



UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Peter JEREB

**VPLIV OBREMENITVE LESA NA SPREMEMBE
NJEGOVIH AKUSTIČNIH LASTNOSTI**

MAGISTRSKA NALOGA

Magistrski študij - 2. stopnja

Ljubljana, 2014

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Peter JEREB

**VPLIV OBREMENITVE LESA NA SPREMEMBE NJEGOVIH
AKUSTIČNIH LASTNOSTI**

MAGISTRSKA NALOGA

Magistrski študij - 2. stopnja

**THE INFLUENCE OF WOOD LOADING ON ITS CHANGES OF
ACOUSTICAL PROPERTIES**

M. Sc. THESIS

Academic Studies Programmes

Ljubljana, 2014

Magistrska naloga je zaključek magistrskega študija Trajnostna raba lesa – 2. Stopnja na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani. Eksperimentalno delo je bilo opravljeno na Biotehniški fakulteti, v Laboratoriju za tehnologije sušenja lesa.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja magistrske naloge imenoval prof. dr. Željka Goriška, za recenzenta pa doc. dr. Aleša Stražeta.

Mentor: prof. dr. Željko Gorišek

Recenzent: doc. dr. Aleš Straže

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Magistrsko delo 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 delo, ki sem ga oddal v elektronski obliki, identično tiskani verziji.

Peter Jereb

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Du2
DK	UDK 630*812.12
KG	les/modul elastičnosti/akustične lastnosti lesa/sušenje/navlaževanje
AV	JEREB, Peter
SA	GORIŠEK, Željko (mentor)/ STRAŽE, Aleš (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2014
IN	VPLIV OBREMENITVE LESA NA SPREMEMBE NJEGOVIH AKUSTIČNIH LASTNOSTI
TD	Magistrska naloga (Magistrski študij – 2. Stopnja)
OP	XI, 80 str., 17 preglednica, 51 slika, 44 vir.
IJ	sl
JJ	sl/en
AI	Na šestih izbranih lesnih vrstah (smreka, jesen, bukev, oreh in češnja) smo med navlaževanjem in sušenjem preizkušancev proučevali spremembe modula elastičnosti, frekvenčni odziv in koeficient dušenja. Uporabili smo resonančno metodo z impulzivnim – elastičnim mehanskim vzbujanjem. Ugotovili smo, da je hitrost spremembe modula elastičnosti pri procesu sušenja dvakrat hitrejša kot pri navlaževanju. S povečevanjem vlažnosti se je koeficient dušenja zmanjševal, vendar so zveze statistično nezanesljive. Najmanjše dušenje zvoka smo zasledili pri jesenovini, smrekovini in češnjevini. Sprememba modula elastičnosti je bila v linearni odvisnosti od povprečne vlažnosti medtem, ko je bil odziv dušenja zvoka hitrejši, kar pripisujemo nastalemu vlažnostnemu gradientu.

KEY WORDS DOCUMENTATION

ND Du2

DC UDC 630*812.12

CX wood/E – modul/acoustic properties/drying/wetting

AU JEREB, Peter

AA GORIŠEK, Željko (supervisor)/ STRAŽE, Aleš (co-advisor)

PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c VIII/34

PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology

PY 2014

TY THE INFLUENCE OF WOOD LOADING ON ITS CHANGES OF ACUSTICAL PROPERTIES

DT M. Sc. Thesis (Master Study Programmes)

NO XI, 80 p., 17 tab., 51 fig., 44 ref.

LA sl

AL sl/en

AB On a six selected species of wood - spruce, ash, oak, beech, walnut and cherry- all test specimens were moistened and dried, we investigated changes in the following modules: fundamental frequency, sound damping and elasticity. The method used was resonance with elastic mechanical excitation. We came to conclusion, that modulus of elasticity in drying process changed two times faster than in the moistening process. With moisture increasing, the sound damping coefficient was decreasing, but changes have not been proved statistically important. Lowest sound damping was detected in spruce, cherry and ash. The change in modulus of elasticity was in linear dependency with average moisture content, while response of sound damping was faster. We concluded, that this is due to the moisture gradient.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VII
KAZALO SLIK	IX
1 UVOD	1
2 SPLOŠNI DEL	3
2.1 KRITERIJ KAKOVOSTI ZA GLASBENE INŠTRUMENTE.....	3
2.1.1 Vpliv strukture lesa na akustične lastnosti	5
2.2 RESONANČNI LES	10
2.2.1 Resonančni les smreke	10
2.2.2 Palisander (rožni les).....	13
2.2.3 Javor rebraš	14
2.2.4 Pernambuk (<i>Guilandesia echinata</i>)	16
2.2.5 Ostale lesne vrste	16
2.3 OBREMENITVE LESA PRI UPORABI ZA GLASBENEINŠTRUMENTE	17
2.3.1 Vpliv naravnega staranja na resonančni les	17
2.3.2 Vpliv okoljskih razmer.....	22
2.3.3 Vpliv dolgotrajne obremenitve.....	22
2.4 NAJPRIMERNEJŠE LESNE VRSTE ZA POSAMEZNA GLASBILA.....	27
2.4.1 Akustične lastnosti resonančnega lesa za violine	27
2.4.2 Akustične lastnosti lesa za kitare	29
2.4.3 Akustične lastnosti lesa za pihala	31

2.4.4	Akustične lastnosti lesa za tolkala	32
2.4.5	Akustične lastnosti lesa za klavir	33
3	MATERIALI IN METODE	34
3.1	MATERIAL	34
3.1.1	Izdelava preizkušancev	34
3.2	METODE	35
3.2.1	Postopki uravnovešanja	35
3.2.2	Potek eksperimenta	35
3.2.3	Določanje fizikalnih karakteristik	37
4	REZULTATI	39
4.1	DINAMIKA URAVNOVEŠANJA LESNIH VRST	39
4.2	VPLIV SPREMEMBE VLAŽNOSTI IN ČASA NA MODUL ELASTIČNOSTI.....	44
5	RAZPRAVA	59
5.1	PRIMERJAVA DINAMIKE SPREMEMB MODULA ELASTIČNOSTI MED ADSORPCIJO IN DESORPCIJO	59
5.2	PRIMERJAVA DINAMIKE SPREMEMB KOEFICIENTA DUŠENJA ZVOKA MED ADSORPCIJO IN DESORPCIJO	66
6	SKLEPI	73
7	POVZETEK.....	74
8	VIRI	76

ZAHVALA

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Glavni parametri, ki se uporabljajo za presojo kvalitete lesa v aksialni (L) in radialni (R) smeri (Spycher s sod., 2007)	5
Preglednica 2: Anatomske značilnosti resonančne smrekovine, najprimernejše za izdelavo violin. (Rocaboy in Bucur, 1990)	6
Preglednica 3: Vpliv trakov na strižni modul G_{ij} in G_{ji} (108 N/m ²) resonančne smrekovine. Opomba, prisotnost trakov močno vpliva na strižni modul $G_{RL} < G_{LR}$ in $G_{RT} < G_{TR}$. (Bucur, 2006).....	6
Preglednica 4: Fizikalne in mehanske značilnosti smrekovine za različne glasbene inštrumente. (Holz 1984)	7
Preglednica 5: Dinamične elastične konstante in hitrosti zvoka v smrekovini uporabljeni za glasbene inštrumente (Haines, 1979).....	11
Preglednica 6: Vpliv frekvenčnega območja na koeficient dušenja zvoka (logaritemski dekrement) v vzdolžni in prečni smeri smrekovine (Haines 1979)	12
Preglednica 7: Akustične in elastične konstante javorovine <i>Acer</i> spp. (po Haines 1978; in po Ghemeizu in Beldie 1972)	15
Preglednica 8: Vpliv staranja na akustične lastnosti lesa za violine (Barducci in Pasqualini, 1948, cit. po Bucur, 2006)	19
Preglednica 9: Nekatere kemične komponente stare in recentne smrekovine ter javorovine (Pishik 1971).....	21
Preglednica 10: Indeks kristaliničnosti celuloze v recentnem in starem resonančnem lesu (Lungu, 1975)	22
Preglednica 11: Hitrosti zvoka in dušenje po 52 dneh statične upogibne obremenitve pri 0,2 σ porušenja smrekovine, duglazijevine in lesa javorja rebraša pri 8 % vlažnosti (Bucur in Ghelmeziu 1977).....	24
Preglednica 12: Hitrosti zvoka in dušenje po 2000 h upogibnih udarcev pri 0,2 σ porušenja smrekovine , duglazijevine in lesa javorja rebraša pri 8% vlažnosti. (Bucur in Ghelmeziu 1977).....	25
Preglednica 13: Opis anatomskih znakov za resonančni les različnih vrst najprimernejših za godala.	27

Preglednica 14: Zahtevane mehanske lastnosti smrekovine izbrane za zvočno ploščo kitare (Richardson 1986).....	29
Preglednica 15: Značilnosti nekaterih lesnih vrst, ki se uporabljajo za stranice in hrbet kitar (Richardson 1986)	30
Preglednica 16: Akustične lastnosti pomembnih vrst lesa, ki se uporabljajo za pihala (Haines 1979).....	32
Preglednica 17: Spremljanje sušenja preizkušancev. Začetna vlažnost (u_z), končna vlažnost (u_k) in polovični uravnovesni čas sušenja ($t_{0,5}$).....	40

KAZALO SLIK

Slika 1: Histogram širine branik resonančnega lesa: 1 - les za kitare, 2 - les za violine, 3 - les za klavir, 4 - les za ostala brenkala (viola, violončelo...), 5 - les za ostalo uporabo, 6 - konstrukcijski les (Holz, 1984).	8
Slika 2: Histogram porazdelitve hitrosti zvoka (v_{LL}) (a) in akustične radiacije (v_{LL}/ρ) (b) pri resonančni- (črtkana črta) in navadni smrekovini (polna črta) (Holz 1984)	9
Slika 3: Hitrost ultrazvoka v odvisnosti od širine branike resonančnega lesa (Bucur 1984)	9
Slika 4: Resonančna smreka: notranje trenje v odvisnosti od frekvence. (Holz 1967b)	13
Slika 5: Odvisnost modula elastičnosti (EL) od gostote lesa pri starem in recentnem lesu. • - 180 let star stavbni les; × - 60 let star les zvočne plošče violine; o - recenten les za neakustične namene. (Holz 1981)	18
Slika 6: a) Razmerje hitrosti in napetosti v resonančni smrekovini pod statično upogibno obremenitvijo v radialni ali tangencialni smeri; b) hitrosti v vzdolžni in tangencialni smeri (V_{LL} , V_{TT}) v primerjavi z razmerjem napetosti v času 0 in pri (σ torušenja). (Bucur 1979)	26
Slika 7: Pripravljeni preizkušanci	34
Slika 8: Preizkušanci zaviti v PVC vrečo.	36
Slika 9: Podpora za vzbujanje vzorcev z mikrofonom (levo), program za zajem podatkov (desno).	36
Slika 10: Relativna sprememba mase bukovine po času, levo adsorpcija desno desorpcija.	41
Slika 11: Relativna sprememba mase smrekovine po času, levo adsorpcija desno desorpcija.	41
Slika 12: Relativna sprememba mase jesenovine po času, levo adsorpcija desno desorpcija.	42
Slika 13: Relativna sprememba mase hrastovine po času, levo adsorpcija desno desorpcija.	42
Slika 14: Relativna sprememba mase orehovine po času, levo adsorpcija desno desorpcija.	43
Slika 15: Relativna sprememba mase lesa češnje po času, levo adsorpcija desno desorpcija.	43

Slika 16: Sprememba E – modula bukovine po času, levo adsorpcija, desno desorpcija. ..	44
Slika 17: Sprememba E – modula bukovine v odvisnosti od lesne vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.....	45
Slika 18: Sprememba E – modula smrekovine po času, levo adsorpcija, desno desorpcija.	45
Slika 19: Sprememba E – modula smrekovine v odvisnosti od vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.	46
Slika 20: Sprememba E – modula jesenovine po času, levo adsorpcija, desno desorpcija.	46
Slika 21: Sprememba E – modula jesenovine v odvisnosti od vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.	47
Slika 22: Sprememba E – modula hrastovine po času, levo adsorpcija, desno desorpcija.	47
Slika 23: Sprememba E – modula hrastovine v odvisnosti od vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.	48
Slika 24: Sprememba E – modula orehovine po času, levo adsorpcija, desno desorpcija. .	49
Slika 25: Sprememba E – modula orehovine v odvisnosti od vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.	49
Slika 26: Sprememba E – modula lesa češnje po času, levo adsorpcija, desno desorpcija.	50
Slika 27: Sprememba E – modula lesa češnje v odvisnosti od vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.	50
Slika 28: Sprememba $\tan \delta$ pri bukovini po času, levo adsorpcija, desno desorpcija.....	51
Slika 29: Sprememba $\tan \delta$ pri bukovini v odvisnosti od vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.....	52
Slika 30: Sprememba $\tan \delta$ pri smrekovini po času, levo adsorpcija, desno desorpcija.	53
Slika 31: Sprememba $\tan \delta$ pri smrekovini v odvisnosti od vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.....	53
Slika 32: Sprememba $\tan \delta$ pri jesenovini po času, levo adsorpcija, desno desorpcija.....	54
Slika 33: Sprememba $\tan \delta$ pri jesenovini v odvisnosti od vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.....	55
Slika 34: Sprememba $\tan \delta$ pri hrastovini po času, levo adsorpcija, desno desorpcija.	55
Slika 35: Sprememba $\tan \delta$ pri hrastovini v odvisnosti od vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.....	56
Slika 36: Sprememba $\tan \delta$ pri orehovini po času, levo adsorpcija, desno desorpcija.....	56

Slika 37: Sprememba $\tan \delta$ oreha v odvisnosti od vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.....	57
Slika 38: Sprememba $\tan \delta$ pri lesu češnje po času, levo adsorpcija, desno desorpcija.....	58
Slika 39: Sprememba $\tan \delta$ pri lesu češnje v odvisnosti od vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.....	58
Slika 40: Relativna sprememba E – modula pri bukovini v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.....	60
Slika 41: Relativna sprememba E – modula smrekovine v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.....	61
Slika 42: Relativna sprememba E – modula pri jesenovini v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.....	62
Slika 43: Relativna sprememba E – modula pri hrastovini v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.....	63
Slika 44: Relativna sprememba E – modula pri orehovini v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.....	64
Slika 45: Relativna sprememba E – modula pri lesu češnje v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.....	65
Slika 46: Relativna sprememba $\tan \delta$ pri bukovini v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.....	67
Slika 47: Relativna sprememba $\tan \delta$ smrekovine v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.....	68
Slika 48: Relativna sprememba $\tan \delta$ pri jesenovini v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.....	69
Slika 49: Relativna sprememba $\tan \delta$ pri hrastovini v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.....	70
Slika 50: Relativna sprememba $\tan \delta$ pri orehovini v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.....	71
Slika 51: Relativna sprememba $\tan \delta$ pri lesu češnje v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.....	72

1 UVOD

Les je zaradi napetih strun v brenkalih, godalih in tudi klavirju pod veliko obremenitvijo. Izdelovalci glasbil so te obremenitve lesa presenetljivo dobro poznali in obvladovali predvsem s primerno konstrukcijo in izbiro lesa. Prav posebno pozornost pa so namenili izbiri in pripravi lesa. Zaradi dinamike in konstrukcije kitare ali violine mora biti les sprednjega pokrova drugačen od spodnjega dna, če želimo doseči, da bo inštrument imel čim lepši in kar se da enakomeren zvok. Seveda pa so pri drugih glasbilih (klavir, tolkala, pihala...) te zahteve povsem drugačne. Izbira lesa ne temelji samo na akustičnih lastnostih lesa, temveč tudi na njegovih obdelovalnih lastnostih, nenazadnje pa je odvisna tudi od cene določene lesne vrste.

Pod splošnim izrazom resonančni les najpogosteje pomislimo na smrekovino (*Picea Abies* Mill.) za zgornjo ploščo in les javorja (*Acer pseudoplatanus*) za spodnjo ploščo pri številnih lesenih inštrumentih s strunami. Dejansko lahko vse vrste z izjemno konstantno oz. enakomerno anatomsko strukturo in odličnimi akustičnimi lastnostmi uvrščamo pod oznako resonančni les. Kakovost takšnega lesa lahko določimo z destruktivnimi ali nedestruktivnimi metodami. Izdelovalci se zanašajo na preproste anatomske kriterije kot so: potek vlaken, gostota, tekstura in širina branik. Za bolj podrobno oziroma znanstveno oceno resonančnega lesa pa lahko uporabimo več indikatorjev: Modul elastičnosti (E-modul), gostoto, hitrost zvoka, razmerje radiacije, emisijsko razmerje, indeks glasnosti. Zasledimo pa lahko še stopnjo anizotropije in ACE – acoustic conversion efficiency ali učinkovitost akustične konverzije.

Dejstvo je, da se hitrost zvoka povečuje z večanjem gostote lesa, toda pojavlja se vprašanje, kako so posamezne elastične lastnosti lahko povezane z strukturnimi lastnostmi. Da vključimo razmeroma širok nabor vprašanj, morata biti izpolnjena dva kriterija. Prvi se nanaša na makrostrukturne parametre drugi pa na mikroskopske in submikroskopske strukturne značilnosti. Poleg kakovosti materiala je zlasti pomembna še sama konstrukcija inštrumenta. Kljub temu, da izdelovalci največ pozornosti namenijo materialu in njegovi pripravi, je inštrument brez primerne konstrukcije neuporaben. Sem spadajo tudi vpliv

obdelave resonančne plošče na njeno akustiko, povezava med dvema ali več vibrirajočimi elementi – sklapljanje in utrjevanje zvočne plošče, ki ima denimo kritičen pomen pri akustiki kitare saj izjemno spreminja razmerje trdnost – masa in E-modul.

Les, vgrajen v glasbene inštrumente, je tudi v uporabi izpostavljen različnim obremenitvam, ki ob dolgotrajnem delovanju lahko povzročijo lezne deformacije. Spremembe so večje v vlažnejši klimi, ki značilno vpliva na viskoznost lesa, še večje pa je pričakovati v nihajočih klimatskih razmerah. Akustični odziv glasbenih inštrumentov je kritično odvisen od ustreznih okoljskih razmer, ki morajo biti predvsem stabilne (idealna temperatura sobe, 50 – 55 % relativna vlažnost in 8 – 10 % vlažnost lesa), posledično pa je inštrument stabilen in uglašen.

Različne lesne vrste imajo svoje značilne reološke in akustične lastnosti, ki se pod vplivom dolgotrajnih obremenitev in okolja tudi spreminjajo. Cilj naloge je proučevanje teh sprememb pri vrstah, ki se največkrat uporabljajo za izdelavo glasbenih inštrumentov in pri vrstah, ki se za te namene uporabljajo redkeje. Pri lesnih vrstah pričakujemo specifične odzive na spremembo klime, ki se lahko kažejo v slabšanju akustičnih lastnosti, predvsem koeficienta dušenja zvoka. Poleg tega pričakujemo boljše rezultate pri vrstah, ki se pogosteje uporabljajo za glasbene inštrumente.

2 SPLOŠNI DEL

Izdelovalci glasbenih inštrumentov (unikatnih in serijskih) upoštevajo načelo, da je za najboljši izdelek potrebna primerno izbrana lesna vrsta, ustrezna kakovost lesa, čvrsta in primerna konstrukcija ter končna obdelava. Skozi stoletja so slavni izdelovalci skrbno čuvali način izdelovanja, oziroma konstrukcijske podrobnosti inštrumentov, nekaterih njihovih skrivnosti pa še danes ne poznamo. Mednje spada tudi površinska obdelava – lakiranje, kjer so na začetku uporabljali večinoma naravne smole in olja. Lakiranje inštrumentu poudari njegovo lepoto in samo teksturo lesa, obenem pa okrepi celotno zvočno integriteto inštrumenta in ga s tem dokonča. Upoštevati pa moramo dejstvo, da se za različne inštrumente omenjene metode in uporabljeni materiali razlikujejo.

Les je eden od najstarejših, najbolj poznanih materialov, ki z unikatnimi mehanskimi in akustičnimi lastnostmi prevladuje pri izdelavi godal. Kljub trenutno aktualnim modernim materialom kot so sintetični polimeri in kompoziti, npr. iz ogljikovih ali drugih vlaken, izdelovalci še vedno najraje uporabljajo les. Resonančni les smreke je z vidika akustike izjemno anizotropen in ga odlikuje visoka hitrost zvoka (6000 m/s) vzdolž vlaken in relativno nizka gostota (400 kg/m^3). Istočasno pa so strižne hitrosti v prečni ravnini (RT) zelo nizke (300 m/s). Najbolj pomembna lastnost smreke za glasbene inštrumente je visoka akustična in elastična anizotropija, ki sta posledici ortotropno urejene makroskopske strukture. Zveza med elastičnimi lastnostmi in tipičnimi strukturnimi lastnostmi so širina branike in pripadajoča gostotna porazdelitev. Dejavniki, ki vplivajo na akustične lastnosti lesa za inštrumente so: naravno staranje, okoljski dejavniki (temperatura in vlaga), dolgoročne obremenitve in lastnosti premazov.

2.1 KRITERIJ KAKOVOSTI ZA GLASBENE INŠTRUMENTE

Kakovost lesa lahko ocenjujemo z estetskega vidika, lahko z vidika fizikalnih in mehanskih lastnosti, lahko pa tudi z vidika obdelovalnosti, trajnosti ipd. Vizualno

ocenjevanje zajema predvsem potek vlaken, pri vrstah s posebno figurativnostjo, pa tudi barvo in teksturo lesa (javor rebraš). Z vidika obdelave je pomembna anatomska sestava lesa, kjer je v ospredju finost strukture, ki je povezana s samo gostoto lesne vrste. Osnovno je ocenjevanje fizikalnih in mehanskih lastnosti. Te lastnosti se lahko določajo na dva načina: z destruktivnimi ali nedestruktivnimi metodami. Bolj zaželeno so nedestruktivne metode, kjer materiala ne poškodujemo. Na splošno velja, da visoka učinkovitost akustične pretvorbe (ACE – acoustic conversion efficiency) in velika stopnja anizotropije odločata o kvaliteti zvočne plošče (Bucur, 2006). Visoko cenjen resonančni les ima visoko razmerje modula elastičnosti in gostote (E'/ρ) in majhno dušenje ($\tan \delta$), zato je višja tudi učinkovitost akustične konverzije. Po drugi strani, pa je razmerje modula elastičnosti in strižnega modula (E'/G') lesa višje kot pri izotropnih materialih (plastika, kovine) predvsem zaradi zgradbe celične stene. Znano je, da ima les smreke sitke (*Picea Sitchensis Carr.*), ki je zaželen les za zvočne plošče klavirjev, visoko vrednost E/G , in da je njeno dušenje v visokih frekvencah večje kot pri ostalih vrstah lesa. Relativno visoko učinkovitost akustične konverzije in visoko razmerje E/G lesa moramo pripisati ligno-celulozni kompozitni matriki celične stene in tudi porozni celični strukturi, t.j. njeni mikrostrukturi (Obataya, 2000). Osnovne akustične parametre predstavlja preglednica 1.

Preglednica 1: Glavni parametri, ki se uporabljajo za presojo kvalitete lesa v aksialni (L) in radialni (R) smeri (Spycher s sod., 2007)

Modul elastičnosti E (MPa) in gostota ρ (kg/m^3)	E-modul za L in R smer in ρ
Hitrost zvoka v (m/s)	$v = \left(\frac{E}{\rho}\right)^{1/2}$ za L in R smer
Akustična radiacija / Akustični koeficient ($\frac{\text{m}^4}{\text{kgs}}$)	$R = \frac{v}{\rho} = \left(\frac{E}{\rho^3}\right)^{1/2}$ za L in R smer
Učinkovitost akustične pretvorbe ACE ($\frac{\text{m}^4}{\text{kgs}}$)	$ACE_L = \frac{R_L}{\delta_L}$ ali $ACE_R = \frac{R_R}{\delta_R}$ za L in R smer
Indeks glasnosti S_t ($\text{m}^8/\text{kg}^2\text{s}^2$)	$S_t = \frac{R_L \cdot R_R}{\delta_L \cdot \delta_R} = ACE_L \cdot ACE_R$

Akustična radiacija (akustični koeficient) in učinkovitost akustične pretvorbe sta pomembna dejavnika pri oceni kakovosti lesa za inštrumente na katere udarjamo in potrzamo po strunah (kitara, čembalo...). Za inštrumente z lokom, kot je npr. violina, pa so ti faktorji manj pomembni, ker je struna kontinuirano vzbujena (Spycher s sod., 2007).

2.1.1 Vpliv strukture lesa na akustične lastnosti

Les resonančne smreke opredeljuje visoka hitrost širjenja zvoka v vzdolžni smeri in nizka gostota. Resonančni les določajo tako makro strukturne značilnosti: širina in enakomernost branik, delež kasnega lesa, razpored gostote v braniki, kot tudi mikroskopska in submikroskopska zgradba: dolžina vlaken, porazdelitev parenhimskih trakov, mikrofibrilni kot in indeks kristaliničnosti (preglednica 2).

Za izdelavo violin je zelo pomembna enakomerna širina branik. Indeks enakomernosti je razmerje variacijskega razmika širine branik ter maksimalne širine.

Preglednica 2: Anatomske značilnosti resonančne smrekovine, najprimernejše za izdelavo violin. (Rocaboy in Bucur, 1990)

Širina branike	Delež kasnega lesa	Indeks enakomernosti	Kristaliničnost	Mikrofibrilni kot (%)		
mm	(%)		(%)	skupni	rani les	kasni les
1,5	23	0,37	38	2,94	11-30	2-9
1,9	25	0,52	35,5	4,08	8-15	1-8
1,3	26	0,58	30	7,95	12,30	4-12

Trakovi so pomemben anatomski element, ki vpliva na anizotropijo resonančne smreke (Schleske 1990). Vpliv trakov na strižni modul je demonstriral Beldie (1968) v lesu resonančne smreke (preglednica 3)

Preglednica 3: Vpliv trakov na strižni modul G_{ij} in G_{ji} resonančne smrekovine. Opomba, prisotnost trakov močno vpliva na strižni modul $G_{RL} < G_{LR}$ in $G_{RT} < G_{TR}$. (Bucur, 2006)

Vrsta	Strižni modul pri statičnih meritvah (10^8 N/m ²)					
	Ravnina LR		Ravnina LT		Ravnina RT	
	G_{LR}	G_{RL}	G_{LT}	G_{TL}	G_{RT}	G_{TR}
Resonančna smrekovina	5,73	2,50	6,21	5,64	0,31	0,60

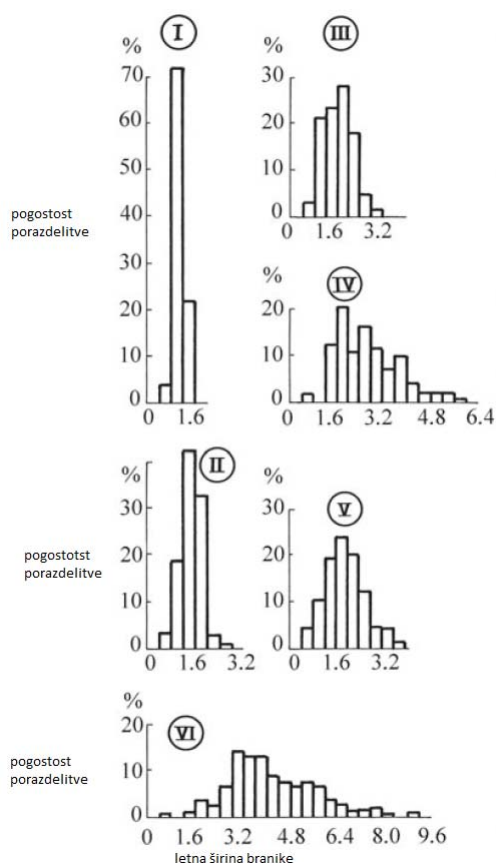
Najbolj kritične vrednosti so v prečni ravnini kjer je razlika med G_{RT} in G_{TR} 50%. Schleske (1990) je analiziral spremembe lesa med rezbarjenjem. Na loku konture zgornje plošče violine so vlakna in trakovi skrajšani in močno odstopajo od glavne smeri L in R. Odklon trakov je večji od vlaken. Takšna geometrija povzroči lokalno zmanjšanje trdnosti in hitrosti zvoka v ravnini zvočnice. Natančen in zelo prefinjen način dela z lesom in anizotropija plošče violine sta dobro znana pri izdelovalcih, ki denimo zmanjšujejo debelino plošče da prilagodijo zvok inštrumenta (Bucur 2006).

