

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Beno IFKO

**VPLIV STARANJA NA FIZIKALNO-MEHANSKE LASTNOSTI LESA
STROPNE KONSTRUKCIJE**

DIPLOMSKO DELO
Univerzitetni študij

**EFFECTS OF AGING ON PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES
OF A WOOD CEILING CONSTRUCTION**

GRADUATION THESIS
University Studies

Ljubljana, 2016

Diplomsko delo je zaključek Univerzitetnega študija lesarstva. Eksperimentalno delo je bilo opravljeno v laboratoriju Katedre za tehnologijo lesa Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka je za mentorja diplomskega dela imenoval prof. dr. Željka Goriška, za somentorja doc. dr. Aleša Stražeta in za recenzentko prof. dr. Katarino Čufar.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora: 23. 9. 2016

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela. Podpisani se strinjam z objavo svoje naloge v polnem tekstu na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je naloga, ki sem jo oddal v elektronski obliki, identična tiskani verziji.

Beno IFKO

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD Dn
DK UDK 630*561.24
KG smrekovina/staranje/dendrokronologija/fizikalne lastnosti/mehanske lastnosti
AV IFKO Beno
SA GORIŠEK, Željko (mentor)/STRAŽE, Aleš (somentor)/ČUFAR, Katarina (recenzentka)
KZ SI – 1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI 2016
IN VPLIV STARANJA NA FIZIKALNO-MEHANSKE LASTNOSTI LESA STROPNE KONSTRUKCIJE
TD Diplomsko delo (univerzitetni študij)
OP X, 63 str., 12 pregl., 34 sl., 97 vir.
IJ sl
JI sl/en
AI Na odvzetem lesu navadne smreke (*Picea abies* (L.) Karst.), iz lesene stropne konstrukcije v kapeli Graščine Preddvor, smo ovrednotili vpliv staranja na osnovi izbranih fizikalno-mehanskih lastnosti vgrajenega lesa (gostote, ravnovesne vlažnosti, dimenzijske stabilnosti, statičnega in dinamičnega modula elastičnosti, upogibne, tračne in strižne trdnosti). Z dendrokronološkimi raziskavami smo časovno umestili odvzete vzorce. Datirali smo jih v sredino 19. stoletja. Starost odvzetih preizkušancev za mehansko testiranje je tako med 160 in 170 leti. Povprečna gostota v absolutno suhem stanju lesa stropne konstrukcije je bila 398 kg/m³, povprečna gostota zračno suhega lesa pa je znašala 429 kg/m³. Povprečna ravnovesna vlažnost naših preizkušancev je bila v zgornjem higroskopskem območju ($\phi = 87\%$), v procesu adsorpcije 17,8 % in v procesu desorpcije 19,1%. Na spodnji meji kvazilinearnega območja ($\phi = 33\%$) pa je bila ravnovesna vlažnost v procesu adsorpcije 8,4 % in v procesu desorpcije 9,6 %. Kazalniki dimenzijske stabilnosti so normalni, razen sorpijskega kvocienta in anizotropije, ki sta neugodna. Upogibna trdnost je bila 72,3 MPa, elastični modul iz upogiba pa je pri tem bil 9,4 GPa. Dinamični elastični modul v vzdolžni smeri pri frekvenčnem odzivu je bil 12,3 GPa. Prečni dinamični elastični modul je bil nižji in je znašal 10,9 GPa. Tlačna trdnost vzporedno z vlakni je bila 40,5 MPa. Strižna trdnost v vzdolžno radialni ravnini je bila za odvzete preizkušance 8,6 MPa. Vse te vrednosti ne izkazujejo drastičnega znižanja in s tem poslabšanja nosilnosti lesa stropne konstrukcije. Les bi lahko služil svojemu namenu še več stoletij, če ne bi prišlo do lokalnega razkroja, zaradi intenzivnega zamakanja skozi streho.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Dn
DC UDC 630*561.24
CX spruce wood/ageing/dendrocronology/physical properties/mechanical properties
AU IFKO Beno
AA GORIŠEK, Željko (supervisor)/STRAŽE, Aleš (co-advisor)/ČUFAR, Katarina (reviewer)
PP SI – 1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY 2016
TI EFFECTS OF AGING ON PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF A WOOD CEILING CONSTRUCTION
DT Graduation Thesis (University studies)
NO X, 63 p., 12 tab., 34 fig., 97 ref.
LA sl
AL sl/en
AB From the specimens of the wood Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.), taken from the wood ceiling construction in the chapel of the Preddvor manor, we evaluated the influence of aging on the basis of the selected physical-mechanical properties of the inbuilt wood. Dendrochronological investigation helped us to identify the felling dates of the wood. The dating showed that the construction is derived from the middle of the 19th century. The age of the tested material is between 160 and 170 years. The average density of the oven dry massive ceiling wood was 398 kg/m³. The average density of the air dry wood was 429 kg/m³. The average value of equilibrium moisture content was in the upper quasi-linear area ($\varphi = 87\%$), in the process of adsorption 17.8 % and in the process of desorption 19.1 %. The indicators of dimension stability are normal, but the ratio of sorption and anisotropy are unfavourable. The modulus of elasticity was determined for the equilibrated specimens using a 3-point bending test and dynamic excitation in the longitudinal and transverse direction. The correspondence between the methods was good, with the coefficient of determination greater than 0.85. The bending strength was 72.3 MPa and the modulus of elasticity from bending was 9.4 GPa. The dynamic elastic modulus in the longitudinal direction was 12.3 GPa and in the transverse direction 10.9 GPa. The compressive strength parallel to grain was 40.5 MPa. The shear strength in the longitudinal radial plane was 8.6 MPa. All these values do not show a drastic reduction and thus deterioration of the load-carrying capacity of the wood ceiling construction. The wood could serve its purpose for more centuries to come if the intensive roof leakage had not led to local degradation.

KAZALO VSEBINE

	str.
Ključna dokumentacijska informacija (KDI)	III
Key Words Documentation (KWD)	IV
Kazalo vsebine	V
Kazalo preglednic	VII
Kazalo slik	VIII
Kazalo prilog	X
Okrajšave in simboli	XI
Slovarček	XII
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	1
1.2 CILJI RAZISKOVANJA	2
1.3 HIPOTEZE	3
2 SPLOŠNI DEL	4
2.1 KRAJ IN OBJEKT PROUČEVANJA	4
2.1.1 Kraj Preddvor	4
2.1.2 Graščina Preddvor	5
2.1.3 Štukaturni strop v kapeli	5
2.2 NAVADNA SMREKA	6
2.2.1 Osnovne značilnosti lesa navadne smreke	7
2.2.2 Uporaba smrekovega lesa	9
2.3 STARANJE LESA V UPORABI	9
2.3.1 Mehanske lastnosti starega lesa v uporabi	11
2.3.2 Mikrostrukturne spremembe starega lesa	14
2.3.3 Variabilnost kemijske sestave lesa v procesu staranja	17
2.3.3.1 Stopnja kristaliničnosti celuloze	19
2.3.4 Higroskopske lastnosti starega lesa v uporabi	20
2.3.5 Barvne spremembe v procesu staranja	20
3 MATERIAL IN METODE	22
3.1 MATERIAL	22
3.1.1 Vzorci za dendrokronološko datiranje	22
3.1.2 Preizkušanci za fizikalno-mehanske poskuse	23
3.2 METODE	24
3.2.1 Denrokronološko datiranje lesa	24
3.2.1.1 Merjenje širin branik	24
3.2.1.2 Dendrokronološki kazalniki ujemanja	26
3.2.2 Metode za določanje fizikalnih lastnosti	26
3.2.2.1 Gostota lesa	26
3.2.2.2 Ravnosvesna vlažnost	27
3.2.2.3 Kazalniki dimenzijske stabilnosti	28
3.2.3 Metode za določanje mehanskih lastnosti	30
3.2.3.1 Nedestruktivno določanje dinamičnega elastičnega modula	30
3.2.3.1.1 Določanje modula elastičnosti z vzdolžnim vzbujanjem	30

3.2.3.1.2	Določanje modula elastičnosti s prečnim vzbujanjem	32
3.2.3.2	Upogibna trdnost in modul elastičnosti	32
3.2.3.3	Tlačna trdnost vzporedno s potekom vlaken	34
3.2.3.4	Strižna trdnost vzporedno z vlakni	35
4	REZULTATI	36
4.1	DATIRANJE ODVZETIH VZORCEV	36
4.2	FIZIKALNE LASTNOSTI LESA STROPNE KONSTRUKCIJE	37
4.3	MEHANSKE LASTNOSTI LESA STROPNE KONSTRUKCIJE	39
4.3.1	Dinamični modul elastičnosti	42
5	RAZPRAVA IN SKLEPI	44
5.1	RAZPRAVA	44
5.1.1	Datiranje stropne konstrukcije Graščine Predvor	45
5.1.2	Fizikalne lastnosti lesa stropne konstrukcije	46
5.1.3	Mehanske lastnosti lesa stropne konstrukcije	49
5.1.4	Nedestruktivne metode preizkušanja lesa	53
5.2	SKLEPI	55
6	POVZETEK	56
7	VIRI	57
	ZAHVALA	

KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 1: Posamezne kemijske komponente svežega in starega lesa.	17
Preglednica 2: Pregled načrtovanih poskusov, dimenzije in število preizkušancev.	22
Preglednica 3: Kriteriji za ocenitev dimenzijske stabilnosti.....	30
Preglednica 4: Statistični kazalniki sinhroniziranja in datiranja vzorcev stropne konstrukcije.....	36
Preglednica 5: Gostota v absolutno suhem stanju (ρ_0) v [kg/m^3].	37
Preglednica 6: Ravnovesne vlažnosti v procesu sušenja (D_e) in navlaževanja (A_d) pri relativni zračni vlažnosti (ϕ) in temperaturi $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$	37
Preglednica 7: Kazalniki dimenzijske stabilnosti lesa stropne konstrukcije.	37
Preglednica 8: Upogibne lastnosti smrekovega lesa (F_{maks} – sila porušitve, σ_b - upogibna trdnost, E – modul elastičnosti, ρ_u – gostota lesa pri $\approx 12\%$ vlažnosti lesa).....	39
Preglednica 9: Tlačne lastnosti smrekovega lesa (F_{maks} – sila porušitve, $\sigma_{+/-}$ - tlačna trdnost, E – modul elastičnosti, ρ_u – gostota lesa pri $\approx 12\%$ vlažnosti lesa).	40
Preglednica 10: Strižna trdnost smrekovega lesa vzporedno z vlakni (F_{maks} – sila porušitve, τ_{ll} - tlačna trdnost, G – strižni modul elastičnosti, ρ_u – gostota lesa pri $\approx 12\%$ vlažnosti lesa)	41
Preglednica 11: Kazalniki akustičnih lastnosti smrekovih preizkušancev pridobljeni merjenjem fizikalnih parametrov v vzdolžni smeri (ρ_u – gostota, f – lastna frekvenca, v – hitrost zvoka, E – el. modul).	42
Preglednica 12: Kazalniki akustičnih lastnosti smrekovih preizkušancev, pridobljenih z merjenjem fizikalnih parametrov v prečni smeri (ρ_u – gostota, f – lastna frekvenca, $\tan \delta$ – dušenje zvoka, E – el.modul).	43

KAZALO SLIK

	str.
Slika 1: Delno porušena stropna konstrukcija v Graščini Preddivor (levo). Močno degradiran stropnik (desno).	6
Slika 2: Okužen stropnik s sivo hišno gobo (levo). Hrastov mozni (desno).	6
Slika 3: Naravni areal razširjenosti navadne smreke (EUROFORGEN, 2009.).....	7
Slika 4: Odvisnost natezne, upogibne, tlačne in udarne žilavosti od gostote za star in svež les (Schultz in sod. 1984).	12
Slika 5: Razmerje med gostoto in in dinamičnim elastičnim modulom (Kranitz, 2014)...	13
Slika 6: Vrščni elektronski mikroskop, vidna je razgradnja S3 stene na 500 let stari navadni smreki. (Froidevaux in sod., 2014).....	14
Slika 7: Razslojevanje srednje lamele navadne smreke 160 let v uporabi (levo). Razpoke v celični steni navadne smreke 170 let v uporabi (desno). (Kranitz, 2014).....	15
Slika 8: Pojav prelomov v srenji lameli na prečnem prerezu 200 let stare navadne smreke v uporabi. (Froidevaux in sod., 2014.).....	15
Slika 9: 200 let stara navadna smreka v uporabi. Vidne razplastitve med srednjo lamelo in sekundarno steno ter vidne razpoke v sekundarni steni. (Froidevaux in sod., 2014).....	16
Slika 10: Vsebnost glavnih gradnikov celične stene v odvisnosti od starosti (Fengel, 1991).....	18
Slika 11: Pripravljene skupine preizkušancev. Levo so vzorci za dendrokronološko datiranje, desno preizkušanci za akustične i upogibne lastnosti.	23
Slika 12: Pripravljene skupine preizkušancev. Levo preizkušanci za tlačne in strižne lastnosti, desno preizkušanci za dimenzijsko stabilnost.	23
Slika 13: Merilna mizica Lintab s stereo lupo in računalniškim programom Tsap – Win...	25
Slika 14: Tehtanje preizkušancev za določanje gostote v normalni laboratorijski klimi...	27
Slika 15: Potek uravnovešenja v različnih klimah a) prve skupine: desorpcijski preizkušanci (De) in b) druga skupina: adsorpcijski preizkušanci (Ad). (Kline, 1995.).....	28
Slika 16: Steklene kontejnerji za uravnovešenja preizkušancev nad nasičenimi raztopinami soli.....	29

Slika 17: Merilna veriga za določanje akustičnih lastnosti lesa.	31
Slika 18: Izvedba upogibnega poskusa (levo), računalniško beleženje in grafični prikaz poskusa (desno).	33
Slika 19: Izvedba tlačnega poskusa na stroju Zwick/Roell Z 100.	34
Slika 20: Prikaz strižnih ravnin vzporedno z vlakni (levo), izvedba strižnega poskusa (desno).	35
Slika 21: Napetostno-deformacijski diagram upogibnega poskusa smrekovega lesa stropne konstrukcije	39
Slika 22: Napetostno-deformacijski diagram tlačnega poskusa smrekovega lesa vzporedno z vlakni stropne konstrukcije.	40
Slika 23: Napetostno – deformacijski diagram pri strižnem poskusu smrekovega lesa vzporedno z vlakni stropne konstrukcije.	41
Slika 24: Tloris 1. nadstropja z označenim mestom odvzema posameznih delov stropne konstrukcije (Konzervatorski načrt Graščine Preddvor, 2013).	44
Slika 25: Izgled stropne konstrukcije z Graščine Preddvor (levo). Prečni prerez smrekovega stropnika odvzetega z Graščine Preddvor (desno).	45
Slika 26: Prečni prerez odvzetih stropnikov s stropne konstrukcije z značilnimi izletnimi odprtini hišnega kozlička v perifernem delu. (levo in desno).	45
Slika 27: Odvisnost diferencialnega nabreka od gostote v absolutno suhem stanju v tangencialni in radialni smeri preizkušancev odvzetih s stropne konstrukcije.	48
Slika 28: Odvisnost upogibne trdnosti od gostote zračno suhega lesa stropne konstrukcije.	49
Slika 29: Prikaz prelomov preizkušancev odvzetih s stropne konstrukcije pri upogibnem preizkusu.	50
Slika 30: Prikaz prelomov preizkušancev odvzetih s stropne konstrukcije pri upogibnem preizkusu.	50
Slika 31: Odvisnost statičnega modula elastičnosti iz upogib in gostote zračno suhega lesa stropne konstrukcije.	51
Slika 32: Odvisnost tlačne trdnosti vzporedno z vlakni od gostote zračno suhega lesa stropne konstrukcije.	52
Slika 33: Odvisnost strižne trdnosti v LR ravnini od gostote zračno suhega lesa stropne konstrukcije.	53

Slika 36: Odnos med dinamičnim modulom elastičnosti v vzdolžni smeri in statičnim modulom elastičnosti iz upogiba preizkušancev odvzetih s stropne konstrukcije..54

1 UVOD

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Les je bil v določenem preteklem obdobju v širši uporabi za konstrukcijske namene zapostavljen in prezrt. V zadnjem času pa se ponovno uveljavlja kot gradbeni material. Gradbeniki so les želeli nadomestiti z betonom, ki ima monolitno konstrukcijsko obliko, s steklom z neprijetnim hladnim občutkom ali novejšimi umetnimi materiali, ki mnogokrat sprožajo dileme o vprašljivih ekoloških vplivih.

Danes lahko opazimo mnogo prenov, sanacij in rekonstrukcij objektov, katerih namen je z restavriranjem podaljšati uporabo vgrajenega lesa. Dotrajane lesene elemente nadomeščajo z novimi, kjer je to nujno potrebno, in s kompozitnim sestavljanjem konstrukcijskih elementov med lesom ter betonom. Opažamo, da je v konstrukcijske namene mogoče sožitje različnih materialov: lesa, betona in kovine. Lahko tudi potrdimo, da je reintegracija lesenih konstrukcijskih elementov vse bolj pomembna.

Les ima več prednosti pred drugimi inženirskimi materiali, kar ga uvršča med najperspektivnejše materiale prihodnosti. Kot naraven biološki material je obnovljiv in nastaja ob blagodejnih učinkih na okolje. V postopkih predelave in obdelave lesa so energijske zahteve mnogo manjše kot pri uporabi nekaterih drugih materialov (cementa, kovine ...), proizvodnja je okolju prijazna tako z vidika energijske porabe kot onesnaženja. Les je biološko razgradljiv material, mogoče ga je reciklirati. Gozdovi zaradi vezave ogljika zmanjšujejo tudi učinek tople grede. Hkrati se uporabnost lesa kaže tudi v zelo ugodnem razmerju med trdnostjo in gostoto. (Gorišek, 2009.)

Pri uporabi lesa v konstrukcijske namene se moramo toliko bolj zavedati, da je organski material del naravnega ogljikovega cikla in zato podvržen razkroju. Glavni povzročitelji tega razkroja pa so biotični dejavniki, to so bakterije, glive in insekti, ter abiotični, to so ogenj, vremenski vplivi in mehanske sile. Les, ki ni izpostavljen tem škodljivim dejavnikom, lahko ohranja prvotne lastnosti zelo dolgo.

Leseni predmeti iz egipčanskih piramid so na primer starejši od 4000 let in so nedotaknjeni. Večina predmetov iz lesa, ki jih redno uporabljamo, se tej starosti ne približa. Zelo pogosto pa pri ohranjanju stavbne kulturne dediščine naletimo na lesene predmete stare več stoletij, pri čemer moramo zaradi vprašljive konstrukcijske zanesljivosti podrobno preučiti še ustreznost vgrajenega lesa.

Glavni sestavni deli nosilnih konstrukcij zgodovinskih objektov so narejeni iz lesa in kamna. Les so večinoma uporabljali pri izvedbi stropov, medetažnih konstrukcij in ostrešij. Med takrat znanimi gradivi je bil les edini odporen na upogib in zato zelo uporaben za premoščanje večjih razponov. Ob nevzdrževanju ostrešij pa so lesene stropne konstrukcije zelo izpostavljene zamakanju in s tem trohnenju in napadu insektov ter gliv. Poleg tega pa pri lesenih stropnih izvedbah pri ležiščih tramov na zidovih pogosto nastane kondenzni

efekt in s tem velika verjetnost bioloških okužb in trohnenja. Vse to pa lahko zmanjša nosilnosti in končno povzroči porušitev.

Predvsem pri konstrukcijskih sanacijah zgodovinskih objektov velikokrat naletimo na nezadovoljivo poznavanje lastnosti in starosti vgrajenih materialov. Pri prenavljanju in vzdrževanju lesenih konstrukcij pogosto nastane vprašanje, kaj storiti z njimi in kako ukrepati. Ozaveščenost, pripravljenost za vzdrževanje in finančna podpora nam pri tem namreč nič ne pomagajo, če nimamo tehničnega znanja in vedenja o vgrajenih materialih, ki nam lahko omogočijo ustrezno sodobno funkcionalno uporabo.

Le redke stavbe in objekti kulturne dediščine lahko ostajajo revitalizirani v prvotnih oblikah. Vse ostale pa morajo omogočati novo ustrezno sodobno funkcijo uporabe. Zato je toliko bolj pomembno poznavanje lastnosti materialov, ki nam bodo, vgrajeni v spremenjenih sodobnejših funkcijah uporabe, dovolj varno služili naprej.

Raziskovalci do zdaj niso pogosto raziskovali procesa staranja lesa v uporabi in njegovega vpliva na lastnosti. Prav te podatke pa potrebujemo za uspešno sanacijo zgodovinskih objektov in pri presoji, kaj bomo storili z vgrajenimi konstrukcijskimi elementi. Primerjave z recentnim lesom so težje, saj pogosto ni relevantnih podatkov o naravno staranem lesu v uporabi. V tej diplomski nalogi bomo raziskali vpliv staranja na osnovne fizikalno-mehanske lastnosti lesa. Raziskavo bomo izvedli na odvzetih vzorcih masivne lesene stropne konstrukcije iz graščine v Predddvoru, kjer je prišlo do delnega porušjenja lesene stropne konstrukcije.

1.2 CILJI RAZISKOVANJA

Raziskali bomo vpliv staranja na osnovne fizikalno-mehanske lastnosti lesa. Raziskavo bomo izvedli na odvzetih vzorcih masivne lesene stropne konstrukcije iz graščine v Predddvoru, kjer je prišlo do delnega porušjenja. Preučili bomo naslednje karakteristike:

- Z dendrokronološko analizo bomo časovno datirali odvzete posamezne elemente stropne konstrukcije iz smrekovega lesa (*Picea abies* (L.) Karst.).
- S standardnimi metodami bomo preučili vpliv staranja lesa v konstrukciji na spremembo osnovnih fizikalnih lastnosti vgrajenega lesa (gostota, sorpcijske lastnosti, dimenzijska stabilnost).
- Z nedestruktivnimi metodami bomo preučili dolgotrajne spremembe elastičnih lastnosti lesa.
- S standardnimi mehanskimi testi bomo določili upogibno, tlačno in strižno trdnost vgrajenega lesa.
- Na osnovi pridobljenih podatkov bomo ocenili in ovrednotili vpliv staranja na fizikalno-mehanske lastnosti lesa v uporabi.

1.3 HIPOTEZE

V raziskavi bomo poskusili potrditi naslednje delovne hipoteze:

- Z dendrokronološko analizo želimo potrditi starost stropne konstrukcije, ki je po ustnem izročilu stara približno 300 let.
- Predpostavljamo, da se s starostjo zmanjšajo gostota lesa, ravnovesna vlažnost, kazalniki dimenzijske stabilnosti pa naj bi pokazali nekoliko povečano stabilnost starega lesa.
- S starostjo se mehanske lastnosti spreminjajo, zato pričakujemo znižanje upogibne, tlačne in strižne trdnosti.
- Pričakujemo tudi potrditev možnosti uporabe nedestruktivnih metod za oceno elastičnih lastnosti lesa.

2 SPLOŠNI DEL

V literaturi zasledimo dve smeri raziskovanja procesa staranja lesa. Prva se ukvarja predvsem s tehnično pospešenim staranjem v različnih aerobnih in anaerobnih pogojih. Druga raziskuje predvsem lastnosti pri naravnem staranju, ki se nanašajo na kemijske, barvne, higroskopske in mehanske spremembe.

Staranje lesa razumemo kot ireverzibilno spremembo fizikalnih, kemijskih in mehanskih lastnosti pri podaljšanem skladiščenju ali uporabi. Do poslabšanja pride zaradi delovanja biotičnih in abiotičnih dejavnikov na les. (Unger in sod., 2001.) Nekateri avtorji štejejo proces staranja od trenutka, ko drevo podremo. (Fengel, 1991.) Pri tem pa moramo vedeti, da se procesi staranja v živem drevesu pričnejo že v trenutku formiranja lesa. Zato je korektno, da letom v uporabi prištejemo še leta starosti drevesa.

Vpliv staranja lesa v uporabi na fizikalne in mehanske lastnosti je pogosto dvoumen in je odvisen od drevesne vrste, pogojev v okolju ter starosti. Največ različnih podatkov zasledimo pri sorpcijskih lastnostih. Za rdeči bor (*Pinus sylvestris* L.) tako zasledimo rahlo povečanje sorpcijskih krivulj v primerjavi z recentnim lesom. (Erhardt in sod., 1996; Garcia, 2006.) Schulz (1984) ter Erhardt in sodelavci (1996) pa navajajo nespremenjene sorpcijske lastnosti za recenten in star smrekov les v uporabi. Nasprotno pa Kurtoglu (1983) navaja znižanje sorpcijskih lastnosti pri smrekovem lesu. Za mehanske lastnosti je znano, da se slabšajo s starostjo. S starostjo se spreminjajo tudi akustične lastnosti lesa, ki so odvisne tudi od gostote, elastičnega modula in vlažnosti lesa.

