskih naselbin, najstarejše leseno kolo na svetu ter različni deblaki (Čufar & Velušček, 2012).

Različne komponente lesa so izpostavljene različnim vrstam razgradnje in pretvorbe (Fengel, 1991). Praviloma spremembe najprej doživijo hemiceluloze in celuloza, zato v lesu narašča delež lignina (npr. Čufar et al., 2008). Ker je v omenjenih razmerah kisik redko popolnoma odsoten, je les pogosto podvržen počasnemu razkroju bakterij (Kim & Singh, 2000; Singh et al., 2019; Balzano et al., 2022).

V tem pregledu nas zanima predvsem les konstrukcij stavb, ki se stara v aerobnih razmerah (Slika 1). Kadar so razmere ugodne (ugodna temperatura, odsotnost UV sevanja ter vode oz. zamakanja), se zdi, da je učinek staranja na strukturo lesa minimalen, tudi pri arheološkem lesu iz piramid, starem do 4400 let (Van Zyl et al., 1973). V nadaljevanju podajamo pregled sprememb lesa, vgrajenega v stavbah.

## 2.2 KEMIJSKE SPREMEMBE

### 2.2 CHEMICAL CHANGES

Pri naravnem staranju lesa se najpogosteje z vidika osnovnih lesnih komponent omenjajo spremembe na hemicelulozah, najmanj stabilni komponenti, ki ima zaradi svoje manj urejene strukture večjo topnost in se lažje hidrolizira (Hedges,

1989; Fengel, 1991). V večini dosedanjih raziskav so zaznali zmanjšanje deleža hemiceluloz zaradi hidrolize (Chowdhury et al., 1967; Pishik et al., 1971; Erhardt et al., 1996; Yonenobu & Tsuchikawa, 2003; Tsuchikawa et al., 2005; Popescu et al., 2007; Ganne-Chédeville et al., 2012; Kránitz, 2014; Kačik et al., 2014; Hudson-McAulay, 2016; Belec, 2017). Holz (1981) pa pri vzorcih manjše starosti, 60-180 let, ni zaznal značilnih razlik v primerjavi z recentnim lesom. Hudson-McAulay (2016) v svoji raziskavi navaja, da se z zmanjšanjem deleža acetilnih skupin v polimerih hemiceluloz zaradi te kemijske reakcije sprošča očetna kislina.

Celuloza je bolj odporna na staranje kot hemiceluloze, saj ima višjo stopnjo kristaliničnosti in visoko stopnjo medmolekularne povezanosti znotraj fibril, kaže nizko topnost v večini topil in razmeroma močno odpornost na hidrolizo (Hedges, 1989; Fengel, 1991). V nekaterih raziskavah so zaznali zmanjšanje deleža celuloze (Chowdhury et al., 1967; Pishik et al., 1971; Tomassetti et al., 1990; Campanella et al., 1991; Belec, 2017), v drugih pa niso zaznali bistvenih sprememb v količini celuloze (Holz, 1981; Erhardt et al., 1996; Kránitz, 2014). Yonenobu in Tsuchikawa (2003) sta zaznala degradacijo v amorfni regiji celuloze.

Nekatere raziskave podajajo spremembe za holocelulozo, ki vključuje celulozo in hemiceluloze. Tako Kohara in Okamoto (1955) in drugi viri poročajo o zmanjšanem deležu holoceluloze, Van Zyl in sodelavci (1973) poročajo o povečanem deležu holoceluloze, Kačik in sodelavci (2014) pa o rahlem zmanjšanju.

Lignin se zdi med glavnimi gradniki celične stene najbolj odporen na staranje. Etrske vezi in vezi med ogljikovimi atomi naredijo lignin odporen proti hidrolizi, vendar pa je dovzeten za oksidacijske procese (Kránitz, 2014). Oksidacija lignina skupaj z drugimi reakcijami lahko privede do degradacije makromolekul lignina na manjše enote (Borgin et al., 1975a). Od gradnikov celične stene spada lignin med najbolj občutljive na ultravijolično svetlobo (UV). Nekatere raziskave ugotavljajo, da pride s staranjem do povečanja deleža lignina (Narayanamurti et al., 1961; Tomassetti et al., 1990; Campanella et al., 1991), druge pa poročajo o zmanjšanju (Pishik et al., 1971; Van Zyl et al., 1973; Borgin, et al. 1975a; Ganne-Chédeville et al., 2012; Kačik et al., 2014). Več avtorjev (Kránitz, 2014; Hudson-McAu-

lay, 2016; Belec, 2017) ni zaznalo bistvenih sprememb, je pa bila zaznana oksidacija lignina. Za procentualno povečanje deleža lignina v elementarni sestavi je verjetno odgovorna razgradnja hemiceluloz in zmanjšanje njihovega deleža (Dremelj, 2018).

Glede kristaliničnosti celuloze si raziskave niso tako enotne. Nekatere poročajo o povečanju stopnje kristaliničnosti (Popescu et al., 2007; Saito et al., 2008; Gawron et al., 2012), druge o zmanjšanju (Borgin et al., 1975a; Erhardt et al., 1996; García Esteban et al., 2006; Kránitz, 2014), nekatere pa govorijo, da sprememb niso opazili (Yonenobu & Tsuchikawa, 2003; Inagaki et al., 2008).

Kohara in Okamoto (1955) sta pri lesu japonske ciprese (*Chamaecyparis obtusa*, jap. hinoki) zaznala povečanje kristaliničnosti do starosti 100 let, nato pa pri starejših vzorcih zmanjšanje, medtem ko je bilo pri lesu listavca zelkova (*Zelkova serrata*, jap. keyaki) opaženo stalno zmanjševanje stopnje kristaliničnosti. Kohara in Okamoto (1955), razlagata povečanje deleža kristaliničnosti z ustvarjanjem novih intermolekulskih vezi v amorfni delih celuloznih mikrofibril. Fukada (1965) je proučeval les Japonske ciprese (*Cryptomeria japonica*, jap. sugi), indeks kristaliničnosti celuloze je bil največji pri lesu starosti 350 let, nato pa je indeks padal do starosti lesa 1400 let. Navaja, da so dobre akustične lastnosti povezane s samo kristaliničnostjo, in so najboljše pri največji kristaliničnosti celuloze.