Letni prirastek lesa je zelo lahko videti na prečnem prerezu, kjer lahko izmerimo velikost in delež kasnega lesa. Holz (1984) je prirastne značilnosti resonančnega lesa različne kakovosti primerjal z elastičnim modulom (E_r), hitrostjo zvoka in koeficientom dušenja zvoka (preglednica 4).

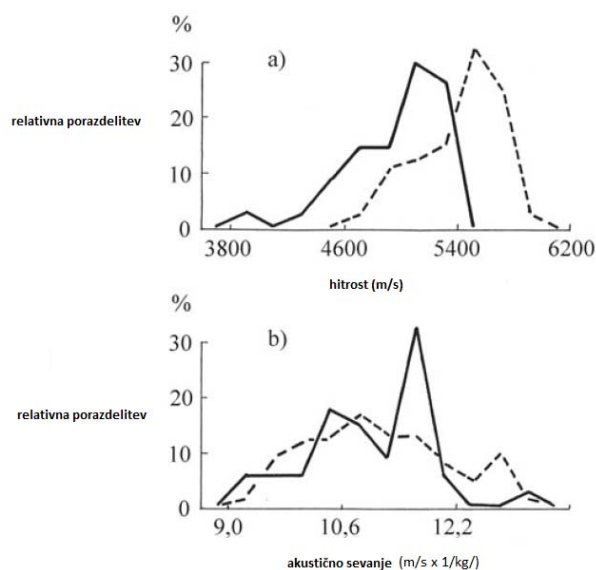
Preglednica 4: Fizikalne in mehanske značilnosti smrekovine za različne glasbene inštrumente. (Holz 1984)

Kakovost lesa za	Gostota (kg/m^3)	Letni prirastek (branike)		Hitrost zvoka V_{RR}	Modul elastičnosti E_R	Koeficient dušenja $\tan \delta$
		Širina (mm)	Kasni les (%)	(m/s)	10^8 N/m^2	(10^{-2})
Kitaro	413	1,08	21	1190	5,9	1,8
Violino	528	1,46	26	1380	10,0	1,8
Klavir	463	1,64	25	1110	5,7	1,6
Ostala brenkala	456	2,65	41	510	12,0	2,8
Gradnja plovil	378	4,25	13	730	1,9	2,2

Iz preglednice lahko opazimo, da delež kasnega lesa pri ploščah za kitaro, violino in klavir komaj presega 25 %. Histogrami širine branike (slika 1 in 2) prikazujejo zelo ostro razporeditev za violine in kitare. Poleg tega so za iste vrste prikazane porazdelitve hitrosti zvoka v vzdolžni smeri in porazdelitev radiacije zvoka. Na histogramu hitrosti je jasna razlika med resonančno smrekovino in smrekovino za konstrukcije. Profil krivulje je podoben, toda razpon je drugačen. Krivulja, ki ustreza akustični radiaciji resonančnega lesa ima ploski parabolični profil, medtem ko ima konstrukcijski les nepravilnega.

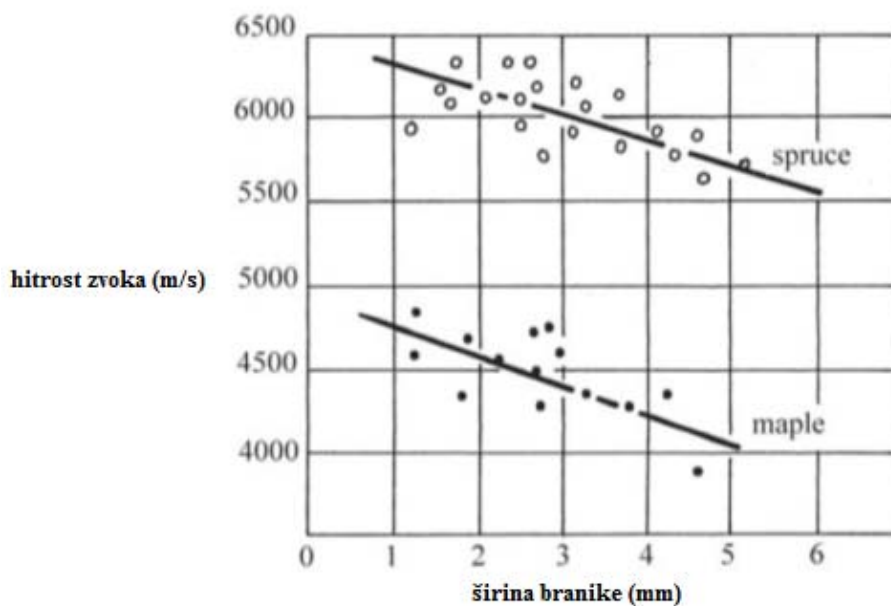


Slika 1: Histogram širine branik resonančnega lesa: 1 - les za kitare, 2 - les za violine, 3 - les za klavir, 4 - les za ostala brenkala (viola, violončelo...), 5 - les za ostalo uporabo, 6 - konstrukcijski les (Holz, 1984).



Slika 2: Histogram porazdelitve hitrosti zvoka (v_{LL}) (a) in akustične radiacije (v_{LL}/ρ) (b) pri resonančni- (črtkana črta) in navadni smrekovini (polna črta) (Holz 1984)

Meritve hitrosti ultrazvoka v resonančni smrekovini in v lesu javorja rebraša kažejo, da se s povečanjem širine branike hitrost zvoka zmanjšuje (slika 3). Povečan delež kasnega lesa pomeni tudi večji modul elastičnosti in zmanjšanje notranjega trenja.



Slika 3: Hitrost ultrazvoka v odvisnosti od širine branike resonančnega lesa (Bucur 1984)

Razlika hitrosti zvoka v vzdolžni in prečni smeri resonančnega lesa dokazuje visoko anizotropijo tega materiala (Bucur, 2006).

2.2 RESONANČNI LES

Za kitare in violine se še danes uporabljajo lesne vrste, ki so jih izdelovalci iz izkušenj že pred stoletji izbrali kot najprimernejše in najboljše. Na vrhu sta resonančna smreka in javor rebraš, sledijo jim tropske vrste kot so: palisander, mahagonij in ebenovina. V današnjem času pa so znanstveniki z obširnimi raziskavami kvantitativno in kvalitativno opredelili najpomembnejše akustične lastnosti lesnih vrst, ki jih lahko določamo tudi z modernimi nedestruktivnimi metodami. Lahko rečemo, da vse vrste z izjemno konstantno oz. enakomerno anatomsko strukturo in visokimi akustičnimi lastnostmi razvrščamo kot »resonančni les«.

2.2.1 Resonančni les smreke

Izdelovalci glasbil tradicionalno izberejo les glede na najenostavnejše anatomske kriterije: raven potek vlaken, fina tekstura in nizka gostota. Ostali kriteriji se nanašajo na velikost letnega prirastka (branike): za violine in viole, povprečno 1 mm (0,8 – 2,5 mm); za čelo 3 mm; za dvojni bas 5 mm; delež kasnega lesa v braniki je tipično okoli 25 %. Razkorak v gostoti kasnega in ranega lesa mora biti čim manjši (tipično 900 in 280 kg/m³) tako, da je povprečna gostota okoli 400 kg/m³. Prehod med kasnim in ranim lesom mora biti čim bolj postopen. Kompresijski les ni primeren in ga moramo povsem izločiti. Dokončna selekcija se določi s prečnim dinamičnim vzbujanjem. Rezultat tega je, da imata zvočni plošči podoben elastičen odziv (vibriranje).

Enakomerni strukturi ustrezajo tudi elastične in akustične karakteristike resonančnega lesa (preglednica 5). Opaziti je mogoče visoke vrednosti E_L in zelo nizke vrednosti G_{TR} , ki nakazujejo na visoko anizotropijo smrekovine.

Preglednica 5: Dinamične elastične konstante in hitrosti zvoka v smrekovini uporabljeni za glasbene inštrumente (Haines, 1979).

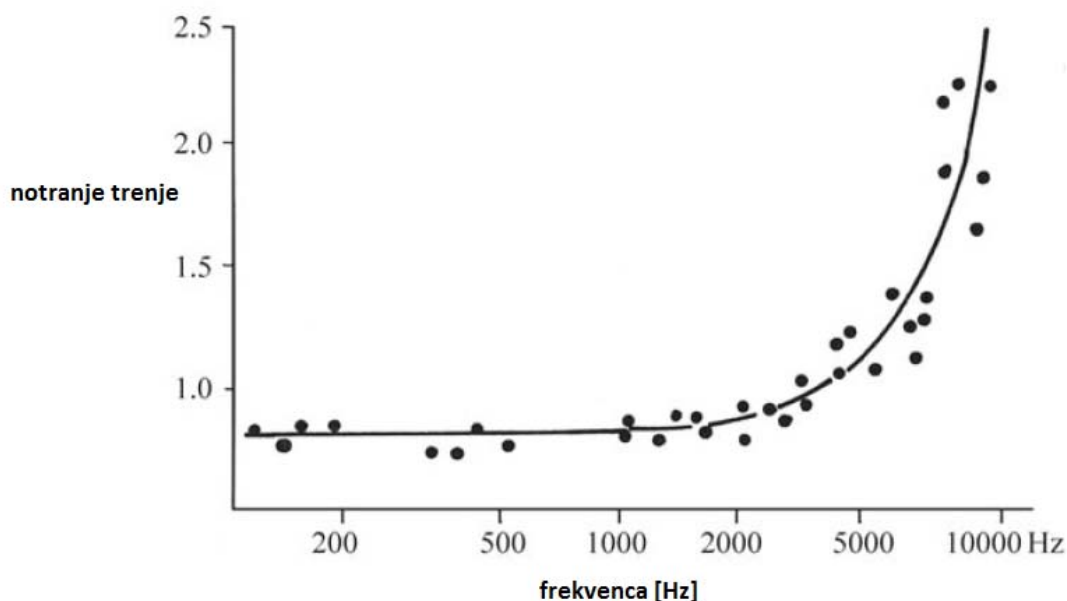
vrsta	Gostota (kg/m ³)	Hitrost (m/s)				Modul elastičnosti (10 ⁸ N/m ²)		Strižni modul (10 ⁸ N/m ²)	
		V_{LL}	V_{RR}	V_{TL}	V_{TR}	E_L	E_R	G_{TL}	G_{TR}
<i>Picea abies</i>	480	5600	1200	1307	359	150	7,4	8,2	0,62
	440	600	1100	1215	316	160	5,0	6,5	0,44
<i>Picea sitchensis</i>	480	5200	1700	1581	309	130	3	12	0,46
	460	5200	1500	1062	242	130	11	5,1	0,27
<i>Picea rubens</i>	480	6300	950	1060	277	90	4,8	5,4	0,37
	450	5700	1300	1192	305	150	7,9	6,4	0,42
<i>Picea glauca</i>	480	5200	1600	1241	306	130	12	6,9	0,53
	460	5700	1600	1224	339	150	12	6,9	0,53

V preglednici 6 so prikazani koeficienti dušenja pri nizkih frekvencah (<900 Hz) in visokih frekvencah (>9900 Hz) pridobljeni z resonančno metodo. Na koeficiente dušenja zelo vpliva frekvenčno območje in anizotropija oziroma atomska struktura. Koeficienti dušenja so višji v radialni smeri kot v vzdolžni smeri. Holz (1967b) je opazil dramatičen vpliv frekvence v območju 2 – 10 kHz (slika 4) na notranje trenje in zmanjšanje vpliva frekvence na vzdolžni modul elastičnosti (E_L).

Preglednica 6: Vpliv frekvenčnega območja na koeficient dušenja zvoka (logaritemski dekrement) v vzdolžni in prečni smeri smrekovine (Haines 1979)

Lesna vrsta	Gostota kg/m ³	Logaritemski dekrement pri nizki frekvenci				Logaritemski dekrement pri visoki frekvenci			
		Vzdolžno		Radialno		Vzdolžno		Radialno	
		$2\pi\tan\delta_L$	ν	$2\pi\tan\delta_R$	ν	$2\pi\tan\delta_L$	ν	$2\pi\tan\delta_R$	ν
<i>Picea abies</i>	480	0,022	642	0,069	1046	0,084	16587	0,098	13130
	440	0,021	779	0,058	753	0,075	13025	0,077	12008
<i>Picea sitchensis</i>	480	0,030	425	0,063	190	0,049	14551	0,071	11311
	460	0,032	552	0,059	1159	0,081	11332	0,070	12042
<i>Picea rubens</i>	480	0,022	873	0,074	553	0,052	9931	0,120	8074
	450	0,022	797	0,063	696	0,052	9613	0,072	8718
<i>Picea glauca</i>	480	0,023	547	0,063	4454	/	/	/	/
	460	0,022	591	0,066	437	0,064	12817	0,082	14527

Hitrost ali realni deli elastičnih konstant so manj odvisni od frekvenčnega območja. Med vrstami smrek je znana smreka »Haselfichte« z značilnimi zamaknjenimi/členastimi branikami. Chiesa (1987, cit. po Bucur, 2006) je določil hitrost ultrazvoka v vzdolžni, radialni in tangencialni smeri



Slika 4: Resonančna smreka: notranje trenje v odvisnosti od frekvence. (Holz 1967b)

te smrekovine in je pri 8% vlažnosti ugotovil naslednje vrednosti: $V_{LL}=4450$ m/s, $V_{RR}=2410$ m/s in $V_{TT}=1290$ m/s. Hitrost v longitudinalni smeri (V_{LL}) je zelo nizka glede na meritve merjene pri popolnoma ravni resonančni smreki z enako gostoto (440 kg/m^3). Izjemna redkost tega lesa je povzročila, da je zelo zaželen pri izdelovalcih violin. Ta smreka je težavna za obdelavo, a ima bogato in atraktivno barvo, poleg tega pa da violini briljanten zvok. Z akustičnega vidika je »zamaknjena smreka« zanimiva za razumevanje odnosa valovitih oblik z anatomskimi lastnostmi. Barlow (1997) je predstavil zelo inovativen pristop pri izbiri materiala za glasbene inštrumente z »merid indeksi«, ki so razmerja med različnimi mehanskimi lastnostmi – modul elastičnosti – gostota.

2.2.2 Palisander (rožni les)

Palisander ali rožni les (angl. rosewood) je bolj skladen in manj heterogen po izgledu kot smreka in cedra. Od palisandrov, ki se uporabljajo za glasbene inštrumente je brazilski najkakovostnejši in je najboljša izbira. To je deloma zaradi tradicije in deloma zaradi zelo aktivnega akustičnega odziva. Ta lastnost denimo prispeva k dolgotrajni ohranitvi vibracij

zvočnice pri kitarah, to pa je glavna funkcija zadnje plošče. Zaradi visokega koeficienta kakovosti (Q – angl. »quality factor, recipročna vrednost koeficienta dušenja) je brazilski palisander obenem steklast in krhek, s tem pa nagnjen k pokanju. Vzhodni indijski palisander kot alternativna izbira, je primerljiv brazilskemu, toda enostavno ni tako dekorativen, po ocenah za 10 – 20 % slabši. Poleg tega je tudi manj dovzeten za razpoke in manj problematičen za obdelavo. Ostali podobni lesovi, ki imajo visok Q so wenge in afriški padouk ter nekateri centralno ameriški lesovi.

2.2.3 Javor rebraš

Javor rebraš, ki se pogosto uporablja za spodnjo ploščo, stranice in vrat violin, izkazuje prav tako ugodne resonančne lastnosti in ima pomembno vlogo v modernih izvedbah brenkal in godal. Za javor rebraš je najpomembnejši kriterij selekcije tekstura, t.j. valovit potek vlaken. Na prvi pogled je ta kriterij očitno povezan z estetiko inštrumenta (Bucur, 2006).

Valovit potek vlaken pri lesu gorskega javorja (*Acer pseudoplatanus*) se smatra kot naravna anomalija, ki izjemno izboljša njegovo komercialno vrednost in je pomembna pri estetiki in akustiki glasbenih inštrumentov. Značilen vzorec imenovan tudi rebrasta tekstura ima vijugavost vzdolž branike. Spremembe v poteku vlaken v braniki lahko opazimo lokalno ali pa po celotnem deblu. Visoko dekorativno strukturo kodrastega javorja je zelo lahko opaziti na vzdolžno-radialni ravnini. Odboj svetlobe in razporeditev barve sta različna na gladki površini, manj izrazita pa na neobdelani. Videz te vrste delimo v štiri skupine: široko valovita vlakna razvrščena v ozkih ali širokih conah ali kratka valovita vlakna (plamena) umeščena v ozkih ali širših conah. Drevesa za glasbene inštrumente naj bi posekali na območju od 800 – 1200 m nadmorske višine, kjer so zasledili drevesa z odličnimi akustičnimi lastnostmi. Variabilnost gostote zaradi vpliva višine ima majhen vpliv na modul elastičnosti. Toda hitrost zvoka vzdolž vlaken je manjša kot pri smreki. Razmerje med gostoto in modulom elastičnosti prikazuje, da ima valovita struktura višjo gostoto in rahlo večji modul elastičnosti E_L kot navadna struktura (550 in

770 kg/m³ ter). Koeficient dušenja je različen samo v frekvenčnem območju od 200 do 500 Hz (preglednica 7). Redkost javorja rebraša v gozdu je motivirala znanstvenike, da so izvedli raziskave na vrstah lesa, ki bi ga lahko zamenjale. Bond (1976) je za hrbet violine predlagal tropski les *Intsia bukeri*, s komercialnim imenom merbau ali mirabou (Bucur, 2006).

Preglednica 7: Akustične in elastične konstante javorovine *Acer* spp. (po Haines 1978; in po Ghemeizu in Beldie 1972)

Gostota	Hitrost zvoka (m/s)		Modul elastičnosti (10 ⁸ N/m ²)		Strižni modul (10 ⁸ N/m ²)		Logaritemski dekrement	
	V_{LL}	V_{RR}	E_L	E_R	G_{TL}	G_{TR}	$2\pi\tan\delta_L$	$2\pi\tan\delta_R$
Javor (<i>Acer platanoides</i>)								
750	3800	1700	110	20	17	0,89	3,7	6,1
Sladkorni javor (<i>Acer saccharinum</i>)								
760	3800	1900	110	26	13	0,49	4,1	6,7
Gorski javor (<i>Acer pseudoplatanus</i>)								
630	3700	1600	87	16	/	/	4,7	7
Javor rebraš (<i>Acer pseudoplatanus</i>)								
580	4491	2379	117	13,8	/	/	/	/

2.2.4 Pernambuk (*Guilandesia echinata*)

Les pernambuka (*Guilandesia echinata*), ki ga imenujejo tudi brazilski les, je zaželen pri izdelavi loka violine zaradi njegove izjemne fleksibilnosti in trdnosti. Kot nadomestna vrsta je bila uspešno uporabljena manilkara (Delune, 1977) (*Manilkara bidentata*), preizkušen pa je bil tudi les »lancewood« toda rezultati so pokazali, da ta les zdaleč ni tako dober kot pernambuk. Za masovno proizvodnjo inštrumentov uporabljajo bukovino (Bucur, 2006).

2.2.5 Ostale lesne vrste

Ostali majhni deli, ki sestavljajo violino (ubiralka, kobilica, sedlo in navijalke) imajo manjši vpliv na akustične lastnosti celega inštrumenta kot pa zgornja in spodnja plošča. Ubiralka, kobilica in navijalke so pogosto narejene iz ebenovine. Za kobilico je v Evropi najboljši les poljskega javorja (*Acer campestre*), v Ameriki pa uporabljajo tudi les gorskega javorja (*Acer pseudoplatanus*) (Bucur, 2006).

2.3 OBREMENITVE LESA PRI UPORABI ZA GLASBENEINŠTRUMENTE

Zvok glasbenih inštrumentov je odvisen od številnih dejavnikov. Najbolj pomembni so akustika sobe, znanje glasbenika in zmožnost zvočne skrinje inštrumenta, da prejme in odda energijo akustičnih vibracij.

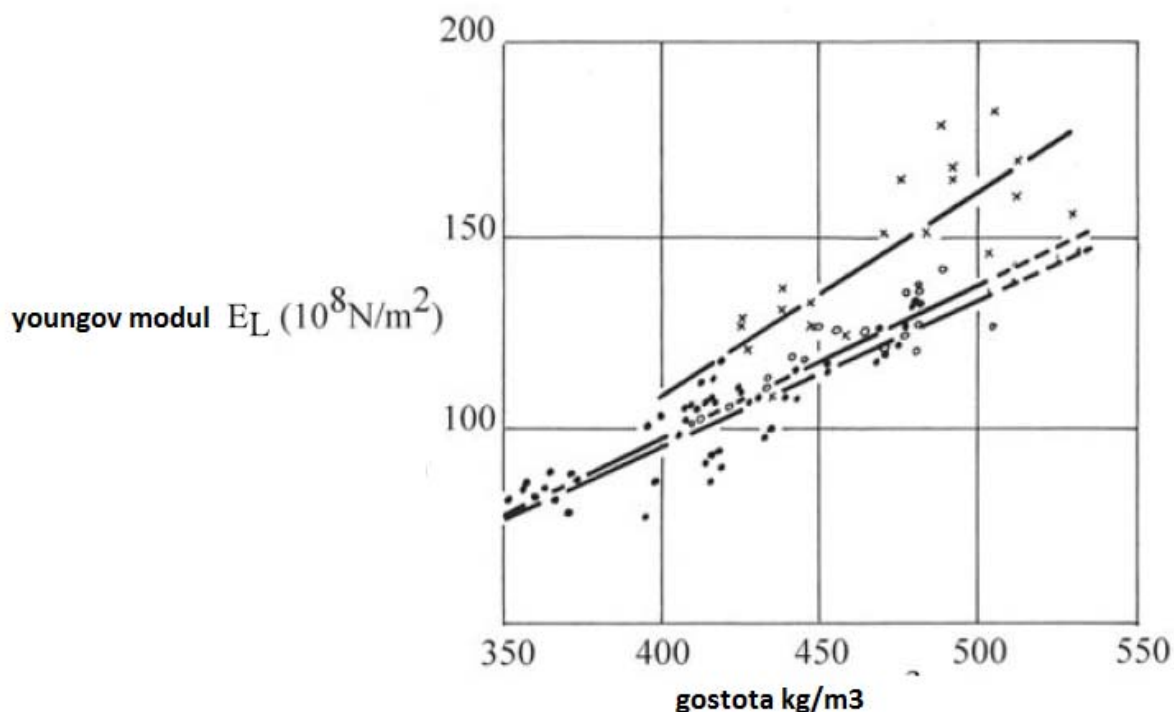
Kvantitativna razmerja med tonom inštrumenta in konstrukcijskimi parametri so pomembni, odkar govorimo o odnosu med tonom in lastnostmi lesa uporabljenega za glasbene inštrumente. Ta pristop zahteva temeljito poznavanje fizikalnih principov nastajanja zvoka v inštrumentu in obenem fiziologije človeškega dojetja zvoka (Hutchins 1975; Weinreich 1983; Meyer 1984; Dünwald 1990; Gough 2001; Schleske 2002a,b). Richardson (1988) navajajo: »Najbolj ekskluzivni vidik izdelovalčeve umetnije je njegova zmožnost, da naredi inštrument z vnaprej določeno kvaliteto tona. Variabilnost lesa uporabljenega pri konstrukciji glasbila igra pomembno vlogo v kakovosti tona inštrumenta. Objektivna selektivna merila surovega materiala lahko pomagajo izdelovalcu pri njegovem delu.« Z namenom vizualizacije zelo kompleksnih modalnih načinov vibriranja trupa so bile razvite različne metode, ki segajo od vibracijskih vzorcev plošče violine do modalnih analiz in holografske interferometrije. Znanstvena dognanja in oprema našega stoletja lahko pomagajo pri ohranjanju bolj ali manj reproduktivnih rezultatov, toda izdelovalčevo znanje ostaja unikaten prispevek pri izdelavi glasbenega inštrumenta (Bucur, 2006).

2.3.1 Vpliv naravnega staranja na resonančni les

Prvo raziskavo o vplivu naravnega staranja resonančnega lesa na akustične lastnosti sta naredila Barducci in Pasqualini (1948, cit. po Bucur 2006). Z uporabo resonančne metode sta merila hitrost zvoka in faktor kvalitete Q v longitudinalni in radialni smeri smrekovine ter javorjevine (preglednica 8). Najboljše akustične lastnosti lesa lahko pričakujemo po desetih letih naravnega staranja. Holz (1981) je preučeval vpliv staranja na akustične in mehanske lastnosti resonančnega lesa. Izbral je 2 do 4 leta, 60 in 180 let star les. Uporabil

je vzdolžno elastično vzbujanje za določitev longitudinalnega modula elastičnosti in notranjega trenja.

Slika 5 prikazuje razmerje med E_L in gostote lesa. Vrednosti modula elastičnosti v vzdolžni smeri (E_L) za star les so rahlo nižje kot tiste za recenten les. Odvisnost notranjega trenja v vzdolžni smeri pri v frekvenčnem območju od 100 Hz do 10 kHz med recentnim in starim lesom ni značilna (Bucur, 2006).



Slika 5: Odvisnost modula elastičnosti (E_L) od gostote lesa pri starem in recentnem lesu. • - 180 let star stavbni les; × - 60 let star les zvočne plošče violine; o - recenten les za neakustične namene. (Holz 1981)

Preglednica 8: Vpliv staranja na akustične lastnosti lesa za violine (Barducci in Pasqualini, 1948, cit. po Bucur, 2006)

Starost	Gostota	Hitrost zvoka			Faktor kvalitete Q	Izvor
		V_{LL}	V_{RR}	razmerje		
let	kg/m ³	m/s	m/s			
Smreka						
1	460	5350	/	/	125	Italija
10	410	5700	1150	4,95	125	Italija
12	415	5600	/	/	135	Italija
52	440	5400	1500	4,7	130	Tirolska
67	450	5250	/	/	115	Tirolska
390	450	4200	950	4,40	95	Italija
Javor						
1	720	4050	/	/	80	Italija
13	665	4300	/	/	105	Italija
17	785	4150	/	/	80	Francija

Iz analiz funkcij violine vidimo dva glavna fizikalna vpliva, ki bi lahko bila vključena v procesu staranja lesa za glasbene inštrumente. To sta:

- kemične in fizikalne spremembe v lesu zaradi nihanj temperature, relativne zračne vlažnosti itd.,
- statična obremenitev strun in vplivi vibracij med igranjem.