2.1. KRAJ IN OBJEKT PROUČEVANJA

2.1.1 Kraj Preddvor

Naselje Preddvor (485 nm. v. ter 46°18'18.62"N in 14°25'13.24"E) leži na Gorenjskem, okoli 10 km severno od Kranja, 1km zahodno od ceste, ki povezuje Kranj z Jezerskim vrhom, na desnem bregu reke Kokre. Prvič kraj omenjajo med leti 1070 in 1080 kot last plemičev Breže-Selških. Grofje Andeški leta 1142 podarijo obsežno območje pod Storžičem cistercijanskemu samostanu iz Vetrinja, v letu 1147 pa še dvorec v Preddvoru. Prvo ime za današnji dvorec v središču vasi je znano že v 12. stoletju, in sicer Novi dvor (danes Graščina Preddvor). Ime kraja naj bi izviralo iz prebivališč, ki so jih imeli podložniki pred dvorom. Popis prebivalstva iz leta 1754 je v Preddvoru naštel 18 hiš in 129 prebivalcev. Leta 1826 se je število stavb povečalo. Sprememba na bolje je bila tudi v stavbnem materialu, lesenim se pridružijo še zidane stavbe. (Pušnik, 2014.)

Kot pomembna domačina sta omenjena jezikoslovec Matija Valjavec in pesnica Josipina Urbančič Turnograjska.

Danes je Preddvor majnša občina z okoli 3000 prebivalci. Lega v zaledju Storžiča pod Karavankami, jezero Črnava in prijetna klima v kraju omogočajo razvoj turizma.

2.1.2 Graščina Preddvor

Graščina Preddvor je v središču kraja. Zasnova in prva omemba prvotne stavbe sega v leto 1147, ko vetrinjski menihi pridobijo prva posestva v Preddvoru. Graščino Preddvor lahko označimo za dvorec. To so bile fevdalne arhitekture, ki so praviloma pozidane brez utrdbenih sestavin, običajno na ravnini. Graščina Preddvor ima zaprt renesančni tloris v obliki ključa. (Pušnik, 2013.)

Današnji izgled dvorca je rezultat številnih prezidav od 16. do 20. stoletja. Gledano v celoti je stavba dvonadstropna, pretežno grajena iz kamna, krita z dvokapno streho. Izjemnega kulturnega pomena v dvorcu so predvsem arkadni del v pritličju, nekaj lesenih štukaturnih stropov s poslikavami, kapela s štukaturnim stropom ter rezbarsko obogaten lesen strop. (Pušnik, 2013.)

2.1.3 Štukaturni strop v kapeli

Skozi vežo in križno obokano stopnišče pridemo v 1. nadstropje, kjer je kapela. V prvotni obliki je bila kapela opremljena s štukaturno leseno stropno konstrukcijo, ki meji na podstrešje. (Pušnik, 2013.)

Stropne konstrukcije omejujejo višino prostora, hkrati pa imajo še nosilno, zvočno, toplotno, protipožarno in estetsko funkcijo. Stropno konstrukcijo sestavljajo širinsko spojena polovična lesena bruna (stropniki), ki so povprečno 22 cm široka in 14 cm visoka. Stropniki na koncih nalegajo na zidano steno. Štukaturni strop je masivne smrekove izvedbe, po širini so bruna prečno spojena s hrastovimi lesenimi cveki (mozniki), ki so široki 2 cm in dolgi 10 do 15 cm (slika 2). Vloga lesenih cvekov je enakomerno prenašanje obtežbe ter preprečevanje vibracij in povesov. Na spodnji strani stropne konstrukcije so pribite lesene letvice za lažjo izvedbo ometa, ki ga zaključuje štukaturna površina v apnenem beležu. Zgornja površina lesene stropne konstrukcije, ki meji na odprto ostrešje, je prekrita z nasutjem, ki bi preprečevalo širjenje požara. Izvedba takšnih stropov je bila predpisana v Stavbnem redu za vojvodino Krajnsko (1875). Na območju avstro-ogrske monarhije pa so ga uporabljali do konca 19. stoletja. Celoten strop je zaradi preprečevanja povesa podprt s tesanim smrekovim tramom, širokim 24 cm in visokim 30 cm.



Slika 1: Delno porušena stropna konstrukcija v graščini Preddvor (levo). Močno degradiran stropnik (desno).



Slika 2: Okužen stropnik s sivo hišno gobo (levo). Hrastov mozni (desno).

Zaradi zamakanja skozi streho je prišlo do biotskih in abiotskih vzrokov razkroja lesene stropne konstrukcije, kar je vodilo do delne porušitve (slika 1). Ob pregledu smo na porušeni konstrukciji našli značilne izletne odprtine hišnega kozlička (*Hylotrupes bajulus* (L.)). Posamezni stropniki so bili tudi okuženi s sivo hišno gobo (*Serpula lacrymans* (Wulf. ex Fr.) Bond) (slika 2). Močno degradirani so bili leseni stropniki predvsem nad mestom zamakanja, kar je povzročilo trohnjenje lesa. Zaradi oksidacije lignina je bil okužen les v značilni rjavi barvi. Do tega pride pri encimatski razgradnji celuloze (slika 1). Gre za najbolj poškodovan prostor v graščini. Del neporušenega stropa so podprli z novim prečnim tramom, ki je nadomestil starega, porušenega. Poškodovano kritino so nadomestili z novo ter delno sanirali poškodbo. Tla v prostoru so lesena. Prostor je velik 5,90 x 5,60 metra.

2.2 NAVADNA SMREKA (*Picea abies* (L.) Karst.)

V stavbni dediščini lahko na področju lesenih konstrukcij za preteklo obdobje dveh stoletij opazimo intenzivno uporabo smrekovega lesa. Kakovosten smrekov les je bil zaradi dobrih lastnosti in dostopnosti že od nekdaj zelo cenjen. Zaledje Preddvora, bližnja Jelovica in Pokljuka so znani po naravnih smrekovih sestojih. Smrekov les je tako v večini

izpodrinil uporabo jelovega in macesnovega lesa, ki sta prevladovala pred uporabo smrekovega predvsem na področju Gorenjske. Lokalne danosti gozdnih sestojev so v preteklosti bile na področju lesenih konstrukcij zelo pomembne. Na Dolenjskem so npr. v konstrukcijske namene večinoma uporabljali les listavcev, ki prevladujejo v tej pokrajini. Podobno je bilo tudi v Prekmurju, kjer najdemo v mnogih konstrukcijah tudi les jelše. Za Gorenjsko in Pohorje pa so značilni iglavci, predvsem les smreke, jelke in macesna, ki so večinsko zastopani v stropnih in strešnih konstrukcijah.

2.2.1 Osnovne značilnosti lesa navadne smreke

Navadna smreka je v Evropi ena izmed najpomembnejših vrst med iglavci. Spada v družino borovk (*Pinaceae*). Je vedno zeleno, do 50 m visoko in do 1 m debelo iglasto drevo s stožčasto krošnjo. (Brus, 2012.) Večinoma ima plitev koreninski sistem, ki lahko v ugodnem stanju tal prekriva veliko površino. Plitev koreninski sistem pa je zelo izpostavljen nevarnostim poškodbe in okužbe, kar se kaže v manjši stabilnosti dreves (vetrolomi in snegolomi). Veliko nevarnost za smrekove sestoje predstavlja tudi jelov korenčnik oziroma rdeča trohnoba (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.)

V strnjenem sestoji oblikuje ravno in polnolesno deblo, v nasprotnem pa malolesno deblo z globoko krošnjo. Veje izraščajo v izrazitih vejnih vencih. Skorja je rjavordečkasta, gladka in tanka. S starostjo skorja razpoka v obliko lusk. (Brus, 2012.) Brus (2012) navaja, da so brsti jajčasto zašiljeni, rjavkasti in niso pokriti s smolo. Iglice so dolge od 1 do 2,5 cm in široke do 1 mm, v prečnem prerezu rombaste, na poganjku so razmeščene spiralno. Moški cvetovi so do 2 cm dolgi, sprva rdečkasti in pozneje rumenorjavi, ženska storžasta socvetja so rdeča, pokončna in rastejo na koncu poganjkov v zgornji tretjini krošnje. Po oploditvi se razvijejo v storže, ki se med zorenjem povesijo in so sprva zelenkasti ali rdečkasti, nato rjavkasti. Dozorijo oktobra, odpirati se začnejo februarja naslednje leto in odpadejo poleti. Pod vsako plodno lusko sta po dve rjavi, do 4 mm dolgi krilati semeni.



Slika 3: Naravni areal razširjenosti navadne smreke. (EUFORGEN, 2009.)

Smreka je razširjena na treh velikih arealnih območjih, ki med seboj skoraj niso povezana. Po višini se razprostira od morske gladine do višine 2300 m.n.v. v italijanskih Alpah (slika 3).

Današnja 32-odstotna razširjenost smreke v gozdni sestavi v Sloveniji je posledica dejavnosti ljudi, saj vemo, da naravna gozdna sestava smreki namenja zgolj 8%. Na območju Pohorja, Karavank z Jelovico in Pokljuko je danes delež smreke v gozdnem sestoju med 75 do 100 %. Do tega je pripeljalo intenzivno izkoriščanje bukovih gozdov v 18. in 19. stoletju, ki so jih nadomeščali s pogozdovanjem z navadno smreko, katerih vzgoja sadik v drevesnicah je bila precej enostavna in zato široko dostopna.

Med faktorji, ki vplivajo na rast drevesa, največji pomen pripisujejo klimatskim in pedološkim pogojem. Smreki najbolj ustreza hladno in vlažno podnebje z nižjimi zimskimi temperaturami (letno povprečje okrog 6 °C). Dolga sušna obdobja predstavljajo velik problem za smrekove sestoje. Padavinski optimum predstavlja od 500 do 600 mm padavin v rastni dobi, to je od maja do avgusta. Najbolj pa uspeva na svežih, mokrih, dobro zračnih, kamnito peščenih, glinenih, ilovnatih in rahlih tleh.

Smreka ima neobarvano jedrovino, zato se beljava in jedrovina barvno ne ločita. Les je večinoma rumenkastobel, v starosti tudi rumenkastorjav. Branike, od ozkih do zelo širokih, so razločne. Prehod iz svetlega, belkastega ranega lesa do rdečkastorumenega kasnega lesa je večinoma postopen. Poskobljane površine imajo svilnat lesk. Svež les diši po smoli. Pogost je pojav smolnih žepkov. Les je mehak in srednje gost (gostota $\rho_{\square} = 300...430...640 \text{ kg/m}^3$). (Čufar, 2006.)

Za smreko (in načeloma za vse iglavce) velja zakonitost, ki govori o širini branik. Pri iglavcih je namreč širina kasnega lesa, ne glede na širino branike, bolj ali manj stalna. Iz tega sledi, da je v ožjih branikah odstotni delež kasnega lesa večji, v širokih pa manjši. Gostota kasnega lesa je tudi do 3-krat večja od ranega. Gostota lesa je premosorazmerna s trdnostjo lesa, vpliv pa ima tudi na druge lastnosti.

Iglavci evolucijsko spadajo med razvojno starejše vrste od listavcev, prav tako tudi med nižje razvitejše rastline od listavcev. Ta mnogo zgodnejši razvoj pa se kaže v enostavnejši anatomski zgradbi. Pri golosemenkah zato več kot 90% osnovnega lesnega tkiva predstavljajo aksialne traheide. Traheida je mrtva neperforirana lesna celica, ki jo s kongeneričnimi elementi povezujejo obokane piknje. (Torelli, 1990.) Pikenjski pari obokanih pikenj, ki povezujejo med seboj sosednje traheide, se skoraj izključno nahajajo v radialnih stenah oziroma v radialnih nizih in so posebej številčne na koncih traheid. Pri smreki so razporejene v enojnih nizih. Več jih je v ranem lesu (okrog 200) kot pa v kasnem (od 10 do 50).

Traheide ranega lesa, ki nastanejo na začetku vegetacijske periode, imajo velike lumne, traheide kasnega lesa, ki nastanejo proti koncu vegetacijske periode, pa majhne. Radialni premer traheid od ranega proti kasnemu lesu pada, medtem ko debelina celičnih sten traheid narašča. Traheide ranega lesa so zaradi velikih lumnov pomembne za prevajanje vode, traheide kasnega lesa z debelimi stenami pa zagotavljajo mehansko trdnost. (Čufar, 2006)

Aksialni parenhim v lesu večine iglavcev manjka. Če pa je prisoten, navadno ne presega 6% in opravlja prenos in skladiščenje hrane. (Čufar, 2006.) Parenhimske celice so žive celice, ko so del beljave. Za smreko je značilna prisotnost smolnih kanalov, ki so večinoma v kasnem lesu. Glede na nastanek ločimo normalne in travmatske celice, ki so nastale kot odziv na mehansko poškodbo. Pri navadni smreki so smolni kanali obdani z debelostenimi epitelnimi celicami. Trakovi pri navadni smreki so heterocelularni, zgrajeni iz parenhimskih celic in trakovnih traheid. Gre za radialno potekajoč agregat celic. Trakovi so večinoma enoredni. Pri večrednih pa najdemo tudi radialne smolne kanale. Trakovi zavzemajo okrog 5% ter imajo nalogo prevajanja in skladiščenja ogljikovih hidratov.

2.2.2 Uporaba smrekovega lesa

Današnja drevesna sestava gozdov v Sloveniji kaže, da smreka zaseda 32%. Skupaj z bukovino sestavljata več kot 65-odstotni delež. V 19. stol. se je namreč zgodil velik preobrat na škodo bukovine. Intenzivno izkoriščanje za namene glažutarstva in fužinarstva je pripeljalo do intenzivnega izkoriščanja naravnih bukovih gozdov. Na posekanih površinah so pogozdili smreko ali pa pripravili zemljišča za fratarjenje.

Že Terezijanski gozdni red za Krajnsko (1771) priporoča predvsem gospodarjenje s hrastom, smreko, jelko in borom. Torej z drevesnimi vrstami, ki bodo uporabne kot konstrukcijski les in bodo dajale visoka ravno zraščena debla. Vsa ta navodila in priporočila so povzročila široko uporabo teh drevesnih vrst. Prva znanstveno-raziskovalna spoznanja o lesu in razširjenost so narekovala široko uporabo smrekovega lesa.

Smrekovino najdemo na trgu kot hlodovino, žagan les in furnir. Na veliko jo uporabljajo v konstrukcijske namene, v stavbnem in pohištvenem mizarstvu, v proizvodnji lesnih tvoriv, pa tudi za proizvodnjo celuloze in papirja. Najkakovostnejšo resonančno smrekovino uporabljajo za izdelavo glasbil.

2.3 STARANJE LESA V UPORABI

Staranje razumemo kot nepopravljive spremembe fizikalnih in mehanskih lastnosti materiala med daljšim skladiščenjem ali uporabo. Do sprememb lahko pride zaradi biotičnih in abiotičnih dejavnikov. (Unger, 2001) Ne glede na to, če smo konstrukcijski les zaščitili pred vremenskimi vplivi, biološkimi škodljivci in ga uporabljamo v zaprtih prostorih, v lesu neprestano reverzibilno potekajo procesi staranja. Staranje lesa se odraža predvsem v mehanskih, barvnih, higroskopskih, kemijskih in mikrostrukturnih spremembah.

Poznavanje mehanskih lastnosti starega lesa postaja vse bolj pomembno, ne samo zaradi vzdrževanja obstoječe kulturne dediščine, pač pa tudi zaradi recikliranja že uporabljenih konstrukcijskih elementov, ki ga je v sodobnem času čedalje več. Do poslabšanja lastnosti lesa pride zaradi klimatskih pogojev, insektov, gliv, bakterij ali drugih vplivov.

Vsekakor moramo ločiti med procesi staranja lesa, vgrajenega nekje na prostem in med procesi, ki potekajo v lesu, ki je uporabljen v notranjih prostorih. Elementi lesa na prostem so lahko bili pred vgradnjo tudi predhodno toplotno in kemijsko obdelani (to so na primer lahko električni drogovci, vrtna ograje in podobno). Vseeno pa bodo v določenem časovnem obdobju podvrženi intenzivnejšim vplivom UV svetlobe in posledično fotodegradaciji in izpiranju. Raziskave takšnega lesa se ukvarjajo predvsem s **področjem njegove trajnosti**.

Drugače pa je v primeru konstrukcijskega lesa, ki je uporabljen v notranjih prostorih za ostrešja, stavbno pohištvo, stropne konstrukcije in podobno. V tem primeru raziskave obsegajo najširši spekter, saj takšen les kljub visoki starosti uporabe še vedno opravlja svojo funkcijo. **S tega vidika nas zanimajo njegove mehansko-fizikalne, kemijske in druge uporabne lastnosti.**

Omeniti moramo tudi les, ki ga obravnavamo kot arheološki, na primer koliščarske najdbe, barjansko leseno kolo in podobno. Arheološki les se je do najdbe običajno nahajal v mokrih tleh ali v vodi. Pri arheološkem lesu nas bolj zanimajo kemijski procesi razgradnje kot pa njegove trdnostne lastnosti; ta les namreč nima več uporabne konstrukcijske vrednosti. Pri teh lesenih predmetih je pomembno predvsem, **kako jih ohraniti**, saj imajo visoko vrednost kot razstavni arheološki predmeti.

V vseh treh omenjenih primerih, v katerih je bil les izpostavljen različnim pogojem iz okolja, pa različna predhodna uporaba lesa kaže različne rezultate pri opazovanju staranja. Zato je pri raziskovanju zelo pomembno dosledno navajanje okolja, iz katerega preiskovani les prihaja.

Večina lesenih konstrukcijskih elementov je med uporabo izpostavljena večjim ali manjšim, stalnim in občasnim obremenitvam. Les kot viskoelastičen material izkazuje poleg elastičnih tudi viskozne lastnosti. Dolgotrajne ali ponavljajoče se ciklične obremenitve zato pustijo na lesu deformacije. Elastični del se po razbremenitvi hipno povrne v prvotno stanje. Gre za časovno neodvisno in reverzibilno deformacijo. Pri daljših obremenitvah pa se pojavijo časovno odvisne deformacije. Tako moramo predvsem pri obravnavi mehanskih lastnosti starega lesa v uporabi upoštevati tudi njegovo dolgotrajno izpostavljenost različnim pogojem obremenitev. V tem primeru govorimo o utrujanju materiala.

Splošno znano je, da s starostjo gostota lesa pada, kakor tudi, da je gostota pomemben pokazatelj ostalih trdnostnih lastnosti lesa. Običajno tudi menimo, da je les z nižjo gostoto manj naravno odporen, kar se v veliki meri kaže tudi v procesu staranja. Vendar pa ne moremo trditi, da sta gostota in krčenje lesa soodvisna samo s starostjo. Na spremembo gostote med uporabo vpliva še več dejavnikov, to so na primer: različna drevesna vrsta, razlike med iglavci in listavci, pa tudi različni pogoji izpostavljenosti lesa.

Dobro znano je, da se lesu pod določenimi neugodnimi pogoji, kot so na primer stik s tlemi, izpostavljenost biološkim škodljivcem ali drastični vremenski pogoji, lastnosti hitro poslabšajo. To daje vtis, kot da je les slabši material, če ga primerjamo z drugimi. Ampak dejstvo je, da je les zelo obstojen, če se nahaja v primernih pogojih. Nenazadnje so les tudi

v zgodovini prvotno uporabljali predvsem v konstrukcijske namene in kot gorivo. (Van Zyl in sod., 1973.)

V tradicionalni lesarski znanosti so zaradi tega najprej potekale mehansko-fizikalne raziskave na mikroskopski ravni. Raziskovalci so namreč domnevali, da variabilnost izvira iz mikroskopske ravni. Seveda pa takratna oprema ni omogočala poglobljenega raziskovanja. Zato so bile raziskave na področju kemije lesa v začetku le maloštevilne, šele pozneje pa se je razvilo tudi to področje.

Obstaja več odločujočih dejavnikov, ki določajo stanje lesa v daljšem časovnem obdobju. Zelo pomembna je kemijska struktura lesa, ki se povezuje z drugimi pomembnimi dejavniki, kot so kisik, vlaga, Ph, temperatura, UV- svetloba in lesni škodljivci. (Nilsson in Rowell, 2012.)

Danes les obravnavamo kot hierarhično zgrajeno strukturo, ki je med seboj strogo soodvisna. Zato moramo les obravnavati celostno, če hočemo razumeti procese staranja.

2.3.1 Mehanske lastnosti starega lesa v uporabi

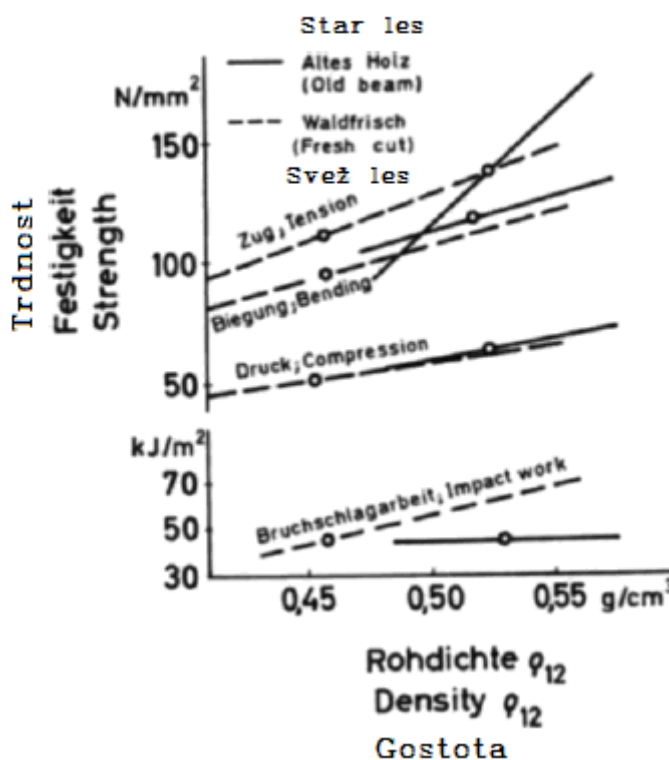
Ko opazujemo izjemne lesene konstrukcijske dosežke naših prednikov, se nam zagotovo postavi vprašanje, kako dolgo bo lahko takšna konstrukcija varno služila svojemu namenu. Če gre pri tem za zgradbe stare nekaj stoletij, smo še toliko bolj nezaupljivi. Prav mehanske lastnosti lesa pa so tiste, ki nam dajo prve odgovore na takšna vprašanja. Danes se povečuje delež vzdrževanja stavbne dediščine in ponovna uporaba lesenih konstrukcijskih elementov. S tem pa postajajo vse pomembnejše tudi raziskave na vgrajenem lesu.

Spremembe mehansko-fizikalnih lastnosti starega lesa izvirajo iz spremembe mikrostrukture in kemijskih komponent. Odvisno od pogojev uporabe se pojavijo različni kemijski procesi, ki imajo pomemben vpliv na staranje. (Fengel, 1991.)

Eno prvih in najobsežnejših raziskav na vgrajenem lesu v uporabi sta naredila Kohara in Okamoto (1955). Raziskava je bila narejena na lesu hinoki (*Chamaecyparis obtusa* (Siebold & Zucc.) Endl.) in keyaki (*Elkova serrata* (Thunb.) Makino). Najvišja starost vgrajenega lesa je bila 1300 let za les hinoki in 650 let za keyaki. Vsi vzorci so bili odvzeti iz konstrukcije in vizuelno nepoškodovani. Za les hinoki sta ugotovila naraščanje upogibne in tlačne trdnosti ter dinamičnega elastičnega modula v prvih 100 letih, nato so se vrednosti pričele zniževati s starostjo. Ugotovila sta, da je trdnost v visoki korelaciji s stopnjo kristaliničnosti celuloze, ki je v začetku naraščala, nato pa s starostjo padala.