Kačik in sodelavci (2014), Kohara in Okamoto (1955), Pishik in sodelavci (1971) poročajo o povečanju deleža ekstraktivov, Ganne-Chédeville in sodelavci (2012) pa o njihovi degradaciji.

Več virov (Pishik et al., 1971; Van Zyl et al., 1973; Borgin et al., 1975a; Tomassetti et al., 1990) poroča o povečanem deležu pepela pri staranem lesu, pri raziskavah, ki sta jih opravila Holz (1981) in Kránitz (2014), pa se delež pepela ni bistveno spremenil. Kránitz (2014) navaja zmanjšanje količine ekstraktivov pri lesu, starem 150 let ali manj, kot posledico izhlapevanja hlapnih komponent. Pri starejšem lesu ista avtorica ponovno povečanje deleža ekstraktivov pojasnjuje kot posledico povečanja deleža oksidacijskih produktov lignina in hemiceluloz.

## 2.3 MIKROSTRUKTURNE SPREMEMBE

### 2.3 MICROSTRUCTURAL CHANGES

Več virov navaja spremembe v mikrostrukturi naravno staranega lesa. Na makroskopskem nivo-

ju samih sprememb pogosto ni možno opaziti, šele z mikroskopskimi metodami, kot je mikroskopija v svetlem polju, elektronska mikroskopija z uporabo vrstičnega (SEM) in transmisijskega elektronskega mikroskopa (TEM) daje vpogled v samo mikrostrukturo in spremembe v njej, ki so posledica staranja lesa.

Več raziskav poroča o delaminaciji S3 sloja celične stene (Narayanamurti et al., 1958; Froidevaux et al., 2012; Kránitz, 2014), prav tako tudi o delaminaciji srednje lamele (Kollmann & Schmidt, 1962; Borgin et al., 1975b; Froidevaux et al., 2012; Kránitz, 2014) ter pojavu radialnih razpok v sekundarni steni (Kollmann & Schmidt, 1962; Froidevaux et al., 2012; Kránitz, 2014). Chowdhury in sodelavci (1967) pa poročajo tudi o helikalnih razpokah v celičnih stenah vlaken.

Brez poznavanja natančne zgodovine lesa ni mogoče zagotoviti, da so napake posledica samo staranja. Priprava vzorca, zunanje ali notranje napetosti lahko prav tako vplivajo na mikrostrukturo, vendar se napake večinoma pojavljajo na območjih, kjer je več hemiceluloz, pektinskih materialov in lignina (Borgin et al., 1975b).

Kojiro in sodelavci (2008) so raziskovali poroznost lesa in poroznost celične stene. Število por v celični steni, manjših od 0,6 nm, se je zmanjšalo s starostjo lesa. S starostjo lesa je prišlo tudi do prostorninskega zmanjšanja por na maso lesa.

## 2.4 BARVA LESA

### 2.4 WOOD COLOUR

V procesu staranja lesa je najbolj opazna sprememba barve površine. Najbolj pride do izraza pri lesu, ki je izpostavljen direktnim sončnim žarkom. Izpostavljenost lesa sončnim žarkom v kombinaciji z vodo pripelje do barvnih sprememb na površini lesa, kjer voda lahko tudi spere produkte fotodegradacije lignina, ki nastanejo zaradi UV sevanja in les posivi. Prav tako pa lahko nastanejo razpoke na površini in med samimi celicami in znotraj celične stene. Fotodegradacija pojasnjuje spremembo barve na površini lesa, medtem ko sprememba barve lesa v notranjosti lesnih elementov ni natančno pojasnjena. Obstaja le malo dosedanjih študij barvnih sprememb znotraj lesenih elementov. Matsuo in sodelavci (2011) v svoji raziskavi pojasnjujejo, da je sprememba barve med naravnim staranjem predvsem posledica počasnega in blagega procesa ter-



Slika 2. Videz tipičnih hrastovih preizkušancev od najmlajše do najstarejše starostne skupine (100–600 let) (po Straže et al., 2018).

Figure 2. Appearance of typical oak specimens sorted from the youngest to the oldest (age groups 100 – 600 years) (after Straže et al., 2018).

mične oksidacije lesa. Do spremembe barve lesa pa lahko pride tudi zaradi spreminjanja deleža ekstraktivov in njihove kemijske strukture. Delež ekstraktivov se pri starem lesu povečuje kot posledica razpada strukturnih elementov lesa, oksidacije lignina in hemiceluloze (Kačič et al., 2014; Kránitz, 2014).

Avtorji (Kohara, 1955; Matsuo et al., 2011; Kránitz, 2014; Dremelj, 2018) enotno opažajo temnejše barve in povečanje kromatičnosti barvnega odtenka na zeleno-rdeči (+a) in rumeno-modri (+b) osi s starostjo lesa (Slika 2). Kránitz (2014) večje razlike v barvi opaža pri iglavcih, manjše pa pri hrastovini. Sprememba barve lesa ni odvisna samo od okoljskih razmer, temveč tudi od vrste lesa in razlik v kemični sestavi med lesnimi vrstami (slika 2). Matsuo in sodelavci (2011) navajajo, da so barvne spremembe zaradi naravnega staranja in toplotne obdelave podobne.