Izdelovalci violin največ pozornosti namenijo ustrezno suhemu in umirjenemu »dozorelemu« resonančnemu lesu. V ta namen je les previdno sušen kar nekaj let pred uporabo. Priporočena so različna obdobja od treh let do stoletja. Kratka obdobja (3 – 10 let) so potrebna za dimenzijsko stabilizacijo lesa, ko material doseže njegovo popolno higroskopsko ravnovesje. Zimmermann (1978) je poudaril, da mehanizem zadrževanja vode v lesu ureja elastičnost tkiva, kapilarnost in pojav kavitacije. Primarno izgubo vode so opazili takoj po poseku drevesa zaradi prekinitve vodnega stolpca (večina večjih anatomskih elementov določa povečanje pritiska v tkivu). Očitno je, da imata kapilarnost in kavitacija pomembno vlogo pri porazdelitvi napetosti v lesu, ko vlažnost lesa pade z visoke vrednosti pod točko nasičenja celičnih sten. Majhni anatomske elementi ali nekatere komponente celične stene lahko dolgo časa zadržujejo vodo in jo oddajo šele po več letih.

Da se izognemo kavitaciji in tako pridobimo surov material zelo dobre kakovosti, brez razpok in notranjih napetosti, je potreben zelo dolg proces sušenja na prostem. Pri masovni proizvodnji glasbenih instrumentov so razvili komorsko sušenje z manjšo ostrino sušenja in daljšim trajanjem (3 do 4 mesece). Izdelovalci violin pogosto poročajo tudi o izboljšanju lesa s staranjem.

Realne informacije o odzivu lesa na staranje so nedvomno povezane s kemičnimi lastnostmi (Fengel in Wegener 1989) (preglednica 9). Sklepi glavnih točk preglednice so:

- Celuloza je najbolj stabilna kemična komponenta lesa in se kvantitativno z leti ne spreminja,
- delež lignina se zaradi oksidacije z leti rahlo zmanjšuje, pojav se vidi na barvi in v značilnem vonju starega lesa,
- hemiceluloze so najbolj nestabilne komponente in hidrolizirajo v oligosaharidihe.

Ostali zanimivi fizikalni parametri v povezavi s staranjem lesa so piezoelektrične konstante. Kot je zapisal Fukada (1956) za lesne vrste stare 8, 200, 350, 530, 700, 900, 1200 in 1300 let se je piezoelektrična konstanta v longitudinalni smeri s časom staranja povečala. Maksimum so opazili pri 200 letih. Ta pojav je mogoče pojasniti z reorganizacijo finih struktur, imenovano rekristalizacija celuloznih verig in počasen razpad

celuloznih molekul. V preglednici 10 lahko razberemo, da se indeks kristaliničnosti spreminja s starostjo lesa in doseže maksimum pri 4 in 100 letih (Bucur, 2006).

Preglednica 9: Nekateri kemične komponente stare in recentne smrekovine ter javorovine (Pishik 1971)

starost (leta)	Kemična zgradba (%)				
	celuloza	lignin	ekstraktivi	hemiceluloze	pepel
smreka					
0	54,47	26,29	0,30	17,79	0,26
3	54,40	25,40	0,97	18,50	0,28
50-70	53,94	25,01	0,92	17,80	0,25
150-200	50,78	24,64	2,82	14,16	0,48
200-300	52,34	24,90	2,58	16,60	0,48
300-400	50,77	24,426	4,60	12,11	0,47
500-700	49,45	26,97	2,21	10,35	0,42
Javor					
0	46,53	24,18	0,32	22,51	0,56
70	46,53	23,97	1,64	19,80	0,51
100	47,71	21,91	1,60	18,98	0,52

Preglednica 10: Indeks kristaliničnosti celuloze v recentnem in starem resonančnem lesu (Lungu, 1975)

Čas naravnega staranja lesa (leta)									
1	4	10	30	40	50	60	90	100	120
Indeks kristaliničnosti smrekovine									
39	46,5	41,9	43,6	41,7	39,6	39,6	39,9	46,9	46,9
Indeks kristaliničnosti javorovine									
32	33,4	/	/	36	46	/	/	/	/

2.3.2 Vpliv okoljskih razmer

Akustični odziv glasbenih inštrumentov je kritično odvisen od ustreznih okoljskih razmer (idealna temperatura sobe, 50 – 55 % relativna vlažnost in 8 – 10 % vlažnost lesa). Konstantne spremembe v temperaturi in relativni vlažnosti v letnih časih so velikega pomena pri vseh lesenih delih lakiranih ali ne, starih ali novih. Tanjši elementi so bolj dovzetni na spremembe kot debelejši.

2.3.3 Vpliv dolgotrajne obremenitve

Splošno prepričanje je, da se dobra violina izboljša z leti igranja. Da violina doseže optimalno akustično zmogljivost, je potreben čas (meseci ali leta) igranja. Ko na inštrument ne igramo dalj časa, se njegove akustične lastnosti zmanjšajo, domnevno zaradi relaksacije napetosti nastalih od statičnih in dinamičnih obremenitev strun. Ta obremenitev se pojavi preko vibracij inštrumenta, ki je pod napetostjo strun okoli 44 kg in pod vplivom toplote ter vlažnosti violinista. Spremembo kakovosti zvoka nove violine izdelovalci in igralci opisujejo z besedami »krepitev« lesa. Pri inštrumentih s strunami utrujenost lesa

pripisujemo dvema vzrokoma: dinamičnemu, ko inštrument med igranjem vibrira in statičnemu, ki ga inducira napetost strun.

Sobue in Okayasu (1992) sta raziskovala vpliv vibracije na modul elastičnosti in notranje trenje na različnih listavcih in iglavcih. Prosto prečno nihanje z majhnimi amplitudami (od 0,015 do 0,40 mm) in frekvenco (100 – 170 Hz) sta izvajala 5 h. Na modul elastičnosti režim vibriranja ni imel vpliva, za razliko od notranjega trenja, ki se je zmanjšalo od 5 % do 15 %. Ta odziv je povezan s spremembo normalne poravnave molekul celuloznih verig. Vodikove vezi so se pod konstantnim vibriranjem pretrgale, ta pojav se odraža z zmanjšanjem koeficienta trenja ($\tan \delta$).

Gadd (1984) je preučeval vpliv relaksacije napetosti s statično obremenitvijo lesa smreke sitke. Pri konstantni obremenitvi v elastičnem območju je stopnja vpliva temperature odvisna od odziva lesa po eni uri obremenjevanja. Gadd je predlagal, da bi z obdelovanjem zvočne plošče violine pri temperaturi 65,5 °C za nekaj ur, lahko stabiliziral notranje napetosti. Spremembo akustičnih lastnosti resonančnega lesa (10 let naravnega staranja) z dolgotrajnim obremenjevanjem pri zelo nizkih napetostih ($0,20 \times \sigma_{\text{porušenja}}$) je pokazala ultrazvočna metoda (Bucur in Ghelmeziu 1977; Bucur 1980a). Diagram (slika 6) opisuje pojav porušitve v lesu. Značilne cone so bile razmejene: cona 1; pod $0,2 \times \sigma / \sigma_{\text{porušenja}}$, cona 2; $0,2-0,7 \times \sigma / \sigma_{\text{porušenja}}$, cona 3; $0,7-0,9 \times \sigma / \sigma_{\text{porušenja}}$ in cona 4; nad $0,9 \times \sigma / \sigma_{\text{porušenja}}$. V prvi coni opazimo povečanje hitrosti. V drugi coni je hitrost skoraj konstantna, v tretji in četrti coni se je hitrost zmanjšala z večanjem napetosti. Kljub temu spremembe hitrosti povzročijo spremembe v strukturi lesa (Bucur, 2006).

Da določimo vpliv dolgotrajne obremenitve na akustične lastnosti, so predlagali dva tipa obremenitve: statični upogib in ponavljajoče upogibne udarce na Charpy nihalu pri zelo nizkih napetostih $0,2 \times \sigma_{\text{porušenja}}$. Proučevali so smrekovino, jelovino in javorovino dimenzij 300 x 20 x 20 mm iz zvočnih plošč violine. Hitrost ultrazvoka in dušenje so merili: za statično obremenitev po 1h, 4h, 1, 2, 4, 8, 10, 12, 20, 48 in 52 dneh; za dinamično obremenitev pri 50, 100, 200-2000 udarcih z 24 h relaksacijo po prvih 1000 ciklih udarcev. Strukturne spremembe so izrazili s spremembo hitrosti in dušenjem longitudinalnih valov glede na čas ali število udarcev (preglednici 11 in 12).

Preglednica 11: Hitrosti zvoka in dušenje po 52 dneh statične upogibne obremenitve pri $0,2 \sigma_{\text{porušenja}}$ smrekovine, duglazijevine in lesa javorja rebraša pri 8 % vlažnosti (Bucur in Ghelmeziu 1977).

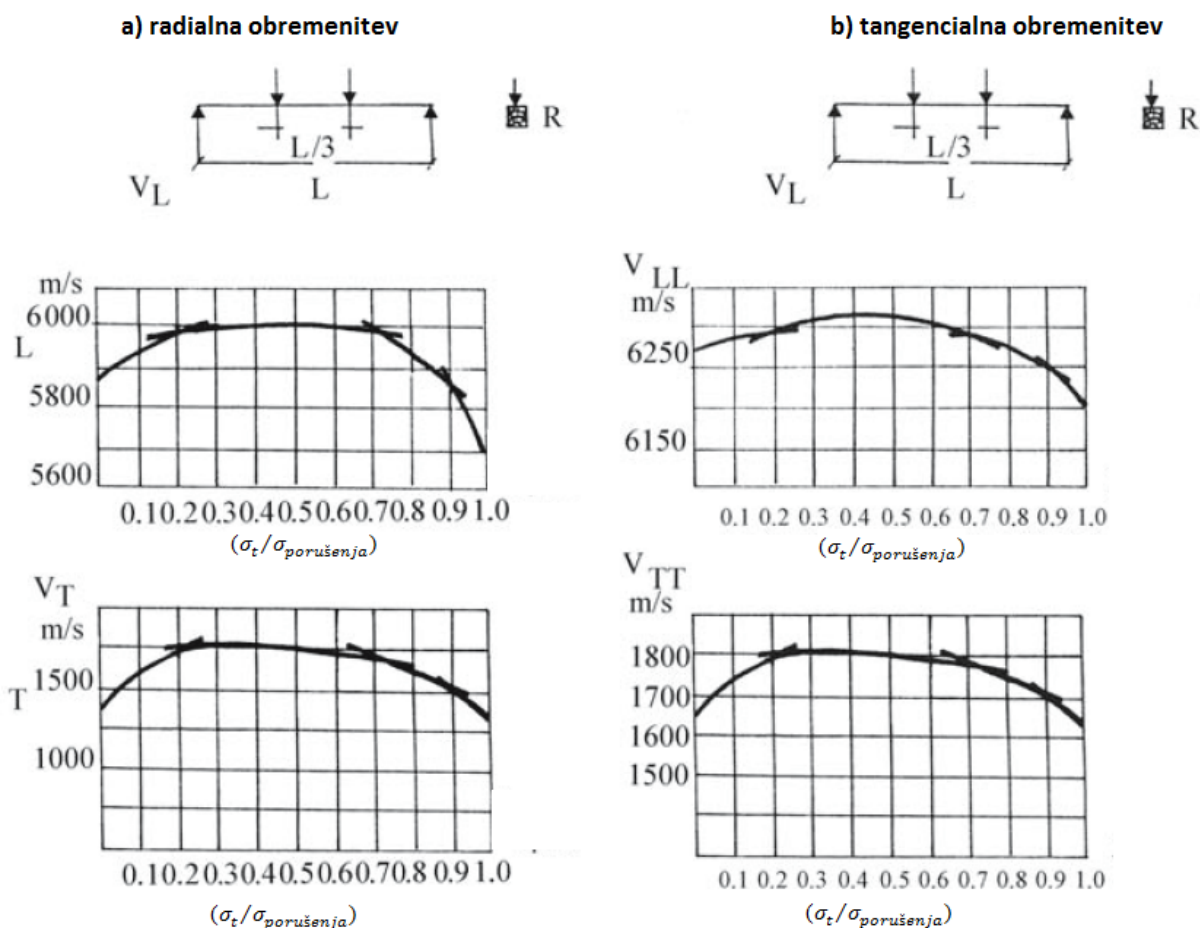
Simbol	Čas	Smreka			Duglazija			Javor		
Upogibna obremenitev po oseh										
		L	R	T	L	R	T	L	R	T
Hitrost (m/s)										
V_{LL}	Začetek	6150	6300	6200	5980	6000	6050	4800	4350	4400
	Konec	6000	6100	6100	5800	5920	5840	4700	4230	4250
V_{RR}	Začetek	2340	1940	2100	1680	1720	1700	2380	2360	2170
	Konec	2200	1970	2170	1600	1800	1780	2330	2380	2270
V_{TT}	Začetek	1500	1470	1470	1160	1300	1200	1680	1550	1520
	Konec	1400	1530	1570	1100	1410	1300	1670	1630	1580
Dušenje (Neper/m)										
α_{LL}	Začetek	0,46	0,50	0,45	0,57	0,60	0,59	1,23	1,20	1,30
	Konec	0,50	0,52	0,52	0,62	0,63	0,69	1,32	1,23	1,36
α_{RR}	Začetek	1,60	1,75	1,80	1,40	2,00	1,90	2,70	2,73	2,70
	Konec	1,10	1,60	1,40	1,60	1,80	1,40	2,80	2,70	2,65
α_{TT}	Začetek	2,40	2,80	3,50	3,90	3,00	3,60	3,20	3,83	3,50
	Konec	2,5	2,00	2,60	4,20	3,00	2,90	3,70	2,92	3,30

Preglednica 12: Hitrosti zvoka in dušenje po 2000 h upogibnih udarcev pri 0,2 $\sigma_{\text{porušenja}}$ smrekovine, duglazijeve in lesa javorja rebraša pri 8% vlažnosti. (Bucur in Ghelmeziu 1977)

Simbol	Čas	Smreka			Duglazija			Javor		
Oсна upogibna obremenitev										
		L	R	T	L	R	T	L	R	T
Hitrost (m/s)										
V_{LL}	Začetek	6000	6180	6080	5870	5900	5900	4800	4830	4530
	Konec	5930	6000	6000	5700	5800	5800	4200	4750	5600
V_{RR}	Začetek	1560	1460	1390	1330	1580	1600	2200	1890	1990
	Konec	1460	1520	1450	1430	1670	1670	2110	1850	1850
V_{TT}	Začetek	1260	1260	1260	1100	1100	1210	1350	1510	1440
	Konec	1230	1340	1360	1080	1190	1290	1200	1470	1600
Dušenje (Neper/m)										
α_{LL}	Začetek	0,46	0,50	0,45	0,57	0,60	0,59	1,23	1,20	1,30
	Konec	0,50	0,52	0,52	0,62	0,63	0,69	1,32	1,23	1,36
α_{RR}	Začetek	1,60	1,75	1,80	1,40	2,00	1,90	2,70	2,73	2,70
	Konec	1,10	1,60	1,40	1,60	1,80	1,40	2,80	2,70	2,65
α_{TT}	Začetek	2,40	2,80	3,50	3,90	3,00	3,60	3,20	3,83	3,50
	Konec	2,5	2,00	2,60	4,20	3,00	2,90	3,70	2,92	3,30

Pri statični obremenitvi je bila pod največjim vplivom ravnina, kjer je bila povzročena napetost. Spreminjanje akustičnih lastnosti je pomembno do dvanajstega dneva eksperimenta, po tem vsi akustični parametri ostanejo razmeroma stabilni.

Razmerje $(\frac{V}{V_0})^2$ (kjer je V hitrost v trenutku t in V_0 hitrost pri času $(t=0)$ se je pokazalo kot možen parameter z oceno strukturne spremembe, ki so jih povzročili različni tipi obremenitve. (Bucur, 2006).



Slika 6: a) Razmerje hitrosti in napetosti v resonančni smrekovini pod statično upogibno obremenitvijo v radialni ali tangencialni smeri; b) hitrosti v vzdolžni in tangencialni smeri (V_{LL} , V_{TT}) v primerjavi z razmerjem napetosti v času 0 in pri $(\frac{\sigma_t}{\sigma_{porušenja}})$. (Bucur 1979)

2.4 NAJPRIMERNEJŠE LESNE VRSTE ZA POSAMEZNA GLASBILA

Različna glasbila zahtevajo drugačne akustične karakteristike, s tem pa tudi različne lesne vrste. Izdelovalci so skozi leta izkušenj opredelili najbolj primerne vrste, zaradi redkosti nekaterih pa tudi njihove alternative. Zelo pomemben je način vzbujanja lesa, način njihove uporabe, obremenitve ter na koncu tudi način obdelave.

2.4.1 Akustične lastnosti resonančnega lesa za violine

V zgodovini je bi prav gotovo najbolj proučevan les za izdelavo godal, še posebno violine. Tako so se oblikovali zahtevani anatomske kriteriji (preglednica 13) in mehanske karakteristike za najprimernejši les (preglednica 5).

Preglednica 13: Opis anatomske znakov za resonančni les različnih vrst najprimernejših za godala.

Anatomski elementi	Vrsta
Traheide	Smreka: 20 – 40 μm v premeru radialne ravnine pri ranem lesu in manjši pri kasnem lesu. Majhne, obokane piknje v eni vrsti na radialni steni. Piknje v parenhimskem traku piceoidne, majhne, enakomerne velikosti z vidno mejo. Po navadi dve na križnem polju v eni vrsti. Jelka: 25 – 65 μm v premeru na radialni ravnini pri ranem lesu, 10 – 25 μm za kasni les. Obokane piknje v enem nizu ali zelo redko v paru na radialni steni. Piknje na parenhimskem traku taksodoidne, majhne, dokaj enakomerne velikosti z vidno mejo. Ena do štiri na križnem polju. Javor rebraš: vlaknaste traheide debelostene, srednje do zelo grobi. Zelo različni v dolžini od 0,01 – 3 mm

se nadaljuje

nadaljevanje **preglednice 13**: Opis anatomskih znakov za resonančni les različnih vrst najprimernejših za godala.

Anatomski elementi	Vrsta
Trakovi	Smreka: dva tipa – enoredni in fuziformni; enoredni trakovi številni (80 – 100 trakov/cm) in 1 – 25 celic v višino. Fuziformni trakovi raztreseni z transferzalnimi smolnimi kanali, 3 – 5 redni na sredini, zoženi zgoraj in spodaj v enoredni do roba kot enoredni trakovi, do 16 celic v višini, končne stene kolenčaste in nazobčane, trakovne traheide v obeh tipih trakov po navadi omejene na eno vrsto na spodnjem in zgornjem robu. Jelka: enoredni, zelo variabilni po dolžini (1-50 celic), v celoti sestavljeni iz trakovnega parenhima, številni do 80 trakov/cm Javor rebraš: do 5 mm v višini vzdolž vlaken, homocelularni, 1-20 (večinoma 2-10) redni, piknje med trakom in trahejo podobne intervaskularnem tipu
Smolni kanali	Smreka: debelostene epitelne celice, vzdolžni smolni kanali, majhni, 125 μm v premeru, po navadi redki, približno 22 kanalov /cm², prečni kanali bolj redki. Jelka: brez, včasih prisotni travmatski smolni kanali, občasno v široko razporejenih krogih, postavljeni v tangencialnem nizu, ki se po navadi dolgo razširijo po braniki Javor rebraš: brez
Traheje	Smreka: brez Jelka: brez Javor rebraš: posamične, 25-150 μm v premer, 30-50 trahej/mm², enostavne perforacije, občasno lestvičaste, intervaskularne piknje ovalne, okrogle, široko razporejene, 50 μm v premeru

2.4.2 Akustične lastnosti lesa za kitare

Zaradi dinamike kitare mora biti zvočni les za sprednjo ploščo drugačen kot za zadnjo, če želimo, da bo inštrument imel kar najboljši in najbolj enakomeren zvok. Soglasje med izdelovalci je, da sta sprednja in zadnja plošča različnih gostot zato, ker mora biti resonančna frekvenca zadnje plošče višja od sprednje vsaj za en ton. Če je prisoten prevelik ali premajhen razmik, ki ločuje osnovne resonančne frekvence na sprednji in zadnji plošči, potem bo kitara imela neenakomeren zvok.

Izbira resonančne smreke za zvočno ploščo kitare je potrebno izvesti zelo pazljivo glede na pravila, ki so se oblikovala v zgodovini pri izdelovalcih inštrumentov. Najbolj cenjena je smreka z ozkimi prirastnimi plastmi (širina branike 2 mm), čeprav lahko uporabijo tudi libanonsko cedro (*Cedrus libani*) ali kanadsko rdečo cedro (*Tsuga heterophylla*) kot tudi orjaški klek (*Thuja plicata*). Zahteve za enakomerno strukturo niso tako zahtevne kot pri violini. To je razumljivo dejstvo takrat, ko smatramo, da je razlika med zvočno ploščo violine in kitare v glavnem le v velikosti in napetosti strun. Zgornja plošča violine je ukrivljena (izrezljana), medtem ko je na kitari ravna. Posledično so tudi trdnostne zahteve drugačne. V preglednici 14 so navedene nekatere karakteristike smrekovih zvočnih plošč.

Preglednica 14: Zahtevane mehanske lastnosti smrekovine izbrane za zvočno ploščo kitare (Richardson 1986)

Gostota (kg/m ³)	Modul elastičnosti (10 ⁸ N/m ²)		Koeficient dušenja	
	E_L	E_R	$2\pi\tan\delta_L$	$2\pi\tan\delta_R$
406	130	3,8	0,020	0,067
420	111	11,0	0,022	0,058
403	121	9,1	0,021	0,057
518	136	2,4	0,026	0,008
460	150	7,6	0,021	0,064

Kakovosten les za izdelavo glasbenih inštrumentov odlikuje visoka trdnost, nizko notranje trenje, nizka gostota in tudi atraktivna tekstura lesa. Za primeren zvok in njegovo dolgotrajnost je potrebnih več kriterijev. Tako, na primer, violine potrebujejo več dušenja kot kitare. Za hrbet in stranice kitare je najboljši brazilski palisander (*Dalbergia nigra*), čeprav so izdelovalci kitar uporabljali za stranice in kobilico širok nabor listavcev visokih gostot. Alternativne tropske vrste so navedene v preglednici 15. Vse te vrste zaznamuje visoka gostota in nizko dušenje (Bucur, 2006).

Preglednica 15: Značilnosti nekaterih lesnih vrst, ki se uporabljajo za stranice in hrbet kitar (Richardson 1986)

vrsta	Gostota kg/m ³	Modul elastičnosti (10 ⁸ N/m ²)		Koefficient dušenja	
		E_L	E_R	$2\pi\tan\delta_L$	$2\pi\tan\delta_R$
<i>Cordia trichotoma</i>	793	82,4	46,7	0,035	0,04
<i>Zollernia illicifolia</i>	838	178,3	46,7	0,025	/
<i>Piptadernia macrocarpa</i>	1095	267,8	/	0,015	0,03
<i>Machaerium villosar</i>	824	/	33,2	/	0,04
<i>Dalbergia</i>	1012	76,70	35,60	0,026	/
<i>Ferreira spectabilis</i>	893	230	/	0,019	/
<i>Dalbergia nigra</i>	1025	167,7	/	0,018	/

2.4.3 Akustične lastnosti lesa za pihala

Pihalni inštrumenti v klasičnih orkestrih so flavta, oboa, klarinet in fagot. Današnje flavte in klarineti so pogosto narejeni iz kovine ali plastike. Toda flavte in pikolo za vojaške godbe so lahko narejene iz afriške ebenovine (*Dalbergia melanoxylon*), palisandra ali madagaskarske ebenovine. Glavne značilnosti teh vrst so visoka dimenzijska stabilnost, visoka gostota in fina struktura.

Za inštrumente, narejene iz lesa, se značilnost lesnih vrst vidi predvsem v estetiki in kakovosti tona. Material lahko vpliva na obnašanje inštrumenta med igranjem zaradi:

- Spremembe frekvence v zračnem stolpcu,
- vibracijskega fenomena dušenja na stenah, ki ga inducira trenje zraka ali oscilacija temperature in
- turbulence v vibraciji zračnega stolpca.

Potrebni obdelovalni lastnosti pihal narejenih iz lesa sta enostavnost in točnost struženja ter vrtanja. Ti lastnosti sta povezani z akustičnim obnašanjem inštrumenta, ki je močno odvisno od dizajna sistema zvočnih lukenj. Odprte luknje določajo obstoj ali izničenje frekvenc značilnih za vsak inštrument.

Klarineti in oboe najvišje kakovosti so narejeni popolnoma ročno iz afriške ebenovine (*Dalbergia melanoxylon*). Les Cocus (*Brya ebenus*) in različni palisandri so se uporabljali, ko je primanjkovalo afriške ebenovine. Navadni pušpan (*Buxus sempervirens*) je zadovoljiv nadomestek pri izdelavi oboe. Afriška ebenovina se smatra za najboljšo vrsto pri izdelavi fagota, toda uporabijo se lahko tudi ostale goste vrste kot so gorski javor (*Acer pseudoplatanus*) in ostrolistni javor (*Acer platanoides*). V preglednici 16 so navedene akustične lastnosti glavnih vrst uporabljenih za pihala (Bucur, 2006).

Preglednica 16: Akustične lastnosti pomembnih vrst lesa, ki se uporabljajo za pihala (Haines 1979).

Gostota kg/m^3	Hitrost zvoka (m/s)		Modul elastičnosti (10^8N/m^2)		Strižni modul (10^8N/m^2)		Koefficient dušenja	
	V_{LL}	V_{RR}	E_L	E_R	G_{TL}	G_{TR}	$2\pi \tan \delta_L$	$2\pi \tan \delta_R$
Indijski palisander								
790	4600	1600	170	20	27	8,8	19	47
Brazilski palisander								
830	4400	1800	1600	28	30	9,2	17	38

2.4.4 Akustične lastnosti lesa za tolkala

Obroči bobna so narejeni iz lesa jesena ali bukve, včasih tudi iz vezanih plošč. Kastanjete, ki dajejo značilno barvo flamenku in ostalim latinskim plesom, so narejene iz dveh okroglih delov lesa palisandra ali ebenovine. Ksilofoni so narejeni iz številnih lesenih desk različnih velikosti in vrst lesa (javor, oreh, smreka, eksotične vrste). Orkestrska marimba je globoko zveneči ksilofon s kovinskimi cevastim resonatorjem pod ploščicami, ki zveni eno oktavo nižje kot štiri oktavni ksilofon. Na ta inštrument se igra s palicami z mehko glavo. Honduraški palisander (*Dalbergia stevensonii*), zelo trajna vrsta, je najbolj primeren za marimbe, ki jim daje bogat zvok. Te vrste imajo nizko notranje trenje in veliko zvočno radiacijo.

2.4.5 Akustične lastnosti lesa za klavir

Najboljše zvočne plošče so narejene iz smrekovine (*Picea abies* iz Evrope – Avstrijske in Bavarske Alpe ter Karpati). Smreko sitko (*Picea sitchensis*) dandanes priporočajo najbolj pomembni izdelovalci klavirjev v Evropi, Severni Ameriki in Japonski. Komercialno poimenovana tudi »Romunski bor«, smreka iz Karpatov – regija Bucovina v severni Romuniji velja za eno najboljših lesnih vrst za velike klavirje zaradi njenih akustičnih lastnosti, izgleda in atraktivne nežne rumene barve.

Širina branik je od 0,7 – 3 mm, je pomemben faktor pri izbiri surovega materiala. Zvočne plošče z ožjimi branikami se uporabljajo pod visoko zvonečimi strunami, širše branike pa pod nizko zvonečimi strunami. Za akustično obravnavo naj bi bila sprememba širine v letni braniki sosednje plošče postopna (Bucur, 2006).