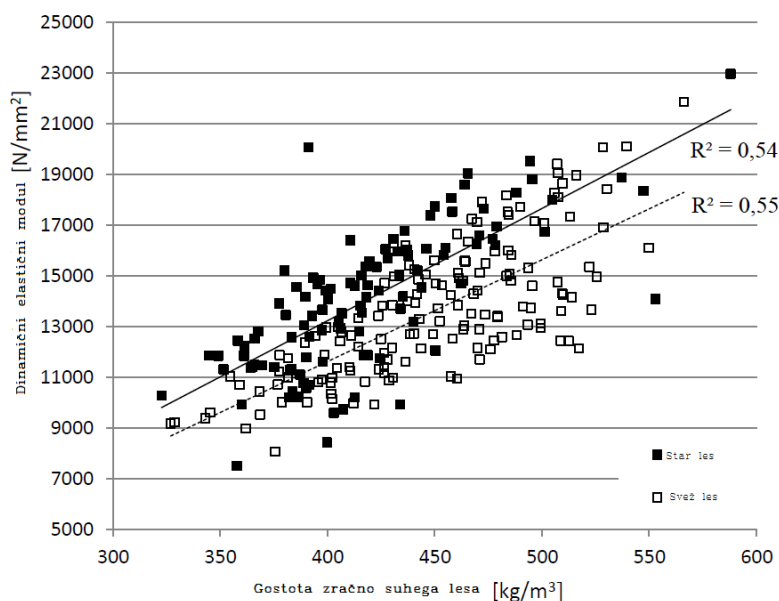
Schultz in sodelavci (1984) so testirali star les navadne smreke vgrajen v strešno konstrukcijo, iz obdobja med leti 1656 in 1678, kar pomeni, da gre za 300 let star les. Povprečna vrednost gostote v absolutno suhem stanju je znašala 500 kg/m³ in je presegala običajne vrednosti. Upogibne, tlačne in natezne trdnosti starega lesa so presegale trdnosti svežega lesa.

Samo udarna žilavost starega lesa je bila nekoliko pod vrednostmi svežega (slika 4). Iz vseh teh vrednosti ni razvidno nikakršno poslabšanje lastnosti tega lesa v 300 letih uporabe.



Slika 4: Odvisnosti natezne, upogibne, tlačne in udarne žilavosti od gostote za star in svež les. (Schultz in sod. 1984.)

Na starem lesu navadne smreke v uporabi je Kránitzeva (2014) opravila raziskavo mehanskih parametrov (slika 5). Za uporabo lesa v konstrukcijske namene so pomembni predvsem dinamični elastični modul, modul elastičnosti iz upogiba in upogibna trdnost. Rezultati te raziskave prikazujejo precej podobne vrednosti dinamičnega elastičnega modula iz frekvenčnega odziva in modula elastičnosti iz upogiba. Dinamični elastični modul iz ultrazvočnega preizkusa pa je bil od 15% do 30% višji v primerjavi z drugima dvema parametroma. Upogibna trdnost starega lesa navadne smreke je bila v mejah, ki so navedene v literaturi. Ugotovila je tudi signifikanten pozitiven učinek na gostoto. Širina branik je izkazovala negativen učinek, kar pa je razumljivo glede na korelacijo med gostoto in širino branik.



Slika 5: Razmerje med gostoto in dinamičnim elastičnim modulom. (Kránitz, 2014.)

Grabner (2008) navaja podatke za les navadne jelke in navadne smreke, ki sta stari 150 in 300 let. Zadnji braniki sta bili datirani v letih 1720 in 1854. Opazno narašča upogibna trdnost od stržena proti skorji, vendar se trend v bližini skorje obrne in trdnost začne padati. Enak trend opisuje za gostoto v radialni smeri.

V literaturi obstaja mnogo več podatkov o starem lesu rdečega bora. (Burmester, 1967; Deppe in Rühl, 1993; Erhard in sod., 1996; Witomski in sod., 2014; Yorur in sod., 2014.) Deppe in Rühl (1993) na 600 let starem lesu strešne konstrukcije ugotavljata, da širina branik nima vpliva na trdnostne lastnosti. Prav tako nista potrdila pozitivnega razmerja med gostoto in trdnostjo v vseh primerih. Veliko razpršenost rezultatov sta navajala kot posledico vsebnosti smole, spremembe celične strukture in izgube lesne substance. Vrednosti tlačnih trdnosti za les, ki ni bil vidno biološko poškodovan, so bile primerljive s svežimi preizkušanci.

Staranja lesa ne moremo nujno enačiti z drastičnim zmanjšanjem trdnostnih lastnosti, saj gre za počasen proces. Vsekakor pa procesi razgradnje celične stene, ki potekajo nenehno, vplivajo na znižanje gostote lesa. Znižanje gostote vpliva na izgubo mase lesa in posledično na razgradnjo osnovnih lesnih komponent. Z znižanjem gostote se znižajo tlačna, natezna in upogibna trdnost. Zniža se tudi E-modul. Naraščajoča dolžina vlaken in manjši mikrofibrilni kot vplivata tudi na višji E-modul. Vpliv gostote se bolj odraža na tlačni kot na upogibni trdnosti. Vendar vsaj za obdobje starosti 500 let lahko trdimo, da so vsa ta znižanja v okvirih priporočenih vrednosti za nosilne konstrukcije. Edina trdnost, pri kateri se kaže drastično znižanje, je udarna žilavost. Star les izkazuje zmanjšano možnost absorpcije energije udarca. Pri tem vsi prelomi kažejo krhek lom.

Pri tem pa moramo izvzeti drastična in hitra poslabšanja lesne konstrukcije zaradi lokalnih vplivov, kot so zamakanje in podobno. Ob tem pride do bioloških okužb, ki vodijo do

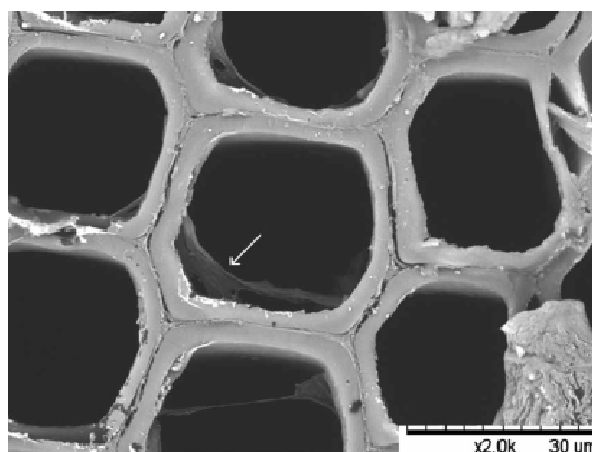
pospešene razgradnje in hitrega poslabšanja lastnosti lesa. To pa pripelje do porušenja konstrukcij.

Najbolj kritični dejavniki za dolgotrajne obremenitve lesa so obseg in vrsta napetosti, stopnja in trajanje obremenitve, temperatura, materialne značilnosti in vlažnost lesa. (Bodig in Jane, 1982.) Dolgotrajne obremenitve imajo pri starajočem se lesu velik vpliv, saj kažejo na povsem drugačne trdnostne vrednosti.

Splošno znana je visoka soodvisnost med hitrostjo zvoka v materialu in elastičnimi lastnostmi. Hitrost zvoka v longitudinalni smeri je višja pri lesu z daljšimi vlakni. Na dinamični elastični modul vplivajo starost, gostota in širina branik. Širina branik ima pomemben učinek na upogibno trdnost. Les z ožjimi branikami izkazuje višjo trdnost. Gostota ima pozitiven učinek na upogibno trdnost. (Kollmann in Cote, 1968.) Pomemben je tudi učinek vlažnosti lesa.

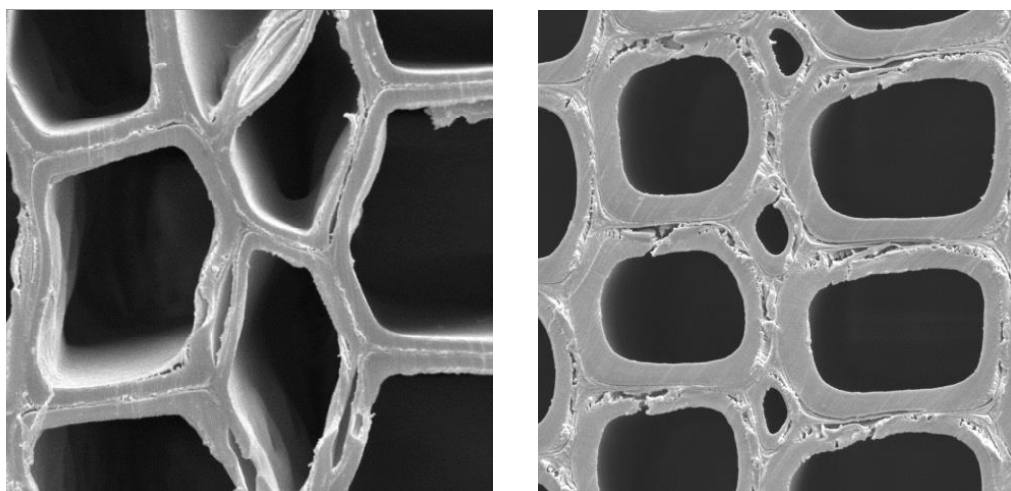
2.3.2 Mikrostrukturne spremembe starega lesa v uporabi

Sodobnejše in naprednejše tehnologije v raziskavah na področju anatomije lesa omogočajo izboljšane in natančnejše vpogleda na dogajanje na mikroskopski in submikroskopski ravni. Klasično svetlobno mikroskopijo, ki je omejena z valovno dolžino svetlobe (0,38 – 0,70 μ m), nadomešča uporaba elektronske mikroskopije. Najpogosteje sta v uporabi vrstična elektronska mikroskopija (SEM), ki omogoča izredno globinsko ostrino (3D – slika) (slika 8) in presevna elektronska mikroskopija (TEM), ki jo uporabljajo, kjer je to smiselno. Pri elektronski mikroskopiji je mogoče razločevanje na ravni nanometrov (nm). Vrstična elektronska mikroskopija nam omogoča opazovanje mikrostrukturnih poškodb na tkivih in celicah, opazujemo lahko posledice bioloških okužb ter vsebnosti posameznih lumnov.



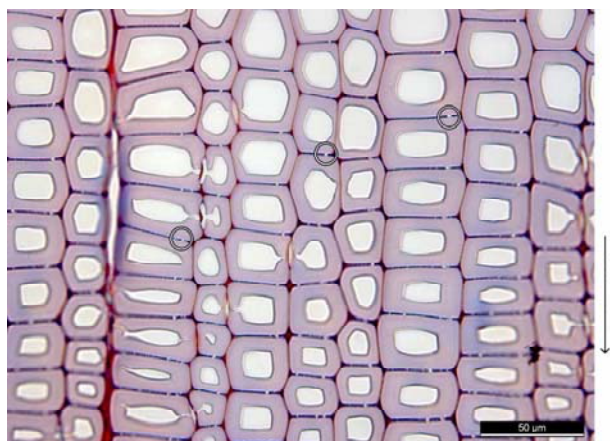
Slika 6: Vrstični elektronski mikroskop, vidna je razgradnja S3 stene na 500 let stari navadni smreki v uporabi. (Froidevaux in sod., 2012.)

Na lesu navadne smreke, ki je bil v uporabi med 160 oz. 170 let, Kránitzova (2014) ne navaja nikakršnih anatomskih sprememb v mikrostrukturi. Tkiva so bila večinoma nepoškodovana ali pa so bila omejena na posamezno območje. Najpogostejše poškodbe na starem lesu so bile opazne kot razslojevanje srednje lamele. V nekaterih primerih je bilo vidno ločevanje v S3 sloju sekundarne stene. V večini primerov je S2 sloj ostal nespremenjen, le redko so bile opazne razpoke tudi v tem sloju (slika 6).



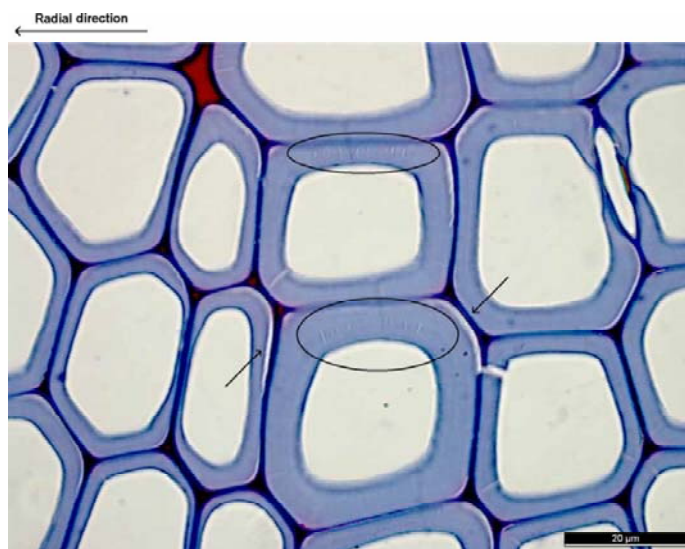
Slika 7: Razslojevanje srednje lamele navadne smreke 160 let v uporabi (levo). Razpoke v celični steni navadne smreke 170 let v uporabi (desno). (Kránitz, 2014.)

Podobno navajajo tudi Borgin in sodelavci (1975a) ter Froidevaux in sodelavci (2012). Froidevaux in sodelavci (2012) navajajo pojav prelomov v srednji lameli, ki so razvidni kot bele pike na prečnem prerezu anatomskega preparata 200 let stare navadne smreke v uporabi. (Slika 7). Avtorji dopuščajo možnost, da je do poškodb prišlo pri pripravi preparatov, vendar so te poškodbe na mlajših preparatih maloštevilne. Te nepojasnjene poškodbe, ki so opazne na določenem območju, lahko predstavljajo lokalna slabitvena mesta in s tem velik vpliv na trdnost lesa.



Slika 8: Pojav prelomov v srednji lameli na prečnem prerezu 200 let stare navadne smreke v uporabi. (Froidevaux in sod., 2012.)

Kollmann in Schmidt (1962) navajata podobne ugotovitve za borov les, ki je bil 30 let vgrajen v stolpu radijskega oddajnika. V srednji lameli je prišlo do prelomov, v sekundarni steni pa do pojava radialnih razpok. Pri udarni žilavosti pa so vsi vzorci izkazovali krhek prelom.



Slika 9: 200 let stara navadna smreka v uporabi vidne razplastitve med srednjo lamelo in sekundarno steno ter vidne radialne razpoke v sekundarni steni (Froidevaux in sod., 2012)

Pogoste spremembe klimatskih pogojev, v katerih se nahajajo leseni konstrukcijski elementi, izpostavljenost neugodnim vremenskim vplivom, notranji stres, ki so nastali zaradi različnih zunanjih obremenitvenih stanj in biološki vplivi lahko privedejo do prej omenjenih strukturnih napak. Hitre spremembe relativne zračne vlažnosti se odražajo na neenakomerni porazdelitvi ravnovesne vlažnosti po prerezu elementa. To pa pripelje do napetosti, ki povzroči notranje razpoke v strukturi (slika 9). (Froidevaux in sod., 2012.)

V primeru cikličnih obremenitev, pri katerih v fazi razbremenitev ne pride do popolnega okrevanja, se lahko te nepopolne razbremenitve nalagajo, kar prav tako lahko vodi do strukturnih poškodb, ki niso nujno vidne kot površinski zlomi. Veliko slabitveno mesto v celični steni predstavlja tudi večje število pikenj. Celulozne fibrile obdaja hemiceluloza, zato morajo pri biološki razgradnji lesa encimi prodreti preko njih, da pridejo do celuloze. Če pride do razgradnje hemiceluloze, celične stene začnejo kolabirati in izgubljati trdnost zaradi izgube matriksa. Pri razgradnji se les krči in pojavijo se razpoke znotraj sekundarne stene. Na površini konstrukcijskih elementov običajno ne moremo zaznati teh sprememb, ker so nevidne. Zato mnogokrat pride do nenadnih porušitev, ki jih sploh nismo pričakovali in stanje lesa ni nakazovalo, da bi se lahko to zgodilo.

Sprememb, ki se dogajajo v času uporabe lesa, se moramo zavedati in jih tudi upoštevati pri načrtovanju lesenih konstrukcij. Preiskave na starem lesu v uporabi so težko izvedljive, saj težko pridobimo kakovostne vzorce. Če pa jih že, pa so običajno maloštevilni. Zaradi tega raziskovalci razvijajo nedestruktivne metode in jih tudi v velikem številu uporabljajo.

S postopki umetnega staranja poskušajo ustvariti primerljive pogoje z naravnim starim lesom v uporabi. Običajno so zasnovani tako, da v laboratorijih simulirajo določene zunanje vplive, fotodegradacijo, biološko razgradnjo in podobno. Vsebnost lignina se povečuje. Celuloza se spreminja le nekoliko. Opaziti je nižje dušenje in višjo hitrost zvoka pri starem lesu. (Noguchi, 2011.) Raziskave na starem lesu so maloštevilne in velikokrat si njihovi rezultati nasprotujejo. Gotovo do tega privede tudi različna starost preizkušancev in različne metode preiskav. Zato je pri raziskovanju vedno pomembno navajanje starosti, metod in pogojev, v katerih je bil les. Prispevek k temu pomanjkanju podatkov je tudi naša raziskava.

2.3.3 Variabilnost kemijske sestave lesa v procesu staranja

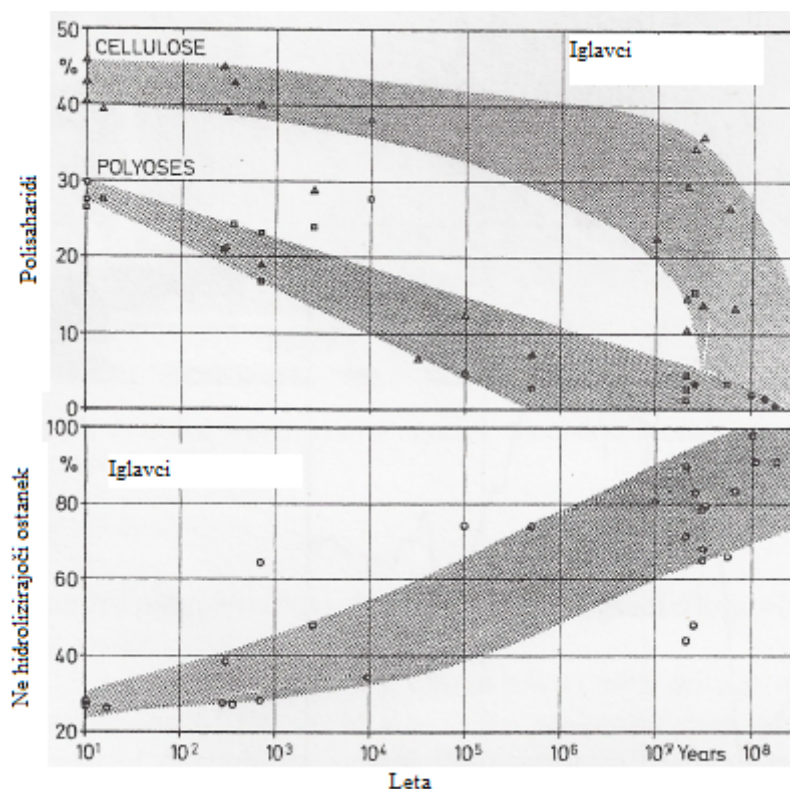
Med staranjem lesa razgradnja najmanj stabilnih hemiceluloz bistveno vpliva na njegove trdnostne lastnosti. Izgubo mehanskih lastnosti je mogoče določiti z analizo hemiceluloznih sladkorjev, še posebno galaktoze, ki neposredno visoko kolerira z modulom elastičnosti in upogibno trdnostjo lesa. (Nilsson in Rowell, 2012.) Zaradi zmanjšanja hidroksilnih skupin hemiceluloze les postane manj hidrofilen, kar vodi do nižjih ravnovesnih vlažnosti in boljše dimenzijske stabilnosti.

Pri anaerobnih pogojih je lignin odporen na glivno, bakterijsko in kemično razgradnjo, v aerobnih pogojih pa ga razgrajujejo glive bele trohnobe. Oksidacija lignina skupaj z drugimi reakcijami lahko privede do zmanjšanja makromolekul lignina na majhne enote. Lignin je za oksidacijo zelo senzitiven. (Borgin in sod., 1975b.) Med gradniki celične stene spada med najbolj občutljive komponente na ultravijolično svetlobo (UV). Glede na ostale komponente je lignin najbolj obstojen gradnik celične stene. Radialne stene iglavcev vsebujejo več lignina kot pa tangencialne, predvsem za iglavce je značilno, da vsebujejo več lignina v ranem lesu kot kasnem.

Kemijske analize, ki bi pokrivala daljše časovno obdobje uporabe smrekovega lesa so v literaturi redke in pokrivajo le omejeno starostno obdobje. (Holz, 1981; Fengel, 1991.) (slika 10). Eno redkih analiz za daljše časovno obdobje je predstavila Bucurjeva (2006). (Preglednica 1)

Preglednica 1: Posamezne kemijske komponente svežega in starega smrekovega lesa. (Bucur, 2006.)

Leta	Kemijske komponente smrekovega lesa [%]				
	Celuloza	Hemiceluloza	Lignin	Ekstraktivi	Pepel
0	54,47	17,79	26,29	0,30	0,26
3	54,40	18,50	25,40	0,97	0,28
50 - 70	53,94	17,80	25,01	0,92	0,25
150 - 200	50,78	14,16	24,64	2,82	0,48
200 - 300	52,34	13,60	24,90	2,58	0,48
300 - 400	50,77	12,11	24,43	4,60	0,47
500 - 700	49,45	10,35	26,97	2,21	0,42



Slika 10: Vsebnost glavnih gradnikov celične stene v odvisnosti od starosti. (Fengel, 1991.)

Vsebnosti osnovnih komponent navadne smreke je podrobno analizirala tudi Kránitzeva (2014) na lesu, ki je bil v uporabi 120, 150 in 210 let, in vrednosti primerjala z recentnim lesom. Ostanek pepela ni pokazal nobenega trenda staranja. Pri ekstraktivnih snoveh je bilo opaziti rahel trend padanja vsebnosti. Vsebnost celuloze ni bila pomembno spremenjena. Ugotovila pa je očitni trend padanja vsebnosti hemiceluloze. Razlike med vsebnostmi lignina med posameznimi starostnimi skupinami vzorcev niso presegale 0,7% in niso kazale očitnega trenda. Tako lahko opazimo samo očitno zmanjšanje vsebnosti hemiceluloze.

Kačik in sodelavci (2014) so opravili kemijsko analizo na vgrajenem lesu navadne jelke (*Abies alba* Mill.) stare od 108 do 390 let. Dobljene rezultate so primerjali z recentnim lesom. Ugotovili so 13 % povečanje vsebnosti celuloze, najvišji upad vsebnosti hemiceluloze je bil 24 %. Vrednost lignina se je v primerjavi z recentnim lesom zmanjšala za 4 %. Opazno so se povečale tudi vsebnosti ekstraktivnih snovi v starem lesu.

Vsem omenjenim kemijskim analizam je v odvisnosti od staranja skupen podoben trend. V obdobju do približno 300 let se delež celuloze povečuje. Delež hemiceluloze s staranjem konstantno pada. Vsebnost lignina pa v prvih stoletjih precej niha okrog osnovne vrednosti 28 %. V daljšem časovnem obdobju, čez več tisočletij, pa vrednost lignina močno narašča. Ekstraktivne snovi, kakor tudi pepel, se s staranjem zelo malo povečajo.

2.3.3.1 Stopnja kristaliničnosti celuloze

Zaradi razširjenih intramolekularnih in intermolekularnih vodikovih vezi med celuloznimi verigami govorimo o visoki kristalni strukturi oziroma o stopnji kristaliničnosti celuloze. Visoko urejene (orientirane) strukture celuloze se izmenjujejo z neurejenimi amorfnimi področji znotraj mikrofibril. Bolj ko je celulozna struktura urejena, bolj je trdna in odporna, neurejena področja pa prispevajo k potrebni prožnosti. Obenem stopnja kristaliničnosti povečuje natezno trdnost, dimenzijsko stabilnost, gostoto lesa, znižata pa se kemijska reaktivnost in nabrekanje.

Stopnja kristaliničnosti za normalen zrel les je $52\pm 3\%$. (Andreson in sod., 2004.) V začetnem juvenilnem obdobju je stopnja kristaliničnosti nižja, vendar pa se v poznejšem starostnem obdobju po prerezu poenoti. V razkroju z navadno tramovko (*Gloeophyllum trabeum* (Pers.) Murr.) na lesu navadne smreke kristaliničnost naraste in doseže najvišjo vrednost po dveh tednih, potem pa njena stopnja začne drastično padati. (Kambič, 2011.)

Esteban in sodelavci (2006) navajajo znižanje kristaliničnosti za 4% v lesu rdečega bora (*Pinus sylvestris* L.), ki je bil v uporabi 205 let. Kohara in Okamoto (1955) navajata zvišanje kristaliničnosti v prvih 100 letih, nato je stopnja kristaliničnosti drastično padala. Pri tem sta poročala o podobnem trendu med kristaliničnostjo in dinamičnim elastičnim modulom in upogibno trdnostjo. Podobno kot kristaliničnost sta se tudi dinamični modul in upogibna trdnost v prvih 100 letih zviševala, nato pa je prišlo do padanja vrednosti.