## 2.5 HIGROSKOPSKES LASTNOSTI

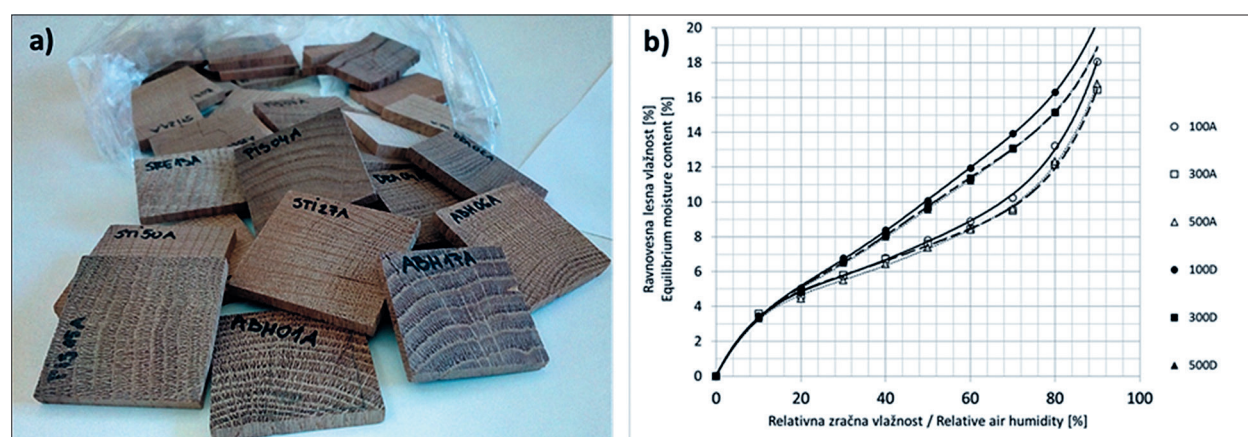
### 2.5 HYGROSCOPIC PROPERTIES

V različnih klimatskih razmerah les, ki je higroskopen material, vzpostavlja ravnovesno vlažnost in s tem tudi svoje stabilne dimenzije. Dimenzijsko stabilnost določajo sorpcijske lastnosti materialov (Noack et al., 1973; Gorišek, 2009). Osnovni gradniki celične stene izkazujejo različne higroskopske lastnosti. Hemiceluloze so najbolj higroskopske, sledi celuloza, najmanj higroskopen pa je lignin. V zgodovinskih stavbah so pohištvo, leseni izdelki in konstrukcije izpostavljeni različnim nihajočim relativnim zračnim vlažnostim (Gereke et al., 2011), to lahko povzroči velika dimenzijska nihanja lesa, kar pa lahko privede zaradi razlik v krčenju in/ali nabrekanju lesa tudi do ireverzibilnih strukturnih poškodb lesa (Hudson-McAulay, 2016).

Kohara in Okamoto, (1955) sta poročala o zmanjšanju koeficienta nabrekanja, prav tako Dre-

melj (2018) poroča tudi o zmanjšanju diferencialnega nabreka. Schulz in sodelavci (1984) pa pri smrekovini starosti 300 let ugotavljajo nasprotno, da se koeficient nabrekanja ( $h$ ) povečuje. Holz (1981) ni odkril bistvenih razlik v nabrekanju vzorcev smreke, stare 60–180 let, prav tako pri boru (Erhardt et al., 1996) niso mogli dokazati nobenih sprememb. Kránitz (2014), ki je proučevala les smreke, jelke in hrasta, ni zaznala bistvenih razlik pri sorpciji in ravnovesni vlažnosti v primerjavi z recentnim lesom.

Opravljenih je bilo več študij sorpcijskih izoterm in ravnovesne vlažnosti starega lesa. Buck (1952) navaja, da čeprav so sorpcijske izoterme pokazale rahlo zmanjšanje ravnovesne vlažnosti pri starih vzorcih, razlik ni bilo mogoče jasno ugotoviti zaradi majhnega števila vzorcev in možnih napak med meritvami. Več avtorjev je zaznalo nižje sorpcijske izoterme za staran les in s tem nižje ravnovesne vlažnosti (Kohara & Okamoto, 1955; Burmester, 1967; Lang, 2004; Inagaki et al., 2008; Kawai et al., 2008; Kurtoglu, 1983; Dremelj, 2018). Dremelj (2018) na stari hrastovini pri preverjanju velikosti histerezne zanke in adsorpcijsko-desorpcijskega razmerja ni potrdil bistvenih razlik (Slika 3). Esteban in sodelavci (2006) ugotavljajo na vzorcu juvenilnega lesa rdečega bora večjo histerezno zanko in višjo ravnovesno vlažnost na vsakem posamičnem intervalu dinamičnega sorpcijskega testiranja. Razlika je lahko posledica nižje stopnje kristaliničnosti celuloze, opažene pri starih vzorcih. Nekatere raziskave pa omenjajo tudi ožanje sorpcijske histerezne zanke starega in recentnega lesa, če se les za več tednov izpostavi vlažnejši klimi. To povezujejo s sproščanjem napetosti v materialu, oz. celičnem matriksu. Staranje lesa s tem podobno kot toplotno obdelavo lesa razlagajo kot delno reverzibilen proces (Obataya, 2017). Na testih absorpcije oz. navzemanja tekoče vode, ki jih je izvedel Narayanamurti s sodelav-



Slika 3. Vzorci hrasta, odvzeti iz starih konstrukcijskih elementov lesenih zgradb (a) in primer sorpcijske histerize adsorpcijsko-desorpcijskega eksperimenta za starostne skupine lesa 100, 300 in 500 let po poseku (b) (Straže et al., 2018).

Figure 3. Oak wood samples from old structural elements of wooden buildings (a) and the sorption hysteresis for the adsorption-desorption test for the age groups 100, 300 and 500 years after tree felling (b) (Straže et al., 2018).

ci (1958) na 1500 let starih vzorcih tikovine, so prav tako pokazali zmanjšanje higroskopsnosti, pri čemer je skupna količina adsorbirane vode znatno nižja pri starih vzorcih.