3 MATERIALI IN METODE

3.1 MATERIAL

Pri eksperimentalnem delu smo uporabili šest lesnih vrst: bukev (*Fagus sylvatica* L.), jesen (*Fraxinus excelsior* L.), smreko (*Picea abies* Mill.), hrast (*Quercus* sp.), češnja (*Prunus avium*) in oreh (*Juglans regia* L.). Naključno izbran material smo dobili v obliki žaganic dolžine 0,6 m kvadratnega prereza 2 x 2 cm.

3.1.1 Izdelava preizkušancev

Žaganice smo razžagali na manjše preizkušance dimenzij ($L \times R \times T = 17 \text{ mm} \times 17 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$) in jih označili tako, da smo lahko sledili njihovem izvoru (slika 7). Pri izdelavi vzorcev smo pazili na njihovo orientacijo, tako, da so ravnine obdelave sovpadale z anatomskimi. Sledilo je kondicioniranje preizkušancev v komori pri standardnih pogojih ($T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in $\varphi = 65 \text{ } \%$). Preizkušance smo nato razdelili v dve skupini; eno smo sušili in drugo navlaževali.



Slika 7: Pripravljeni preizkušanci

3.2 METODE

3.2.1 Postopki uravnovešanja

Preizkušance smo najprej uravnovesili v normalni klimi in sicer v zatesnjenem kontejnerju z relativno zračno vlažnostjo 65%, ki smo jo dosegli z nasičeno vodno raztopino natrijevega nitrata (NaNO_2) pri 20°C. Preizkušance smo nato stekali na 0,001 g natančno in izmerili vse dimenzije na 0,01 mm natančno. Nato smo jih razdelili v dve skupini, prvo skupino smo navlaževali in drugo sušili. Navlaževanje preizkušancev smo izvedli v zatesnjenem kontejnerju z relativno zračno vlažnostjo 86 %, ki smo jo dosegli z nasičeno raztopino cinkovega sulfata (ZnSO_4), drugo skupino preizkušancev smo uravnovešali nad nasičeno raztopino magnezijevega klorida (MgCl_2) z relativno zračno vlažnostjo 37%. Vse preizkušance smo pri omenjenih pogojih obdržali toliko časa, da smo pri dveh zaporednih tehtanjih ugotovili zanemarljivo majhno razliko v masi, kar pomeni, da so se vzorci uravnovesili v navedenih klimatskih pogojih. Med celotnim uravnovešanjem smo intervalno, na začetku vsake štiri ure, vsem vzorcem izmerili maso in dimenzije. Interval pa se je s časoma povečeval, tako, da smo na koncu meritve opravili na vsake štiri dni.

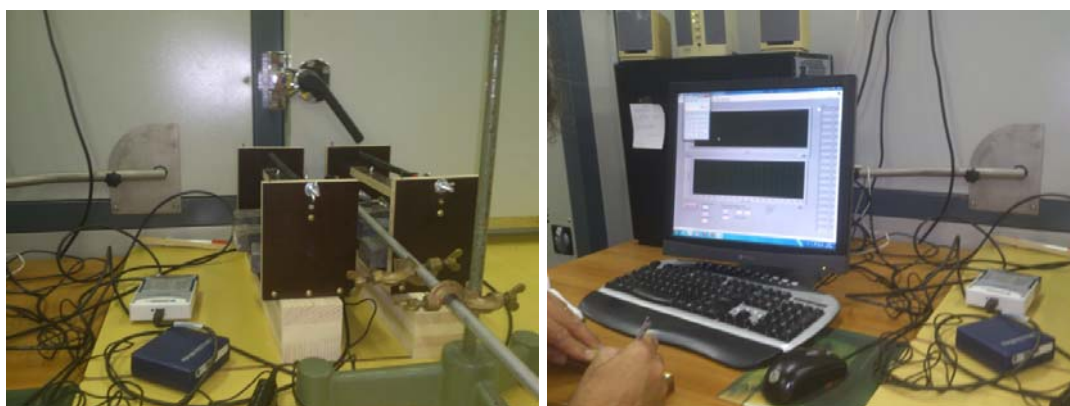
3.2.2 Potek eksperimenta

Navlaževane in sušeče preizkušance smo najprej v krajših, kasneje pa v daljših časovnih intervalih vzbujali in določali njihove akustične karakteristike ter sočasno spremljali tudi spremembo vlažnosti (slika 8).



Slika 8: Preizkušanci zaviti v PVC vrečo.

Preizkušance smo postavili na podpore in z lesenim klavircem vzbujali prečno nihanje. Pri tem je bila bistvena postavitev vzorca na podpore, ki je znašala 0,224 dolžine od konca palice, na t.i. vozliščih. Zvok smo zajeli s kondenzatorskim mikrofonom (PCB 130D20), ki smo ga postavili na sredino vzorca oz. na mesto kjer je nihanje največje. Mikrofon smo povezali z modulom za zajem podatkov (NI-9234) in z računalnikom (slika 9).



Slika 9: Podpora za vzbujanje vzorcev z mikrofonom (levo), program za zajem podatkov (desno).

Vse podatke smo obdelali s programom LabVIEW 8.0®, kjer smo naredili dva podprograma:

- Prvi je bil namenjen zajemu podatkov, t.j. zvočnega signala v 3-sekundnem intervalu, časa meritve ter podatkov o preizkušancu (masa in dimenzije). Pred

vzbujanjem smo preizkušance stehali na natančni tehtnici (Exacta 300 EB), s kljunastim merilom izmerili dimenzije, ter zabeležili čas meritve. Meritve smo izvedli na vlažnih in suhih preizkušancih.

- Druga aplikacija pa je bila namenjena analizi podatkov in izračunom. V aplikaciji smo uporabili hitro Fourierjevo transformacijo signala za določitev lastne frekvence (f). Z vnesenimi podatki o masi in dimenzijah preizkušancev smo po Bernoulli-jevi enačbi določili še modul elastičnosti (E-modul). Na grafu smo iz pojemajočega nihanja določili še koeficient dušenja zvoka ($\tan \delta$).

3.2.3 Določanje fizikalnih karakteristik

Pri vzbujanju z elastičnim udarjanjem smo dobili naslednje podatke:

- osnovna frekvenca zvočnega signala (f_l),
- amplituda zvočnega signala (β),
- trenutno dušenje osnovne frekvence (α).

Prvi kazalnik, ki smo ga izračunali iz dobljenih podatkov, je bil koeficient dušenja zvoka ($\tan \delta$) (Brancheriau in sod., 2006b) oziroma notranje trenje, ki nam pove kakšno je dušenje mehanskega nihanja preizkušanca pri osnovni, lastni frekvenci, ki smo jo dobili s hitro Fourierjevo analizo signala (FFT).

- Koeficient dušenja zvoka ($\tan \delta$)

$$\tan \delta = \frac{2\alpha}{\pi f_l} \quad \dots(3)$$

Prečni dinamični elastični modul (E) smo izračunali z enačbo 4 (Bucur, 2006).

- Prečni dinamični elastični modul (E)

$$E = \frac{4 \times \pi^2 \times L^4 \times \rho \times f_n^2 \times A}{I \times k_l^4} \quad \dots(4)$$

Oznake:

- L - dolžina preizkušanca [m],
- ρ - gostota [kg/m^3]),
- frekvenca (f_n), kjer n predstavlja nihajni način ($n = 1$),
- prečni prerez preizkušanca (A),
- vztrajnostni moment (I), ki je za pravokotne prereze $I = bh^3/12$, kjer je b širina in h višina obdelovanca ter
- korekcijski koeficient, ki je odvisen od nihajnega načina oziroma posredno od uporabljene frekvence; za prvi nihajni način je $k_l = 4,730$.

4 REZULTATI

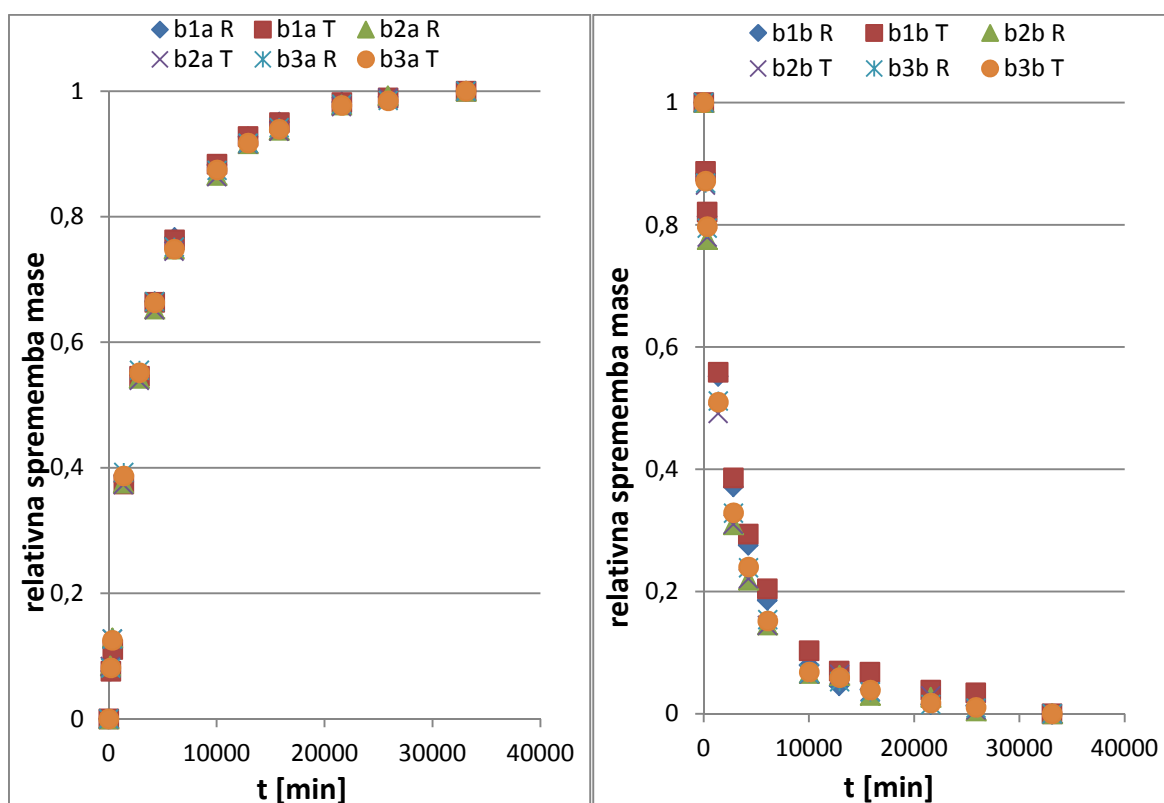
4.1 DINAMIKA URAVNOVEŠANJA LESNIH VRST

Pri spremljanju dinamike sušenja oziroma navlaževanja preizkušancev smo prikazali tipične uravnovesne krivulje glede na čas in jih dopolnili z polovičnim uravnovesnim časom (preglednica 17). Eksperiment sušenja in navlaževanja je potekal približno tri tedne. Za vse preizkušance smo predpostavili, da so imeli začetno vlažnost 12 %. Kot pričakovano so končne vlažnosti pri osušenih preizkušancih nihale od 9,1 % do 9,8 %. Večje variiranje vlažnosti se je pojavilo pri navlaževanju in sicer od 16,0 % do 19,2 %.

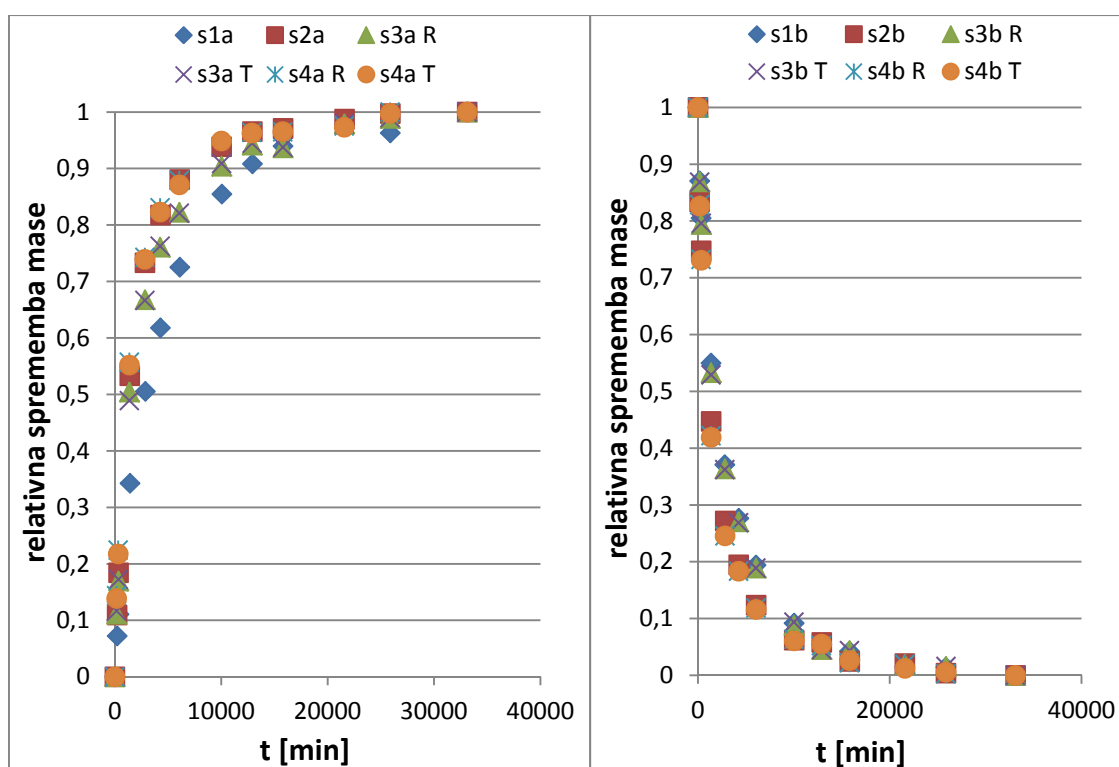
Polovični uravnovesni časi se spreminjajo glede na lesno vrsto, prav tako pa tudi med posameznimi preizkušanci znotraj vrste (preglednica 17). Tako se je najhitreje uravnovesila smreka – 976 minut, najdlje pa je potreboval hrast – 3485 minut (slike 10 do 15).

Preglednica 17: Spremljanje sušenja preizkušancev. Začetna vlažnost (u_z), končna vlažnost (u_k) in polovični uravnovesni čas sušenja ($t_{0,5}$).

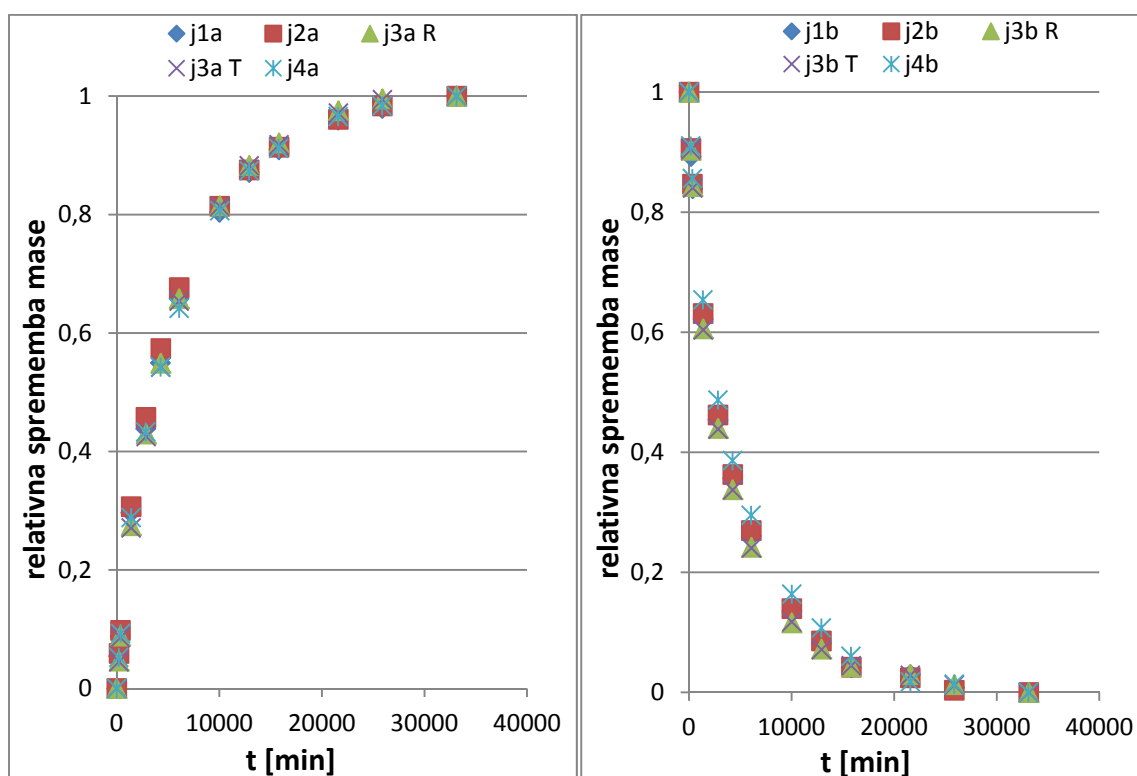
Preizkušanec	u_z (začetna) [%]	u_k (končna) [%]	$t_{0,5}$ [min]
	radialno	radialno	radialno
b1a	12	19,08	
b1b	12	9,14	1761
b2a	12	18,43	
b2b	12	9,39	1060
b3a	12	18,37	
b3b	12	9,36	1448
s1a	12	18,43	
s1b	12	9,26	1866
s2a	12	19,15	
s2b	12	9,23	1070
s3a	12	17,42	
s3b	12	9,14	1652
s4a	12	18,76	
s4b	12	9,26	976
č1a	12	16,43	
č1b	12	9,76	1892
č2a	12	19,23	
č2b	12	9,78	1390
h1a	12	18,57	
h1b	12	9,40	3485
j1a	12	17,11	
j1b	12	9,38	2886
j2a	12	18,31	
j2b	12	9,33	3087
j3a	12	18,36	
j3b	12	9,61	2589
j4a	12	18,40	
j4b	12	9,22	3276
o1a	12	16,28	
o1b	12	9,64	2005



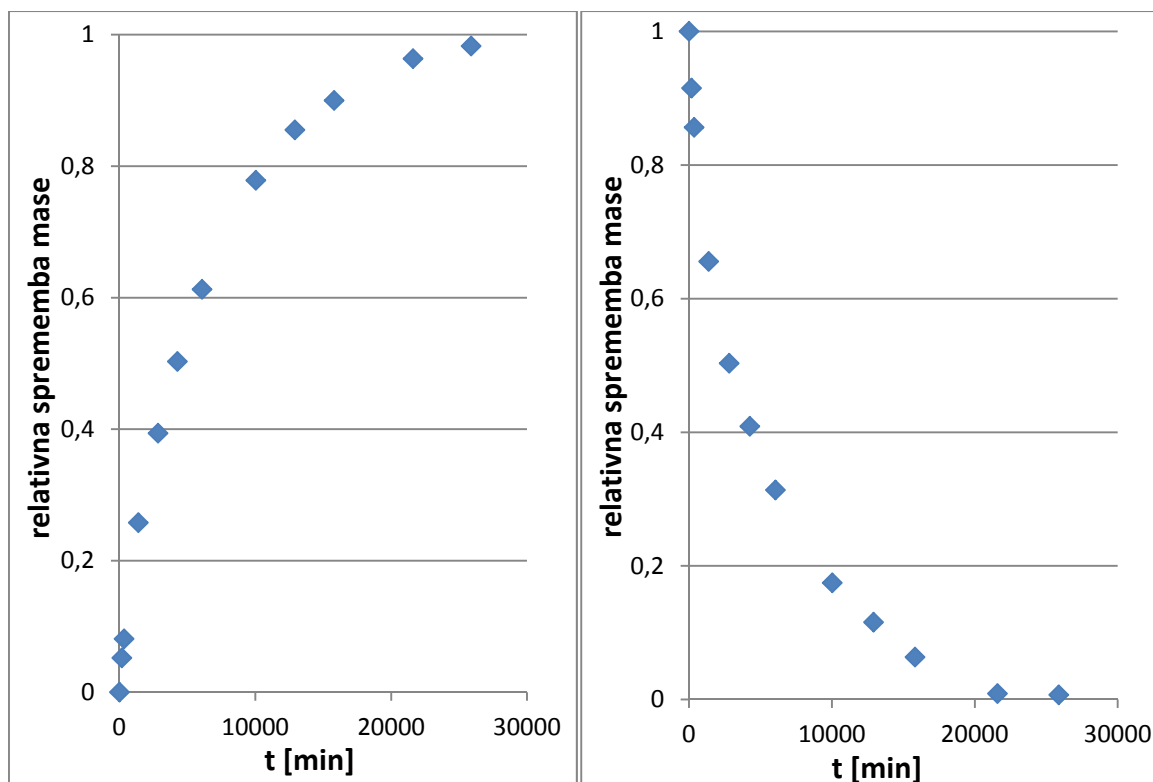
Slika 10: Relativna sprememba mase bukovine po času, levo adsorpcija desno desorpcija.



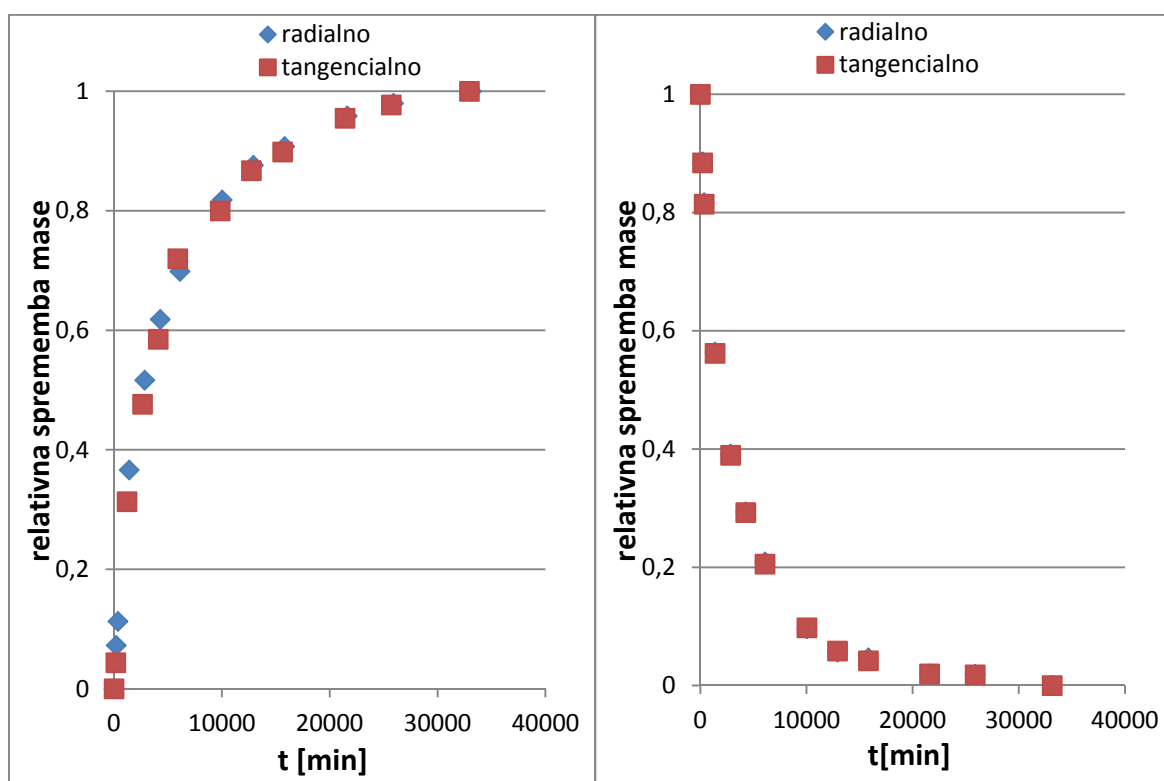
Slika 11: Relativna sprememba mase smrekovine po času, levo adsorpcija desno desorpcija.



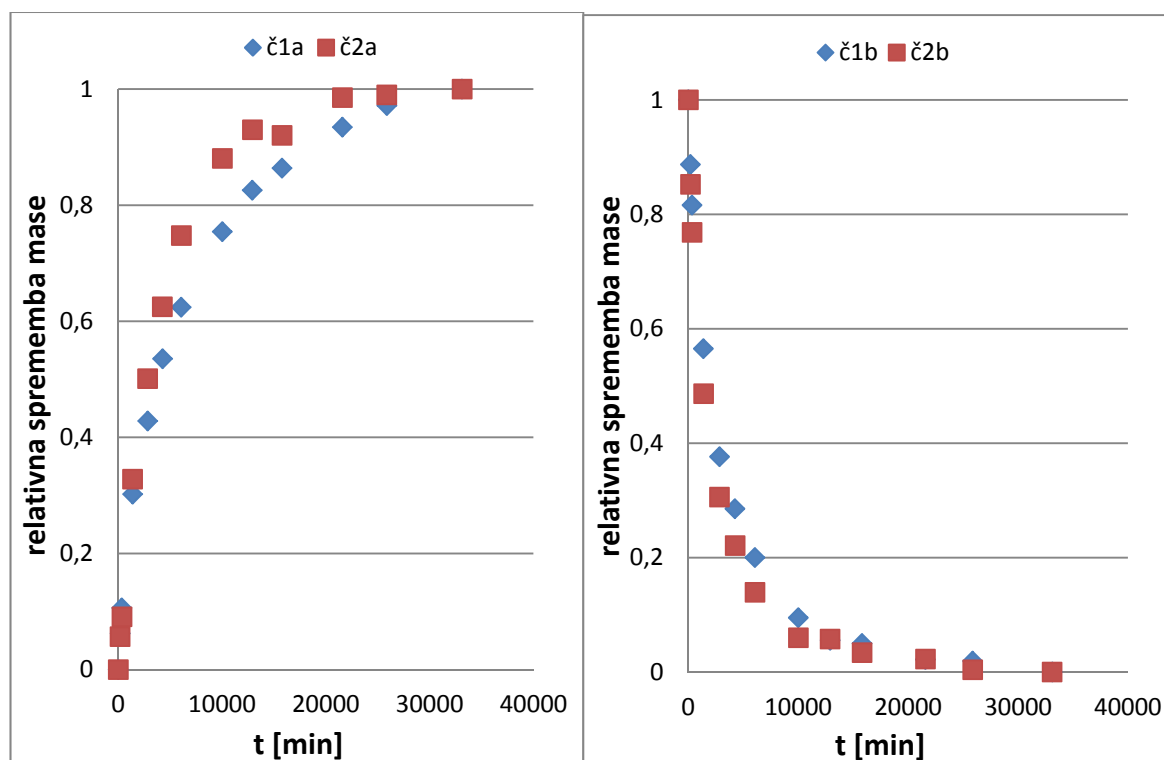
Slika 12: Relativna sprememba mase jesenovine po času, levo adsorpcija desno desorpcija.



Slika 13: Relativna sprememba mase hrastovine po času, levo adsorpcija desno desorpcija.



Slika 14: Relativna sprememba mase orehovine po času, levo adsorpcija desno desorpcija.