Pri starem lesu navadne smreke v uporabi se kaže znižanje stopnje kristaliničnosti celuloze v primerjavi z recentnim lesom. (Kránitz, 2014.) Preiskovala je tri starostne skupine lesa navadne smreke: 120, 150 in 250 let. Za vse tri starostne skupine je ugotovila stopnjo kristaliničnosti okrog 40%. V recentnem lesu je bila stopnja kristaliničnosti 46%.

Glive večinoma najprej razgradijo neurejena amorfn področja. Zato v začetku procesa razkroja kristaliničnost naraste. Daljša razgradnja v obdobju staranja pa vodi do zmanjšanja urejenih kristaliničnih področij in višje vlažnosti lesa. Nižja stopnja kristaliničnosti celuloze je povezana tudi z mehanskimi lastnostmi, ki se zmanjšujejo.

Očitna sprememba stopnje kristaliničnosti se kaže v daljšem časovnem obdobju. Zato podatki za prva stoletja uporabe lesa kažejo precej različne vrednosti, ki pa se v daljši časovni uporabi poenotijo kot jasen trend zmanjševanja stopnje kristaliničnosti celuloze v odvisnosti od staranja.

Izpostavljenost lesa vremenskim vplivom v kombinaciji z vodo in svetlobo vodi do barvnih sprememb na površini lesa ter makroskopskih in mikroskopskih razpok v notranjosti med posameznimi celicami in v sami celični steni.

2.3.4 Higroskopske lastnosti starega lesa v uporabi

Les kot higroskopen material v različnih klimatskih pogojih vzpostavlja različne ravnovesne vlažnostne in dimenzijske stabilnosti. Sorpcijske lastnosti higroskopskih materialov določajo dimenzijsko stabilnost. (Noack, 1973.) Osnovni gradniki celične stene izkazujejo različne higroskopske afinitete. Najbolj higroskopne so hemiceluloze, nato celuloza, najmanj pa lignin. Pohištvo in drugi leseni objekti v zgodovinskih zgradbah so pogosto izpostavljeni različni relativni zračni vlažnosti. (Gereke in sod., 2011.) To pa lahko povzroči velika dimenzijska nihanja lesa.

Burmester (1967) je raziskoval sorpcijske izoterme različnih drevesnih vrst in starosti v uporabi. Za les beljave rdečega bora, ki je bil v uporabi 65 let, in navadne smreke, ki je bila v uporabi 40 let, je ugotovil različni adsorpcijski izotermi za svež in star les. Oba stara lesa sta izkazovala nižje ravnovesne vlažnosti v procesu adsorpcije.

Kurtoglu (1983) je preiskoval sorpcijske lastnosti na 100 let starem lesu navadne smreke. Adsorpcijske krivulje je primerjal s svežim lesom ter s 14 in 28 dni toplotno obdelanim lesom pri temperaturi 100°C. Zaradi temperature je prišlo do termične razgradnje hemiceluloz. Sorpcijska krivulja starega lesa je med 0 in 40% relativne zračne vlažnosti potekala med svežim lesom in toplotno obdelanim, pri 57 % relativne zračne vlažnosti je sekala krivuljo toplotno obdelanega lesa in potekala vzporedno z ostalimi krivuljami. Ravnovesne vlažnosti starega lesa so bile v celotnem območju nižje od svežega lesa.

V starem lesu z znižanjem gostote narašča krčenje lesa. (Borgin in sod., 1979.) Kar pa je v nasprotju s Kollmann in Cote (1968), ki trdita, da se les z višjo gostoto bolj krči. Gostota sama ni zadosten pokazatelj higroskopnosti. Gotovo ima pomemben vpliv tudi sprememba količine ekstraktivov, saj njihova višja koncentracija vpliva na znižanje ravnovesne vlažnosti, strukturno in kemično sestavo lesa. Manj se les krči ob spremembi klimatskih pogojev, večja je njegova dimenzijska stabilnost. V procesu staranja namreč pride do razgradnje higroskopne hemiceluloze, kot tudi do spremembe stopnje kristaliničnosti. Vsebnost lignina vpliva predvsem na volumsko krčenje, pri nižji vsebnosti je tudi krčenje manjše. Višja kot je stopnja kristaliničnosti celuloze, bolj je ta hidrofozna. V urejeno celulozno mrežo namreč voda težko prodira.

2.3.5 Barvne spremembe v procesu staranja

Barvne spremembe površine so gotovo ena izmed prvih in najbolj opaznih sprememb lesa v procesu staranja. Zelo so izrazite pri lesu, ki je izpostavljen direktnim sončnim žarkom. Les je odličen absorber sončne svetlobe. Izpostavljenost lesa vremenskim vplivom, v kombinaciji z vodo in svetlobo, vodi do barvnih sprememb na površini lesa ter makroskopskih in mikroskopskih razpok v notranjosti med posameznimi celicami in v sami celični steni. Barvne spremembe so večinoma nezaželene, razen ko hočemo s kemijskimi ali toplotnimi postopki izboljšati estetski videz ali umetno ustvariti videz staranja.

Fotodegradacija je v naravnih pogojih pomemben dejavnik, zaradi katerega se pojavijo barvne spremembe. Gotovo pa ima svetloba večji vpliv na konstrukcije, ki so izpostavljene na prostem. Svetlobni spekter različno vpliva na gradnike celične stene. Lignin spada med najbolj senzitivne materiale na UV svetlobo. Najdaljšo valovno dolžino imajo rdeča barva, ki z večanjem valovne dolžine prehajajo v infra rdečo svetlobo (IR). V nasprotju z njimi pa ima najkrajšo valovno dolžino vijolična barva; s krajšanjem valovne dolžine prehaja v ultra vijolično svetlobo (UV). Svetlobe različnih valovnih dolžin na lesu povzročijo različne kemijske spremembe, ki se lahko odražajo tudi v nastajanju novih ekstraktivnih snovi.

Žlahtičeva (2013) je opravila barvno preiskavo na 6 let starem smrekovem nosilcu v uporabi. Vrednost L^* , ki nakazuje spremembo svetlosti, je bila 65 in se je močno zmanjšala v primerjavi s kontrolnim vzorcem, ki je imel vrednost 85. Prišlo je do močne potemnelosti starega lesa. Kranitzova (2014) pa je opazovala barvne spremembe na smrekovem lesu, ki je bil v uporabi od 90 do 210 let. Ugotovila je podobne spremembe na starem lesu, saj je v vseh primerih les potemnel.

S starostjo postaja les vse temnejši in bolj rumen, kar je eden prvih opaznih znakov sprememb. Barvne spremembe so verjetno hitrejše na začetku procesa staranja kot pozneje. (Kránit, 2014.) Pri tem imajo pomembno vlogo ekstraktivne snovi. (Kollmann in Cote, 1968.)

3 MATERIAL IN METODE

3.1 MATERIAL

Iz delno porušene stropne konstrukcije v graščini Preddvor smo odvzeli tri lesene stropnike, dolge 100 cm. Prvi stropniki je bil širine 21 cm in višine 12 cm (osnovna oznaka 1.) drugi širine 22 cm in višine 12 cm (osnovna oznaka 3.) in tretji širine 24 cm in višine 14 cm (osnovna oznaka 2). Stropniki v prerezu predstavljajo polkroge. Odvzeli smo tudi 100 cm dolg vzorec štiristransko tesanega prečnega nosilnega tramu širine 24 cm in višine 30 cm (osnovna oznaka 4.). Vse odvzete vzorce smo odvzeli v razdalji 50 cm od koncev poškodovane (degradirane) konstrukcije. Že na mestu odvzema smo lahko določili drevesno vrsto. Ugotovili smo, da je lesena stropna konstrukcija sestavljena iz lesa navadne smreke (*Picea abies* (L.) Karst.). Zaradi biotskih in abiotskih dejavnikov razgradnje lesa so bili odvzeti vzorci že vidno degradirani. Pri nadaljnji pripravi vzorcev za posamezne metode smo zato težko pridobili kvalitetne in številčne preizkušance za posamezne poskuse, kar se pri raziskavah na starem lesu v uporabi pokaže kot velika pomankljivost, ki pa jo navajajo tudi številni avtorji v literaturi.

3.1.1 Vzorci za dendrokronološko datiranje

Dendrokronološke preiskave za datiranje lesa lahko opravljamo na vzorcih, ki smo jih pridobili z izvrtki (metodo z vrtanjem) ali pa na prečnih kolutih preiskovanih objektov.

V našem primeru stropna konstrukcija ne opravlja več svoje funkcije, zato je bil odvzem vzorcev enostavnejši. Vzorce smo enostavno grobo prežagali z motorno žago, natančnejši razrez pa smo opravili na tračnem žagalnem stroju v delavnici. Pri tem smo bili pozorni, da smo odvzeli kolute, ki so bili dovolj ohranjeni in primerni za nadaljnjo pripravo za postopek datiranja. S končno izdelavo kolotov za dendrokronološko datiranje smo imeli zaradi slabega materiala precej težav, kar pa na večjih vzorcih vizualno nismo predvideli. Za datiranje stropne konstrukcije smo iz vsakega stropnika in prečnega tramu izdelali po en kolut. Skupaj smo tako pripravili štiri kolute (slika 11).

Odvzete preizkušance smo potem obrusili, najprej grobo in nato še fino, tako da so bile pod stereomikroskopom jasno vidne branike, letnice in posamezne celice. Brušenje smo izvajali z brusnim papirjem različnih granulacij. Začeli smo z bolj grobim papirjem granulacije 80, nadaljevali s 120, 180 in z 240 ter končali z 280. Tako smo dobili čisto, gladko površino, primerno za datiranje. Prehodi med ranim in kasnim lesom so bili jasno razvidni, zato večjih težav pri določevanju širin branik nismo imeli.



Slika 11: Pripravljene skupine preizkušancev. Levo so vzorci za dendrokronološko datiranje, desno preizkušanci za akustične in upogibne lastnosti.



Slika 12: Pripravljene skupine preizkušancev. Levo preizkušanci za tlačne in strižne lastnosti, desno preizkušanci za dimenzijsko stabilnost.

3.1.2 Preizkušanci za fizikalno-mehanske poskuse

Iz vzorčnega materiala smo izdelali orientirane palice s prečnim prerezom $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ za določanje fizikalnih lastnosti in $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ za mehansko preizkušanje. Iz najmanjših prečnih prerezov stropnikov smo izdelali po dve palici z oznakami 11, 12 in 31, 32. Iz največjega stropnika tri palice z oznakami 21, 22 in 23. Prav tako smo iz prečnega tramu izdelali tri palice z oznakami 41, 42 in 43. Pri izdelavi preizkušancev za fizikalno-mehanske lastnosti smo upoštevali standardna priporočila, odvisno od vrste poskusa. (Preglednica 2).

Preglednica 2: Pregled načrtovanih poskusov, dimenzije in število preizkušancev

	Vrsta poskusa	Dimenzija preizkušancev $R \times T \times L$ [mm ³]	Št. poskusov	Metoda
Fizikalne lastnosti	gostota	$30 \times 30 \times 5$	10	ISO 13061-2:2014
	vlažnost		10	ISO 13061-1:2014
	dimenzijska stabilnost		10	SIST EN 1910:2013
Mehanske lastnosti	E-modul dinamični	$20 \times 20 \times 300$	10	ASTM E 1876-09
	upogibna trdnost	$20 \times 20 \times 300$	10	ISO 13061-3:2014
	tlačna trdnost	$20 \times 20 \times 40$	10	ISO 13061-17:2015
	strižna trdnost	$20 \times 20 \times 20$	10	ISO 3347:1976

3.2 METODE

3.2.1 Dendrokronološko datiranje lesa

Smreka je s svojo rastno prilagodljivostjo problematična vrsta za vzpostavljanje standardnih referenčnih kronologij. Njen rastni vzorec je lahko že na majhnem opazovanem rastišču povsem različen. Problem pa predstavlja tudi njena razširjenost, ki v preteklosti ni bila tako velika kot danes. Standardne kronologije začnemo tvoriti z drevesi, ki še rastejo, pri čemer je tem bolje, čim starejša so drevesa (Čufar, 1992). Pri nas pa v sestojih težko najdemo stara drevesa, saj imamo dolgo tradicijo s prebiralnim gozdnim gospodarjenjem. Med drugim je vzrok za to Terezijanski gozdni red za Krajsko iz leta 1771, ki opozarja, da smreka, jelka in bor, pa tudi macesen, dorastejo v 80. do 100. letih. Dolžino referenčnih kronologij lahko podaljšujemo z odvzetimi vzorci lesa z zgodovinskih objektov istega območja. Trenutno najdaljša smrekova kronologija PC-SL-08 v Sloveniji je dolga 496 let in pokriva obdobje od leta 1512 do 2007. Najdaljša kronologija širine branik je južnonemška Hohenheimska hrastova kronologija. Njena dolžina je 12.500 let. Če na nekem območju, kjer smo odvzeli vzorce, ne razpolagamo z referenčno kronologijo, si lahko pomagamo s heterokonekcijo ali s telekonekcijo. Heterokonekcija pomeni, da lahko vzorce datiramo z drugo drevesno vrsto, smreko na primer z jelko. Pri telekonekciji pa izvedemo datiranje s pomočjo kronologije iz drugega območja, kot izvira vzorec za datiranje.

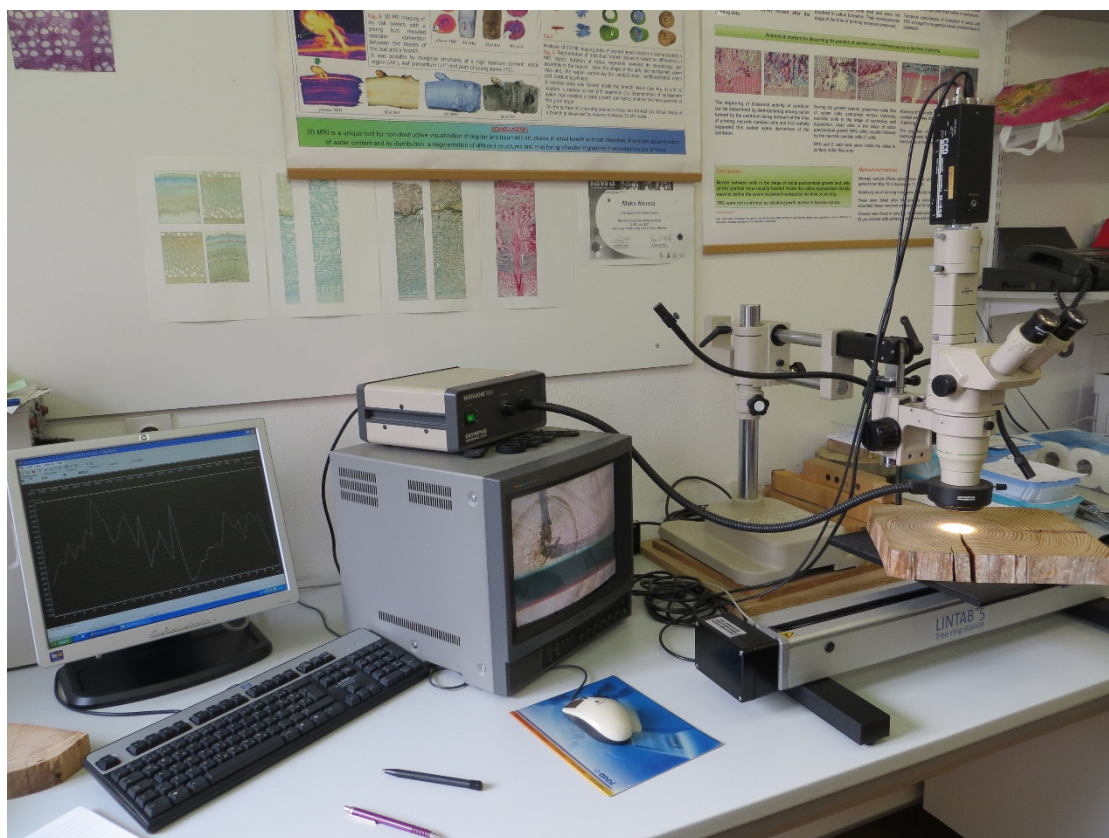
Dendrokronološko analizo smo izvedli na dovolj kakovostnih in orientiranih vzorcih, ki bi naj imeli vsaj 40 branik. Zaporedja izmerjenih širin branik smo nato primerjali z referenčno kronologijo ter vizualno in statistično izvedli čim boljše ujemanje.

3.2.1.1 Merjenje širine branik

Širino branik smo merili v dendrokronološkem laboratoriju Katedre za tehnologijo lesa, kjer smo imeli na razpolago primerno raziskovalno opremo. Ker so bili vsi prečni odrezki

v predelu beljave večinoma poškodovani zaradi napada hišnega kozlička (*Hylotrupes bajulus* (L.)), smo zaradi lažje izvedbe meritev na preizkušance narisali pomožne črte od stržena proti periferiji, v dveh smereh: A in B. To nam je pomagalo, da nam pozneje pri meritvi ni bilo potrebno preizkušanca premikati zaradi izogibanja poškodbam. Preizkušance smo za lažje razločevanje opremili tudi s sestavljeno oznako, ki je pomenila kraj vzorčenja, številko vzorca in zaporedno število meritve v izbrani smeri. Tako npr. oznaka PRE01A1 predstavlja, da je preizkušanec iz Preddvora, prvi kos in prva meritev v A smeri.

Pred začetkom smo v programu TSAP-Win™ (slika 13) poleg osnovnih nastavitvev nastavili še osnovne parametre: drevesno vrsto, podatek, ali preizkušanec vsebuje stržen ali ne, kako se meritev začne in konča (ali gre za rani ali kasni les), ali merimo samo širino branik ali pa rani in kasni les posamezno.



Slika 13: Merilna miza Lintab s stereo lupo in računalniški program Tsap – Win.

Označene preizkušance smo postavili na pomično merilno mizo LINTAB™, ki je preko kabla povezana z osebnim računalnikom. Pri tem smo preizkušance orientirali tako, da je bil stržen na desni strani, zunanji del preizkušanca pa na levi. Tako orientirane preizkušance smo opazovali skozi stereomikroskop OLYMPUS S2-11, ki je bil preko videokamere SONY CDD/RGB povezan z barvnim monitorjem SONY TRINITRON. Zajem podatkov je podpiral program TSAP-Win™. Za začetek meritve smo centrirali merilni križ na strženu preizkušanca ter s klikom na miški pričeli z meritvijo. Ko smo

merilno mizo, na kateri smo imeli preizkušance, ročno premaknili, tako da je bil merilni križ na meji med branikama (na letnici), smo še enkrat kliknili na miško in s tem zabeležili širino branike. Za razlikovanje med ranim in kasnim lesom smo uporabili Morov princip. Po tem principu je meja tam, kjer je dvakratna dvojna širina celičnih sten večja od premera lumna v radialni smeri. Vzorec ob premikanju merilne mize smo morali ves čas premikati pravokotno na letnice. Če so bile na preizkušancu poškodbe, smo ga med merjenjem poravnali. Pri poravnavi preizkušanca smo morali ostati na isti letnici. Računalnik je s pomočjo programa TSAP-Win™ zabeležil širino branike z natančnostjo 0,01 mm. Program TSAP-Win™ je prirejen za nadaljnjo sinhronizacijo in datiranje z referenčno kronologijo.

3.2.1.2 Dendrokronološki kazalniki ujemanja

Koeficient TVBP sta v dendrokronologijo uvedla Baillie in Pilcher (1973). Namen izračunavanja TVBP vrednosti je dobiti objektivno mero za ugotavljanje podobnosti med dvema kronologijama. Koeficient predstavlja razmerje med diferencami dveh aritmetičnih sredin in njihovimi standardnimi odkloni.

Glk - koeficient časovne skladnosti (nem. Gleichläufigket) je mera ujemanja dveh kronologij na opazovanem intervalu. Pri tem primerjamo dva vzorca rasti med seboj. Izrazimo ga v odstotkih in zavzema vrednosti od 0 do 100 %. Večja je podobnost med opazovanima kronologijama, višjo vrednost ima koeficient časovne skladnosti.

OVL (an. Overlap) - predstavlja časovno prekrivanje dveh kronologij v letih. Ta podatek je pomemben, ko primerjamo dve kronologiji. Statistični kazalniki so praviloma boljši, kadar je prekrivanje daljše in imamo večji vzorec za primerjavo.

3.2.2 Metode za določanje fizikalnih lastnosti

3.2.2.1 Gostota lesa

Gostoto smo določali z gravimetrično metodo, kot jo predpisuje standard ISO 13061-2:2014. Dimenzije smo merili s kljunastim merilom, na 0,01 mm natančno. Preizkušance pa smo tehtali na laboratorijski tehtnici EXACTA 300EB, z 0,001 g natančnosti (Slika 14). Meritve smo izvajali v posameznem uravnoveženem stanju oziroma v določenih klimatskih pogojih. Za izračun gostote v absolutno suhem stanju smo vzorce posušili v sušilniku do konstantne mase ($T = 103 \pm 2^{\circ}\text{C}$). Za nas sta bili pomembni gostoti v normalnih laboratorijskih pogojih (ρ_v) in v absolutno suhem stanju (ρ_0).



Slika 14: Tehtanje preizkušancev za določanje gostote v normalni laboratorijski klimi.

Gostoto preizkušancev pri določeni ravnovesni vlažnosti smo izračunali po naslednji formuli:

$$\rho_u = \frac{m_u}{h_u \cdot b_u \cdot l_u} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad \dots(1)$$

Pri tem pomeni:

- ρ_u - gostota lesa pri vlažnosti u ,
- m_u - masa preizkušanca pri vlažnosti u ,
- h_u - višina preizkušanca pri vlažnosti u ,
- b_u - širina preizkušanca pri vlažnosti u ,
- l_u - dolžina preizkušanca pri vlažnosti u .

3.2.2.2 Ravnovesna vlažnost

Ravnovesno vlažnost smo določali po gravimetrični metodi, v skladu s standardom ISO 13061-1:2014 ter jo izračunali po naslednji formuli:

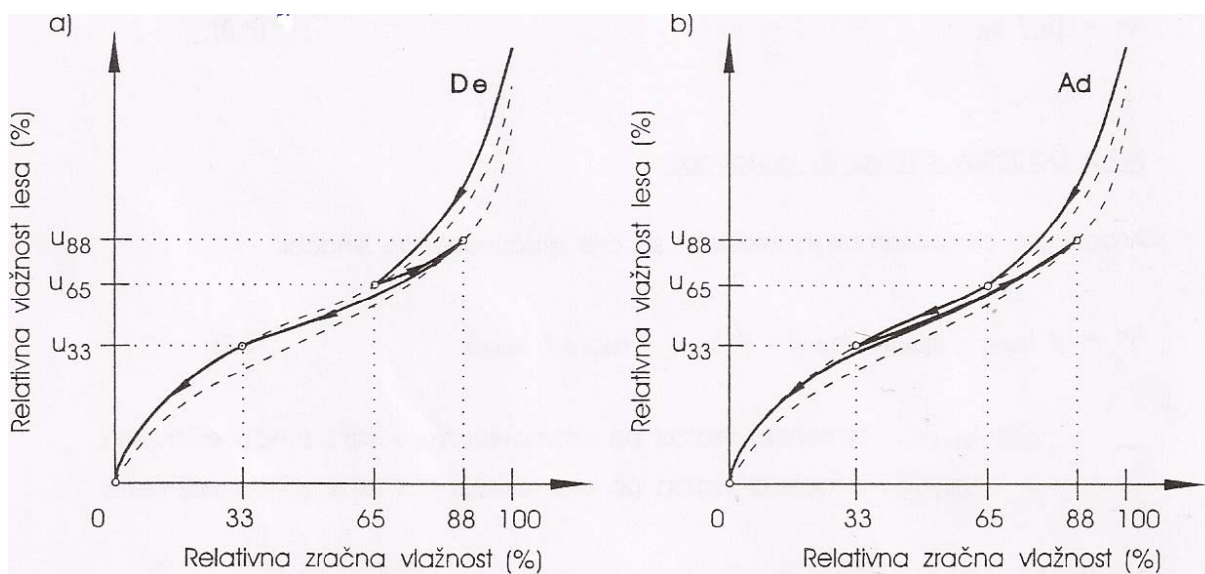
$$u = \frac{m_{vode}}{m_0} \cdot 100 = \frac{m_{vl} - m_0}{m_0} \cdot 100[\%] \quad \dots(2)$$

Pri tem pomeni:

- u - vlažnost lesa,
- m_{vl} - masa vlažnega preizkušanca,
- m_0 - masa preizkušanca v absolutno suhem stanju.

3.2.2.3 Kazalniki dimenzijske stabilnosti

Kazalnike dimenzijske stabilnosti smo določali po standardni metodi SIST EN 1910:2013. Dimenzije in število preizkušancev so predstavljene v preglednici (preglednica 2). Uravnovešenje preizkušancev smo izvedli na spodnji in zgornji meji kvazilinearnega območja. Pri spodnji meji je to bilo v klimi s $\varphi = 33\%$ in $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$, na zgornji meji pa v klimi $\varphi = 87\%$ in $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$ (slika 16). Preizkušance smo uravnovešali v postopku adsorpcije in desorpcije (slika), tako smo dobili dve različni uravnovesni vrednosti glede na enake klimatske pogoje.