Če povzamemo predhodne ugotovitve, lahko domnevamo, da se ravnovesna vlažnost s staranjem lesa zmanjšuje, vendar vzrok sprememb v večini primerov ostaja neznan. V procesu staranja lesa pride do razgradnje higroskopsnih hemiceluloz, prav tako se spremeni stopnja kristaliničnosti celuloze, ki se s staranjem lesa povečuje (Kohara & Okamoto, 1955; Gawron et al., 2012), vendar si pretekle raziskave niso enotne. To je pojasnjeno z ustvarjanjem novih intermolekularnih vezi med celuloznimi verigami, ki nastajajo v amorfni področjih (Kohara et al., 1955). Povečanje stopnje kristaliničnosti celuloze povzroči manjše nabrekanje lesa, manjšo higroskopsnost, višjo gostoto, višjo trdoto in trdnost (Gawron et al., 2012)

## 2.6 MEHANSKE LASTNOSTI

### 2.6 MECHANICAL PROPERTIES

Večina študij mehanskega obnašanja naravno staranega lesa obravnava le nekaj izbranih lastnosti. Tlačna trdnost je bila razmeroma pogosto raziskana predvsem za oceno stanja starih lesenih konstrukcij. Meritve na konstrukcijah iz lesa iglavcev kot so smreka, jelka in rdeči bor, v večini raziskav ne kažejo sprememb v tlačni trdnosti vsaj do starosti

400 let (Ehlbeck & Görlacher, 1988, 1993; Deppe & Rühl, 1993; Nier, 1994; Weimar, 2000; Lang, 2004; Lissner & Rüg, 2004; Kránitz, 2014). Narayanamurti in sodelavci (1961) na listavcih paduk (*Pterocarpus soyauxii*) in tik (*Tectona grandis*), starosti 500 let, prav tako niso zaznali sprememb v tlačni trdnosti. Medtem ko so (Schulz et al., 1984) na 300 let stari smrekovini, (Attar-Hassan, 1976) na 140 let stari borovini, (Kohara, 1955) na japonski pacipresi (hinoki) do starosti 100 let in Narayanamurti in sodelavci (1958) na 1500 let stari tikovini zaznali povečano tlačno trdnost v primerjavi z recentnim lesom. Hudson-McAulay (2016) pa je zaznala na stari borovini veliko zmanjšanje tlačne trdnosti, podobno sta jo zaznala Kohara in Okamoto (1955) na lesu zelkove. Trdota staranega lesa kaže podobne težnje kot tlačna trdnost (Kohara & Okamoto, 1955; Attar-Hassan, 1976; Kavčič, 2019).

Določanje upogibne trdnosti in modula elastičnosti v vzdolžni smeri se pogosto ugotavlja tudi pri preiskavah staranega lesa. Več študij na lesu iglavcev in listavcev ni pokazalo razlik med upogibno trdnostjo recentnega in staranega lesa, starega do 400 let (Ehlbeck & Görlacher, 1988, 1993; Rug & Seemann, 1989; Nier, 1994; Horie, 2002; Baron, 2009; Hudson-McAulay, 2016; Zupanc et al., 2021), oz. kažejo, da se trdnost staranega lesa lahko celo poveča (Schulz et al., 1984), pri lesu zelkove do starosti 650 let, japonske paciprese nad starostjo 100

let in zelenega bora starosti do 140 let zmanjša (Kohara & Okamoto, 1955; Attar-Hassan, 1976).

Zmanjšanje upogibnega statičnega modula elastičnosti so opazili pri starani smrekovini ter lesu zelenega bora, zelkove, paduka in kino (Kohara & Okamoto, 1955; Narayanamurti et al., 1961; Attar-Hassan, 1976; Lang, 2004), vendar so z ultrazvočnimi testi izmerili povečanje dinamičnega modula elastičnosti (Attar-Hassan, 1976; Kránitz, 2014).

Pri starem rdečem boru niso bile ugotovljene nobene značilne spremembe modula elastičnosti (Erhardt et al., 1996). Pri smreki vrste jezoensis (*Picea jezoensis*), jelki vrste sachalinensis (*Abies sachalinensis*) in japonski pacipresi niso opazili poslabšanja modula elastičnosti (Horie, 2002; Yokoyama et al., 2009). Poleg tega nekateri članki poročajo o povečanju elastičnega modula, kot npr. Kawai in sodelavci (2008) na vzorcih japonske paciprese, starih 500–1600 let, ter Noguchi s sodelavci (2011), ki obravnava 300 let star japonski rdeči bor (*Pinus densiflora*). Poskusi na slednjem so razkrili tudi večjo hitrost zvoka, manjše dušenje (nižji kot izgub) in večje razmerje med elastičnim in strižnim modulom. Saito in sodelavci (2008) na vzorcih japonskega rdečega bora poročajo o zmanjšanju modula elastičnosti, Kohara in Okamoto (1955) pa govorita o povečanju modula elastičnosti v prvih 100 letih, nato pa sledi zmanjšanje.

Froidevaux in sodelavci (2012) so opravili mikro natezne teste v radialni smeri na 200–500 let starih primerkih smreke. Opazili so približno 25-odstotno zmanjšanje trdnosti, vendar niso ugotovili razlik v modulu elastičnosti. Yokoyama in sodelavci (2009) so določili upogibno trdnost v radialni smeri za stare vzorce japonske paciprese, stare do 1580 let. Vrednosti za star les so bile bistveno nižje kot pri recentnih vzorcih.

Raziskave natezne trdnosti so protislovne. Medtem ko poročajo o povečanju trdnosti 300 let starega smrekovega lesa (Schulz et al., 1984), se ta pri 140 let starem lesu zelenega bora v primerjavi z recentnim lesom zmanjša (Attar-Hassan, 1976).

Zdi se, da se večina trdnostnih lastnosti lesa s staranjem spreminja precej počasi, da sprememb ni mogoče zaznati ali pa sploh ne nastanejo. Vendar je bilo ugotovljeno, da je obnašanje staranega lesa pri zlomu pogosto drugačno od obnašanja recentnega lesa. Les lahko s staranjem postane bolj krhek, kot so omenili Attar-Hassan (1976) in Kawai in sodelav-

ci (2008). Številni avtorji poročajo o zmanjšanju absorbirane energije ob preskusu udarne žilavosti pri staranem lesu (Kohara & Okamoto, 1955; Schulz et al., 1984; Weimar, 2000; Lang, 2004; Baron, 2009; Yokoyama et al., 2009).