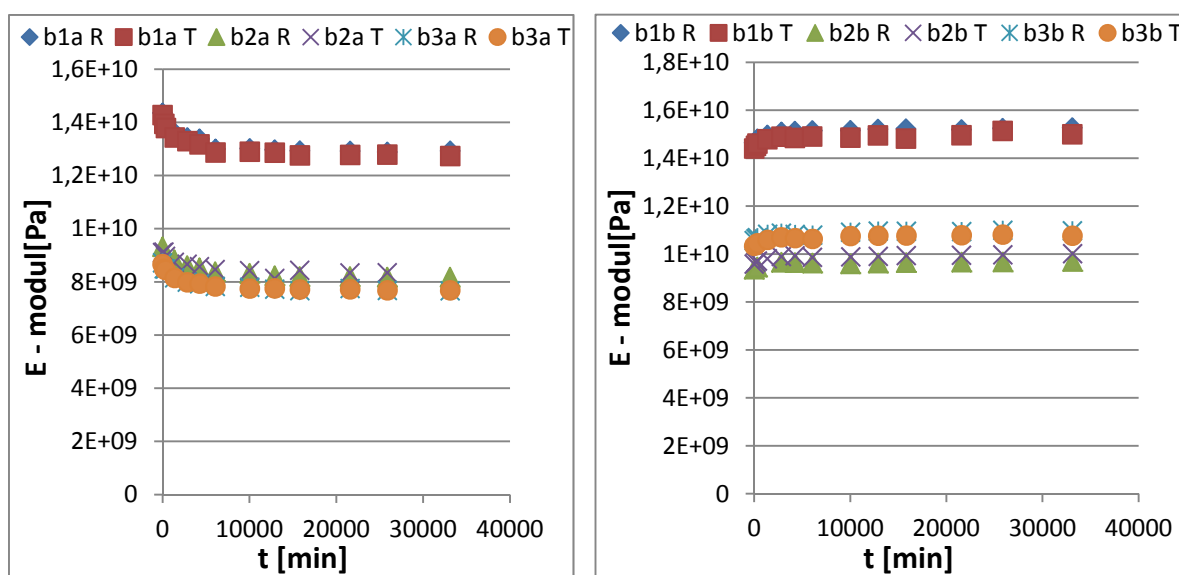


Slika 15: Relativna sprememba mase lesa češnje po času, levo adsorpcija desno desorpcija.

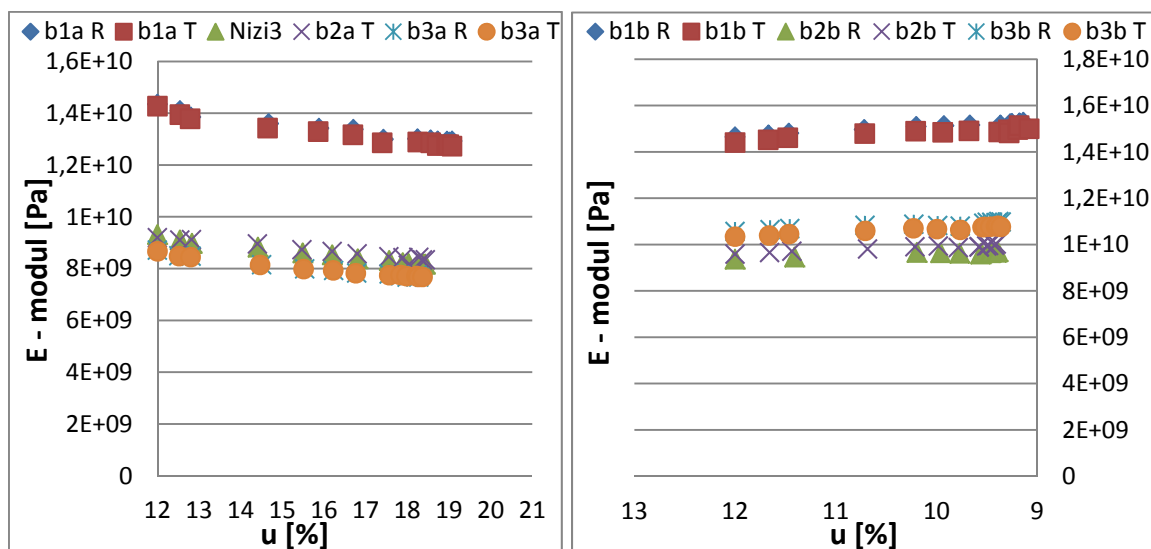
4.2 VPLIV SPREMEMBE VLAŽNOSTI IN ČASA NA MODUL ELASTIČNOSTI

Pri vseh proučevanih lesnih vrstah smo potrdili vpliv vlažnosti na modul elastičnosti. Pri preizkušancih, ki smo jih navlaževali se je zmanjševal, pri sušenju pa povečeval. V začetnem in končnem ravnovesnem stanju so bile vrednosti primerljive z znanimi podatki iz literature.

Na slikah 16 in 17 so prikazane spremembe elastičnega modula bukovine po času oziroma v odvisnosti od vlažnosti. Pri časovni odvisnosti lahko vidimo, da je elastični modul pri desorpciji do nekje 10000 minut skoraj eksponentno padal in se nato skoraj ustalil, enako se je zgodilo v procesu sušenja, kjer so vrednosti naraščale. Preizkušanca b2a in b3b imata bistveno večja E –modula kot b1a. Enako opazimo pri odvisnosti od vlažnosti, kjer se E –modul v procesu adsorpcije linearno zmanjšuje oziroma pri sušenju linearno povečuje.

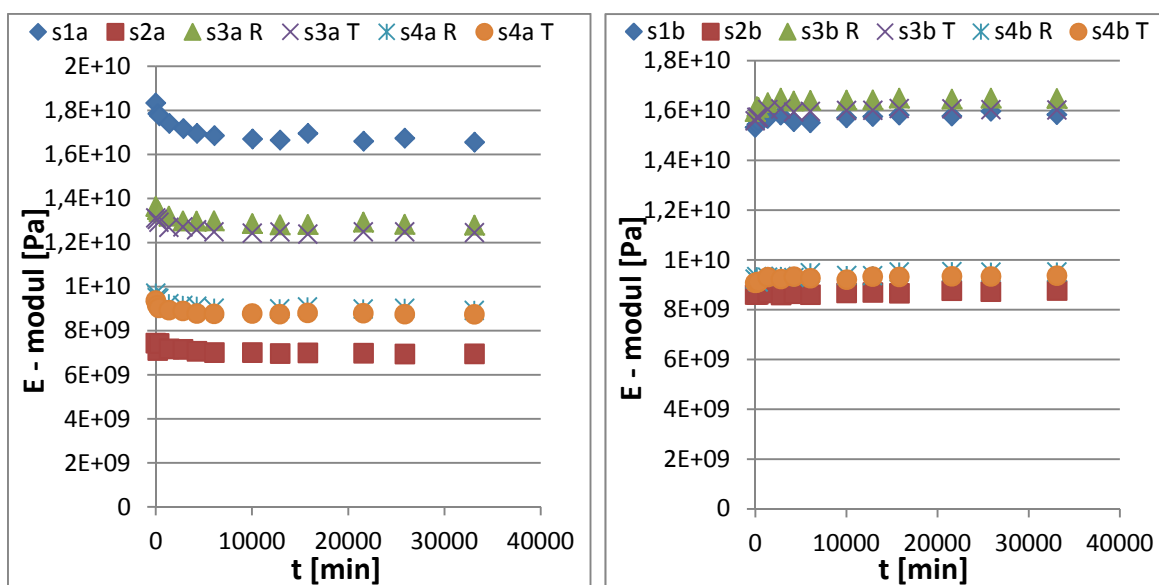


Slika 16: Sprememba E – modula bukovine po času, levo adsorpcija, desno desorpcija.

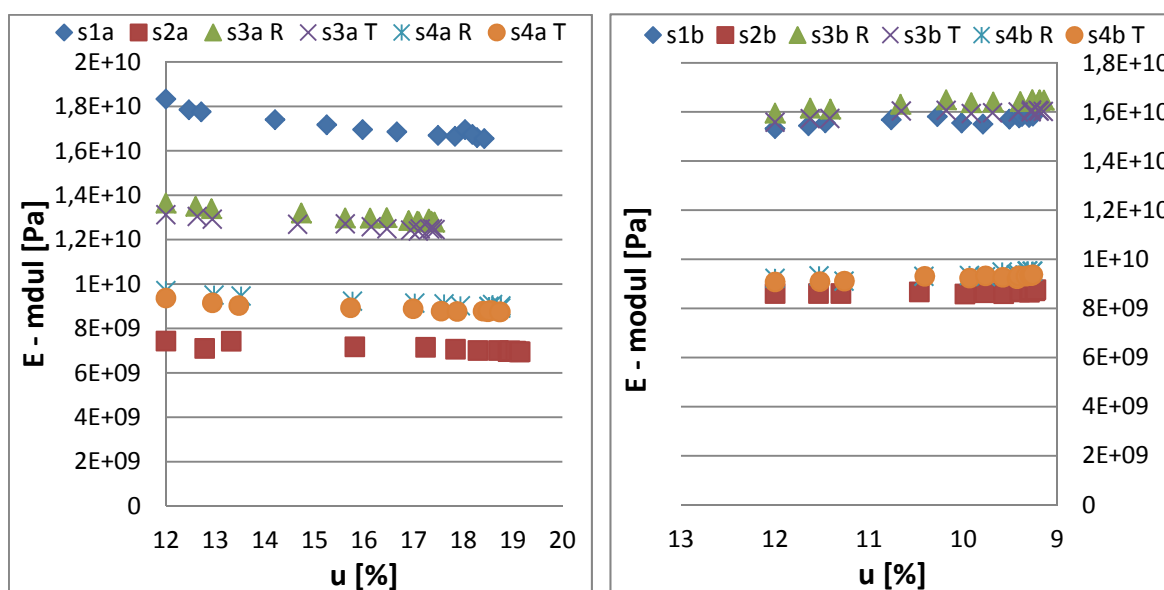


Slika 17: Sprememba E – modula bukovine v odvisnosti od lesne vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.

Trenda na slikah 18 in 19 sta podobna trendoma pri bukovini (slika 16 in 17). Zaznati je eksponentno časovno odvisnost E-modula v začetnem delu procesov sušenja in navlaževanja. Večjih posebnosti ni, zaznamo lahko le razliko v hitrosti odziva med sušenjem in navlaževanjem, ki je pri sušenju višja. Vrednosti E – modula so med preizkušanci navlaževanja bolj posamično porazdeljeni, medtem ko so pri sušenju nekako strnjeni v dve skupini.

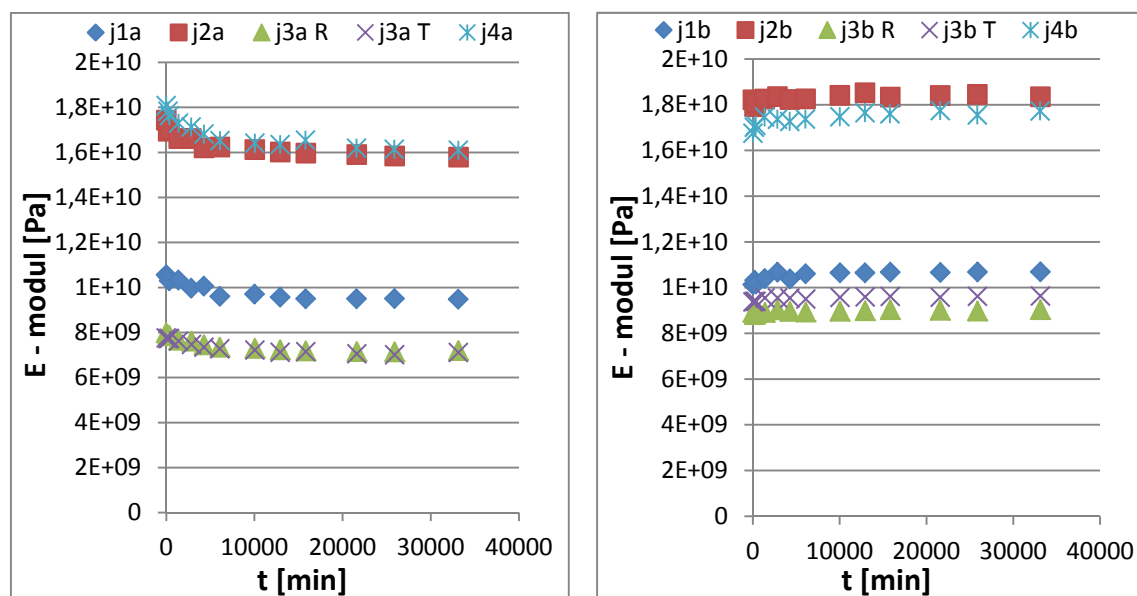


Slika 18: Sprememba E – modula smrekovine po času, levo adsorpcija, desno desorpcija.

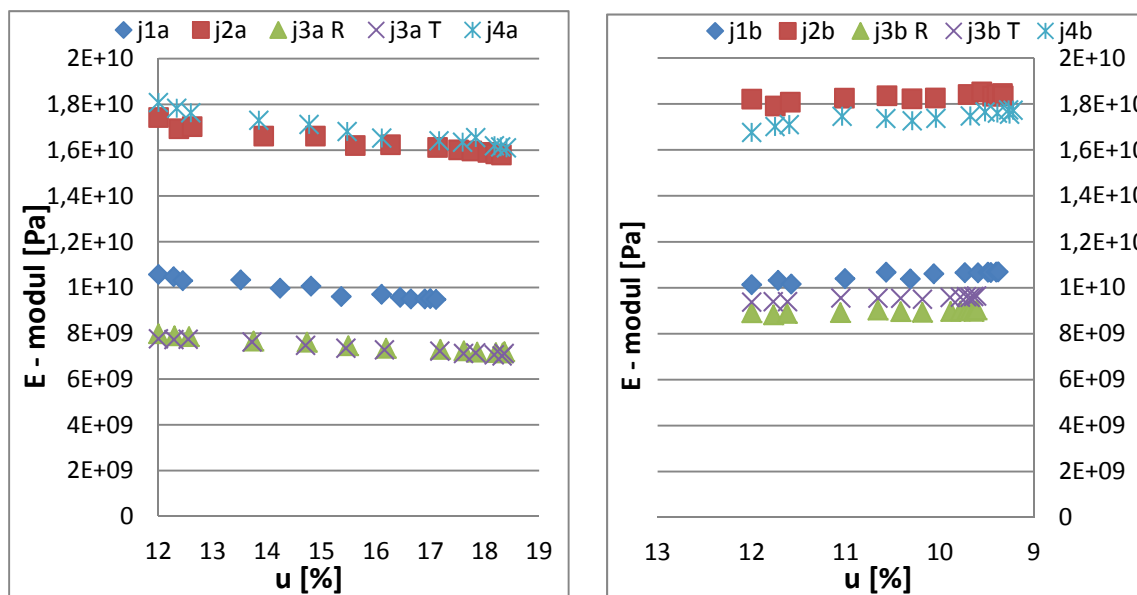


Slika 19: Sprememba E – modula smrekovine v odvisnosti od vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.

Spremembe E – modula na slikah 20 in 21 imajo trende, ki so podobni predhodnim (slika 16, 17, 18 in 19). Večjo linearnost, t.j. hitrejši odziv, je zaznati pri sušenju. Vse večje spremembe so se zgodile na začetku merjenja.

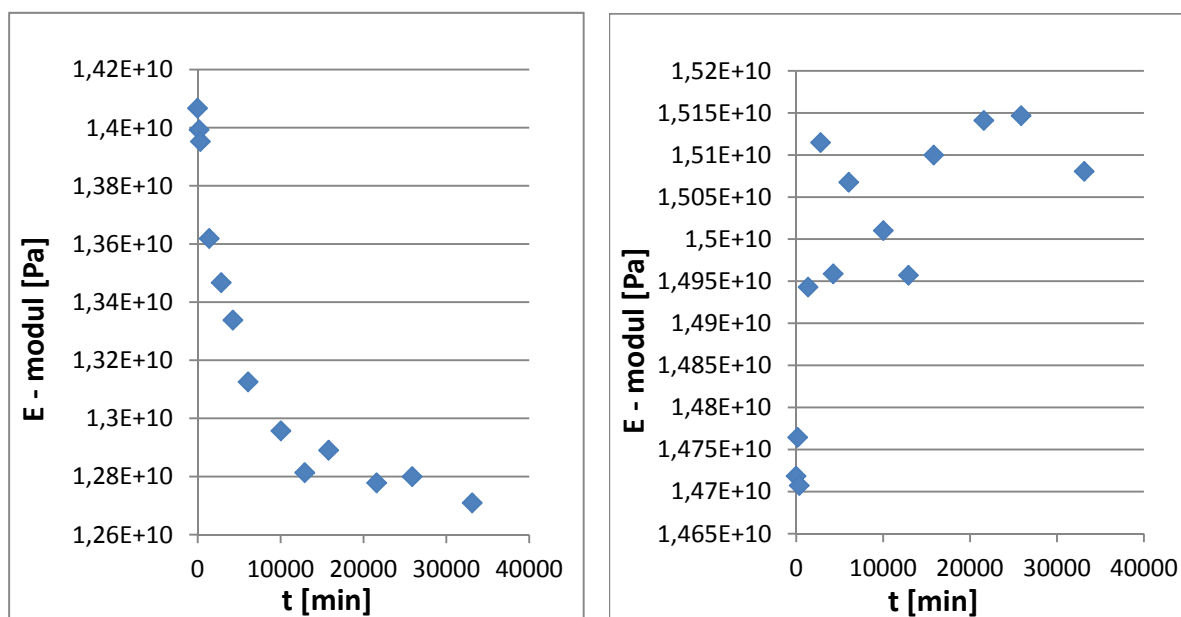


Slika 20: Sprememba E – modula jesenovine po času, levo adsorpcija, desno desorpcija.

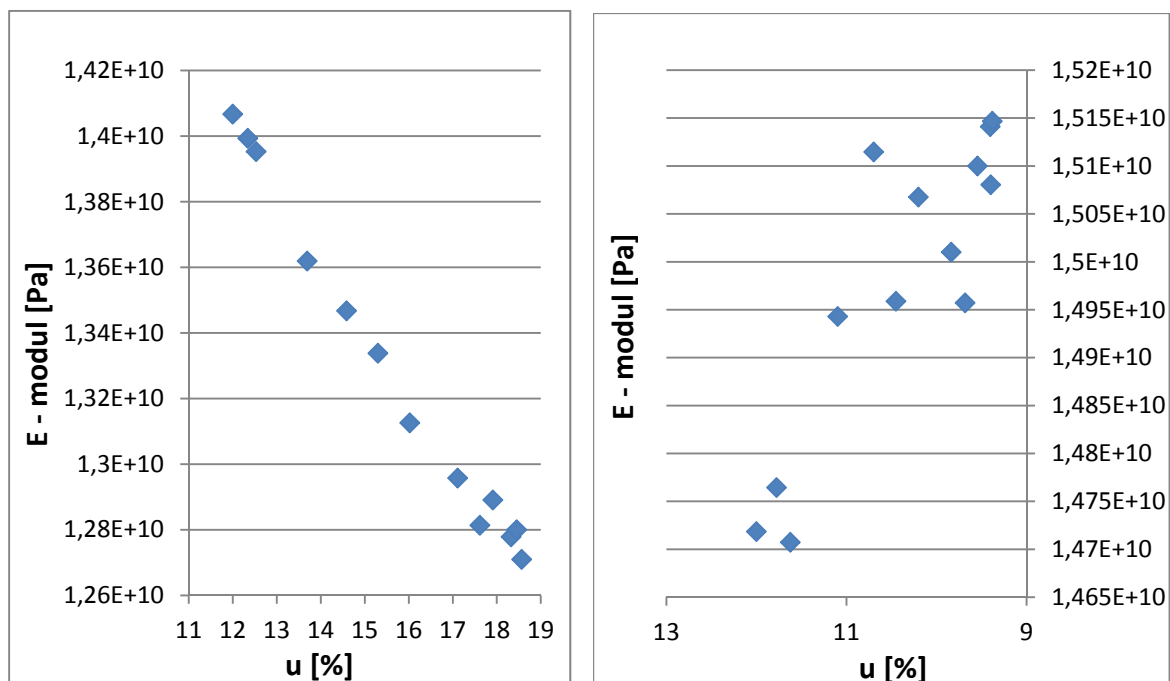


Slika 21: Sprememba E – modula jesenovine v odvisnosti od vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.

Na sliki 22 in 23 opazimo zelo strm padec vrednosti E – modula hrastovine pri procesu adsorpcije. Medtem ko pa so vrednosti desorpcije mnogo bolj razkropljene. Skupna značilnost pa je visoko nihanje vrednosti na začetku. Kot pričakovano je E – modul pri odvisnosti od vlažnosti dokaj linearen, toda spet nekoliko manj pri sušenju.

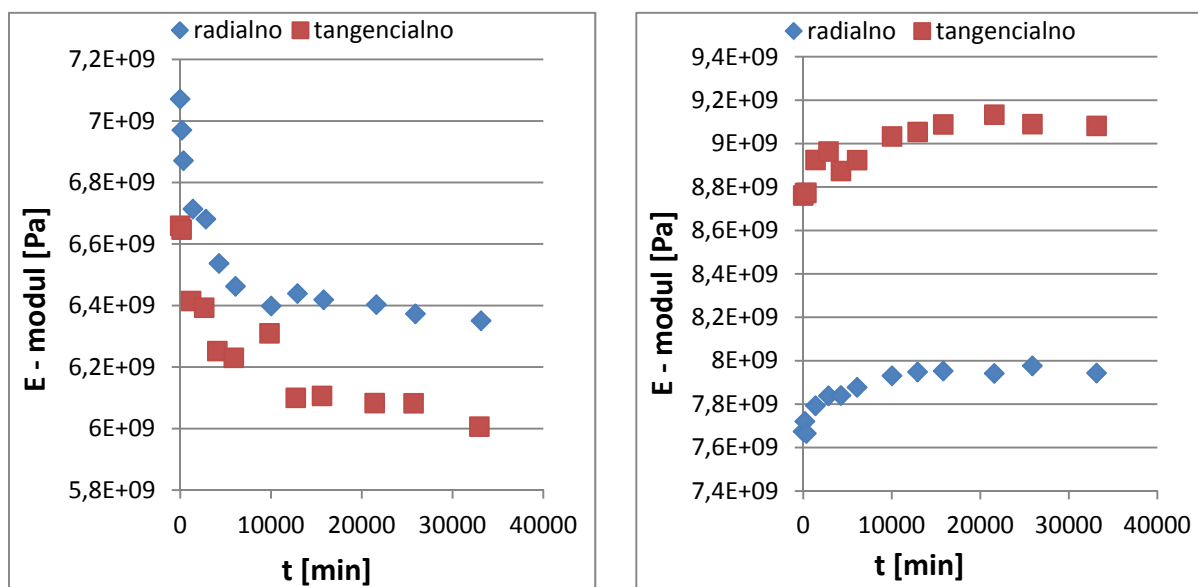


Slika 22: Sprememba E – modula hrastovine po času, levo adsorpcija, desno desorpcija.

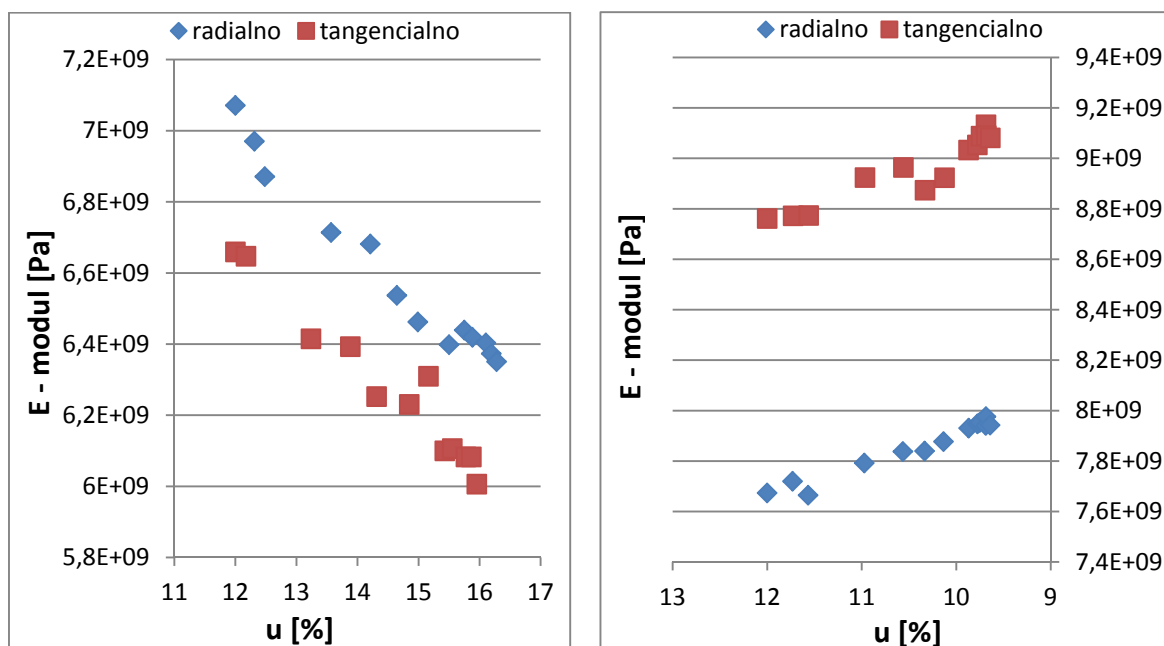


Slika 23: Sprememba E – modula hrastovine v odvisnosti od vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.

Dinamika sprememb E – modula orehovine je podobna kot pri preostalih vrstah (slika 24 in 25). Če se osredotočimo na vrednosti do 10000 minut, opazimo, da le te strmo padajo pri navlaževanju, a se nato povečajo in ponovno padajo toda ne tako naglo. Podobno sliko vidimo tudi pri sušenju, kjer je možno zaslediti večje razlike med radialno in tangencialno smerjo. Trend sprememb je enak z manjšimi odstopanji. Vpliv spremembe vlažnosti pa pričakovano kaže na linearno odvisnost. V procesu sušenja zasledimo tudi bolj zgoščene rezultate na koncu eksperimenta.

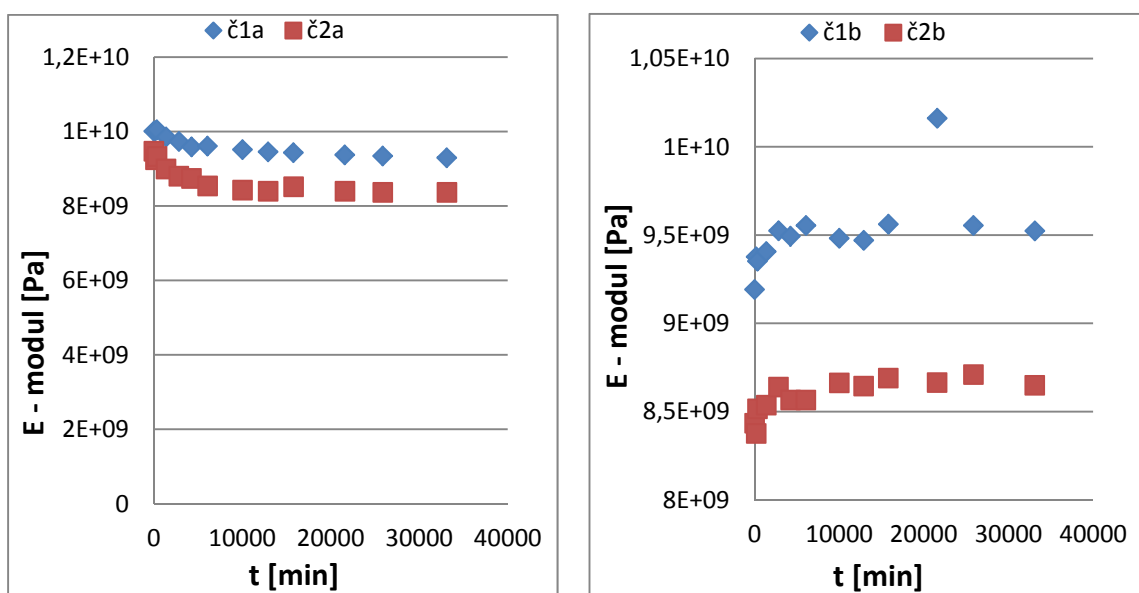


Slika 24: Sprememba E – modula orehovine po času, levo adsorpcija, desno desorpcija.