Slika 15: Potek uravnovešanja v različnih klimah a) prve skupine: desorpcijski preizkušanci (De) in b) druge skupine: adsorpcijski preizkušanci (Ad). (Klinc, 1995.)

Iz meritev smo izračunali diferencialni nabrek v radialni in tangencialni smeri, koeficient nabrekanja v radialni in tangencialni smeri, sorpcijski kvocient in anizotropijo diferencialnega nabrekanja.

Diferencialni nabrek v radialni (q_r) in tangencialni (q_t) smeri:

$$q_{r,t} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta u} = \frac{\left(\frac{l_{r,T87} - l_{r,T33}}{l_{r,T0}} \right) \cdot 100}{u_{87} - u_{33}} \left[\frac{\%}{\%} \right] \quad \dots(3)$$

Pri tem pomeni:

$\Delta\alpha$ - spremembo dimenzije med krčenjem in nabrekanjem [%],

Δu - spremembo vlažnosti med ravnovesnima stanjema [%].

Koeficient nabrekanja v radialni (h_R) in tangencialni (h_T) smeri:

$$h_{R,T} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta \varphi} = \frac{\left(\frac{l_{R,T87} - l_{R,T33}}{l_{R,T0}} \right) \cdot 100}{(\varphi_2 - \varphi_1)} \left[\frac{\%}{\%} \right] \quad \dots(4)$$

Pri tem pomeni:

$\Delta \alpha$ - spremembo dimenzije med krčenjem in nabrekanjem [%],

$\Delta \varphi$ - razliko relativne zračne vlažnosti [%].

Sorpcijski kvocient (s):

$$s = \frac{h}{q} = \frac{\Delta u}{\Delta \varphi} = \frac{(u_{87} - u_{33})}{\varphi_2 - \varphi_1} \left[\frac{\%}{\%} \right] \quad \dots(5)$$

Pri tem pomeni:

h - koeficient nabrekanja,

q - diferencialni nabrek.

Anizotropija diferencialnega nabrekanja (A_n):

$$A_n = \frac{q_T}{q_R} \quad \dots(6)$$

Pri tem pomeni:

q_T - diferencialni nabrek v tangencialni smeri,

q_R - diferencialni nabrek v radialni smeri



Slika 16: Stekljeni kontejnerji za uravnovešanje preizkušancev nad nasičenimi raztopinami soli.

Dimenzijsko stabilnost smo ocenili po kriterijih, kot so jih postavili Noack s sodelavci (1973) in Torelli in Čufar (1983). (Pregl. 3)

Preglednica 3: Kriteriji za ocenitev dimenzijske stabilnosti. (Noack in sod., 1973, Torelli in Čufar, 1983.)

Kazalnik	Neugodno	Normalno	Ugodno	Zelo ugodno
q_T [%/%]	>0,4	0,3–0,4	<0,3	
$q_T - q_R$ [%/%]	>0,2	0,12–0,2	<0,12	
h_T [%/%]	>0,065	0,050–0,065	<0,050	
$h_T - h_R$ [%/%]	>0,035	0,020–0,035	<0,020	
q_T / q_R	>2,0	1,6–2,0	<1,6	
s [%/%]	>0,16	0,15–0,16	0,14 – 0,15	<0,14

3.2.3 Metode za določanje mehanskih lastnosti

3.2.3.1 Nedestruktivno določanje dinamičnega elastičnega modula

Za izvedbo meritve dinamičnega elastičnega modula in statičnega poskusa upogibne trdnosti in modula elastičnosti iz upogiba smo uporabili iste preizkušance. Zato smo najprej izvedli nedestruktivni poskus.

3.2.3.1.1 Določanje modula elastičnosti z vzdolžnim vzburjanjem

Pri določanju dinamičnega elastičnega modula smo upoštevali navodila iz standarda ASTM E 1876-09, ki opisuje postopek določanja dinamičnega Youngovega modula, strižnega modula in Poissonovih števil pri povzročanju vibracij.

Preizkušance smo predhodno obdelali na dimenzijo 20 mm × 20 mm × 300 mm. Testiranje smo izvajali v normalnih laboratorijskih pogojih. Elastični podpori smo postavili na 22,4% dolžine od obeh koncev preizkušancev. (Görlacher, 1984, Haines in sod., 1996, Divos, 2005.) V 1. nihajnem načinu se na teh mestih nahajajo vozli. S takšno postavitvijo podpor smo minimalno vplivali na potujoče valovanje in se s tem izognili popačenju.

Za dinamični oz. akustični test vzburjanja preizkušancev smo potrebovali merilno verigo za beleženje akustičnih lastnosti. Za snemanje zvočnega signala smo uporabili kondenzatorski mikrofoni PCB-130D20, ki smo ga postavili na nasprotni strani vzburjanja. Pri določitvi odmika mikrofona od vzorca moramo paziti, da ne pride do interference ($\approx 0,5$ cm). Mikrofoni so preko kartice NI-9234, ki je namenjena zajemanju signalov, povezani z računalnikom. Meritve smo zajeli v časovni zvočni signal ($t = 3$ s), v 24-bitni resoluciji z 51200 vzorci na sekundo, kar nam omogoča kartica NI-9234, proizvajalca National Instruments Ltd. Obdelava podatkov je potekala v grafičnem programskem jeziku

LabVIEW® in hitro Fourier-jevo transformacijo (slika 17). Tako smo lahko določili lastno frekvenco v 1. nihajnem načinu.

Ko smo preizkušanec prosto vpeli na elastične podpore, smo z leseno udarjalko na prečni površini vzorca s kratkim elastičnim impulzom povzročili tlačno motnjo v vzdolžni smeri. Iz tako dobljene lastne frekvence in dolžine preizkušanca smo izračunali hitrost širjenja zvoka v vzdolžni smeri po enačbi:

$$v = \lambda_n \cdot fn = \frac{2 \cdot L}{n} \cdot fn \quad \dots(7)$$

Pri tem je:

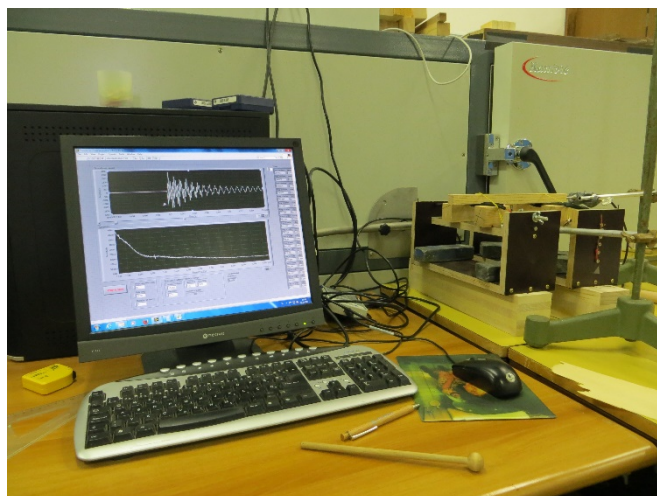
- v - hitrost valovanja [m/s],
- λ_n - valovna dolžina [m],
- L - dolžina preizkušanca [m],
- n - nihajni način ($n=1$ pri osnovnem načinu nihanja) in
- fn - lastna frekvenca v nihajnem načinu [s^{-1}].

Elastični modul pri vzdolžnem vzbujujanju smo izračunali:

$$E_{dinL} = v^2 \cdot \rho_u \quad \dots(8)$$

Pri tem je:

- E_{dinL} - elastični modul pri vzdolžnem nihanju [Pa],
- v - hitrost valovanja [m/s] in
- ρ_u - gostota ($u \approx 12\%$) [kg/m^3].



Slika 17: Merilna veriga za določanje akustičnih lastnosti lesa.

3.2.2.1.2 Določanje modula elastičnosti s prečnim vzbujanjem

Pri vzbujanju v prečni smeri smo uporabili enake naprave za zaznavanje lastnih frekvenc kot pri vzdolžnem vzbujanju. Drugače smo izvajali samo vzbujanje, saj smo tu z leseno udarjalko povzročali tlačno motnjo na radialni površini v tangencialni smeri. Na drugem koncu, na mestu največje amplitude, smo na radialni površini imeli nameščen kondezatorski mikrofoni, ki je meril vzbujeno nihanje. Modul elastičnosti smo pri prečnem nihanju izračunali po enačbi:

$$E_{dinP} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot L^4 \cdot \rho_u \cdot f_n^2 \cdot A}{I \cdot k_i^4} \quad \dots(9)$$

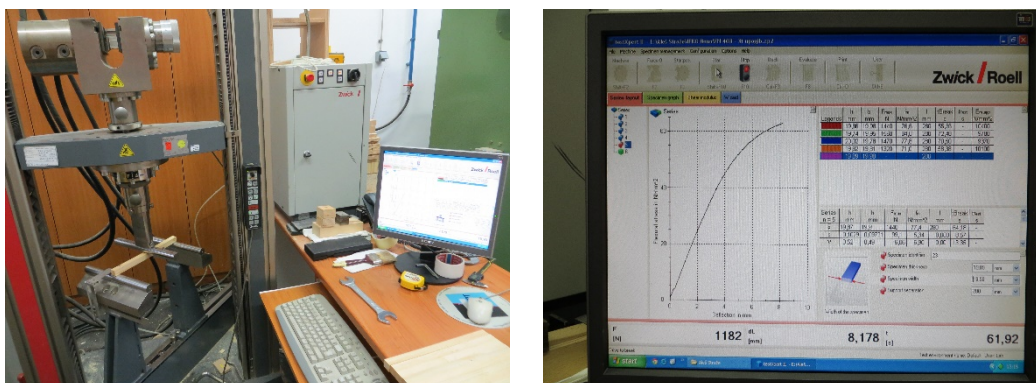
Pri tem je:

- E_{dinP} - elastični modul pri prečnem nihanju [Pa],
- L - dolžina preizkušanca [m],
- f_n - lastna frekvenca [Hz],
- A - prečni prerez [m²],
- I - vztrajnostni moment prereza [m⁴],
- ρ_u - gostota ($u \approx 12\%$) [kg/m³],
- k_i - korekcijski koeficient za 1. nihajni način ($k = 4,730$).

3.2.3.2 Upogibna trdnost in modul elastičnosti

Pri postopku ugotavljanja upogibne trdnosti smo upoštevali navodila iz standarda ISO 13061-3:2014, ki določa zahteve za standardizirano testiranje upogibne trdnosti pri statičnem poskusu.

Standardni vzorci za testiranje so imeli kvadraten prerez nazivnih dimenzij 20 x 20 mm in dolžino 300 mm ($R \times T \times L$ oz. $b \times h \times L$). Uravnovešeni so bili v standardnih klimatskih pogojih ($T = 20 \pm 2$ °C, $\phi = 65 \pm 5$ %, $u_r \approx 12\%$), do konstantne mase. Vsem preizkušancem smo pred testiranjem izmerili dimenzije na 0,01 mm natančno, ter jim stekali maso z 0,001 g natančnosti. Testiranje smo izvajali na univerzalnem testirnem stroju za statično določanje mehanskih lastnosti Zwick/Roell Z100. Programska oprema TestXpert II, nameščena na računalniku, povezanem s testirnim strojem, beleži upogibno trdnost, modul elastičnosti in maksimalno silo ter čas, v katerem je prišlo do porušitve (slika 18).



Slika 18: Izvedba upogibnega poskusa (levo), računalniško beleženje in grafični prikaz poskusa (desno).

Izvajali smo tritočkovni poskus z razmikom med kovinskimi valjčnimi podporami 280 mm, z obremenjevanjem na sredini obeh podpor. Obremenjevanje je potekalo na radialno površino v tangencialni smeri na letnice (zaradi razporeditve ranega in kasnega lesa). Preizkušane smo porušili v času od 0,5 do 5 min.

Pri tritočkovnem upogibu se nam pod tlačnim valjem na preizkušancu pojavijo tlačne sile, na spodnji strani preizkušanca natezne, v sredini pa pride do pojava strižnih sil. Zelene podatke smo dobili v obliki tabele in spremljajočega grafa. Izračun upogibne trdnosti in elastičnega modula iz upogiba smo izvedli po dveh enačbah:

Enačba za izračun upogibne trdnosti:

$$\sigma_{maks} = \frac{3 \cdot F_{maks} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} [Pa] \quad \dots(10)$$

Pri tem pomeni:

σ_{maks} - maksimalna upogibna trdnost [Pa],

F_{maks} - sila loma [N],

L - razdalja med podporama [m],

b - širina preizkušanca [m],

h - višina preizkušanca [m].

Enačba za določanje modula elastičnosti s statičnim upogibom:

$$E_{L3} = \frac{L^3 \cdot \Delta F}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta f} [Pa] \quad \dots(11)$$

Pri tem pomeni:

E_{L3} - modul elastičnosti (tritočkovni test) [Pa],

L - razdalja med podporama [m],

ΔF - prirastek sile v linearnem deformacijskem območju ($F_2 \approx 40\% F_{maks}$, $F \approx 10\% F_{maks}$) [N],
 b - širina preizkušanca [m],
 h - višina preizkušanca [m],
 Δf - prirastek deformacije pri prirastku sile ($F_2 - F_1$) [m].

3.2.3.3 Tlačna trdnost vzporedno s potekom vlaken

Tlačno testiranje smo opravili v skladu s standardom ISO/DIS 13061-17: 2015, ki nadomešča prejšnji standard ISO 3787: 1976. Univerzalni testirni stroj Zwick/Roell Z100 omogoča različna obremenitvena stanja, zato smo z njim izvedli tudi tlačne preizkuse. Nazivne mere preizkušancev so bile 20 mm × 20 mm × 40 mm. Standard dopušča dolžino preizkušancev v razponu od 1,5- do 4-kratnika prečne dimenzije. Pred izvedbo smo vsem preizkušancem izmerili dimenzije z 0,01 mm natančnosti ter maso z 0,001 g natančnosti. Preizkušance smo predhodno uravnovesili v standardni klimi ($T = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $\phi = 65 \pm 5 \%$, $u_r \approx 12\%$) do konstantne mase.



Slika 19: Izvedba tlačnega poskusa na stroju Zwick/Roell Z 100.

Na testirni stroj smo namestili dve vzporedni kovinski plošči, ki sta rahlo bombirani oziroma izbočeni (slika 19). Pri nameščanju preizkušancev na spodnjo kovinsko ploščo moramo biti pazljivi. Z nameščanjem v središče in s pomočjo izbočene površine kovinske plošče se izognemo vplivom upogiba, ki se pojavi pri tlačnem obremenjevanju ob nepravilni namestitvi preizkušanca. Do porušitve preizkušanca mora priti v času od 1 do 5 minut.

Tlačno trdnost vzporedno z vlakni smo izračunali po formuli:

$$\sigma_{cII} = \frac{F_{maks}}{b \cdot h} [Pa] \quad \dots(12)$$

pri tem pomeni:

σ_{cII} - tlačna trdnost vzporedno z vlakni [Pa],

F_{maks} - maksimalna tlačna sila [N],

b - širina preizkušanca [N],

h - višina preizkušanca [N].

3.2.3.4 Strižna trdnost vzporedno z vlakni

Univerzalni testirni stroj Zwick/Roell Z100 smo uporabili tudi pri določanju strižnih trdnosti. Preizkušance z nazivnimi dimenzijami 20 mm × 20 mm × 20 mm smo najprej stehali na 0,001g natančno ter jim s kljunastim merilom izmeri dimenzije na 0,01mm natančno. Strižni preizkus vzporedno z vlakni v vzdolžno radialni ravnini smo izvajali v skladu s standardom ISO 3347: 1976. Standard dovoljuje debelino od 20 do 50 mm ter dolžino tudi od 20 do 50 mm. Naše obremenjevanje je potekalo v vzdolžni smeri na radialni strižni površini (slika 20). Do porušitve mora priti v času od 1,5 do 2 minut.

Strižno trdnost smo izračunali iz enačbe:

$$\tau_{II} = \frac{F_{maks}}{b \cdot h} [Pa] \quad \dots(13)$$

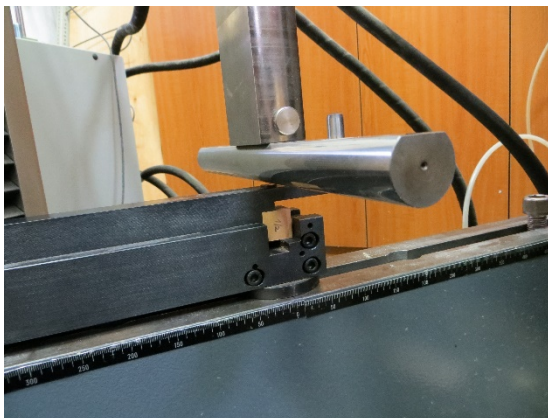
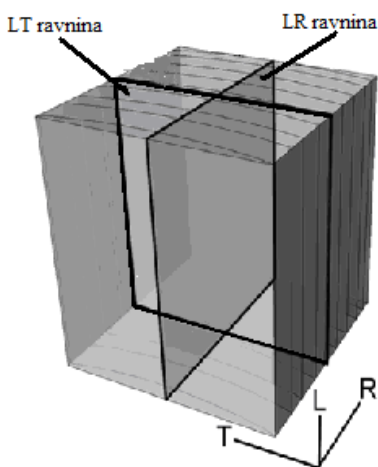
pri tem pomeni:

τ_{II} - strižna trdnost [Pa],

F_{maks} - maksimalna strižna sila [N],

b - širina strižne površine [m],

h - višina strižne površine [m].



Slika 20: Prikaz strižnih ravnin vzporedno z vlakni (levo), izvedba strižnega poskusa (desno).

4 REZULTATI

4.1 DATIRANJE ODVZETIH VZORCEV

Radiji odvzetih vzorcev so imeli od 31 do 48 branik, to pa je povzročalo problem pri uspešnem datiranju. Iz statističnih razlogov potrebujemo vzorce s čim višjim številom branik in posledično višjim statističnim ujemanjem. Naše dobljene krivulje smo primerjali z referenčno smrekovo krivuljo PC-SL-08, ki pokriva obdobje od 1512 do 2007. Zadnje branike odvzetih vzorcev smo datirali v leta 1843, 1851 in 1856 (preglednica 4), kar pomeni, da je les vgrajen 160 do 170 let.

Preglednica 4: Statistični kazalniki sinhroniziranja in datiranja vzorcev stropne konstrukcije

Sample	(=Single):	PRE01A1					PCAB	1851	---	49	1803	1851	
Reference	(=Single):	PC-SL-08					PCAB	3	1462	---	496	1512	2007
Sample	Ref.	PosL	PosR	OVL	Glk	GSL	TV	TVBP	DateL	DateR			
PRE01A1	PC-SL-08	292	340	49	67	**	1,2	4,0	1803	1851			

Sample	(=Single):	PRE02B1					PCAB	1843	WKE	37	1807		
1843													
Sample	Ref.	PosL	PosR	OVL	Glk	GSL	TV	TVBP	DateL	DateR			
PRE02B1	PC-SL-08	296	332	37	66	*	2,3	3,1	1807	1843			

Sample	(=Single):	PRE03B1					PCAB	1856	WKE	39	1818		
1856													
Sample	Ref.	PosL	PosR	OVL	Glk	GSL	TV	TVBP	DateL	DateR			
PRE03B1	PC-SL-08	307	345	39	68	*	0,4	3,8	1818	1856			

Statistični kazalniki so bili na meji značilnosti, saj na splošno velja, da je datiranje uspešno, če so vrednosti TVBP nad 4. V našem primeru je bil ta koeficient od 3,1 do 4. Pri koeficientu časovnega prekrivanja (Glk) pomeni v splošnem vrednost nad 65 % dovolj visoko skladnost, da lahko govorimo o podobnosti dveh krivulj in s tem o uspešnem datiranju. Koeficient časovne skladnosti naših vzorcev se je gibal od 66 % do 68 %. Datiranje temelji na kombinaciji obeh kazalnikov in vizualnih primerjav krivulj širin in branik in referenčne kronologije.

4.2 FIZIKALNE LASTNOSTI LESA STROPNE KONSTRUKCIJE

Na preučevani smrekovini, ki smo jo odvzeli s stropne konstrukcije je bila **povprečna gostota v absolutno suhem stanju 398 kg/m³**, minimalna vrednost gostote je bila 369 kg/m³, maksimalna gostota pa je bila 441 kg/m³. Na splošno je bila gostota naših preizkušancev nekoliko nižja, kot jo sicer navaja Wagenführ (1996) in je 430 kg/m³ za smrekovino. (Preglednica 5)

Preglednica 5: Gostota v absolutno suhem stanju (ρ_0) v [kg/m³].

	Gostota v absolutno suhem stanju (ρ_0) [kg/m ³]
Št. vzorcev	20
Povprečje	398
Min.	369
Maks.	441
Standardni odklon	23,1
Koeficient variacije [%]	5,8

Na zgornjem higroskopskem območju (pri relativni zračni vlažnosti 87%) je bila ravnovesna vlažnost v procesu desorpcije 19,1 % v procesu desorpcije in 17,8 % v adsorpciji. Pri relativni zračni vlažnosti 33 % pa sta bili ravnovesni vlažnosti 9,6 % v procesu desorpcije in 8,4 % v adsorpciji. (Preglednica 6)

Preglednica 6: Ravnovesna vlažnost lesa v procesu sušenja (De) in navlaževanja (Ad) pri relativni zračni vlažnosti (φ) in temperaturi 20 °C ± 1 °C.

Nasičena vodna raztopina soli	Relativna vlažnost φ [%]	Ravnovesna vlažnost lesa u_r [%]	
		Adsorpcija	Desorpcija
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	87	17,8	19,1
MgCl ₂ · 6H ₂ O	33	8,4	9,6

Razvidno je, da smo v procesu adsorpcije pri relativni zračni vlažnosti 87 % (zgornje kvazilinearno območje) dosegli povprečno ravnovesno vlažnost 17,8 %, v procesu desorpcije pa 19,1 % ravnovesno vlažnost. Pri relativni zračni vlažnosti 33 % (spodnje kvazilinearno območje) pa smo v procesu adsorpcije dosegli 8,4 % ravnovesno vlažnost lesa in desorpcije 9,6 % ravnovesno vlažnost.

S starostjo bi se po pričakovanju dimenzijska stabilnost lesa morala izboljševati. V preglednici 6, so predstavljeni posamezni kazalniki smrekovega lesa stropne konstrukcije naših preizkušancev.

Preglednica 7: Kazalniki dimenzijske stabilnosti lesa stropne konstrukcije.

	q_R [%/‰]	q_T [%/‰]	$q_T - q_R$ [%/‰]	q_T / q_R	h_R [%/‰]	h_T [%/‰]	$h_T - h_R$ [%/‰]	s [%/‰]
Št.vzorcev	20	20	20	20	20	20	20	20
Povprečje	0,13	0,30	0,17	2,23	0,023	0,052	0,029	0,17
Min.	0,10	0,25	0,13	1,78	0,017	0,043	0,023	0,16
Maks.	0,18	0,38	0,23	2,69	0,031	0,062	0,038	0,19
Standardni odklon	0,016	0,030	0,026	0,238	0,003	0,006	0,004	0,010
Koeficient variacije [%]	12,60	10,38	15,58	10,24	13,69	11,27	14,92	6,18

Diferencialni nabrek v radialni smeri (q_R) se giblje od 0,10 do 0,18 %/%, povprečna vrednost pa znaša **0,13 %/**%.

Povprečni diferencialni nabrek v tangencialni smeri (q_T) **0,30 %/**%, minimalna vrednost je bila 0,25 %/%, medtem ko je maksimalna znašala 0,38 %/%. Če primerjamo povprečno vrednost s kriteriji v Preglednici 3, jo lahko ocenimo kot **normalno**, saj se nahaja med 0,3 – 0,4 %/

Največja razlika med tangencialnim in radialnim diferencialnim nabrekom ($q_T - q_R$) je znašala **0,23 %/**%, minimalna razlika je znašala 0,13%/%, povprečna vrednost pa je bila 0,17%/%. Tudi ta kazalnik lahko ocenimo kot **normalnega**.

Anizotropija lesa (q_T/q_R) se nahaja v območju 1,78 do 2,69, povprečna anizotropija pa znaša 2,23. To pomeni **neugoden** kriterij za dimenzijsko stabilnost.

Najnižji koeficient nabreka v radialni smeri (h_R) je znašal 0,017 %/%, najvišji pa 0,031. Povprečna vrednost koeficienta nabreka je znašala **0,023 %/**%.