Vzorci, raziskani v teh študijah, predstavljajo predvsem les iglavcev, edina izjema je študija, ki sta jo opravila Kohara in Okamoto (1955), kjer obravnavata tudi les zelkove, ki je listavec. Vsi preiskani vzorci lesa so služili v konstrukcijah 300–1600 let. Pregledi lomnih površin so razkrili večji delež krhkih lomov pri starem kot pri recentnem lesu (Weimar, 2000; Lang, 2004) ter več neravnih in kompleksnih lomnih površin na mikroskopski ravni (Ando et al., 2006). Pri smreki jezoensis (*Picea jezoensis*), jelki (*Abies sachalinensis*) z dobo uporabe 30–80 let niso opazili nobene razlike v udarni žilavosti (Horie, 2002). Erhardt in sodelavci (1996) ne poročajo o nobenih spremembah v porušitveni deformaciji in meji elastičnosti v več ponovitvah statičnega nateznega obremenjevanja 300–400 let starih vzorcev rdečega bora.

Kar zadeva strižno trdnost so se vrednosti staranega zelenega bora s starostjo povečale, vrednosti lesa japonske paciprese in zelkove pa zmanjšale (Kohara & Okamoto, 1955; Attar-Hassan, 1976), na drugi strani pa ni bilo mogoče zaznati razlik med strižno trdnostjo 270 let starega japonskega rdečega bora in recentnega lesa. Vendar je analiza akustične emisije med strižnimi testi pokazala večjo krhkost staranega lesa. Ugotovljeno je bilo razmeroma dolgo in stabilno napredovanje mikrorazpok pred končnim zlomom v primerjavi z recentnim lesom, kjer mikrorazpok ni bilo, pri čemer so bile lomne površine videti bolj neravne in kompleksne na mikroskopski ravni. Prav tako se v primeru staranega lesa poleg loma znotraj celične stene pojavljajo tudi številni lomi med celicami, ki so nastali predvsem na obrobju pikenj (Ando et al., 2006). Avtor meni, da so mikrorazpoke že obstajale na robu pikenj pred samim lomljenjem.

Froidevaux in sodelavci (2012) so raziskovali lezenje in mehano-sorptivne deformacije smrekovega lesa, starega 200–500 let v radialni smeri. Glede viskoelastičnosti se zdi, da je recentni les nekoliko bolj viskozen kot staran les. Vendar pa so bili lomni parametri v plastičnem območju mehanskih obremenitev pri staranem lesu močno poslabšani. Z vidika mehano-sorpcijskega obnašanja je ireverzibil-

na deformacija bistveno večja pri recentnih vzorcih, kar kaže na določeno degradacijo lesa, ki se pojavi z naravnim staranjem.

### 3 ZAKLJUČKI

#### 3 CONCLUSIONS

V preteklih študijah je bil uporabljen velik nabor različnih metod za prepoznavanje sprememb, ki nastanejo v lesu pri naravnem staranju. Iz preteklih študij lahko sklepamo, da razgradnja zaradi staranja lesa najbolj prizadene hemiceluloze. Celuloza je nekoliko bolj odporna in je degradirana predvsem v amorfnem delu. Glede kristaliničnosti celuloze si raziskave niso tako enotne, nekatere poročajo o povečanju kristaliničnosti, druge o zmanjšanju. Vsebnost pepela praviloma narašča z naraščanjem starosti lesa. Pri deležu lignina niso zaznali bistvenih sprememb v odvisnosti od starosti, vendar pa so v več raziskavah našli produkte oksidacije lignina. Dosedanje raziskave poročajo o mikrostrukturnih spremembah, kjer so najpogosteje opažene poškodbe kot je delaminacija srednje lamele in S3 sloja ter radialne razpoke v sekundarnem sloju celičnih sten lesnih vlaken. Pri barvnih spremembah s staranjem avtorji enotno opažajo temnenje barve in povečanje kromatičnosti barvnega odtenka na zeleno-rdeči (+a) in rumeno-modri (+b) osi. Ravnesna vlažnost se s starostjo lesa praviloma zmanjšuje. Glede na rezultate mehanskih testov je mogoče ugotoviti v splošnem bolj krhko obnašanje staranega lesa z zmanjšano udarno žilavostjo (Kranitz et al., 2016). Zmanjša se lahko tudi trdnost v prečni ravnini, v vzdolžni smeri pa ni mogoče opaziti jasnega trenda glede trdnosti in togosti. Različne ugotovitve številnih študij so verjetno deloma posledica v splošnem velike variabilnosti lesnih lastnosti, različnih mikroklimatskih pogojev izpostavitve, ki jim je les izpostavljen med dolgotrajno uporabo, in razliki v metodologiji raziskav. Zelo verjetno je, da se zaradi inherentnih strukturnih in kemijskih lastnosti lesne vrste tudi različno obnašajo v procesu staranja.

### 4 POVZETEK

#### 4 SUMMARY

Wood is a natural polymer composite, and over its lifetime its structures are subjected to pho-

todegradation, biodegradation, structural changes of the surface and interior, and ageing (Straže et al., 2018). Natural ageing of wood is usually interpreted as a slow process of mild thermal oxidation in the range of natural temperature fluctuations, where oxygen is dissolved in air or water, and hydrolysis occurs due to the presence of acids and bound water in wood (Stamm, 1956; Matsuo et al., 2011). The consequences of ageing of wood can be seen in its properties, such as changes in colour and chemistry, altered hygroscopicity and dimensional stability, and changes in some mechanical properties (Straže et al., 2018). The hygroscopic nature and variations of moisture content in the material, as well as the viscoelasticity of wood, cause internal stresses (Matsuo et al., 2011; Kránitz, 2014). Knowledge of the properties of naturally aged wood is critical for its conservation, as wood forms an important part of the structures in cultural heritage buildings. The properties of aged wood are also critical for evaluating the safety of structures.

In this review article, we provide an overview of the literature, focusing on the influence of exposure conditions on changes in wood properties, and provide an overview of chemical and microstructural changes, as well as changes in colour, hygroscopic, and mechanical properties.