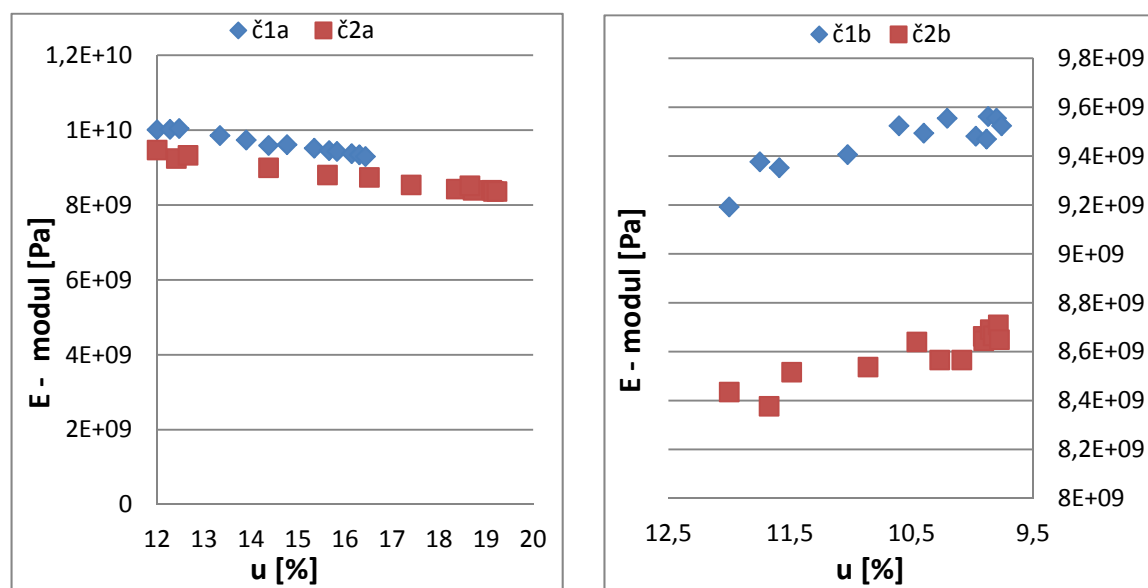


Slika 25: Sprememba E – modula orehovine v odvisnosti od vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.

Slika 26 kaže pri lesu češnje pričakovan odziv modula elastičnosti po času, razen v procesu sušenja, kjer vidimo močan odklon ene vrednosti od preostalih. V obeh primerih odvisnosti tako časovne kot vlažnostne (slika 27) opazimo največje razlike predvsem med sušenjem in navlaževanjem v smislu razmika vrednosti med preizkušancema in doseženi končni vlažnosti pri adsorpciji.



Slika 26: Sprememba E – modula lesa češnje po času, levo adsorpcija, desno desorpcija.

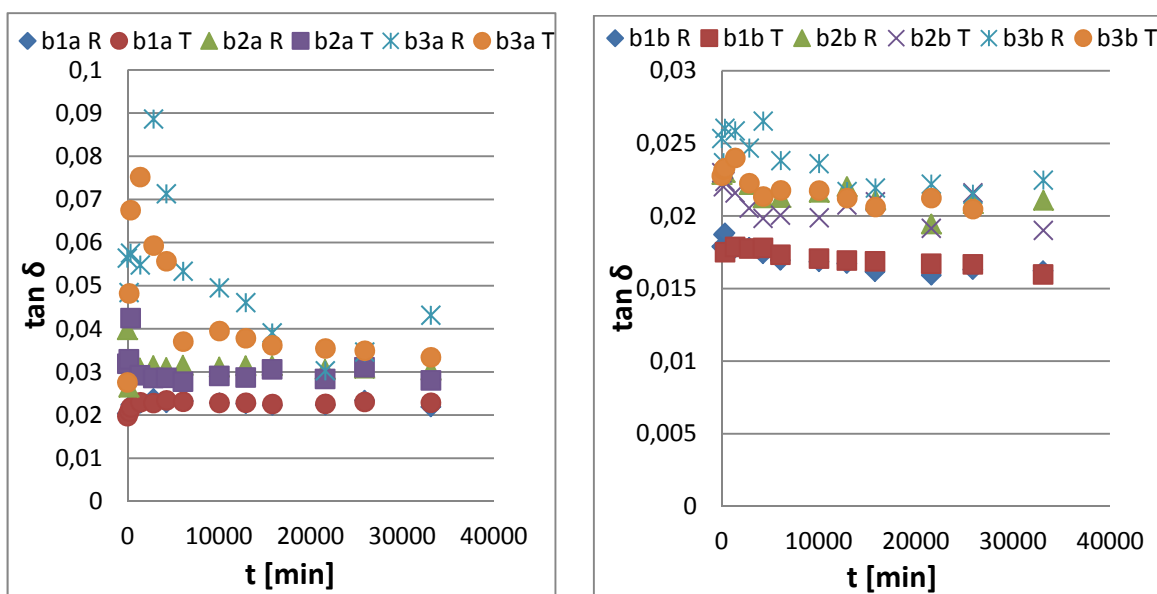


Slika 27: Sprememba E – modula lesa češnje v odvisnosti od vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.

4.3 VPLIV SPREMEMBE VLAŽNOSTI LESA IN ČASA NA DUŠENJE ZVOKA

Tudi trend koeficienta $\tan \delta$, s katerim smo ocenjevali dušilne karakteristike lesa, je v večini primerov izkazoval podobne trende kot pri modulu elastičnosti in nam potrdil že znana dejstva iz literature, vendar pa so bile vrednosti mnogo bolj variabilne.

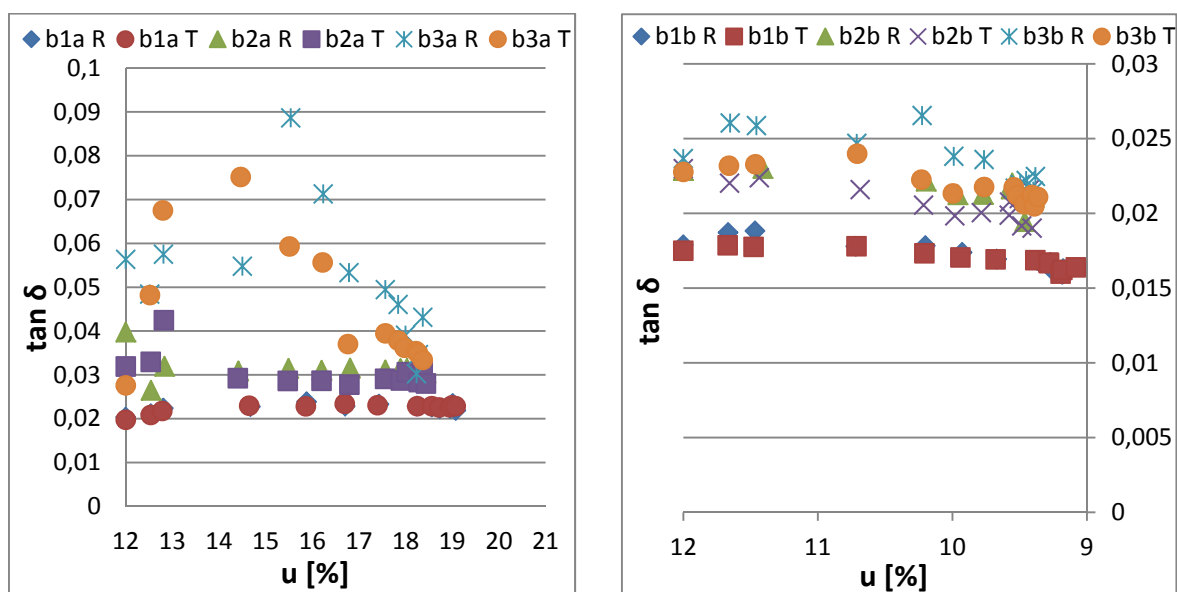
Preizkušanci iz bukovine se v časovni odvisnosti med seboj močno razlikujejo predvsem v procesu adsorpcije (slika 28). Rezultati kažejo velik skok $\tan \delta$ na začetku navlaževanja pri preizkušancu b3a in to za več kot 300 %, nato pa strmo padejo in se ustalijo. Podoben trend sprememb opazimo tudi pri preizkušancu b2a, kjer pa ni tako velike razlike na začetku. Vrednosti se po daljšem času (10000 minut) ustalijo in relativno ne spreminjajo več. Po drugi strani pa pri sušenju ni mogoče opaziti tako velikega nihanja vrednosti kot pri navlaževanju.



Slika 28: Sprememba $\tan \delta$ pri bukovini po času, levo adsorpcija, desno desorpcija.

Večina sprememb se prav tako zgodi na začetku preizkusa, ponovno pa je v ospredju preizkušanec b3b. Preostali preizkušanci ne prikazujejo kakšne večje spremembe, razen na začetku, a so kasneje bolj ali manj konstantni oziroma zelo rahlo padajo.

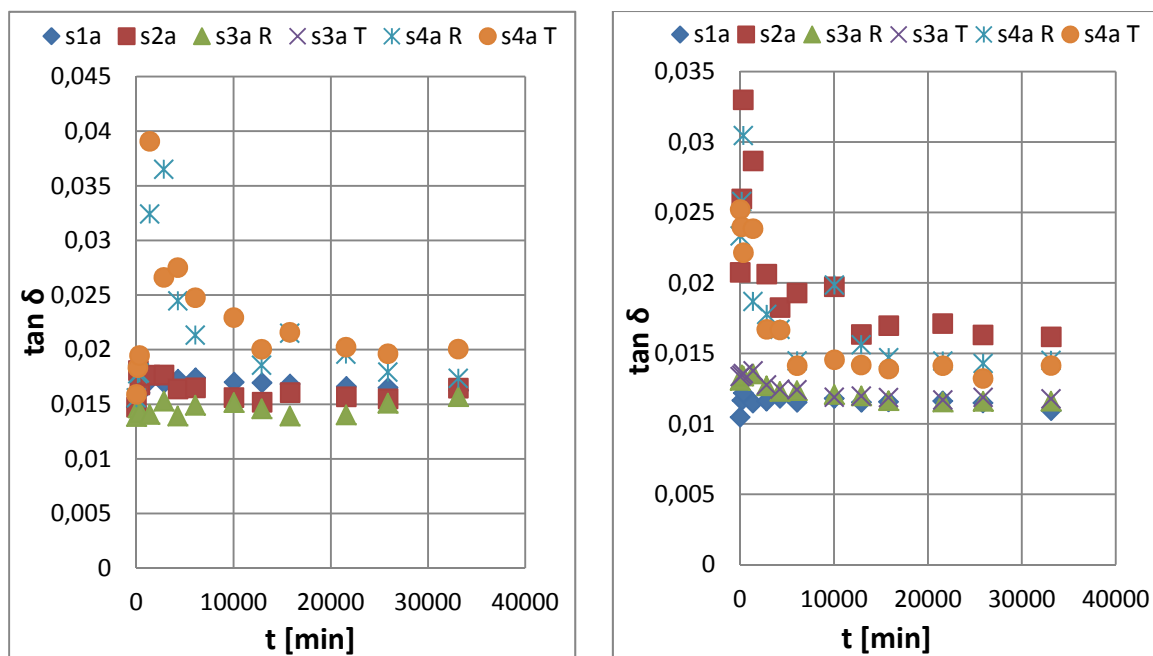
Zelo podobna slika je pri odvisnosti od vlažnosti, kjer spet vidimo zelo velike razlike med adsorpcijo in desorpcijo (slika 29). Izstopanje preizkušanca b3a je tukaj še bolj nazorno, poleg tega pa tudi zakasnjeno glede na ostale preizkušance. Trend sprememb adsorpcije je identičen kot pri spremembi po času. Vse večje spremembe so se zgodile na začetku do vlažnosti 15 %, od tu naprej pa so skoraj nespremenjene seveda z razliko preizkušanca b3a. Povsem drugačna slika je pri sušenju. Razvidno je, da so vrednosti rahlo rasle, nato pa pričele padati. Kakšnih večjih nihanj pa ni.



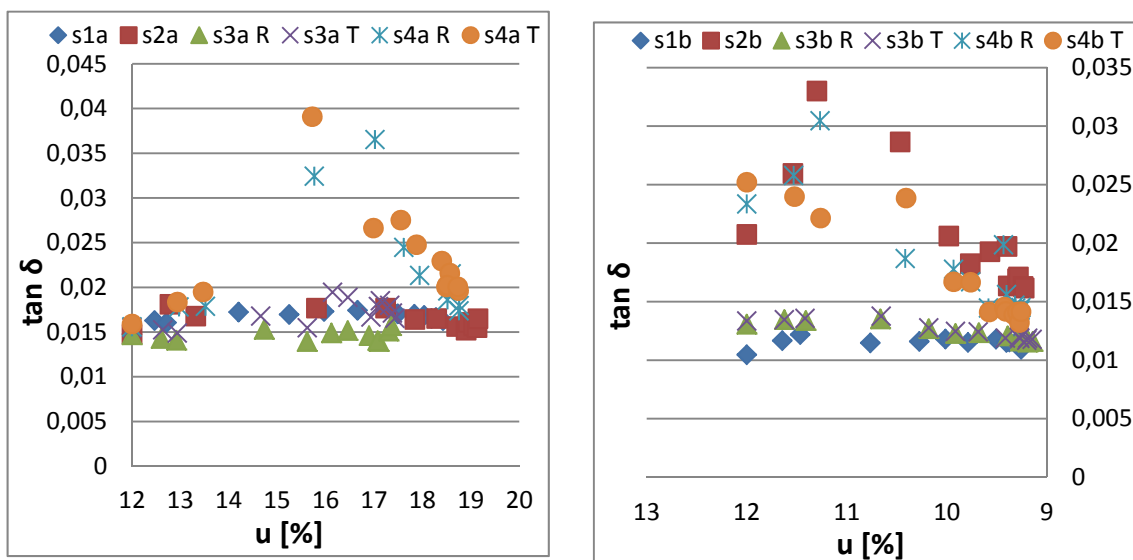
Slika 29: Sprememba $\tan \delta$ pri bukovini v odvisnosti od vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.

Na sliki 30 vidimo, da smrekov preizkušanelec s4a doseže precej višjo vrednost $\tan \delta$, ki pa nato skoraj eksponentno pada. Pri drugih preizkušancih iz smrekovine je tudi mogoče zaslediti dvig $\tan \delta$ na začetku (do 5000 minut), a ne znatno saj se potem vrednosti ne spreminjajo veliko. Zanimivo pa je pri sušenju, saj lahko poleg preizkušanca s4b vidimo tudi s2a, ki se jima $\tan \delta$ na začetku močno poveča, nato pa kot pri vseh ostalih preizkušancih pade in se ustali. Vse skupaj pa se zgodi v času do 5000 minut. Kasneje kakšnih večjih sprememb $\tan \delta$ pri smrekovini ni mogoče zaslediti. Sprememba $\tan \delta$ v odvisnosti od vlažnosti tako kot pri bukovini samo pri preizkušancu s4a močno naraste, zatem pa strmo pade in se približa vrednostim ostalih preizkušancev. Preizkušanci s1a, s2a in s3a pa rahlo variirajo navzgor in navzdol. Desorpcija na sliki 31 prikazuje močno

odstopanje še preizkušanca s2b, ki sledi spremembam preizkušanca s4b. Vzorca s1b in s3b pa se spreminjata podobno kot pri adsorpciji.

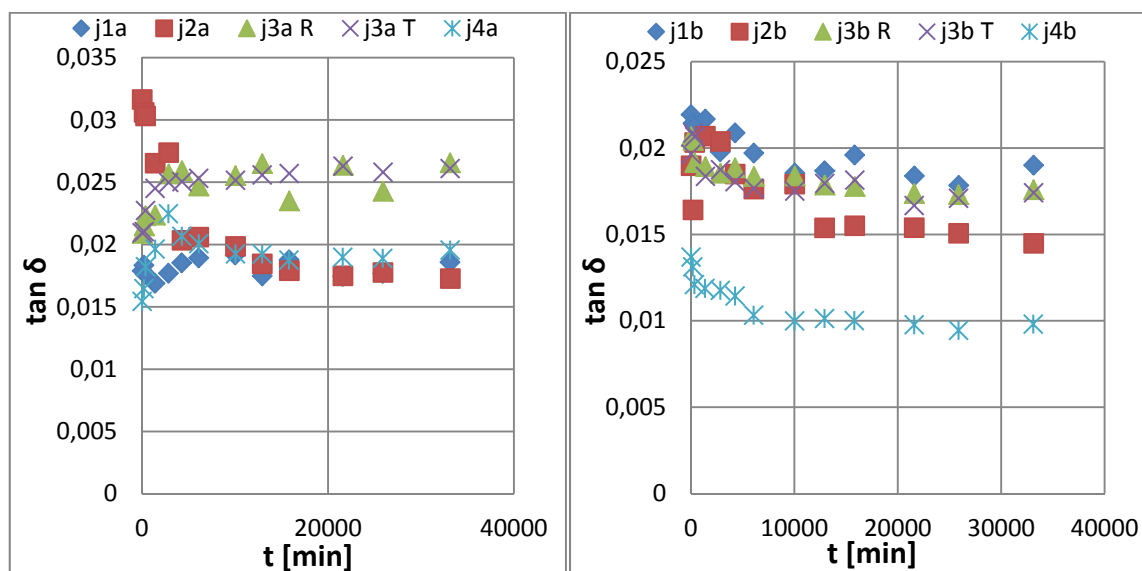


Slika 30: Sprememba $\tan \delta$ pri smrekovini po času, levo adsorpcija, desno desorpcija.

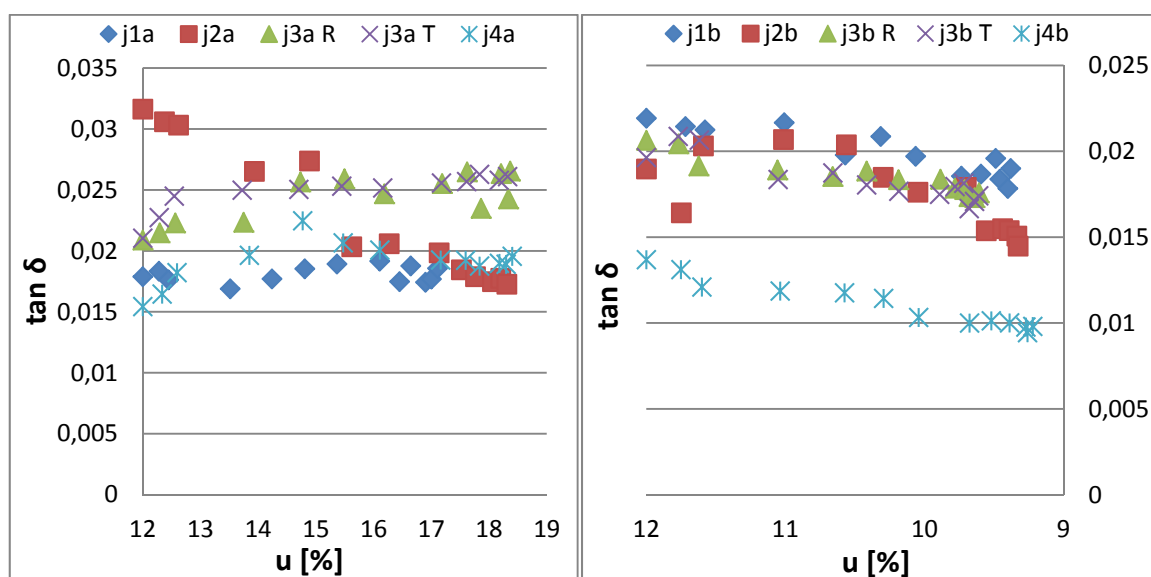


Slika 31: Sprememba $\tan \delta$ pri smrekovini v odvisnosti od vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.

Pri jesenovini dušenje zvoka v odvisnosti od časa precej niha. Iz slike 32 je denimo razviden popolnoma drugačen odziv preizkušanca j2a, ki za razliko od preostalih pada. Tudi pri preizkušancu j1a je na začetku mogoče zaslediti rahel padec vrednosti, a kasneje se trend obrne in nadaljuje kot pri preizkušancih j3a in j4a. Trend sušenja je skoraj pri vseh preizkušancih enak, odstopanje opazimo le pri preizkušancu j4b, a tukaj je tudi začetna vrednost glede na ostale vrednosti nižja. Poleg tega pri preizkušancu j2b vidimo visoko spremembo pri prvih treh meritvah, ki pa se nato bolj naglo znižuje glede na ostale preizkušance. Podobne spremembe zaznamo tudi pri odvisnosti od vlažnosti, toda tukaj je sprememba j2a bolj linearna in prav tako pada. Zanimivo pa je dejstvo, da preizkušanec j1a doseže približno za 1 % manjšo končno vlažnost.

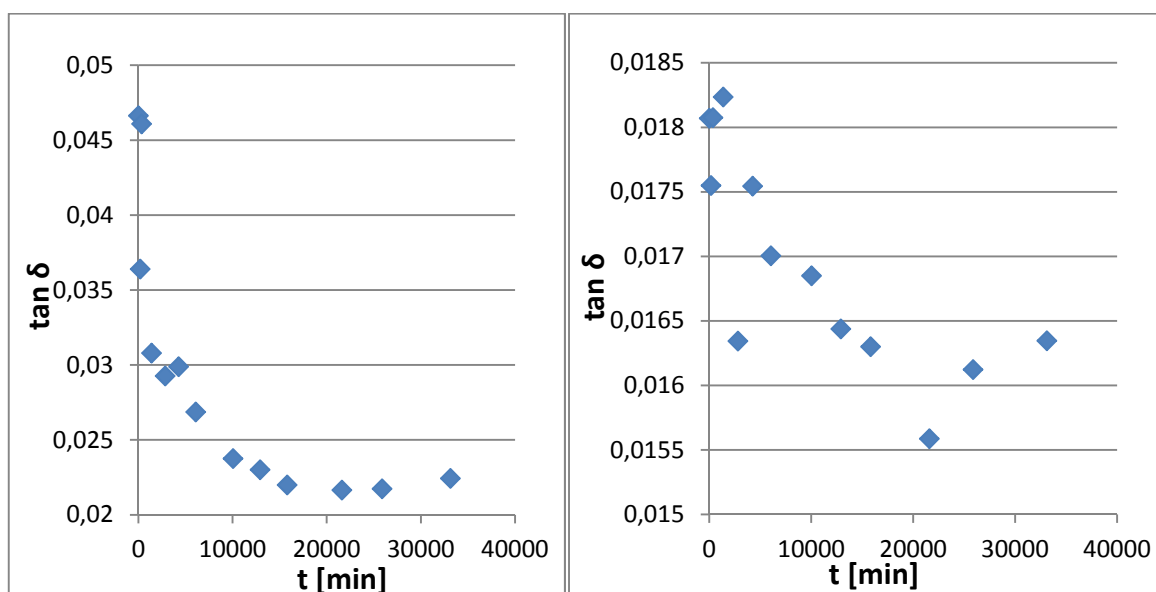


Slika 32: Sprememba $\tan \delta$ pri jesenovini po času, levo adsorpcija, desno desorpcija.

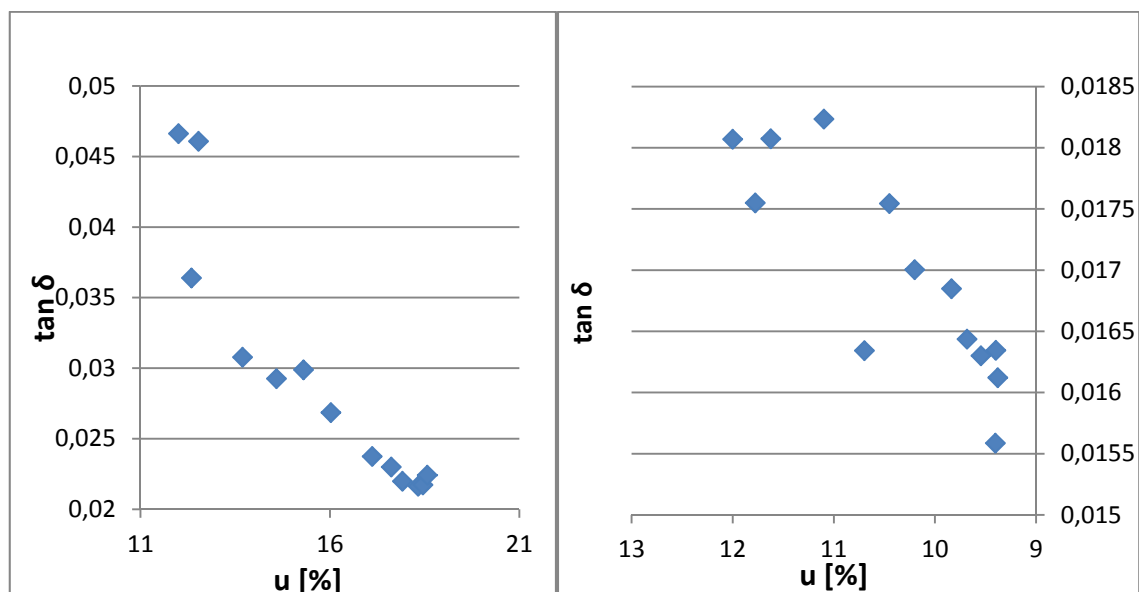


Slika 33: Sprememba $\tan \delta$ pri jesenovini v odvisnosti od vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.

Vrednosti $\tan \delta$ pri hrastovini na sliki 34 praktično padajo eksponentno, zadnja vrednost pa je celo višja od predhodne kar je nenavadno. Spet lahko ugotovimo, da je do največjih sprememb prišlo znotraj 10000 min pri adsorpciji. Za desorpcijo pa je težje ugotoviti, saj tudi po 10000 minutah vrednosti še vseeno veliko nihajo. Spremembe v odvisnosti od vlažnosti, (slika 35) so bolj linearne. Tako kot pri časovni odvisnosti vidimo večje odstopanje vrednosti glede na druge meritve.