V tangencialni smeri je znašal najnižja vrednost koeficienta nabreka (h_T) 0,043 %/%, maksimalna vrednost pa je 0,062 %/%. Povprečna vrednost je znašala **0,052 %/**%, zato lahko uvrstimo ta kazalnik med **normalne**.

Razlika koeficientov nabreka ($h_T - h_R$) je znašala od 0,023 do 0,038 %/%, povprečna vrednost pa je bila **0,029 %/**%. Glede na kriterije v preglednici 3 lahko kazalnik ocenimo kot **ugoden**.

Sorpcijski koeficient (s) je v povprečju znašal **0,17 %/**%, kar glede na kriterije za ocenitev dimenzijske stabilnosti (preglednica 3) pomeni, da je sorptivnost ocenjena kot **neugodna**.

4.3 MEHANSKE LASTNOSTI LESA STROPNE KONSTRUKCIJE

Vse mehanske teste smo opravili na še ne razgrajenem smrekovem lesu, ki smo ga odvzeli z delno porušene stropne konstrukcije. Zaradi močne degradacije lesa, ki je bila posledica biotskih in abiotskih dejavnikov smo morala vzorce pazljivo izbrati, s težavo pa smo izdelali številčno kvalitetne preizkušance.

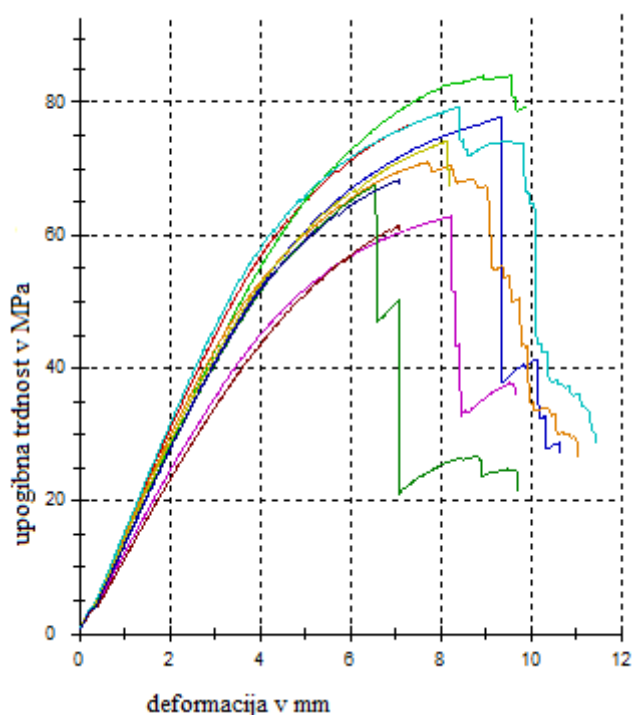
Pri 3-točkovnem upogibnem testiranju preizkušancev z ravnovesno vlažnostjo ≈ 12 %, so bile upogibne trdnosti od 61,5 MPa do 84 MPa. Povprečna vrednost upogibne trdnosti preizkušancev smrekovega lesa je znaša **72,3 MPa**. (Pregl. 8 in Slika 21)

Maksimalna potrebna sila za porušitev lesa v 3-točkovnem upogibnem poskusu je od 1160 N do 1560 N. Povprečna vrednost je 1364 N (Pregl. 8 in Slika 21).

Modul elastičnosti pri 3-točkovnem upogibnem poskusu je od 7,7 GPa do 10,6 GPa. Povprečni upogibni modul elastičnosti je bil **9,4 GPa**. (Pregl. 8 in Slika 21)

Preglednica 8: Upogibne lastnosti smrekovega lesa (F_{maks} – sila porušitve, σ_b – upogibna trdnost, E_b – modul elastičnosti, ρ_u – gostota lesa pri $\approx 12\%$ vlažnosti lesa).

	F_{maks} [N]	σ_b [MPa]	E_b [GPa]	ρ_u [kg/m ³]
Št. Vzorcev	10	10	10	10
Povprečje	1364	72,3	9,4	429
Min.	1160	61,5	7,7	386
Maks	1560	84	10,6	473
Standardni odklon	134,4	7,3	0,9	24,3
Koeficient variacije [%]	9,86	10,1	9,7	5,7



Slika 21: Napetostno – deformacijski diagram upogibnega poskusa smrekovega lesa stropne konstrukcije.

Poleg upogibnih lastnosti spadajo tlačne lastnosti lesa med največkrat preiskovane in predstavljene v literaturi na področju mehanskega testiranja lesa.

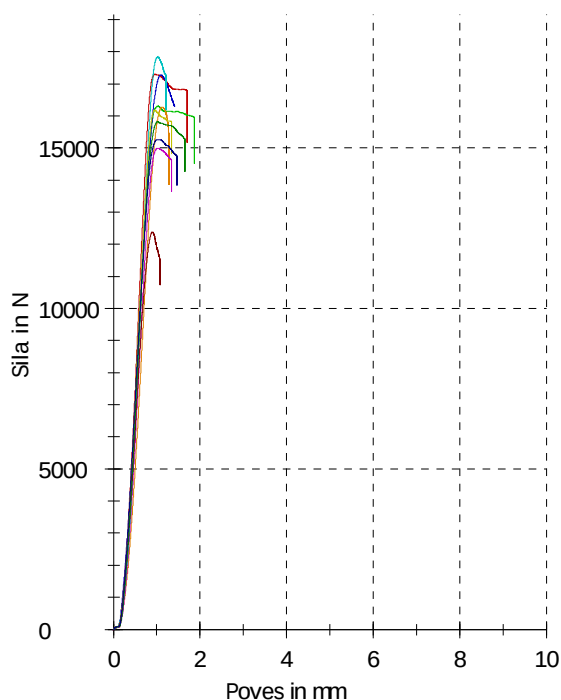
Tlačna trdnost smrekovega lesa vzdolžno z vlakni pri vlažnosti približno 12 % so bile od 37,08 MPa do 44,56 MPa. Povprečna vrednost pa je **40,5 MPa**. (Preglednica 9 in Slika 22)

Povprečna potrebna sila za porušitev tlačnih vzorcev je znašala **16320,9 N** (Preglednica 9 in Slika 22).

Modul elastičnosti pri tlačnem poizkusu je znašal od 10,4 GPa do 13,1 GPa, povprečna vrednost pa je bila **12,4 GPa**. (Preglednica 9 in Slika 22)

Preglednica 9: Tlačne lastnosti smrekovega lesa (F_{maks} – sila porušitve, $\sigma_{\square}$ – tlačna trdnost, E – modul elastičnosti, ρ_u – gostota lesa pri $\approx 12\%$ vlažnosti lesa).

	F_{maks} [N]	$\sigma_{\square}$ [MPa]	E [GPa]	ρ_u [kg/m ³]
Št. Vzorcev	10	10	10	10
Povprečje	16320,9	40,5	12,04	437
Min.	14997	37,08	10,4	384
Maks	17841	44,56	13,1	495
Standardni odklon	909,27	2,37	0,93	33,79
Koeficient variacije [%]	5,57	5,86	7,72	7,73



Slika 22: Napetostno-deformacijski diagram tlačnega poskusa smrekovega lesa vzporedno z vlakni stropne konstrukcije.

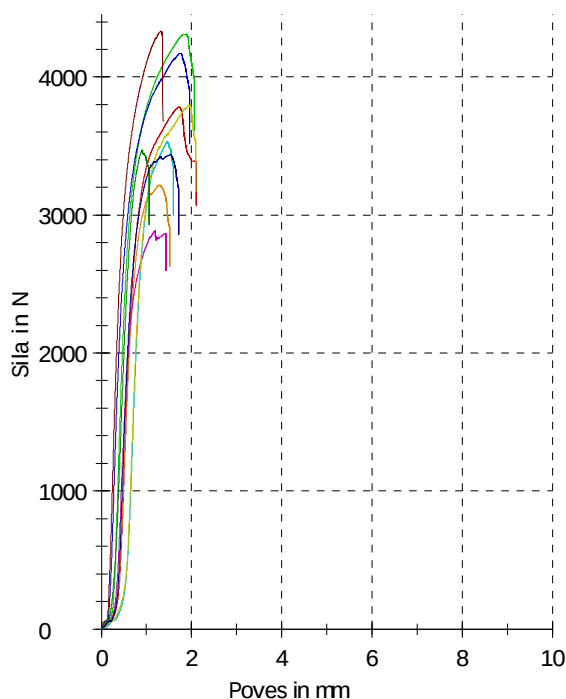
Strižne poskuse smo izvajali na preizkušancih v vzdolžno-radialni ravnini.

Strižna trdnost smrekovega lesa pri vlažnosti $u \approx 12\%$, vzporedno z vlakni v LR strižni ravnini, je od 7,29 MPa do 11,03 MPa. Povprečna vrednost strižne trdnosti je **8,62 MPa**. (Pregl. 9 in Slika 24).

Strižni modul smrekovega lesa znaša v povprečju **3,2 GPa**, pri tem je bila najnižja vrednost 2,7 GPa, najvišja pa 4,3 GPa. (Pregl 9 in Slika 24).

Preglednica 10: Strižna trdnost smrekovega lesa vzporedno z vlakni (F_{maks} – sila porušitve, $\tau_{\square}$ – tlačna trdnost, G – strižni modul elastičnosti, ρ_u – gostota lesa pri $\approx 12\%$ vlažnosti lesa).

	F_{maks} [N]	$\tau_{\square}$ [MPa]	G [GPa]	ρ_u [kg/m ³]
Št. Vzorcev	10	10	10	10
Povprečje	3694,4	8,62	3,2	429
Min.	2888	7,29	2,7	378
Maks	4332	11,03	4,3	474
Standardni odklon	477,62	1,24	0,57	26,75
Koeficient variacije [%]	12,93	14,34	17,93	6,23



Slika 23: Napetostno-deformacijski diagram pri strižnem poskusu smrekovega lesa vzporedno z vlakni stropne konstrukcije.

4.3.1 Nedestruktivno določen dinamični modul elastičnosti

Nedestruktivno testiranje pridobiva na pomenu, gre za hitre in ponovljive metode. Preizkušance, ki smo jih v upogibnem preizkusu obremenjevali do porušitve, smo predhodno zaradi primerjave metod uporabili pri testiranju dinamičnega modula elastičnosti v vzdolžni in prečni smeri. Dinamični modul smo določali z metodo frekvenčnega odziva.

Povprečna vrednost dinamičnega modula elastičnosti v vzdolžni smeri je bila **12,3 GPa**. Najnižja vrednost dinamičnega modula elastičnosti smrekovih preizkušancev v normalni laboratorijski klimi je bila 10 MPa. Najvišja vrednost pa je bila 14,3 GPa. (Pregl. 10)

Prečno vzbujanje preizkušancev smo izvajali v tangencialni smeri na radialno površino. Povprečna vrednost dinamičnega elastičnega modula v prečni smeri je bila nižja kot pri vzdolžnem vzbujanju in je znašala **10,9 GPa**. Najnižja vrednost dinamičnega elastičnega modula v prečni smeri je bila 8,8 GPa najvišja pa 12,6 GPa. Pričakovali smo nižje vrednosti, kar se je pri testiranju tudi potrdilo (Pregl. 11).

Preglednica 11: Kazalniki akustičnih lastnosti smrekovih preizkušancev pridobljeni z merjenjem fizikalnih parametrov v vzdolžni smeri (ρu – gostota, f – lastna frekvenca, v – hitrost zvoka, E – modul elastičnosti).

Vzorec	ρu [kg/m ³]	f [s ⁻¹]	v [m/s]	E [GPa]
11L	445	9424	5654	14,2
12L	473	8267	4960	11,6
21L	428	8873	5323	12,1
22L	407	9743	5845	13,9
23L	386	8757	5254	10,6
31L	441	9438	5662	14,1
32L	438	8943	5365	12,6
41L	437	8007	4804	10
42L	430	8777	5266	11,9
43L	406	8967	5380	11,7
Povp.				12,3
Min.				10,0
Maks.				14,2
St.odklon				1,44
Koeficient Variacije [%]				11,75

Prečno vzbujanje preizkušancev smo izvajali v tangencialni smeri na radialno površino preizkušancev.

Povprečna vrednost dinamičnega modula elastičnosti v prečni smeri je bila nižja kot pri vzdolžnem vzbujanju in je znašala **10,9 GPa**. Najnižja vrednost dinamičnega modula elastičnosti v prečni smeri je bila sicer 8,8 GPa, najvišja pa 12,6 GPa. Zaradi kompleksnega napetostnega stanja pri prečnem nihanju preizkušancev, kjer so prisotne natezne, tlačne in strižne napetosti, smo pričakovali nižje vrednosti modula elastičnosti pri tem preizkusu. To se je pri testiranju tudi potrdilo (preglednica 12).

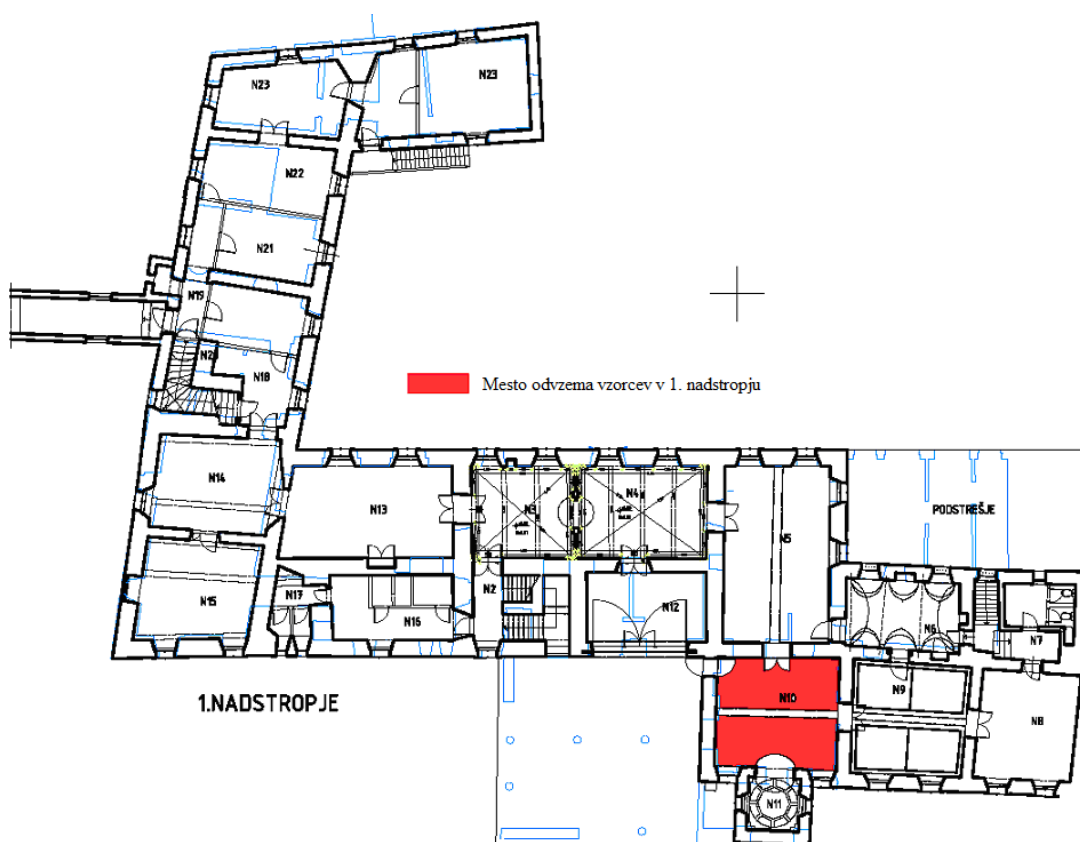
Preglednica 12: Kazalniki akustičnih lastnosti smrekovih preizkušancev, pridobljenih z merjenjem fizikalnih parametrov v prečni smeri (ρ_u – gostota, f – lastna frekvenca, $\tan \delta$ – dušenje zvoka, E – modul elastičnosti).

Vzorec	ρ_u [kg/m ³]	f [s ⁻¹]	$\tan \delta$	E [GPa]
11T	445	1195	0,014967	11,8
12T	473	1090	0,012736	11,0
21T	428	1145	0,016044	10,7
22T	407	1237	0,029516	12,1
23T	386	1124	0,019368	9,4
31T	441	1214	0,014193	12,6
32T	438	1160	0,011823	11,1
41T	437	1025	0,022849	8,8
42T	430	1152	0,01736	10,8
43T	406	1177	0,016622	10,8
Povp.				10,9
Min.				8,8
Maks.				12,6
St.odklon				1,15
Koefficient Variacije [%]				10,54

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

Na smrekovem lesu, ki smo ga odvzeli v prvem nadstropju iz delno porušene stropne konstrukcije v Graščini Preddvor (slika 24), smo opravili izbrane mehansko-fizikalne raziskave. Z nedestruktivno metodo frekvenčnega odziva smo raziskovali elastične lastnosti odvzetega lesa in ocenili možnost uporabe nedestruktivnih metod pri konstrukcijskem lesu. Zaradi natančnejše določitve starosti lesene stropne konstrukcije smo na odvzetih vzorcih izvedli dendrokronološko datiranje in s tem omogočili natančnejšo določitev starosti stropne konstrukcije.



Slika 24: Tloris 1. nadstropja z označenim mestom odvzema posameznih delov stropne konstrukcije (Konzervatorski načrt Graščine Preddvor, 2013).

5.1.1 Datiranje stropne konstrukcije graščine Preddvor

Kot pravi dr. Nika Leben, konzervatorska svetnica, naj bi bila starost stropne konstrukcije približno 300 let. Zaradi natančnejše določitve starosti smo se odločili za dendrokronološko datiranje vzorcev, ki je pokazalo, da so nekoliko mlajši. Za statistično

dovolj zanesljivo datiranje potrebujemo kakovostne vzorce, ki imajo na prečnem kolutu vsaj 40 branik. Že temu pogoju smo s težavo zadostili, saj je v našem primeru šlo za masivno leseno stropno konstrukcijo, ki je izdelana iz klanih polovic lesenih debel (nem. Dippelbaumdecke). (Sliki 25 in 26) Pri tej izvedbi si namreč želimo čim manjši zadostni premer debla, saj se s tem pri izdelavi izognemo nepotrebnemu dodatnemu delu. Pri sami izdelavi kolotov prečnih prereзов pa smo naleteli na dodaten problem, saj so bili vsi stropniki na zunanjem delu precej degradirani zaradi napada hišnega kozlička, kar je delo še dodatno otežilo.



Slika 25: Izgled stropne konstrukcije v Graščini Preddvor (levo). Prečni prerez smrekovega stropnika odvzetega v Graščini Preddvor (desno).



Slika 26: Prečni prerez odvzetih stropnikov s stropne konstrukcije z značilnimi izletnimi odprtinami hišnega kozlička v predelu beljave (levo in desno).

Za razlago starosti konstrukcije smo morali v našem primeru poiskati tudi dodatne pisne vire. V Arhivu Republike Slovenije nismo našli nobenega pisnega dokumenta, ki bi nam pomagal k preverbi datiranja lesa. V Konservatorskem načrtu, ki je bil izdelan za Graščino Preddvor, pa smo v poglavju o zgodovinskem delu lastnikov zasledili podatek, da je okrog leta 1855 graščina dobila novega lastnika. Ta podatek je dodatna potrditev naših ugotovitev o starosti lesa. Novi lastniki namreč običajno poskrbijo za nova dela na stavbah.

Les, ki se uporablja za stavbne konstrukcije, pa običajno ni svež in je od sečnje do vgradnje minilo vsaj nekaj časa. V preteklosti tudi ni bilo nič neobičajnega, da so posamezne dele starejših konstrukcij ponovno uporabili v novo grajenih lesenih konstrukcijah. Pa tudi cena lesa v tistem času ni bila zanemarljiva. Tako lahko povsem pritrdimo sicer širšemu obdobju datiranja posameznih lesenih elementov. Lißner in Rug (2000) navajata, da so se večinsko v obdobju od 1841 do 1918 uporabljale enake izvedbe stropnih konstrukcij, kot smo jih raziskovali. Po letu 1868 so omenjeno izvedbo stropa s peščenim nasutjem na podstrešju uporabljali kot protipožarno zaščito. Z vsemi dodatnimi informacijami lahko tako potrdimo datirano obdobje.

5.1.2 Fizikalne lastnosti lesa stropne konstrukcije

Za osnovne odnose pri lesu iglavcev je znano, da je gostota lesa nižja pri širših branikah. Gostota kasnega lesa je lahko do 3-krat višja od ranega. Gostota je ena najpomembnejših lastnosti za predvidevanje ostalih mehansko-fizikalnih lastnosti. Vpliv vlažnosti smo z določanjem v znanih klimatskih pogojih eliminirali. Višinska porazdelitev gostotnega profila je za smreko običajno precej enakomerna, razen za hlod koreničnika, pri katerem je gostota nekoliko višja.

Kambij tvori les, ki odvisno od časa nastanka izkazuje različne fizikalne, mehanske in kemijske lastnosti. Mladostno obdobje običajno traja od 10 do 20 let kambijeve aktivnosti, lahko pa le 5 ali pa celo 60 (Torelli in sod., 1998). V adultnem območju se fizikalno-mehanske lastnosti normalizirajo, zmanjša se širina branik, poveča se gostota.

Pri izdelavi preizkušancev smo prvotno zamisel, da bi izdelali vzorce za juvenilno in adultno območje, morali opustiti. Kot smo že omenili, je bil periferni del precej uničen in neuporaben. Tako vsi naši vzorci obravnavajo les kot celoto po prerezu in pripadajo juvenilnemu območju.

Wagenführ (1996) navaja povprečno gostoto navadne smreke v absolutno suhem stanju 430 kg/m^3 , ter povprečno vrednost gostote v zračno-suhem stanju 470 kg/m^3 .

Gostota smrekovega lesa v absolutno suhem stanju za zgodnje juvenilno obdobje je 384 kg/m^3 , srednje juvenilno obdobje je 405 kg/m^3 in pozno juvenilno obdobje je 414 kg/m^3 (Straže in Gorišek, 2000). Gryc in sod. (2011) navajajo podobne povprečne vrednosti za gostoto juvenilnega lesa 387 kg/m^3 , v adultnem območju je bila gostota 488 kg/m^3 . Po istih avtorjih je bila gostota lesa v zračno-suhem stanju v juvenilnem območju 410 kg/m^3 , v adultnem pa 515 kg/m^3 . Vidimo, da gostota značilno narašča iz juvenilnega območja proti periferiji in je tudi krajevno pogojena.

Po raziskavah Holza (1981) je bila gostota smrekovine v absolutno suhem stanju po 180 letih uporabe 387 kg/m^3 . Pri proučevanju gostote različnih starostnih skupin uporabe (od 90 do 320 let) je bila gostota smrekovine 445 kg/m^3 , gostota recentnega lesa pa 402 kg/m^3 (Sonderegger, 2015). Schultz (1984) poroča o precej višji gostoti v absolutno suhem stanju, ki je znašala 500 kg/m^3 na smrekovem lesu, ki je bil v uporabi 300 let.

Povprečna gostota naših preizkušancev v absolutno suhem stanju je bila 398 kg/m^3 . Koeficient variacije, ki je merilo razpršenosti verjetnostne porazdelitve, je bil 5,8%. Povprečna gostota zračno suhih preizkušancev je bila 429 kg/m^3 . Predstavljeni podatki nam kažejo precejšnjo podobnost s primerljivimi podatki glede na enako starostno skupino. Nizek koeficient variacije nam nakazuje manjšo razpršenost vrednosti okoli aritmetične sredine. Povprečne vrednosti gostote v absolutno suhem stanju naših preizkušancev nakazujejo nižje vrednosti od podobnih preizkušancev, ki še niso bili v uporabi. Nižja gostota je gotovo odraz encimatskih razgradnih procesov, ki so nastali zaradi biološke okužbe, in juvenilnega območja, iz katerega so naši preizkušanci. Vizualna ocena vzorca 2/3, ki je imel najnižjo gostoto 386 kg/m^3 v zračno suhem stanju, je pokazala, da je imel preizkušanec zelo široke branike z zelo pičlim kasnim lesom (prevladuje prehodni les). Z veliko gotovostjo pa lahko tudi trdimo, da vsi stropniki, iz katerih smo pridobili preizkušance, ne pripadajo koreničniku, pri katerem pričakujemo malo višje gostote.

Ravnovesje je stanje, ki ga les doseže v določenih klimatskih pogojih. Ravnovesna vlažnost, ki jo zasledimo v literaturi, velja za les kot celoto. Podobno je z navajanjem gostote ali trdnostnih lastnosti. Naši vzorci pa večinsko pripadajo juvenilnemu območju.

Povprečne vrednosti ravnovesne vlažnosti naših preizkušancev so bile v zgornjem kvazilinearnem območju ($\varphi = 87\%$), v procesu adsorpcije 17,8% in v procesu desorpcije 19,1%. Na spodnji meji kvazilinearnega območja ($\varphi = 33\%$) pa so bile vrednosti v procesu adsorpcije 8,4% in v procesu desorpcije 9,6%.