A wide range of methods have been used in previous studies to determine the changes that occur during the natural ageing of wood. From previous studies, it can be concluded that the age-related degradation of wood mainly affects the hemicelluloses. Cellulose seems to be more resistant, and is more likely changed in its amorphous form. As for the crystallinity of cellulose, the reports in previous studies vary, with some reporting an increase in the degree of crystallinity and others a decrease. In general, the amount of extractives increases with the age of the wood. No significant age-related changes were found in lignin content, but lignin oxidation products were found in wood in several studies. Microstructural changes have been noted in earlier research, with the most commonly observed damage being delamination of the middle lamella and S3 layer and radial cracks in the secondary wall. In terms of colour changes with ageing, various authors uniformly observe a decrease in colour lightness and an increase in chromaticity in the green-red (+a) and yellow-blue (+b) axes.



Equilibrium moisture content generally decreases with age. According to the results of the mechanical tests, the aged wood is generally more brittle with a consistently lower impact bending strength (Kranitz et al., 2016). Strength perpendicular to the grain may also decrease. However, no clear trend can be seen with respect to strength and stiffness in the longitudinal direction.

Knowledge of the changes in naturally aged wood is essential for preserving cultural heritage and evaluating the safety of wooden constructions.

## ZAHVALA

### ACKNOWLEDGEMENTS

Delo je nastalo v okviru interdisciplinarnega doktorskega študijskega programa Bioznanosti, znanstveno področje: les in biokompoziti ter v okviru dela na programih Javne agencije za raziskovalno dejavnost republike Slovenije ARRS, P4-0015 Les in lignocelulozni kompoziti ter P4-0430 Gozdno-lesna veriga in podnebne spremembe: prehod v krožno biogospodarstvo.

## VIRI

### REFERENCES

- Ando, K., Hirashima, Y., Sugihara, M., Hirao, S., & Sasaki, Y. (2006). Microscopic processes of shearing fracture of old wood, examined using the acoustic emission technique. *Journal of Wood Science*, 52(6), 483–489. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10086-005-0795-7>
- Attar-Hassan, G. (1976). The effect of ageing on the mechanical properties of eastern white pine. *Bulletin of the Association for Preservation Technology*, 8(3), 64. DOI: <https://doi.org/10.2307/1493572>
- Balzano, A., Merela, M., & Čufar, K. (2022). Scanning electron microscopy protocol for studying anatomy of highly degraded waterlogged archaeological wood. *Forests*, 13(2), 161. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13020161>
- Baron, T. (2009). Untersuchungen an ungeschädigten und durch Pilzbefall geschädigten Nadelholzbauteilen mit ausgewählten Prüfverfahren. (Investigations with selected test methods on undamaged softwood constructions and constructions damaged through fungal decay). (In German) Dissertation, Technische Universität Dresden.
- Belec, A. (2017). Vpliv staranja na strukturne lastnosti hrasta (Diplomsko delo). Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo.
- Borgin, K., Faix, O., & Schweers, W. (1975a). The effect of aging on lignins of wood. *Wood Science and Technology*, 9(3), 207–211. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00364638>
- Borgin, K., Parameswaran, N., & Liese, W. (1975b). The effect of aging on the ultrastructure of wood. *Wood Science and Technology*, 9(2), 87–98. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00353388>
- Buck, R. D. (1952). A Note on the effect of age on the hygroscopic behaviour of wood. *Studies in Conservation*, 1(1), 39–44. DOI: <https://doi.org/10.1179/sic.1952.004>
- Burmester, A. (1967). Änderung von Festigkeitseigenschaften des Kiefernholzes durch Alterung / Changes in strength properties of pine wood by ageing / Variations des propriétés mécaniques du bois de pin par vieillissement: Mitteilung aus der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin-Dahlem. *Materials Testing*, 9(7), 267–270. DOI: <https://doi.org/10.1515/mt-1967-090703>
- Campanella, L., Tomassetti, M., & Tomellini, R. (1991). Thermoanalysis of ancient, fresh and waterlogged woods. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), 1923–1932. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01912224>
- Chowdhury, K. A., Preston, R. D., & White, R. K. (1967). Structural changes in some ancient Indian timbers. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 168(1011), 148–157.
- Čufar, K., Gričar, J., Zupančič, M., Koch, G., & Schmitt, U. (2008). Anatomy, cell wall structure and topochemistry of water-logged archaeological wood aged 5,200 and 4,500 years. *IAWA Journal*, 29(1), 55–68. DOI: <https://doi.org/10.1163/22941932-90000170>
- Čufar, K., & Velušček, A. (2012). Les s koliščarskih naselbin na Ljubljanskem barju in njegov raziskovalni potencial. *Les*, 64(3/4), 49–56. URL: <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=68586>
- Deppe, H. J., & Rühl, H. (1993). Evaluation of historical construction timber. 1: Density and compression strength. *Holz als Roh- und Werkstoff* 51: 379–383.
- Dremelj, M. (2018). Izbrane fizikalne lastnosti starega hrastovega konstrukcijskega lesa (Magistrsko delo). Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo.
- Ehlbeck, J., & Görlacher, R. (1988). Erste Ergebnisse von Festigkeitsuntersuchungen an altem Konstruktionsholz (First results from investigations of strength on wood from old constructions). *Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke*. SFB, 315, 235–247.
- Ehlbeck, J., & Görlacher, R. (1993). Probleme bei der Beurteilung der Tragfähigkeit von altem Konstruktionsholz (Problems with the evaluation of timber bearing capacity in old constructions). *Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke*. SFB, 315, 201–208.
- Erhardt, D., Mecklenburg, M. F., Tumosa, C. S., & Olstad, T. M. (1996). New versus old wood: differences and similarities in physical, mechanical, and chemical properties. In: Bridgeland J (ed) *International council of museums-committee for conservation 11th triennial meeting*. James & James, London, pp 903–910.