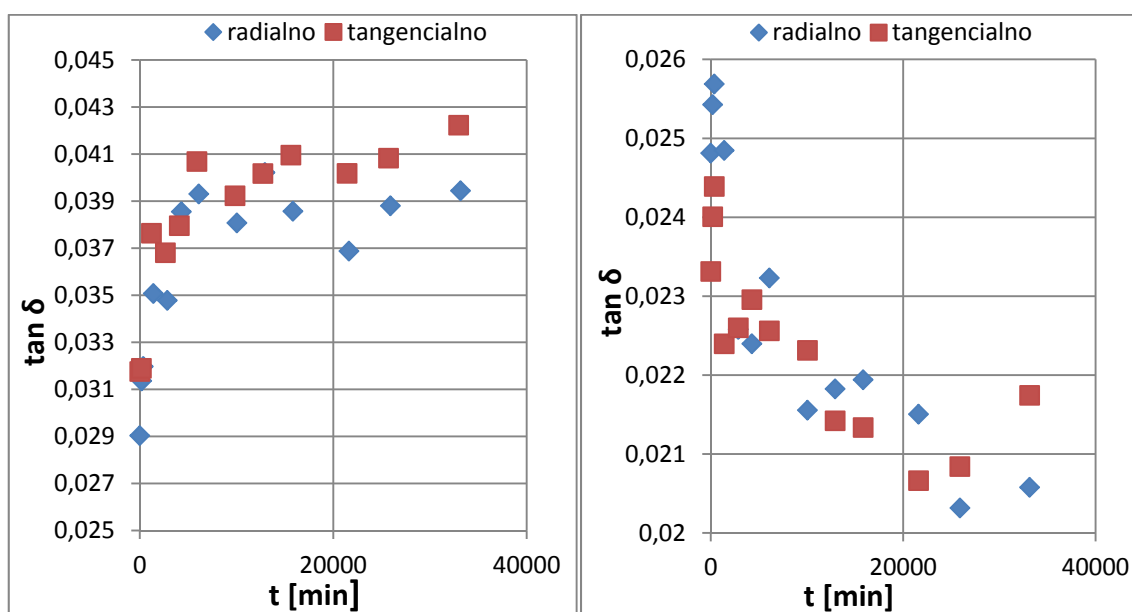


Slika 34: Sprememba $\tan \delta$ pri hrastovini po času, levo adsorpcija, desno desorpcija.



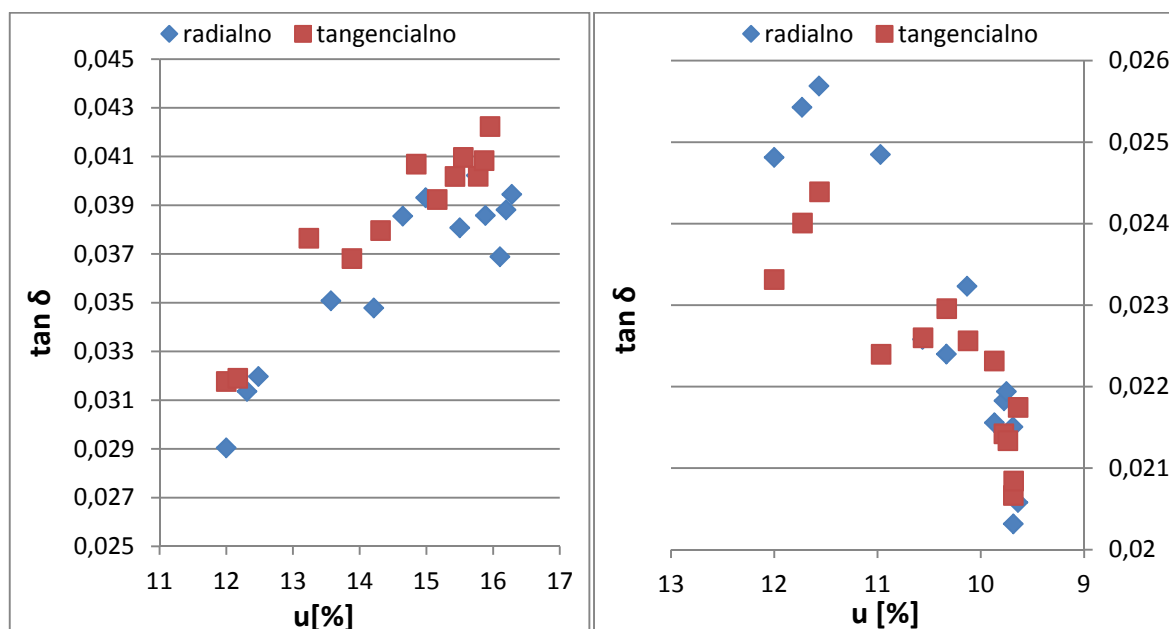
Slika 35: Sprememba $\tan \delta$ pri hrastovini v odvisnosti od vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.

Rezultati lepo prikazujejo, da se tudi pri orehu največje spremembe pojavijo v času do 10000 minut (slika 36). Vrednosti v radialni in tangencialni smeri sta si popolnoma vzporedni, kot pričakovano pa so slednje večje. V primerjavi z navlaževanjem vrednosti pri sušenju hitro padajo, a vmes zasledimo, da se nenadoma trikrat povečajo (stopničasti prehod). Bolj nepričakovani sta zadnji dve meritvi, ki se povečujeta in sta najbrž posledica napak pri merjenju.



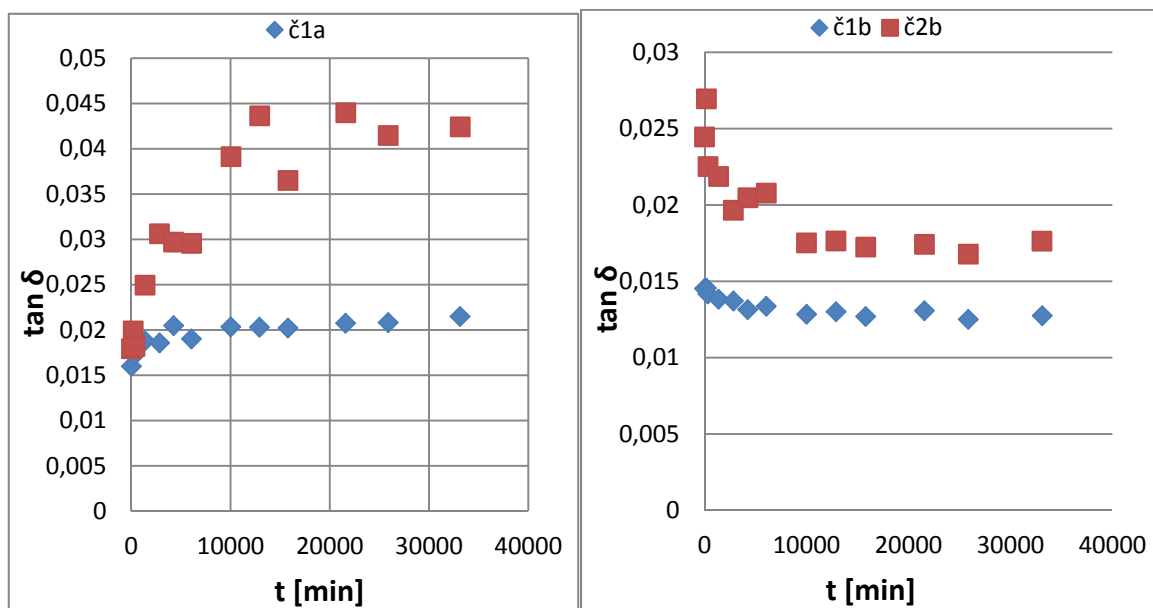
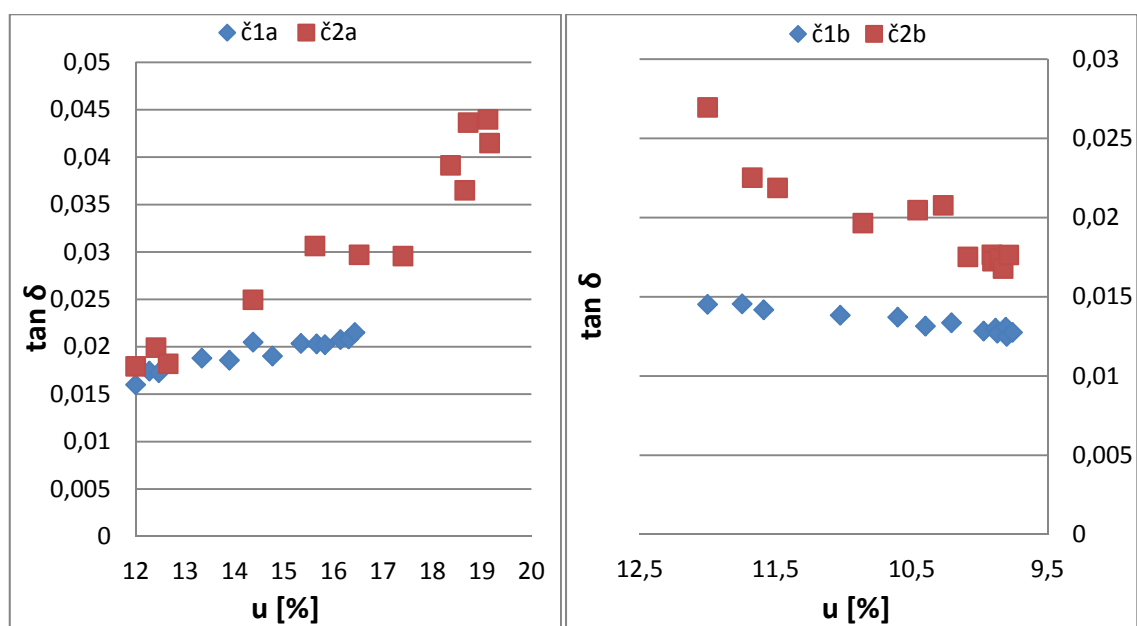
Slika 36: Sprememba $\tan \delta$ pri orehovini po času, levo adsorpcija, desno desorpcija.

Koeficient $\tan \delta$ se v odvisnosti od vlažnosti pri orehovini spreminja bolj linearno, vsaj pri adsorpciji (slika 37), kar pa ne moremo reči za sušenje. Tu je trend sprememb podoben kot pri času, a hkrati bolj nazoren.



Slika 37: Sprememba $\tan \delta$ lesa oreha v odvisnosti od vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.

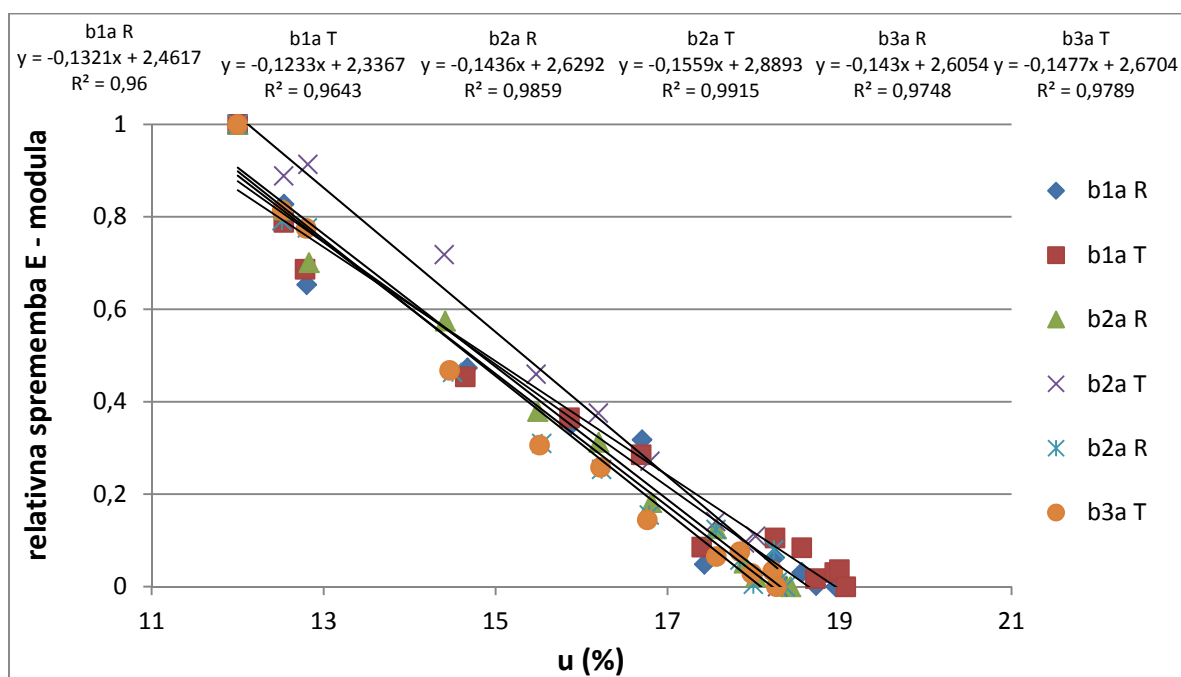
Razlike med adsorpcijo in desorpcijo pri lesu češnje (slika 38) so očitne. Če se osredotočimo le na proces adsorpcije vidimo velik razmik vrednosti med preizkušancema č1a in č2a. Časovna sprememba $\tan \delta$ preizkušanca č2a je mnogo večja v primerjavi s č1a. Na začetku strmo narašča preko 10000 minut nato pa se ustali. Razlika med preizkušancema je več kot 200 %. Obenem preizkušancu č1a vrednosti ne nihajo tako kot pri č2a. Tudi pri sušenju se pojavlja enak trend sprememb. Toda tu se preizkušanca uravnovesita v času do 10000 minut, prav tako pa njune vrednosti ne nihajo tako kot pri navlaževanju. Pri odvisnosti od vlažnosti (slika 39) je razvidna manjša dosežena končna vlažnost pri preizkušancu č1a. Vrednosti $\tan \delta$ v odvisnosti od lesne vlažnosti se spreminjajo dokaj linearno, opazimo pa večji naklonski kot pri preizkušancu č2a. Podoben odziv lahko vidimo pri sušenju, kjer vrednosti padajo, ni pa opaznih razlik v doseženi končni vlažnosti.

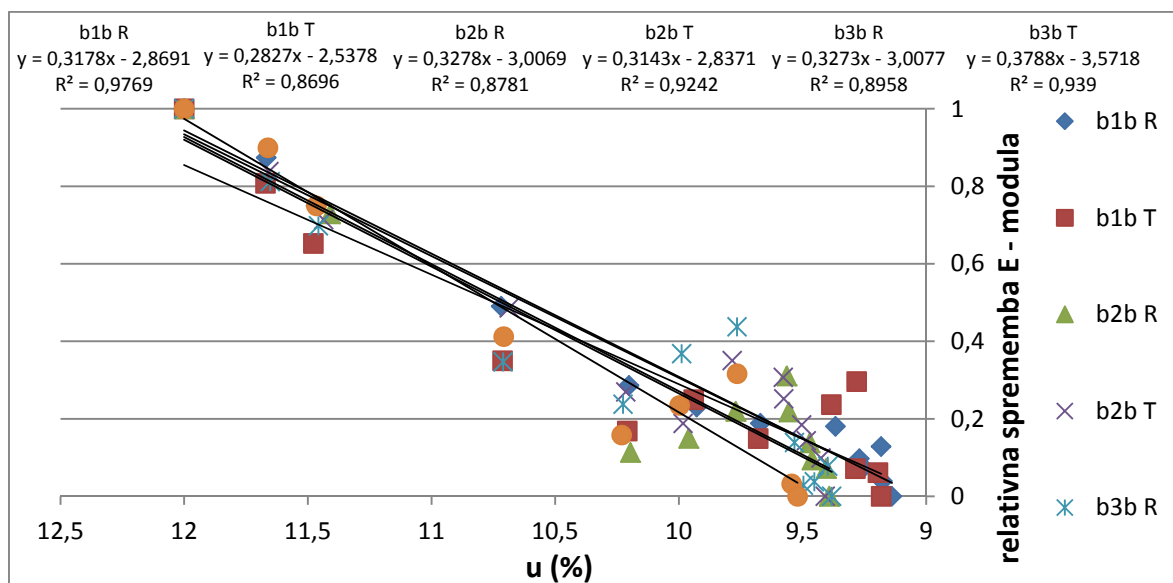
Slika 38: Sprememba $\tan \delta$ pri lesu češnje po času, levo adsorpcija, desno desorpcija.Slika 39: Sprememba $\tan \delta$ pri lesu češnje v odvisnosti od vlažnosti, levo adsorpcija, desno desorpcija.

5 RAZPRAVA

5.1 PRIMERJAVA DINAMIKE SPREMEMB MODULA ELASTIČNOSTI MED ADSORPCIJO IN DESORPCIJO

Preizkušanci iz bukovine izkazujejo značilno linearno odvisnost na spremembo vlažnosti (slika 40). Kot pričakovano, se je modul elastičnosti zmanjševal, pri tem pa vidimo, da se naklonski koti premic ne razlikujejo veliko. Z vidika navlaževanja lahko rečemo, da je bil statistični vzorec bukovine glede na rezultate dokaj homogen. Med vsemi preizkušanci najbolj odstopa naklonski kot pri b2a T, kar pa je lahko vzrok njegove slabše orientiranosti. Poudariti je potrebno še izredno visok determinacijski koeficient, ki je skoraj pri vseh preizkušancih tako v procesu navlaževanja kot tudi sušenja, z izjemo treh kar nad 0,9.

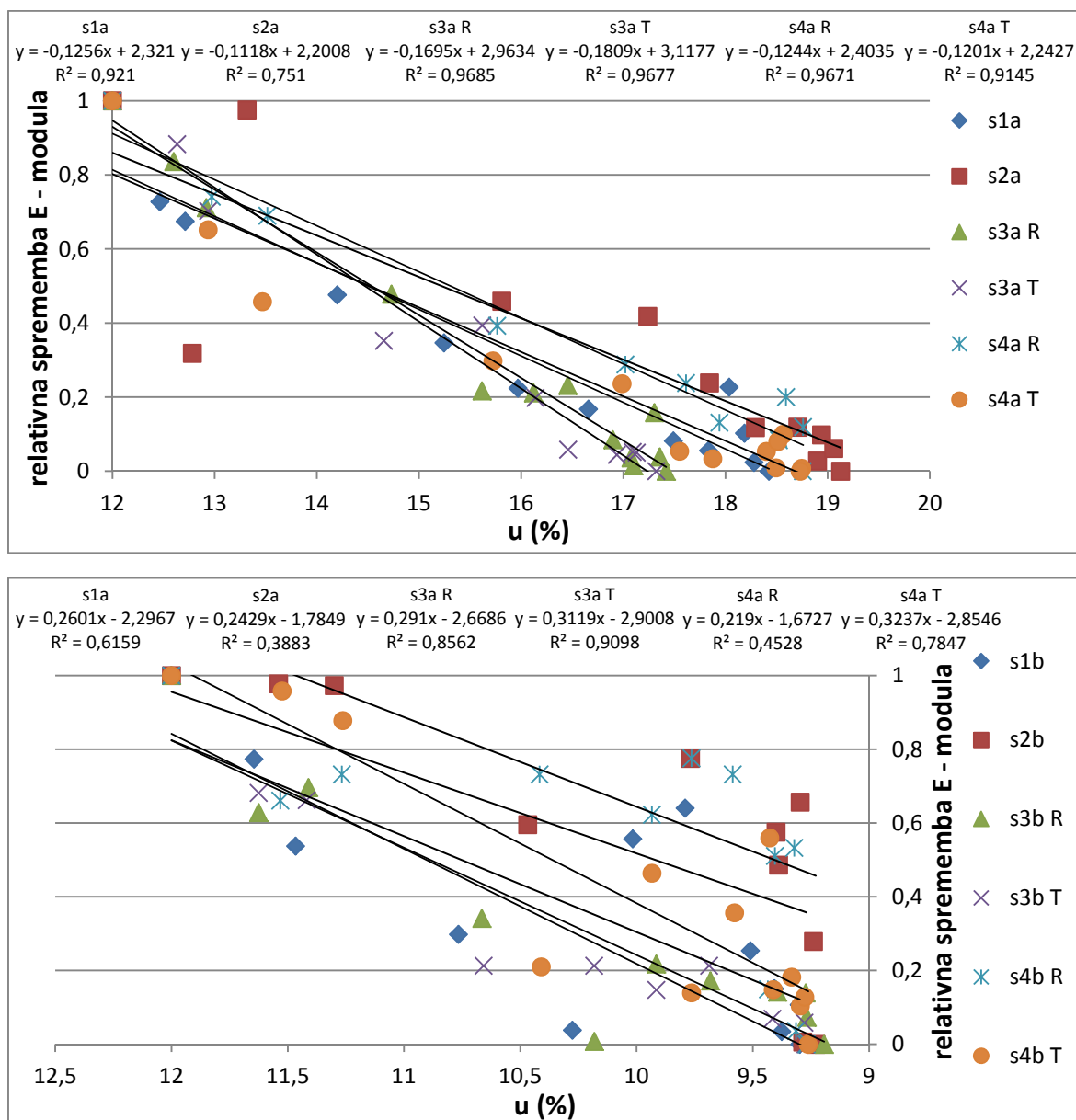




Slika 40: Relativna sprememba E – modula pri bukovini v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.

Če pri bukovini primerjamo sušenje in navlaževanje takoj vidimo, da je sušenje potekalo kar dvakrat hitreje ob tem pa je potrebno poudariti nekoliko slabši determinacijski koeficient. Največja razlika se vidi v primerjavi dosežene vlažnostnih razlik, ki je pri adsorpciji več kot dvakrat večja ($\Delta u = 7.08\%$) kot pri desorpciji ($\Delta u = 2.92\%$). Iz tega sklepamo, da se pri adsorpciji v enakem časovnem obdobju pojavijo manjše notranje napetosti, kot posledica nastalega vlažnostnega gradienta. Pri sušenju so spremembe in tudi nihanja vrednosti največja na začetku preizkusa. Takšna nihanja lahko pripišemo predvsem sorpciji zaradi same manipulacije vzorcev med meritvami. Tako pri navlaževanju kot sušenju opazimo, da so na začetku procesa spremembe vlažnosti večje, proti koncu pa se zmanjšujejo. Za razliko od adsorpcije pri desorpciji relativne vrednosti na koncu veliko bolj nihajo, kar je prav tako lahko posledica vlažnostnega gradienta.

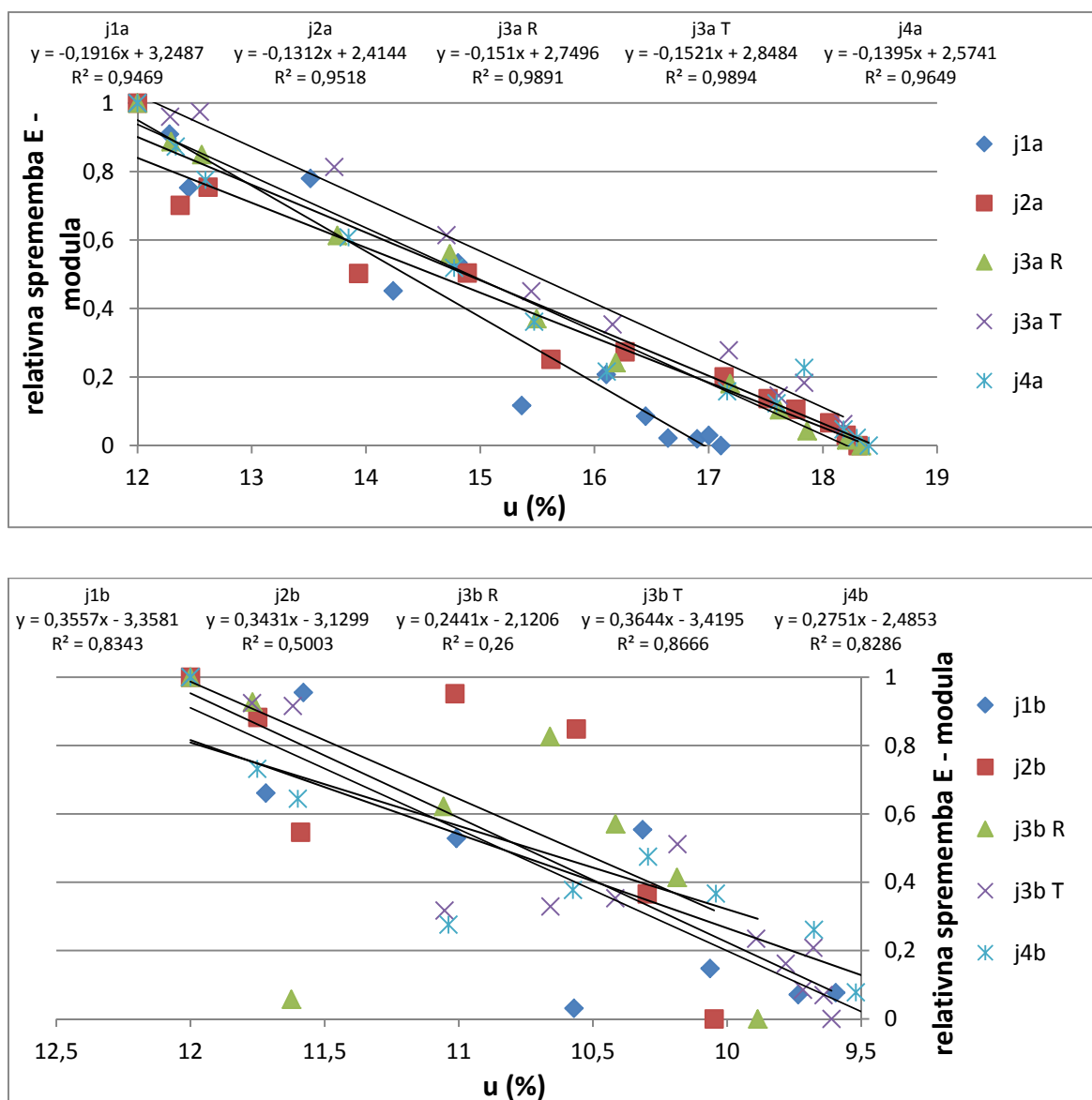
Iz slike 41 je razvidno, da je modul elastičnosti pri smrekovini veliko bolj variabilen. Čeprav med naklonskimi koti premic ni tako velike razlike, pa le to opazimo pri determinacijskem koeficientu (R^2). Vrednosti s2a in s4a T pri navlaževanju na začetku močno nihajo, nato pa se proti koncu ustalijo. Dinamika sprememb modula elastičnosti pri sušenju je večja kot pri navlaževanju, večji pa je tudi raztros podatkov.



Slika 41: Relativna sprememba E – modula smrekovine v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.