Gorišek (1992) za smrekovino navaja ravnovesno vlažnost v procesu desorpcije 19,4 % in 16,1% v procesu adsorpcije pri relativni zračni vlažnosti 88%. Pri relativni zračni vlažnosti 33% pa navaja v procesu desorpcije doseženo ravnovesno vlažnosti 7,4% in adsorpcije 6,5%. Klinc (1995) za smrekovino pri 88% relativni zračni vlažnosti navaja ravnovesno vlažnost 20,5, pri 33% relativni vlažnosti pa je les dosegel ravnovesno vlažnost 8,3 %. Niemz in Sonderegger (2007) navajata za isto drevesno vrsto pri relativni zračni vlažnosti 85% dosežene ravnovesne vlažnosti lesa v procesu desorpcije 19,16% in v procesu adsorpcije 17,46 %. Pri 35% relativni zračni vlažnosti pa navajata za proces desorpcije 8,26% ravnovesno vlažnost in v procesu adsorpcije 6,63% ravnovesno vlažnost lesa. Sonderegger in sodelavci (2015) za star les v uporabi med 90 in 320 leti ugotavljajo nižje vrednosti; pri 35% relativne zračne vlažnosti so preizkušanci dosegli $6,5 \pm 0,6 \%$ ravnovesne vlažnosti, pri 80 % relativne zračne vlažnosti pa $13,9 \pm 0,8 \%$ ravnovesne vlažnosti. Ravnovesna vlažnost starega lesa je bila nekoliko višja od neuporabljenega.

Pri naših preizkušancih je bila ravnovesna vlažnost v vseh primerih v procesu desorpcije višja kot v adsorpciji. Pri višji relativni zračni vlažnosti je opazna višja razlika med adsorpcijo in desorpcijo, kar je podobno, kot navajata Gorišek (1992) in Unger s sodelavci (2000). Nekoliko višje ravnovesne vlažnosti naših preizkušancev lahko pripišemo celuloznemu in hemiceluloznemu delu ter razbitju kristalne celulozne strukture, ki vpliva na višjo higroskopnost.

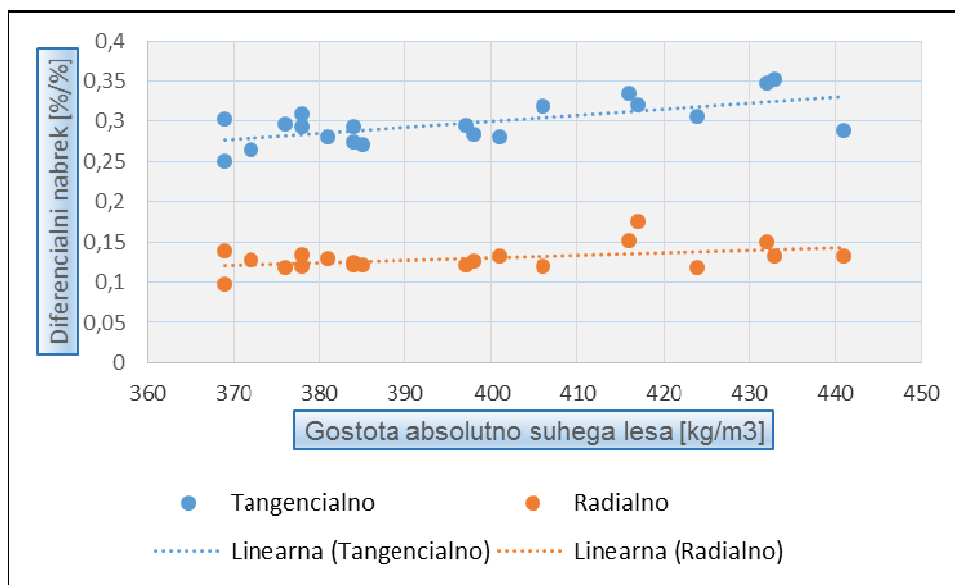
V neogrevanih prostorih težko preprečujemo dimenzijske spremembe lesenih konstrukcij, ki so posledica nihanj klimatskih pogojev. Najlažje te dimenzijske spremembe omilimo s

pravilno ravnovesno vlažnostjo lesa, ki bo ustrezala klimatskim razmeram okolice, v kateri bo ta les vgrajen.

Kazalniki dimenzijske stabilnosti lesa nam pomagajo ovrednotiti, kako se bo les kot higroskopen material obnašal v spreminjajoči se klimi. Diferencialni nabrek v radialni smeri je naraščal z naraščajočo gostoto, razvidno pa je, da je bilo to naraščanje višje v tangencialni smeri (slika 29).

Glede na merila, ki so jih predlagali Noack in sodelavci. (1973) ter Torelli in Čufar (1983), naši preizkušanci izkazujejo **normalne** vrednosti v diferencialnem nabreku, v tangencialni smeri vrednost znaša 0,30%/%. Tudi razliko med vrednostima diferencialnega nabreka v tangencialni in radialni smeri smo ocenili kot **normalno**, saj je znašala 0,23%/%. Vrednost anizotropije preizkušancev smo ocenili kot **neugodno**, znašala je 2,23. Vrednost koeficienta nabreka v tangencialni smeri smo ocenili kot **normalno**, znašala je 0,0052 %/%. Razliko med vrednostima koeficienta nabreka pa smo ocenili kot **ugodno**, njegova vrednost je bila 0,0029 %/%. **Naugodna** pa je bila vrednost sorpcijskega koeficienta (0,17 %/%).

Gorišek (1992) za smrekovino navaja diferencialni nabrek v tangencialni smeri vrednost 0,35 %/%, v radialni smeri pa 0,17 %/%. Anizotropija je znašala 2,04. Koeficient nabrekanja v tangencialni smeri je bil 0,0086 %/ in v radialni smeri 0,034 %/%. Sorpcijski koeficient pa je znašal 0,18.



Slika 27: Odvisnost diferencialnega nabreka od gostote v absolutno suhem stanju v tangencialni in radialni smeri preizkušancev odvzetih s stropne konstrukcije.

Kránitzeva (2014) za diferencialno nabrekanje navaja vrednost 0,309 %/%, za isto starostno obdobje, 150 let. Diferencialno nabrekanje v radialni smeri je bilo 0,175 %/%. Podatki za približno isto starostno obdobje so precej primerljivi z našimi.

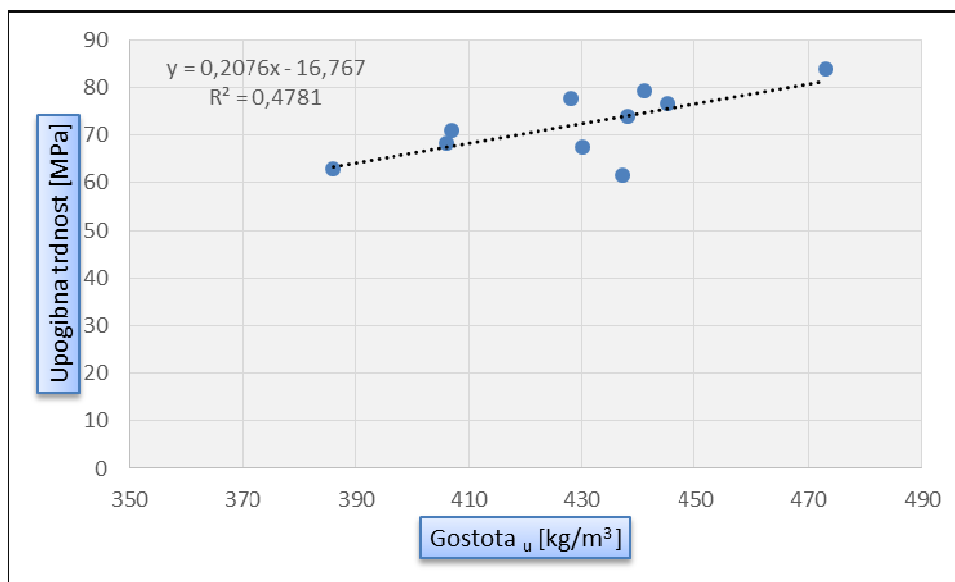
Gostota lesa je v visoki povezavi z nabrekanjem. Različno je tudi nabrekanje ranega in kasnega lesa, prav zaradi gostote. Največji vpliv na dimenzijske spremembe lesa imajo tako gostota kot tudi kemijski gradniki celične stene.

Z vidika stabilnosti imata neugodne vrednosti anizotropija in sorpcijski koeficient. Neugodna vrednost anizotropije nakazuje slabo oblikovno stabilnost odvzetega lesa s stropne konstrukcije. Sorpcijski koeficient s svojo vrednostjo 0,17 % se nahaja na meji med normalno in neugodno vrednostjo. Višje so vrednosti, bolj je les higroskopen. S staranjem pričakujemo, da je les bolj stabilen, predvidevamo lahko, da do tega pride v višji starosti uporabe, kot so bili naši vzorci.

5.1.3 Mehanske lastnosti lesa stropne konstrukcije

Na odvzetih preizkušancih lesa stropne konstrukcije smo raziskovali upogibno trdnost in modul elastičnosti, tlačno trdnost vzporedno z vlakni in strižno trdnost na vzdolžno-radialni ploskvi (LR).

Gostota je eden glavnih kazalcev mehanskih lastnosti lesa. Na upogibno trdnost pa ima velik vpliv dolžina vlaken, mikrofibrilarni kot, kot tudi vsebnost celuloze in z njo povezana stopnja kristaliničnosti.



Slika 28: Odvisnost upogibne trdnosti od gostote zračno suhega lesa stropne konstrukcije.

Povprečna vrednost upogibne trdnosti naših preizkušancev s stropne konstrukcije je bila 72,3 MPa, pri čemer je bila gostota vzorcev 429 kg/m³. Zveza med gostoto in upogibno trdnostjo je značilno linearna (slika 30). Determinacijski koeficient je bil 48 %. To pojasnjuje znano odvisnost trdnosti od gostote.

Wagenführ (1996) in nemški standard DIN 68364 navajata povprečne vrednosti upogibne trdnosti za smrekovino, ki še ni bila v uporabi 78 MPa. Straže in Gorišek (2000) sta juvenilno območje razdelila na tri starostne skupine: zgodnjo, srednjo in pozno. Povprečna vrednost upogibne trdnosti juvenilnega območja je bila 74,3 MPa. Sonderegger in sodelavci. (2015) navajajo upogibne trdnosti za svež les v vrednosti $75,6 \pm 9,5$ MPa. Za les, ki je bil v uporabi od 120 do 150 let, so navedli vrednost upogibne trdnosti $81,2 \pm 9,6$ MPa.

Glede na juvenilno območje, iz katerega smo izdelali naše preizkušance, lahko trdimo, da je njihova upogibna trdnost relativno visoka glede na primerljive podatke iz literature, v kateri so vrednosti navedene večinoma za neuporabljen les. Vpliv staranja ne izkazuje večjega vpliva na upogibno trdnost. Večji je vpliv gostote, ki je za juvenilno območje značilno nižji. Prelomi pri upogibnem preizkusu večinoma izkazujejo krhke kratkovlaknate prelome (slika 31 in 32). Juvenilnost se zlasti pri iglavcih kaže v krajših aksialnih traheidah (Torelli in sod., 1998). Vrednost upogibne trdnosti lesa stropne konstrukcije, ki je le nekaj nižja od primerljivih vrednosti za les, ki še ni bil vgrajen, kaže, da vplivi na kemijsko sestavo in mikroskopsko zgradbo niso bili izraziti.



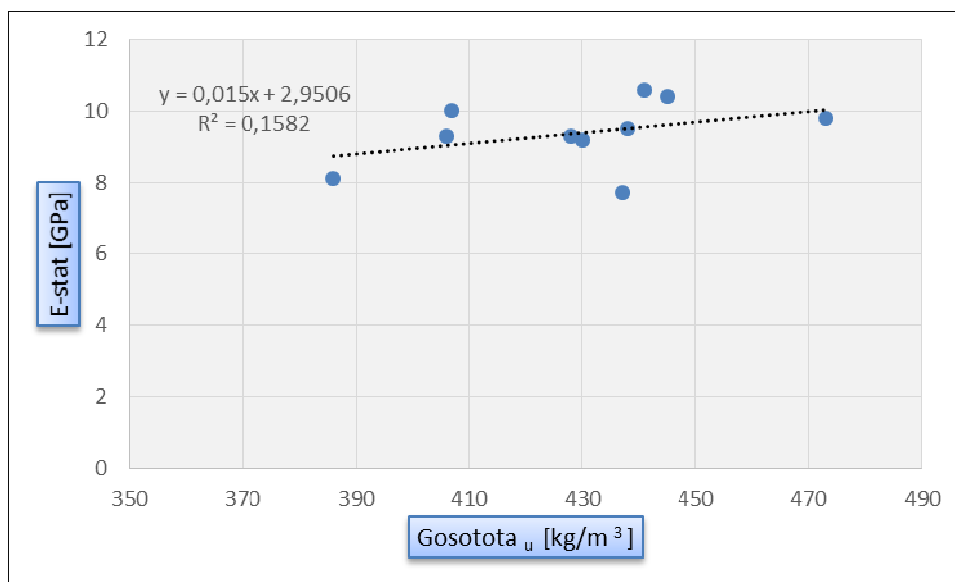
Slika 29: Prikaz prelomov preizkušancev odvzetih s stropne konstrukcije pri upogibnem preizkusu.



Slika 30: Prikaz prelomov preizkušancev odvzetih s stropne konstrukcije pri upogibnem preizkusu.

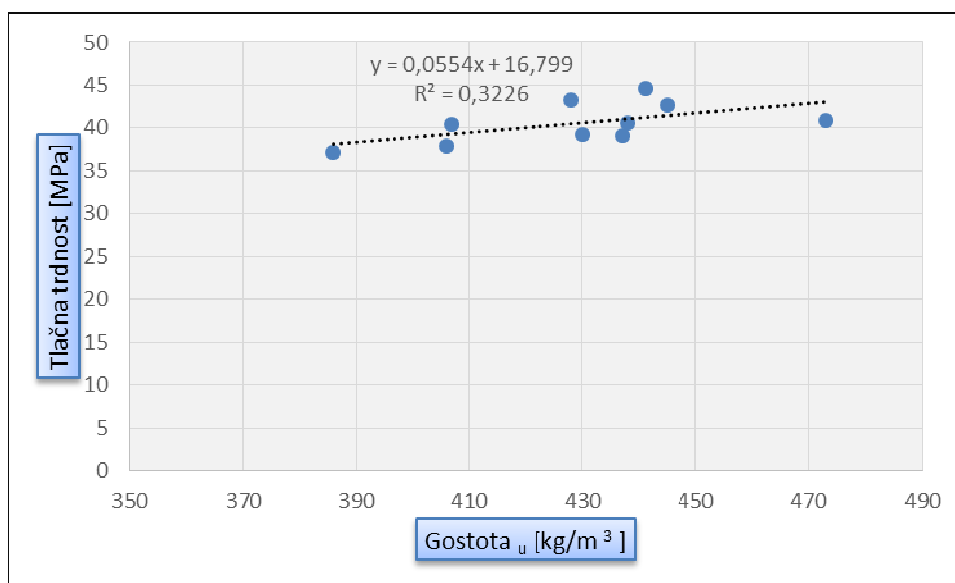
Povprečna vrednost modula elastičnosti iz upogiba je 11 GPa (Wagenführ, 1996). Enako vrednost navaja tudi nemški standard DIN 68364. Povprečna vrednost modula elastičnosti v juvenilnem območju znaša 11,23 GPa (Straže in Gorišek, 2000). Vse navedene vrednosti iz literature predstavljajo elastični modul iz upogiba na lesu, ki ni bil v uporabi.

Modul elastičnosti lesa stropne konstrukcije, ki smo ga določili pri upogibnem preizkusu, je bil 9,4 GPa (Slika 33). Iz regresijske analize izhaja zelo nizek determinacijski koeficient ujemanja 0,16%. Povprečna gostota zračno suhih preizkušancev je bila 429 kg/m³. Vrednost lignina značilno vpliva na povečanje togosti, ki pa se poveča šele v daljšem časovnem obdobju oziroma s starostjo lesa v uporabi. Najznačilnejši vpliv na modul elastičnosti ima mikrofibrilarni kot. Vrednost modula elastičnosti pada z naraščanjem mikrofibrilarnega kota. Tako lahko naše nižje vrednosti pripišemo krajšim vlaknom v juvenilnem lesu in večjemu mikrofibrilarnemu kotu. Les s širšimi branikami običajno izkazuje tudi nižje trdnostne lastnosti. Gotovo pa ima v tem starostnem obdobju določen vpliv tudi začetna dekompozicija gradnikov celične stene.



Slika 31: Odvisnost statičnega modula elastičnosti iz upogiba in gostote zračno suhega lesa stopne konstrukcije.

Preizkus tlačne trdnosti smo na naših preizkušancih opravili vzporedno s potekom vlaken. Povprečna tlačna trdnost vzporedno z vlakni je pri tem bila 40,5 MPa, pokazala pa se je značilna odvisnost od gostote (Slika 34). Gostota zračno suhih preizkušancev je bila 437 kg/m³.



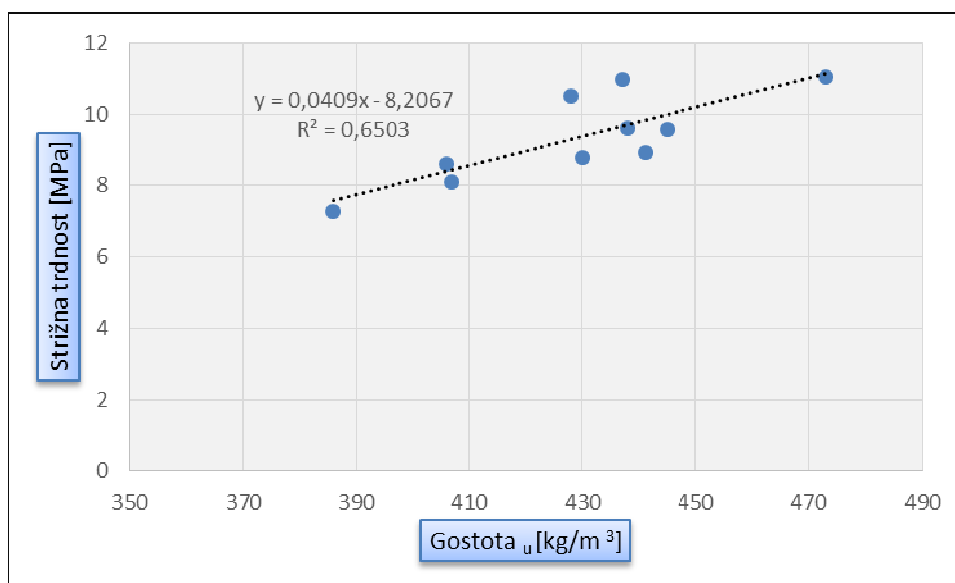
Slika 34: Odvisnost tlačne trdnosti vzporedno z vlakni od gostote zračno suhega lesa stropne konstrukcije.

Wagenführ (1996) navaja povprečne vrednosti 50 MPa. Nemški standard DIN 68364 navaja za smrekov les tlačno trdnost 45 MPa. Povprečna vrednost za tlačno trdnost v celotnem juvenilnem območju je 39,4 MPa (Straže in Gorišek, 2000). Vse navedene vrednosti so bile izmerjene na lesu, ki ni bil v uporabi.

Tudi tlačna trdnost vzporedno z vlakni izkazuje linearno povezavo z gostoto. Vendar nizek determinacijski koeficient nakazuje, da ne moremo tlačne trdnosti pojasniti samo z vplivom gostote. Naša povprečna vrednost je bila primerljiva z vrednostjo, ki jo navajata Straže in Gorišek (2010) za juvenilno območje. Je pa nižja od drugih navedenih v literaturi. V našem primeru juvenilno območje lahko razložimo s tipičnimi strukturnimi značilnostmi, pomemben vpliv na tlačno trdnost poleg gostote kaže predvsem mikrofibrilarni kot.

Strižna trdnost je redko predstavljena v literaturi. Najnižje vrednosti strižne trdnosti dosežemo v tangencialni ravnini pri pravokotnem strižnem obremenjevanju na vlakna. Večina raziskav trdnostnih lastnosti poteka v upogibni in tlačni smeri. Zato je primerjava težje izvedljiva. Wagenführ (1996) navaja vrednost za povprečno strižno trdnost smrekovega lesa 6,7 MPa. Nemški standard DIN 68364 navaja strižno trdnost za smrekov les 10 MPa. Görlacher in Kromer (1991) navajata povprečno vrednost za strižno trdnost za les strešne konstrukcije 6,3 MPa. Žal ni zapisana starost strešne konstrukcije.

Povprečna vrednost strižne trdnosti naših preizkušancev v LR ravnini je bila 8,62 MPa. Povprečna gostota zračno suhega lesa je bila 429 kg/m³.



Slika 35: Odvisnost strižne trdnosti v LR ravnini od gostote zračno suhega lesa stropne konstrukcije.

Odvisnost med gostoto in strižno trdnostjo je v našem primeru značilno linearna. Determinacijski koeficient je precej visok, 65 % (Slika 35). Predstavlja visoko soodvisnost gostote in strižne trdnosti. Vrednost strižne trdnosti naših preizkušancev je bila višja, kot jo navajata Wagenführ (1996) za povprečne vrednosti smrekovega neuporabljenega lesa in Görlacher in Kromer (1991) za star les. Strižna trdnost starega lesa v uporabi ni toliko odvisna od starosti kot je odvisna od gostote. Dejstvo je, da s starostjo gostota lesa pada, tako lahko pričakujemo pri višji starosti tudi precej višji padec strižne trdnosti lesa.

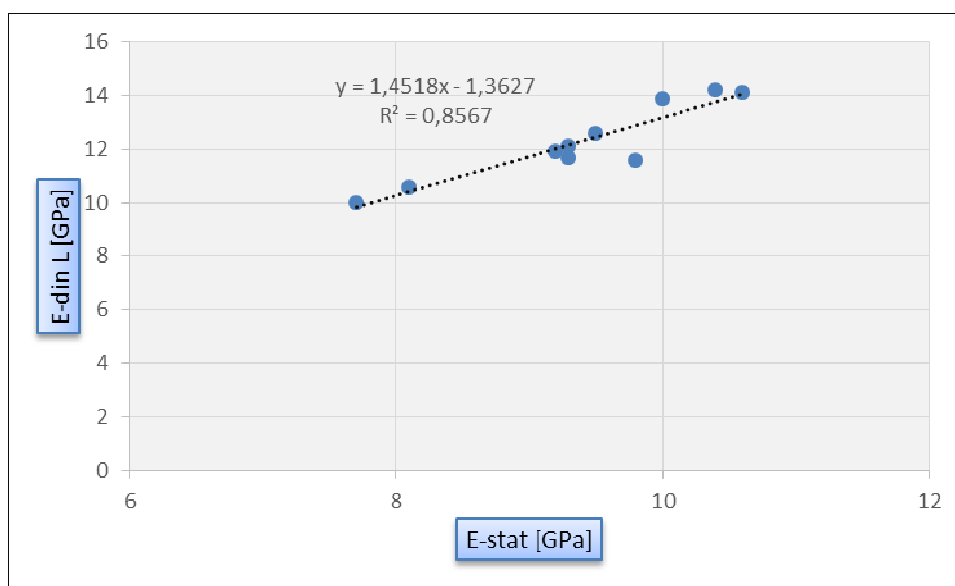
5.1.4 Nedestruktivne metode preizkušanja lesa

Nedestruktivne metode za ugotavljanje elastičnih lastnosti lesa so se v večji meri pričele v praktične namene uporabljati v petdesetih letih prejšnjega stoletja. Njihova uporaba je danes v porastu. Zanje je predvsem značilna možnost večkratne ponovitve meritev na posameznem preizkušancu, saj pri sami izvedbi ne pride do porušitve (uničenja) preizkušanca. Za ugotavljanje dinamičnega elastičnega modula v vzdolžni in prečni smeri smo uporabili metodo z vzbujanjem elastične motnje v preizkušancu oz. metodo frekvenčnega odziva.