- Fengel, D. (1991). Aging and fossilization of wood and its components. *Wood Science and Technology*, 25(3), 153–177. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00223468>
- Fengel, D., & Wegener, G. (1989). *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. Berlin, New York; Walter de Gruyter.
- Froidevaux, J., Volkmer, T., Ganne-Chédeville, C., Gril, J., & Navi, P. (2012). Viscoelastic behaviour of aged and non-aged spruce wood in the radial direction. *Wood Material Science and Engineering*, 7(1), 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2011.629735>
- Fukada, E. (1965). Piezoelectric effect in wood and other crystalline polymers. In: *Proceedings, Second Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, 143–170.
- Ganne-Chédeville, C., Jääskeläinen, A.-S., Froidevaux, J., Hughes, M., & Navi, P. (2012). Natural and artificial ageing of spruce wood as observed by FTIR-ATR and UVR spectroscopy. *Holzforchung*, 66(2). DOI: <https://doi.org/10.1515/HF.2011.148>
- García Esteban, L., García Fernández, F., Guindeo Casasús, A., de Palacios de Palacios, P., & Gril, J. (2006). Comparison of the hygroscopic behaviour of 205-year-old and recently cut juvenile wood from *Pinus sylvestris* L. *Annals of Forest Science*, 63(3), 309–317.
- Gawron, J., Szczęśna, M., Zielenkiewicz, T., & Gołofit, T. (2012). Cellulose crystallinity index examination in oak wood originated from antique woodwork. *Drewno*, 55 (188), 109–114.
- Gereke, T., Anheuser, K., Lehmann, E., Kranitz, K., & Niemz, P. (2011). Moisture behaviour of recent and naturally aged wood. *Wood Res*, 56, 33–42.
- Gorišek, Ž. (2009). *Les: zgradba in lastnosti: njegova variabilnost in homogenost*. Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo.
- Hedges, J. I. (1989). The chemistry of archaeological wood. In: Rowell RM, Barbour RJ (eds) *Archaeological wood: properties, chemistry, and preservation*. Advances in Chemistry Series 225, American Chemical Society, Washington, 111–140.
- Holz, D. (1981). Zum Alterungsverhalten des Werkstoffes Holz – einige Ansichten, Untersuchungen, Ergebnisse (Aging of wood—some aspects, investigations, results). *Holztechnologie* 22, 80–85.
- Horie, H. (2002). Strength deterioration of recycled lumber collected from demolished wooden buildings in Hokkaido. *Mokuzai Gakkaishi*, 48(4), 280–287.
- Hudson-McAulay, K. J. (2016). *The structural and mechanical integrity of historic wood [PhD Thesis]*. University of Glasgow.
- Inagaki, T., Yonenobu, H., & Tsuchikawa, S. (2008). Near-infrared spectroscopic monitoring of the water adsorption/desorption process in modern and archaeological wood. *Applied Spectroscopy*, 62(8), 860–865. DOI: <https://doi.org/10.1366/000370208785284312>
- Kačič, F., Šmíra, P., Kačíková, D., Reinprecht, L., & Nasswettrová, A. (2014). Chemical changes in fir wood from old buildings due to ageing. *Cellulose Chemistry and Technology*, 48, 79–88.
- Kavčič, Ž. (2019). *Mehanske lastnosti starega hrastovega konstrukcijskega lesa (Diplomsko delo)*. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo.
- Kawai, S., Yokoyama, M., Matsuo, M., & Sugiyama, J. (2008). Research on the aging of wood in RISH. *Wood Science for Preservation of Cultural Heritage: Mechanical and Biological Factors*. Braga, Portugal, 52–56.
- Kim, Y. S., & Singh, A. P. (2000). Micromorphological characteristics of wood biodegradation in wet environments: A review. *IAWA Journal*, 21(2), 135–155. DOI: <https://doi.org/10.1163/22941932-90000241>
- Kohara, J. (1955). Studies on the permanence of wood (X) Colorimetry on the old timbers by the trichromatic colorimeter. *Journal of the Japanese Forestry Society*, 37(2), 63–66.
- Kohara, J., & Okamoto, H. (1955). Studies of Japanese old timbers. *The Scientific Reports of the Saikyo University. Agriculture*, 7, 9–20.
- Kojiro, K., Furuta, Y., Ohkoshi, M., Ishimaru, Y., Yokoyama, M., Sugiyama, J., Kawai, S., Mitsutani, T., Ozaki, H., Sakamoto, M., & Imamura, M. (2008). Changes in micropores in dry wood with elapsed time in the environment. *Journal of Wood Science*, 54(6), 515–519. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10086-008-0973-5>
- Kollmann, F., & Schmidt, E. (1962). Structural derangement and loss in strength of permanently stressed coniferous wood. *Holz als Roh- und Werkstoff* 20, 333–338.
- Kránitz, K. (2014). *Effect of natural aging on wood*. (PhD), ETH, Zurich. (DISS. ETH No. 21661)
- Kránitz, K., Sonderegger, W., Bues, C. T., & Niemz, P. (2016). Effects of aging on wood: A literature review. *Wood Science and Technology*, 50(1), 7–22. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0766-0>
- Kurtoglu, A. (1983). The properties of sorption of old spruce timber. *Holzforchung und Holzverwertung*, 35(6), 125–126.
- Lang, A. (2004). *Charakterisierung des Altholzaufkommens in Deutschland (Characterisation of the waste wood situation in Germany)*. Dissertation, Universität Hamburg.
- Lissner, K., & Rüg, W. (2004). Ergänzung bzw. Präzisierung der für die Nachweisführung zur Stand- und Tragsicherheit sowie Gebrauchstauglichkeit von Holzkonstruktionen in der Altbausubstanz maßgebenden Abschnitte der DIN 1052: August 2004. Büro Lißner, Ing.-Büro Rug.
- Matsuo, M., Yokoyama, M., Umemura, K., Sugiyama, J., Kawai, S., Gril, J., Kubodera, S., Mitsutani, T., Ozaki, H., Sakamoto, M., & Imamura, M. (2011). Aging of wood: Analysis of color changes during natural aging and heat treatment. *Holzforchung*, 65(3). DOI: <https://doi.org/10.1515/hf.2011.040>
- Narayanamurti, D., Ghosh, S. S., Prasad, B. N., & George, J. (1958). Note on examination of an old timber specimen. *Holz Als Roh-Und Werkstoff*, 16(7), 245–247.
- Narayanamurti, D., Prasad, B. N., & Verma, G. M. (1961). Untersuchungen an alten Hölzern—Dritte Mitteilung: Ein altes Pterocarpus-Holz aus Tirupathi. *Holz Als Roh-Und Werkstoff*, 19(2), 47–50.

- Nier, J. (1994). Experimentelle Festigkeitsuntersuchungen an alten Bauholzern und daraus abgeleitete Erkenntnisse zur Tragfähigkeitsbeurteilung (Experimental investigations of strength on old construction timber and therefrom deduced knowledge for bearing capacity estimation). Dissertation, Technische Hochschule Leipzig.
- Noack, D., Schwab, E., & Bartz, A. (1973). Characteristics for a judgment of the sorption and swelling behavior of wood. *Wood Science and Technology*, 7(3), 218–236.
- Noguchi, T., Obataya, E., & Ando, K. (2011). Effects of ageing on the vibrational properties of akamatsu (*Pinus densiflora*) wood. *Wood Culture and Science*, Kyoto, 69.
- Obataya, E. (2017). Effects of natural and artificial ageing on the physical and acoustic properties of wood in musical instruments. *Journal of Cultural Heritage*, 27, S63–S69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.02.011>
- Pearson, C., Wazny, T., Kuniholm, P., Botić, K., Durman, A., & Seuffer, K. (2014). Potential for a new multimillennial tree-ring chronology from subfossil Balkan river oaks. *Radiocarbon*, 56, S51–S59. DOI: [https://doi.org/10.2458/azu\\_rc.56.18342](https://doi.org/10.2458/azu_rc.56.18342)
- Pishik, I., Fefilon, V., & Burkovskaya, V. (1971). Chemical composition and chemical properties of new and old wood. *Lesnoi J*, 14(6), 89–93.
- Popescu, C.-M., Dobeles, G., Rossinskaja, G., Dizhbite, T., & Vasile, C. (2007). Degradation of lime wood painting supports. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 79(1–2), 71–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2006.12.014>
- Rede, V., Essert, S., Kocijan, M., & Dubravac, T. (2022). Influence of ageing on abrasion volume loss, density, and structural components of subfossil oak. *Applied Sciences*, 12(4), 1814. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12041814>
- Rug, W., & Seemann, A. (1989). Ermittlung von Festigkeitskennwerten an alten Holzkonstruktionen. *Holztechnologie*, 30(2), 69–73.
- Saito, Y., Shida, S., Ohta, M., Yamamoto, H., Tai, T., Ohmura, W., Maki-hara, H., Noshiro, S., & Goto, O. (2008). Deterioration character of aged timbers: insect damage and material aging of rafters in a historic building of Fukushoji-temple. *Mokuzai Gakkaishi* 54: 255–262.
- Schulz, H., Bellmann, B., & Wagner, L. (1984). Druckholzanalyse in einem stark verkrümmten Fichtenbrett. *Holz Als Roh- und Werkstoff*, 42(3), 109–109. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02628866>
- Singh, A., Kim, Y., & Chavan, R. (2019). Relationship of wood cell wall ultrastructure to bacterial degradation of wood. *IAWA Journal*, 40, 1–26. DOI: <https://doi.org/10.1163/22941932-40190250>
- Stamm, A. J. (1956). Thermal degradation of wood and cellulose. *Industrial & Engineering Chemistry*, 48(3), 413–417. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie51398a022>
- Straže, A., Dremelj, M., Žveplan, E., & Čufar, K. (2018). Spremembe fizikalnih lastnosti hrastovega lesa iz zgodovinskih konstrukcij v življenjski dobi. *Les/Wood*, 67(1), 5–14. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2018.v67n01a01>
- Sundqvist, B. (2006). Determination of formic-acid and acetic acid concentrations formed during hydrothermal treatment of birch wood and its relation to colour, strength and hardness (B. Sundqvist, O. Karlsson, & U. Westermark, Trans.). *Wood Science and Technology*, v. 40(7), 549–561. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-006-0071-z>
- Tomassetti, M., Campanella, L., & Tomellini, R. (1990). Thermogravimetric analysis of ancient and fresh woods. *Thermochimica Acta*, 170, 51–65. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(90\)80524-3](https://doi.org/10.1016/0040-6031(90)80524-3)
- Tsuchikawa, S., Yonenobu, H., & Siesler, H. W. (2005). Near-infrared spectroscopic observation of the ageing process in archaeological wood using a deuterium exchange method. *Analyst*, 130(3), 379–384. DOI: <https://doi.org/10.1039/B412759E>
- Turkulin, H., & Živković, V. (2018). Microtensile testing of wood – influence of material properties, exposure and testing conditions on analysis of photodegradation. *Drvna industrija*, 69(2), 183–191. DOI: <https://doi.org/10.5552/drind.2018.1757>
- Van Zyl, J. D., Van Wyk, W. J., & Heunis, C. M. (1973). The effect of ageing on the mechanical and chemical properties of wood. In: *IUFRO-5 Meeting: Wood in the Service of Man*. Pretoria, 2, 1069–1080.
- Weimar, H. (2000). Aspekte der stofflichen Charakterisierung von Altholz (Aspects of the material characterisation of aged wood). Msc thesis. Universität Hamburg
- Yokoyama, M., Gril, J., Matsuo, M., Yano, H., Sugiyama, J., Clair, B., Kubodera, S., Mistutani, T., Sakamoto, M., Ozaki, H., Imamura, M., & Kawai, S. (2009). Mechanical characteristics of aged Hinoki wood from Japanese historical buildings. *Physics and Heritage*, 10(7), 601–611. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2009.08.009>
- Yonenobu, H., & Tsuchikawa, S. (2003). Near-Infrared spectroscopic comparison of antique and modern wood. *Applied Spectroscopy*, 57(11), 1451–1453. DOI: <https://doi.org/10.1366/000370203322554635>
- Zupanc Lipovec, E., Fajdiga, G., & Humar, M. (2021). Primerjava mehanskih lastnosti recentnega in 400 let starega lesa evropskega macesna. *Les/Wood*, 70(2), 31–40. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2021.v70n02a01>