Za različne dimenzije vzorcev in klimatskih pogojev je Trop (2014) določal elastične parametre na svežem lesu navadne smreke. Za preizkušance podobnih dimenzij kot so bili naši je določil vrednost dinamičnega modula elastičnosti v vzdolžni smeri 15,2 GPa, v prečni pa je bil dinamični modul elastičnosti 13,5 GPa. Sonderegger in sodelavci (2015), so primerjali različni nedestruktivni metodi, pri kateri so določili dinamični modul elastičnosti iz lastne frekvence in s pomočjo preleta ultrazvoka. Dinamični modul elastičnosti iz lastne frekvence je bil za neuporabljen les $11,000 \text{ MPa} \pm 1570 \text{ MPa}$, za les v uporabi od 120 do 150 let pa $12,700 \text{ MPa} \pm 1490 \text{ MPa}$. Dinamični modul elastičnosti iz ultrazvočnega poskusa je znašal $12,800 \text{ MPa} \pm 1840$ pri neuporabljenem lesu, ter za les v uporabi od 120 do 150 let pa je bil $14,700 \text{ MPa} \pm 1650 \text{ MPa}$. Gostota preizkušancev je bila 411 kg/m^3 , les

v uporabi od 120 do 150 let je imel gostoto 428 kg/m^3 . Pri tem je opazen vpliv gostote, višje vrednosti za les, ki je bil v uporabi ter značilno višje vrednosti dinamičnega elastičnega modula iz ultrazvoka. V literaturi ne zasledimo veliko elastičnih parametrov v prečni smeri, večino podatkov se navaja za vzbujanje v vzdolžni smeri.

Naša vrednost dinamičnega modula elastičnosti v vzdolžni smeri je bila $12,3 \text{ GPa}$. Povprečna vrednost gostote zračno suhega lesa pa je pri tem bila 429 kg/m^3 . Dinamični modul elastičnosti v prečni smeri je znašal $10,9 \text{ GPa}$. Značilno nižjo vrednost smo pričakovali, saj je smrekovina v anatomskem smislu zgrajena v večini iz aksialno usmerjenih traheid. Pri tem višjo zvočno hitrost dosežemo v lesu z daljšimi traheidami, ki pa so bolj značilne za adultni les, manj pa za juvenilno področje. Hitrost zvoka je v pozitivni odvisnosti z gostoto. Izrazito velik vpliv na dinamični elastični modul ima mikrofibrilarni kot. Z večanjem kota se zmanjšuje vrednost dinamičnega modula elastičnosti. Za juvenilno območje je značilen višji mikrofibrilarni kot, zato so skladno s tem pričakovane nižje vrednosti dinamičnega elastičnega modula. Elastični modul iz upogiba in dinamični elastični modul v vzdolžni smeri sta linearno odvisna. Pri tem je determinacijski koeficient zelo visok 85% in kaže na visoko soodvisnost med njima. (Slika 34) To kaže na precejšnjo možnost in zanesljivost uporabe omenjenih nedestruktivnih metod.



Slika 34: Odnos med dinamičnim modulom elastičnosti v vzdolžni smeri in statičnim modulom elastičnosti iz upogiba preizkušancev odvzetih s stropne konstrukcije.

5.2 SKLEPI

Z izbranimi standardnimi metodami smo preučili vpliv staranja lesa navadne smreke v konstrukciji na spremembo osnovnih fizikalnih in mehanskih lastnosti lesa, ki je bil v uporabi od 160 do 170 let. Les za preiskavo smo odvzeli iz delno porušene stropne konstrukcije v prvem nadstropju Graščine Preddvor.

Zaradi številčnih prezidav in dozidav Graščine Preddvor starost stropne konstrukcije ni bila nedvoumno znana. S pomočjo dendrokronološke metode smo natančnejše določili starost posameznih lesenih elementov stropne konstrukcije. Zaradi nizkih statističnih dendrokronoloških kazalnikov smo bili primorani poiskati tudi dodatne pisne vire, s katerimi smo lahko potrdili starost lesa stropne konstrukcije, ki smo jo ugotovili z dendrokronološko metodo. Ovrgli smo trditev dr. Lebnove, da je starost stropne konstrukcije 300 let.

Gostota lesa, ki je osnova za napovedovanje ostalih lastnosti, je bila v našem primeru nižja kot primerljive, vendar ne moremo govoriti o drastičnem znižanju gostote, kljub vidnemu napadu insektov in glivni okužbi. Pričakovali smo zmanjšanje ravnovesne vlažnosti lesa, ki pa je bila celo nekoliko višja od primerljivega svežega lesa. Kazalniki dimenzijske stabilnosti so izkazovali ugodne vrednosti. Sicer pa sta bila anizotropija in sorpcijski koeficient ocenjena kot neugodna kazalnika, na meji posameznih razredov. Tako povsem upravičeno pričujemo, da bi višja starost od našega preiskovanega lesa nedvoumno potrdila višjo stabilnost.

Preiskovane mehanske lastnosti, tu mislimo predvsem na upogibno, tlačno vzporedno z vlakni, sta bili nižji kot primerljive vrednosti iz literature. Kar smo tudi pričakovali. Strižna trdnost v vzdolžno-radialni ravnini naših preizkušancev je bila celo višja od predstavljenih v literaturi. Lahko pa trdimo, da za preiskovani les ne moremo govoriti o statistično značilnem znižanju vrednosti.

Nedestruktivna metoda dinamičnega elastičnega vzbujanja, ki smo jo uporabili za ocenitev elastičnih lastnosti lesa, je visoko statistično soodvisna z destruktivno upogibno metodo. To upravičeno potrjuje možnost uporabe metode za oceno elastičnih lastnosti lesa. Nedestruktivne metode bodo v prihodnosti zasedle večji delež uporabe. Na podlagi elastičnih lastnosti lesa, danes predvsem izvajamo kvalitetno razvrščanje konstrukcijskega lesa. Nedestruktivno metodo bi lahko naprimer uporabili tudi za napovedovanje območja juvenilnega in adultnega lesa.

Kljub znižanju trdnostnih lastnosti lesa, ki so najvažnejše za ocenitev nosilnosti lesene konstrukcije, lahko trdimo, da bi naša preiskovana stropna konstrukcija lahko služila svojemu prvotnemu namenu še več stoletij, če ne bi prišlo do lokalnega poslabšanja zaradi zamakanja strešne konstrukcije, kar je vodilo do intenzivne degradacije in končno do porušanja.

6 POVZETEK

Vpliv staranja na konstrukcijski les v uporabi spada med manjkrat raziskovano področje. Čeprav so za lesne tehnologe, konstrukcijske inženirje in konzervatorje ravno ti podatki zelo pomembni. V Sloveniji je bilo opravljeno več raziskav na arheološkem lesu. Čufar in sodelavci (2002), skoraj nič pa na starem lesu v uporabi. Tako je naša raziskava majhen doprinos k vedenju o fizikalno-mehanskih lastnostih konstrukcijskega lesa v uporabi.

Na smrekovem lesu, ki smo ga odvzeli z delno porušene stropne konstrukcije, smo opravili osnovne standardne fizikalno-mehanske raziskave. Za natančnejšo določitev starosti stropne konstrukcije, smo uporabili dendrokronološko metodo.

Smrekov les, ki smo ga odvzeli smo, glede na čas nastanka zadnjih branik datirali v obdobje med leti 1843 in 1856. Tako smo določili starost lesa stropne konstrukcije od 160 do 170 let.

Fizikalne lastnosti, med katere spadajo gostota lesa, ravnovesna vlažnost in dimenzijska stabilnost so kazale odvisnost od starosti. Gostota absolutno suhega lesa glede na primerljive vrednosti iz literature se je nahajala na spodnji meji, podobno je bilo tudi z gostoto zračno suhega lesa. Zavedali pa smo se, da so vrednosti precej variabilne in v širokem razponu. Wagenführ (1996). Ravnovesne vlažnosti lesa so se nahajale nad večino vrednosti iz literature za neuporabljen les. Vendar redki primerljivi podatki za isto starostno obdobje uporabe, ki jih najdemo v literaturi Kránitz (2014) predstavljajo podobne vrednosti. Kazalniki dimenzijske stabilnosti lesa so bili ugodni razen za sorpcijski koeficient in anizotropijo, ki sta bila neugodna. Tako povsem upravičeno pričakujemo, da bi na lesu višjega starostnega obdobja preizkušanci izkazovali boljšo dimenzijsko stabilnost.

Mehanske lastnosti - tu mislimo predvsem upogibno in tlačno trdnost, sta kazali znižanje vrednosti. Strižna trdnost naših preizkušancev, pa je bila višja od primerljive, ki jo navaja Wagenführ (1996). Poudariti pa moramo, da kljub razlikam s primerljivimi vrednostmi iz literature naše vrednosti ne kažejo večje statistično značilne razlike.

Primerjava med smotrnostjo uporabe statične in dinamične metode za določitev modula elastičnosti, je pokazala visoko statistično ujemanje. Podobno visoko ujemanje med metodama, smo zasledili tudi v literaturi. Zato lahko pritrdimo, da bodo nedestruktivne metode v prihodnosti pridobile na pomenu, saj spadajo med hitre, ponovljive in kot kaže na dovolj zanesljive metode.

Iz rezultatov fizikalno-mehanskih preiskav, ki smo jih opravili na odvzeti smrekovini s stropne konstrukcije lahko vidimo, da kljub višji starosti uporabe ni prišlo do drastičnega znižanja lastnosti lesa. Zato upravičeno trdimo, da bi lahko les služil svojemu namenu več stoletij. Dober zgled temu so številni leseni objekti posejani širom Slovenije. Od stanovanjskih hiš, lesenih kozolcev in kašč, ki ponekod še danes opravljajo svojo prvobitno funkcijo.

7 VIRI

- Andersson S. 2003. Crystallinity of wood and the size of cellulose crystallites in Norway spruce (*Picea abies*). Journal of Wood Science, 49, 6: 531-537
- Andersson S. 2004. Studies of crystallinity of Scots pine and Norway spruce cellulose. Trees, 18, 3: 346- 353
- Attar-Hassan G. 1976. The Effect of Ageing on the Mechanical Properties of Eastern White Pine. Bulletin of Association for Presevation Technology, 8, 3: 64-73
- Baar J. 2012. The Influence of wood density on longitudinal wave velocity determined by the ultrasound method in comparison to the resonance longitudinal method. European Journal of Wood and Wood Products, 70, 5: 767-769
- Baillie M.G.L.; Pilcher J.R. 1973. A simple cross-dating program for tree-ring research. Tree- Ring Bulletin, 33, 1:7-14
- Bednar H., Fengel D. 1974. Physikalische, chemische und strukturelle Eigenschaften von rezenten und subfossilen Eichenholz. Holz als Roh- und Werkstoff, 32, 3: 99-107
- Bodig J., Jayne B. 1982. Mechanics of Wood and Wood Composites. Van Nostrand Reinhold Company: 712 str.
- Bodig J. 1982. Moisture Effects on Structural Use of Wood. V: Symposium on Structural Use of Wood in Adverse Environments. Vancouver, 1978. Meyer Robert W., Kellog Robert M. (ur.). New York, Van Nostrand: 53-75
- Borgin K. 1975a. The Effect of Aging on the Ultrastructure of Wood. Wood Science and Technology, 9, 2: 87-98
- Borgin K. 1975b. The Effect of Aging on Lignins of Wood. Wood Science and Technology, 9, 3: 207-211
- Borgin K. 1979. Density and Shrinkage of Old Wood. Wood Science and Technology, 13, 1: 49-57
- Brändström J. 2001. Micro- and ultrastructural aspects of norway spruce tracheids: A review. IAWA Journal, 22, 4: 333-353
- Bremaud I., in sod. 2013. Changes in viscoelastic vibrational properties between compression and normal wood: roles of microfibril angle and of lignin. Holzforschung, 67, 1: 75-85
- Brus R. 2012. Drevesne vrste na Slovenskem 2. dopolnjena izdaja. Ljubljana, samozaložba: 406 str.

- Bucur V. 2006. Acoustics of wood. Berlin, Springer Verlag: 393 str.
- Burmester A. 1965. Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und morphologischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Holz. Holz als Roh- und Werkstoff, 23, 6: 227-236
- Burmester A. 1967. Änderung von Festigkeitseigenschaften des Kiefernholzes durch Alterung. Materialprüfung, 9, 7: 267-270
- Cavalli A., in sod. 2016. A review on the mechanical properties of aged wood and salvaged timber. Construction and Building Materials, 114, 1. July: 681-687
- Čufar K. 1992. Navodila za vaje pri predmetu TEHNOLOGIJA LESA za interno uporabo. Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 72 str.
- Čufar K., Levanič T. 1998 Referenčne kronologije za dendrokronološko datiranje v Sloveniji – stanje 1997. Arheološki vestnik, 49, 1: 63-73
- Čufar K., in sod. 2002. Arheološki les – njegove lastnosti in raziskovalni potencial. Arheološki vestnik, 53, 1: 69-75
- Čufar K., Štamcar Lozar M. 2004. Dendrokronološko datiranje lesenega stropa iz dvorca Šteberk na Cerkniskem. ARGO, 47, 2: 74-80
- Čufar K. 2006. Anatomija lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 185 str.
- Deppe H. J., Rühl H. 1993. Zur Beurteilung alter Bauhölzer. Holz als Roh- und Werkstoff, 51, 6: 379-383
- DIN 68364: 2003-05. Kennwerte von Holzarten – Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten. 2003: 8 str.
- Divos F., Tanaka T. 2005. Relation Between Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Wood. Acta Silvatica Lignaria Hungarica, 1: 105-110
- Erhardt D., in sod. 1996. New versus old wood: differences and similarities in physical, mechanical and chemical properties. V: International Council of Museums – Committee for Conservation 11th Triennial Meeting, Edinburgh Scotland 1-6 september 1996: 903-910
- EUFORGEN 2009. Picea abies. Rome. EUROFORGEN Secretariat c/o Bioversity Internacional.
<http://www.euforgen.org/distribution-maps/html> (25. maj. 2016)

- Fengel D., Wegener G. 1989. Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. Berlin, Walter de Gruyter: 613 str.
- Fengel D. 1991. Aging and fossilization of wood and its components. Wood Science and Technology, 25, 3: 153-177
- Froidevaux J. in sod. 2012. Viscoelastic behaviour of aged and non-aged spruce wood in the radial direction. Wood Material Science & Engineering, 7, 1:1-12
- Garcia Esteban. L., in sod. 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
- Gereke T., in sod. 2011. Moisture behavior of recent and naturally aged wood. Wood Research, 56, 1: 33-42
- Gorišek Ž. 1992. Vpliv prečne krčitvene anizotropije lesa na sušenje in stabilnost. Doktorska disertacija, Ljubljana, VDO Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 120 str.
- Gorišek Ž., Torelli N. 1999. Microfibril angle in juvenile, adult, and compression wood of spruce and silver fir. Phytion annales rei botanicae, 39, 3: 129-132
- Gorišek Ž., in sod. 2004. Juvenile wood in spruce (*Picea abies* Karst.) – Limitation of use. V: International conference Wood in the construction industry – rational utilisation of wood, Zagreb, April 23rd 2004. Jambrečević V. (ur.). University of Zagreb Faculty of forest 2004: 27-34
- Gorišek Ž. 2009. Les zgradba in lastnosti. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 187 str.
- Görlacher R. 1984. Ein neues Meßverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmodulus von Holz. Holz als Roh- und Werkstoff, 42, 6: 219-222
- Grabner M., Kotlinova M. 2008. Ageing of wood – described by the analyses of old beams. V: Proceeding of the international conference held by cost action IE0601 in Braga (Portugal) 5-7 november 2008. Gril J. (ur.). Firenze Univerity Press 2010: 42-47
- Gryc V., in sod. 2011. Density of juvenile and mature wood of selected coniferous species. Journal of Forest Science, 57, 3: 123-130
- Haines D. W. in sod. 1996. Determination youngs modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method wit comparisons to static flexure and other dynamic methods. Wood science and technology, 30, 4: 253-263
- Hearmon R. F. S. 1966. Vibration testing of wood. Forest Products Journal, 16, 8: 29-39

- Holz D. 1981. Zum Alterungsverhalten des Werkstoffes Holz-einige Anzihten, Untersuchungen, Ergebnisse. Holztechnologie, 22, 2:80-85
- Horaček P., in sod. 2012. Nondestructive evaluation of static bending properties of scots pine wood using stress wave technique. Wood Research, 57, 3: 359-366
- Ilic J. 2003. Dynamic MOE of 55 species using small wood beams. Holz als Roh- und Werkstoff, 61, 3: 167-172
- ISO 3347: 1976. Wood – Determination of ultimate shearing stress parallel to grain. 1976: 2 str.
- ISO 13061-1: 2014. Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens – Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. 2014: 4 str.
- ISO 13061-2: 2014. Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens – Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. 2014: 5 str.
- ISO 13061-3: 2014. Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens – Part 3: Determination of ultimate strength in static bending. 2014: 5 str.
- ISO 13061-4: 2014. Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens – Part 4: Determination of modulus of elasticity in static bending. 2014: 6 str.
- ISO/DIS 13061-17: 2015. Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens – Part 17: Determination of ultimate stress in compression parallel to grain. 2015: 7 str.
- Kačik F., in sod. 2014. Chemical changes in fir wood from old buildings due to ageing. Cellulose Chemistry and Technology, 48, 1-2: 79-88
- Kambič M. 2011. Vpliv biotehnološke obdelave lesa na delež kristaliničnosti celuloze. Univerzitetna diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Študij biotehnologije: 47 str.
- Klinc M. 1995. Sorpcijske lastnosti in dimenzijska stabilnost smrekovine (*Picea abies* Karst.) in jelovine (*Abies alba* Mill.) v odvisnosti od starosti kambija. Visokošolska diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 172 str.
- Kohara J., Okamoto H. 1955. Studies of Japanese old Timber. The Scientific reports of the Saiko University agriculture, 7, 1a: 9-20

- Kollman F. 1951. Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Band 1. Anatomie und Pathologie, Chemie, Physik, Elastizität und Festigkeit. Springer Verlag Berlin: 1050 str.
- Kollmann F., Krech H. 1960. Dynamische Messung der elastischen Holzeigenschaften und der Dämpfung. . Holz als Roh- und Werkstoff, 18, 2: 41-54
- Kollmann F., Schmidt E. 1962. Gefügezerrütung und Festigkeitseinbuße von dauerbeanspruchtem Nadelholz. Holz als Roh- und Werkstoff, 20, 9: 333-338
- Kollmann F., Cote W. 1968. Principles of Wood Science and Technology I. Solid Wood. Springer Verlag Berlin: 592 str.
- Kránitz K. 2014. Effect of natural aging on wood. Doctoral dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich: 186 str.
- Kránitz K. in sod. 2016. Effects of aging on wood: a literature review. Wood Science and Technology 50, 1: 7-22
- Kurtoglu A. 1983. Sorptionsverhalten von altem Fichtenholz. Holzforschung und Holzverwertung, 35, 6: 125-126
- Lanius Ross M., in sod. 1981. Strength of Old Wood Joists. Journal of Structural Division, 107, 12: 2349-2363
- Levanič T., in sod. 1995. Kronologija letnih prirastkov jelke in smreke v Sloveniji. Les, 47, 9: 259-261
- Lißner K., Rug W. 2000. Holzbausanierung: Grundlagen und Praxis der sicheren Ausführung. Berlin Springer: 484 str.
- Nilsson T., Rowell R. 2012. Historical wood – structure and properties. Journal of Cultural Heritage, 13, 3: 5-9
- Niemz P. 1999. Untersuchungen zum Einfluß des Faserwinkels auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen in Holz. Holz als Roh- und Werkstoff, 57, 3: 225
- Niemz P., Sonderegger W. 2007. Sorptionsisothermen ausgewälter heimischer und fremdländischer Holzarten bei Adsorption und Desorption. Bauphysik, 29, 5:381-382
- Niemz P., Mannes D. 2012. Non-destructive testing of wood and wood-based materials. Journal of Cultural Heritage, 13, 3: 26-34
- Noack D., in sod. 1973. Characteristics for a Judgment of the Sorption and Swelling Behavior of Wood. Wood Science and Technology, 7, 3: 218-236

- Noguchi T., in sod. 2012. Effect of aging on the vibrational properties of Wood. Journal of Cultural Heritage, 13, 3: 21-25
- Obataya E. 2000. Vibrational properties of wood along the grain. Journal of Materials Science, 35, 12: 2993-3001
- Petrić B., in sod. 1981. Osnove nauke o drvu. Šumarski fakultet sveučilišta u Zagrebu: 87 str.
- Pušnik T. 2013. Analitični del konservatorskega načrta za prenovo Graščine Predvdor. Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije, Območna enota Kranj: 67 str.
- Schulz H., in sod. Eigenschaften eines Fichtenbalkens aus altem Dachstuhl. Holz als Roh- und Werkstoff, 42, 3: 109
- Sonderegger W. in sod. 2008. An investigation of the influence of selected factors on the properties of spruce wood. Wood Science and Technology 42, 4: 281-298
- Sonderegger W., in sod. 2015. Aging effects on physical and mechanical properties of spruce, fir and oak wood. Journal of Cultural Heritage, 16, 6: 883-889
- Srpčić J. 2008. Biological deterioration of historical wooden roof and floor structures and their renovation. V: Proceeding of the international conference held by cost action IE0601 in Braga (Portugal) 5-7 november 2008. Gril J. (ur.). Firenze Univerity Press 2010: 142-147
- Stavbni red za vojvodino Krajnsko od 25. oktobra 1875. Laibach Selbstverlag 1876: 56 str
- Straže A., Gorišek Ž. 2000. Gostota in mehanske lastnosti smrekovine (*Picea abies* Karst.) in jelovine (*Abies alba* Mill.). Les, 52, 6: 185-190
- Terezijanski gozdni red za Krajnsko 1771. Založba Ljubljana: VTOZD za gozdarstvo BF 1985. Zbirka: Viri za zgodovino gozda in gozdarstva na Slovenskem 1. 88 str.
- Torelli N., Čufar K. 1983. Sorpcija in stabilnost lesa. Les, 35, 4-5: 101-106
- Torelli N. 1990. Les & skorja. Ljubljana, Biotehniška fak., Oddelek za lesarstvo: 70 str.
- Torelli N. 1998. Juvenilni les pri jelki (*Abies alba* Mill.) in smreki (*Picea abies* Karst.). Les, 50, 1-2: 5-7
- Trop M. 2014. Vpliv velikosti preizkušanca na določanje mehanskih lastnosti lesa. Diplomski projekt visokošolskega strokovnega študija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 28 str.
- Tsoumis G. 1991. Science and technology of wood: structure, properties, utilization. New York, Van Nostrand Reinhold: 494 str.

- Ugrenović A. 1950. Tehnologija drveta. Nakladni zavod Hrvatske: 502 str
- Unger A., in sod. 2001. Conservation of Wood Artifacts. Springer Berlin: 578 str.
- Unterwieser H., Schickhofer G. 2011. Influence of moisture content of wood on sound velocity and dynamic MOE of natural frequency- and ultrasonic runtime measurement. European Journal of Wood and Wood Products, 69, 2: 171-181
- Van Zyl., in sod. 1973. The effect of ageing the mechanical and chemical properties of wood. V: IUFRO-5 Meeting, Wood in the Service of Man. Pretoria, 2: 1069-1080
- Wagenführ R., Scheiber Ch. 1996. Holzatlas. Leipzig, VEB Fachbuchverlag: 720 str.
- Witomski P. 2014. Selected mechanical properties of Scots pine wood from antique churches of Central Poland. European Journal of Wood and Wood Products, 72, 2: 293-296
- Yayne B. A. 1959. Vibrational Properties of Wood. Forest Products Journal, 9, 11: 413-416
- Yokoyama M., in sod. 2009. Mechanical characteristics of aged Hinoki wood from Japanese historical buildings. Comptes Rendus Physique, 10, 7: 601-611
- Yorur H. 2014. The Effect of Aging on Various Physical and Mechanical Properties of Scotch Pine Wood Used in Construction of Historical Safranabolu Houses. Drvna industrija, 65, 3: 191-196
- Žlahtič M. 2013. Vpliv naravnega staranja na izbrane lastnosti smrekovine in kostanjevine. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 80 str.

ZAHVALA

Najprej se zahvaljujem prof. dr. Željku Gorišku, da je bil pripravljen prevzeti mentorstvo moje diplomske naloge, me je usmerjal in spodbujal med njenim nastajanjem.

Zahvaljujem se somentorju doc. dr. Alešu Stražetu za njegovo odprtost, za veliko mero podpore, ko je bilo to potrebno in za pomoč pri fizikalno-mehanskem testiranju preizkušancev.

Prav tako se zahvaljujem recenzentki prof. dr. Katarini Čufar za njeno recenzijo diplomskega dela, pripravljenost pomagati. Hvala tudi za pomoč in še posebej se zahvaljujem za pomoč pri datiranju odvzetih vzorcev.

Strokovnemu sodelavcu Luku Kržetu dip. ing. les. se zahvaljujem za pomoč pri izdelavi preizkušancev.

Andreja, hvala. Naj beseda hvala nadomesti vse tisto neizrečeno, za kar včasih zmanjka besed.

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Beno IFKO

**VPLIV STARANJA NA FIZIKALNO-MEHANSKE
LASTNOSTI LESA STROPNE KONSTRUKCIJE**

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

Ljubljana, 2016