Tudi pri jesenovini je pri adsorpciji značilna linearna odvisnost modula elastičnosti in lesne vlažnosti, toda šibkejša pri sušenju, kjer je determinacijski koeficient regresijske zveze manjši. Najšibkejša zveza se je pojavila pri preizkušancih j3a R in j3b R. Na sliki 42 je tudi razvidno, da je sušenje v povprečju potekalo dvakrat hitreje kot navlaževanje. Kot pričakovano se E – modul pri navlaževanju zmanjšuje, pri sušenju pa povečuje. Tako lahko sklepamo, da je gradient vlažnosti večji pri sušenju kot pri navlaževanju. Toda pri sušenju

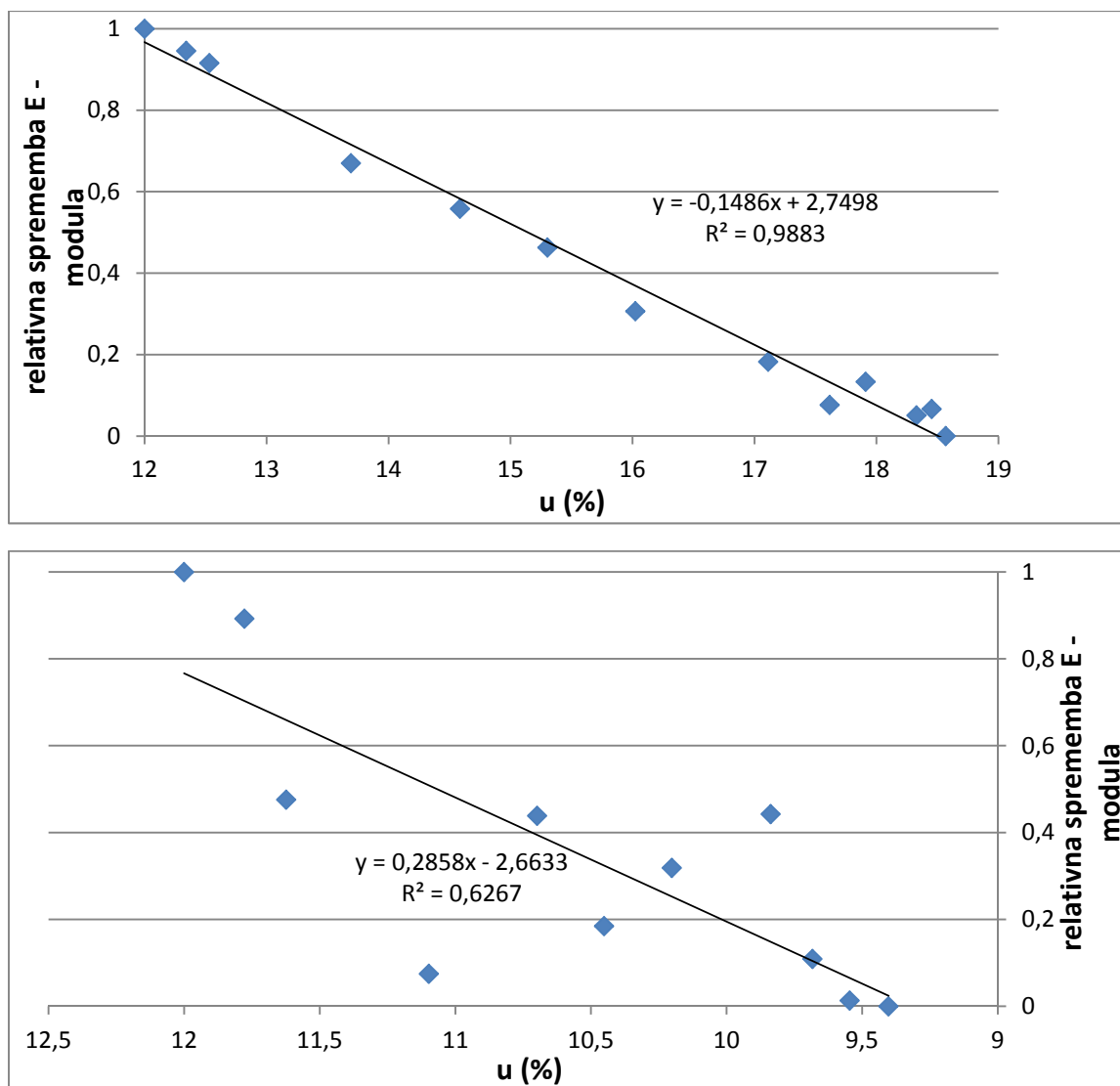
opazimo veliko nihanje vrednosti na začetku, ki se kasneje ustali, kar je lahko predvsem zaradi manjšega gradienta vlažnosti.



Slika 42: Relativna sprememba E – modula pri jesenovini v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.

Pri hrastovini (slika 43) najprej opazimo veliko razliko v naklonskem kotu odvisnosti modula elastičnosti od lesne vlažnosti med adsorpcijo in desorpcijo. Determinacijski koeficient je bil precej manjši pri sušenju, a še vseeno statistično značilen, kar je vidno v večjem nihanju vrednosti pri sušenju v primerjavi z navlaževanjem. Tako kot pri ostalih

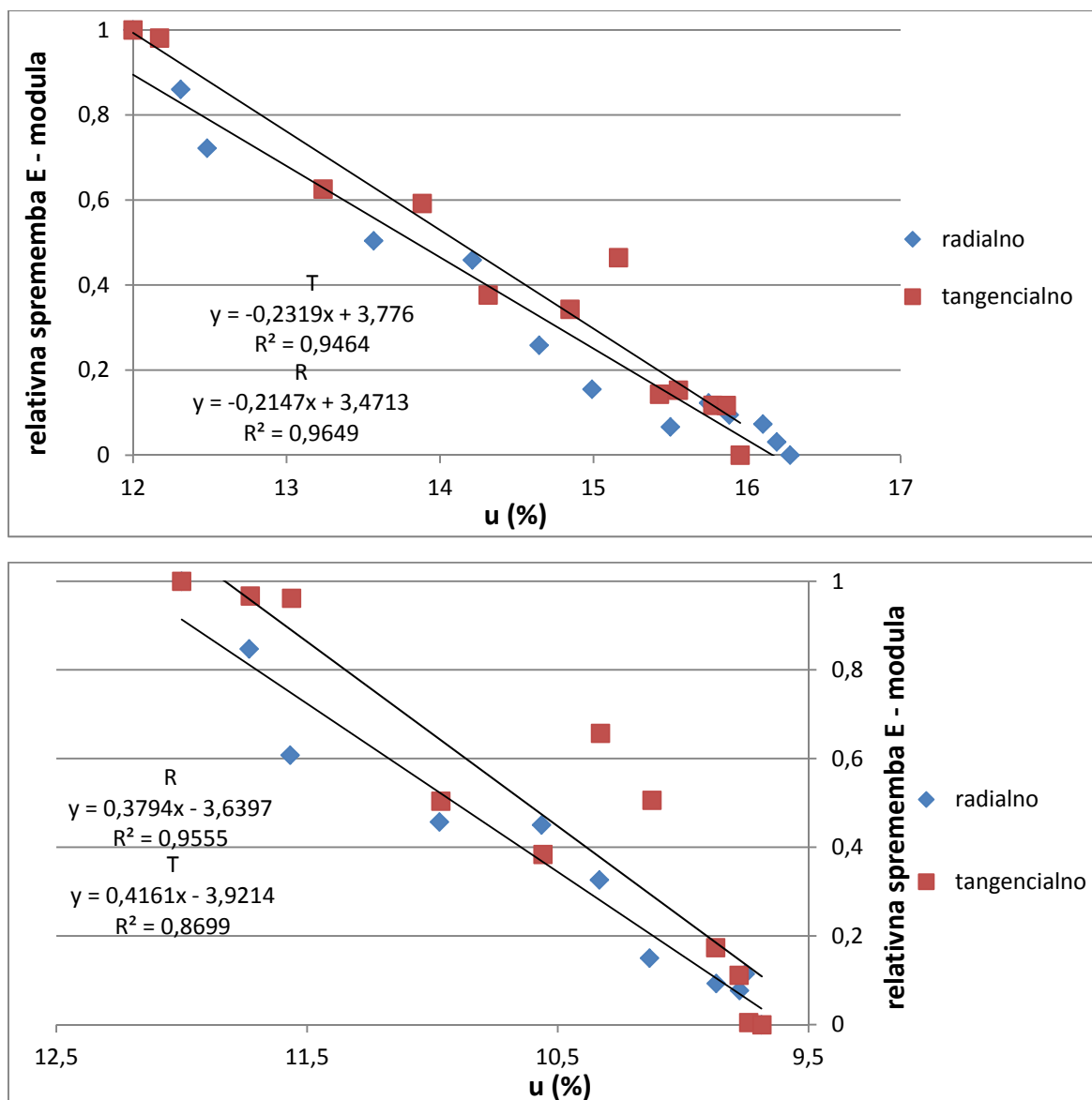
vrstah v tem preizkusu lahko del tega nihanja v procesu sušenja pripišemo tudi izpostavitvi preizkušancev drugačni klimi med samim sicer kratkotrajnim merjenjem. Po drugi strani pa ima precejšno vlogo lahko tudi gradient vlažnosti. To lepo vidimo v procesu sušenja, kjer vrednosti po začetku zelo hitro padejo. Kasneje vrednosti še vedno nihajo, a v veliko manjši meri.



Slika 43: Relativna sprememba E – modula pri hrastovini v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.

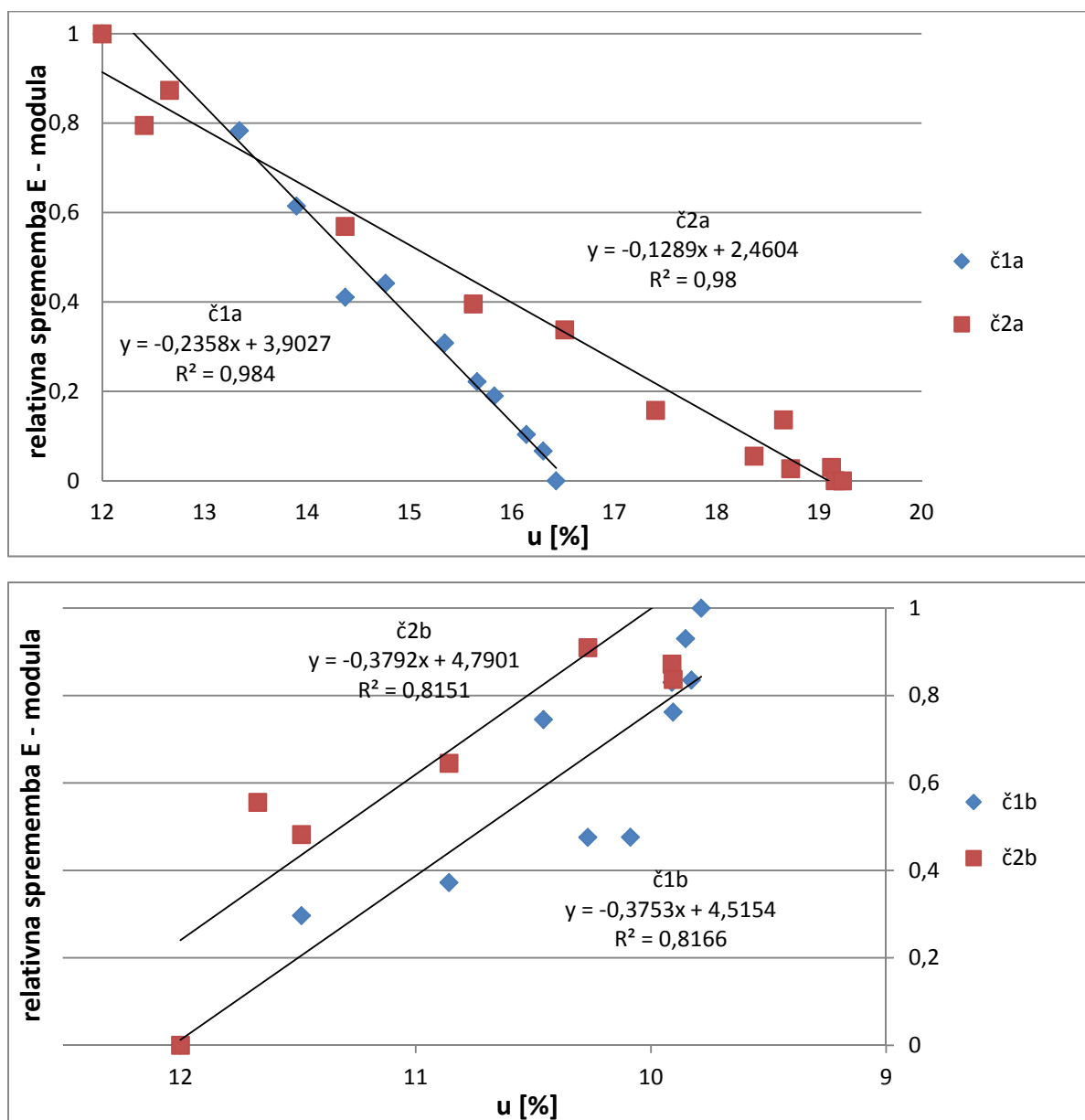
Tudi pri orehovini izkazuje modul elastičnosti med navlaževanjem in sušenjem značilno linearno odvisnost, z visokim determinacijskim koeficientom (slika 44). Koeficient

naklona premice pri sušenju je približno dvakrat večji kot pri navlaževanju, kar lahko zasledimo tudi pri ostalih vrstah z izjemo hrasta. Glede na ostale vrste, je pri orehovini sprememba bolj ustaljena, čeprav tako pri navlaževanju kot pri sušenju nekje na sredini opazimo nenaden dvig vrednosti, ki je lahko tudi posledica predolge izpostavitve drugačni klimi, med merjenjem.



Slika 44: Relativna sprememba E – modula pri orehovini v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.

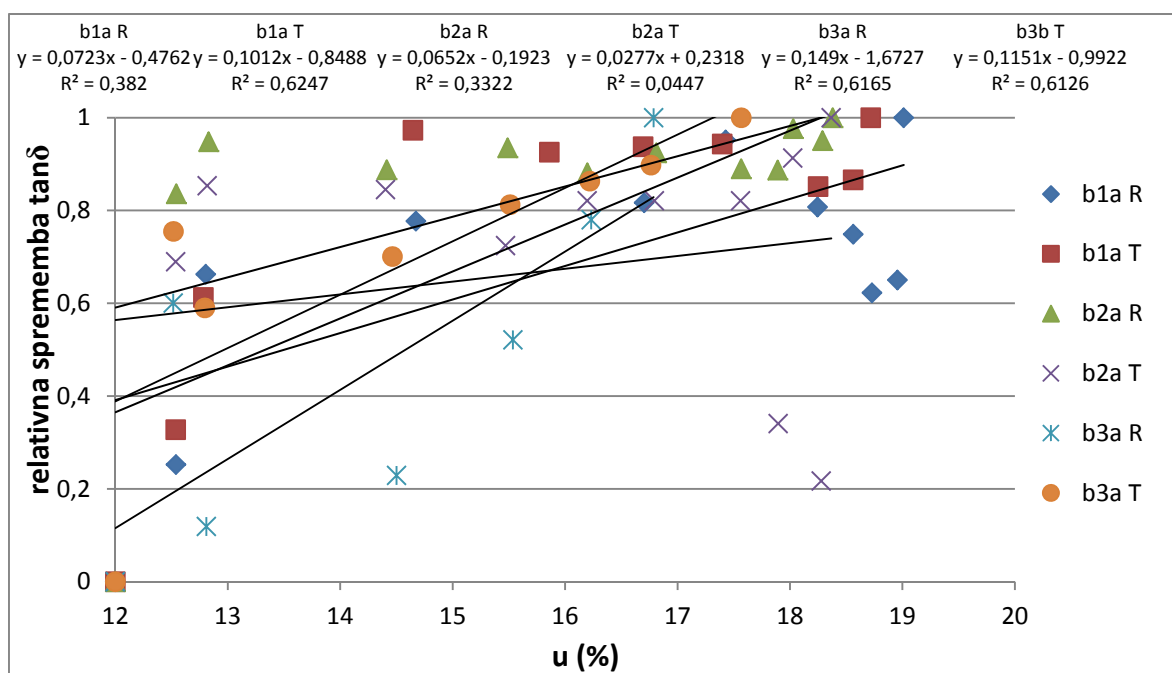
Preizkušanca lesa češnje v procesu adsorpcije prikazujeta veliko razliko v hitrosti spremembe E – modula glede na vlažnost. Obenem imata pa oba skoraj popolno linearno odvisnost. Na sliki 45 vidimo, da je pri procesu sušenja regresijsko ujemanje manjše kot pri navlaževanju, kar lahko nakazuje na večji vpliv vlažnostnega gradienta. Presenetljiva je predvsem razlika med koeficientoma naklonskega kota, saj je trend popolnoma nasproten glede na preostale vrste. Tukaj modul elastičnosti s padanjem vlažnosti narašča.

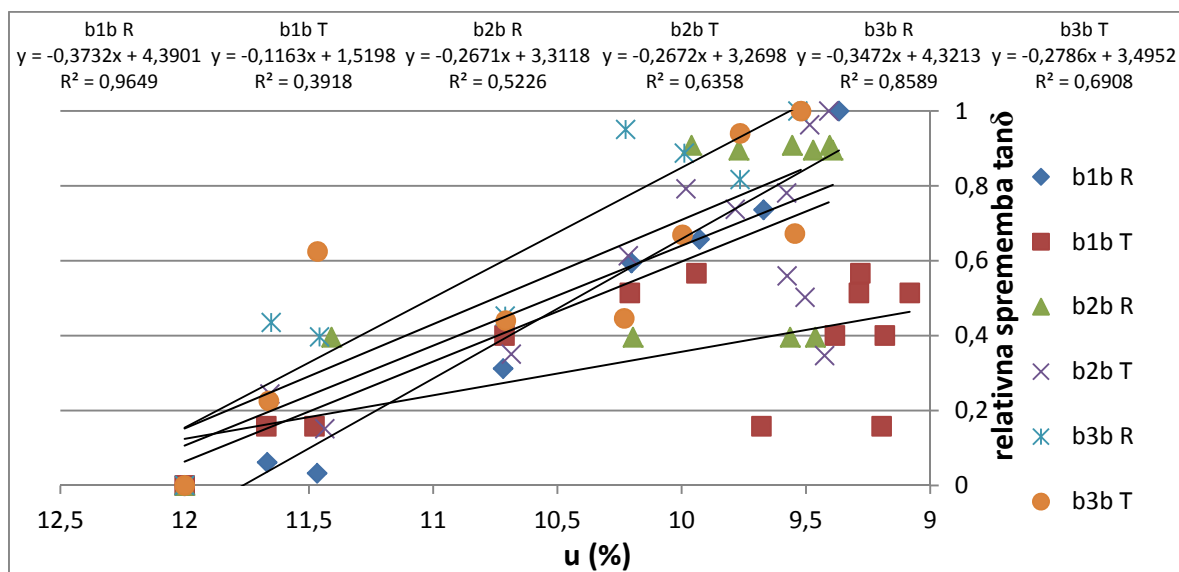


Slika 45: Relativna sprememba E – modula pri lesu češnje v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.

5.2 PRIMERJAVA DINAMIKE SPREMEMB KOEFICIENTA DUŠENJA ZVOKA MED ADSORPCIJO IN DESORPCIJO

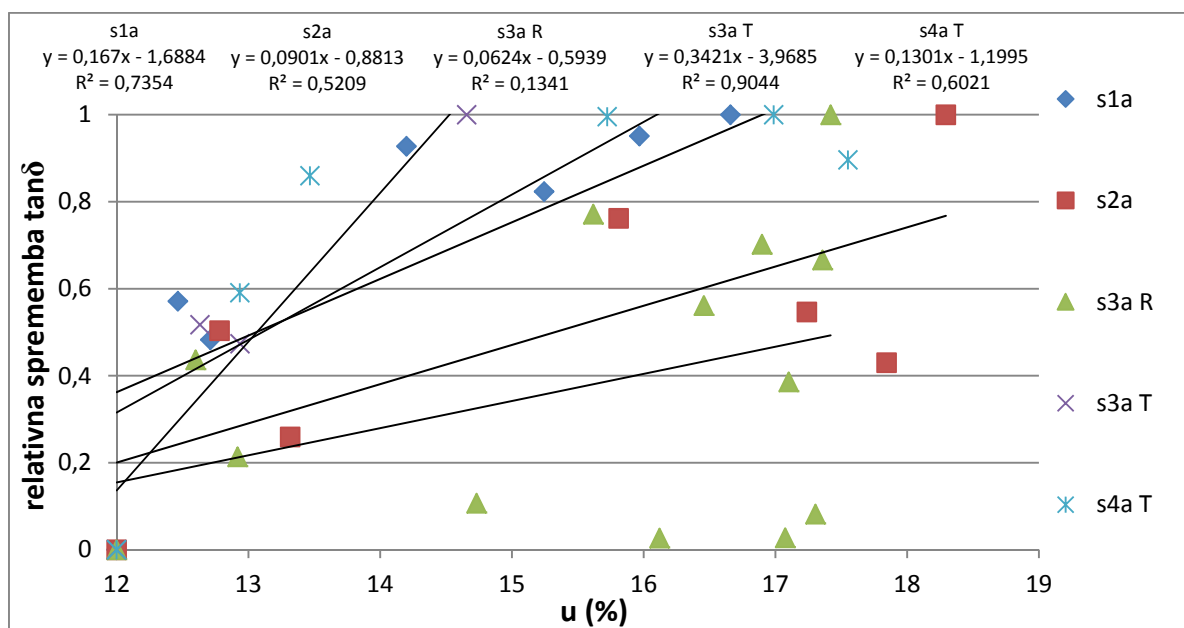
Pri bukovini je raztros vrednosti $\tan \delta$ (slika 46) pri adsorpciji in desorpciji zelo velik, še posebno pri navlaževanju, kjer težko govorimo o značilni linearni odvisnosti. Naklonski koeficienti se med preizkušanci močno razlikujejo, prav tako determinacijski koeficienti (R^2). Kljub temu, da je pri preizkušancu b1b R celo 0,96 je potrebno opomniti, da pri tem niso bili zajete vse meritve. Razlika dinamike med sušenjem in navlaževanjem je očitna, saj pri adsorpciji na začetku prevladuje zelo velik skok vrednosti. Zanimivo je, da vrednosti pri navlaževanju bolj nihajo na začetku, pri sušenju pa na koncu, toda spet ne pri vseh preizkušancih.

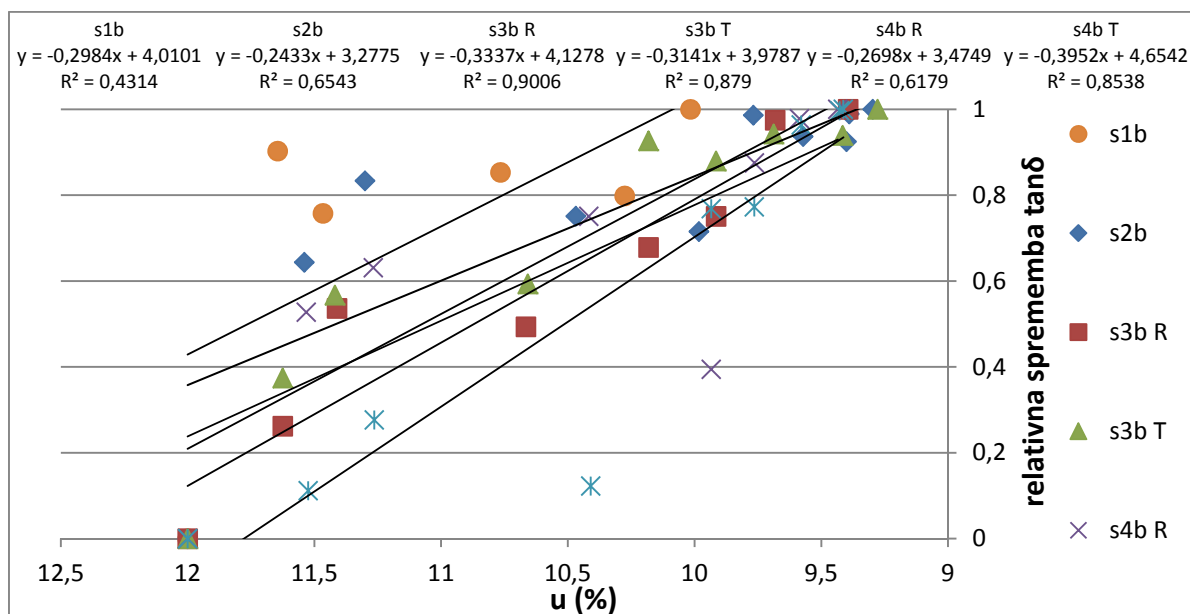




Slika 46: Relativna sprememba $\tan \delta$ pri bukovini v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.

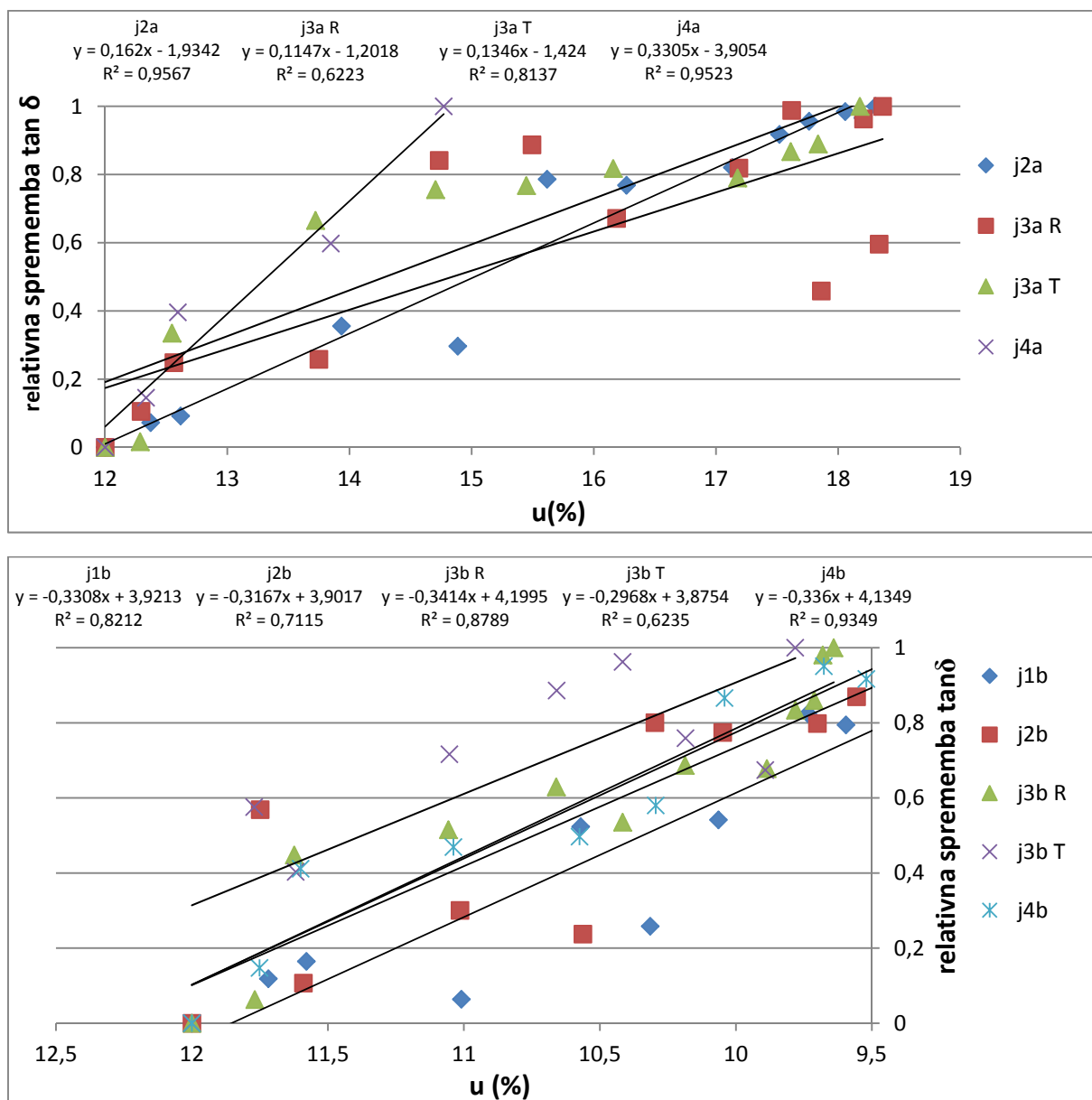
Koeficient dušenja zvoka pri navlaževanju smrekovine ne izkazuje statistično značilne povezanosti z lesno vlažnostjo, vrednosti pa močno nihajo (slika 47). Malo večja urejenost se vidi pri procesu sušenja, kjer so večje spremembe na začetku uravnovešanja, morda zaradi večjega gradienta vlažnosti. Z zniževanjem vlažnosti pa se spremembe zmanjšujejo.





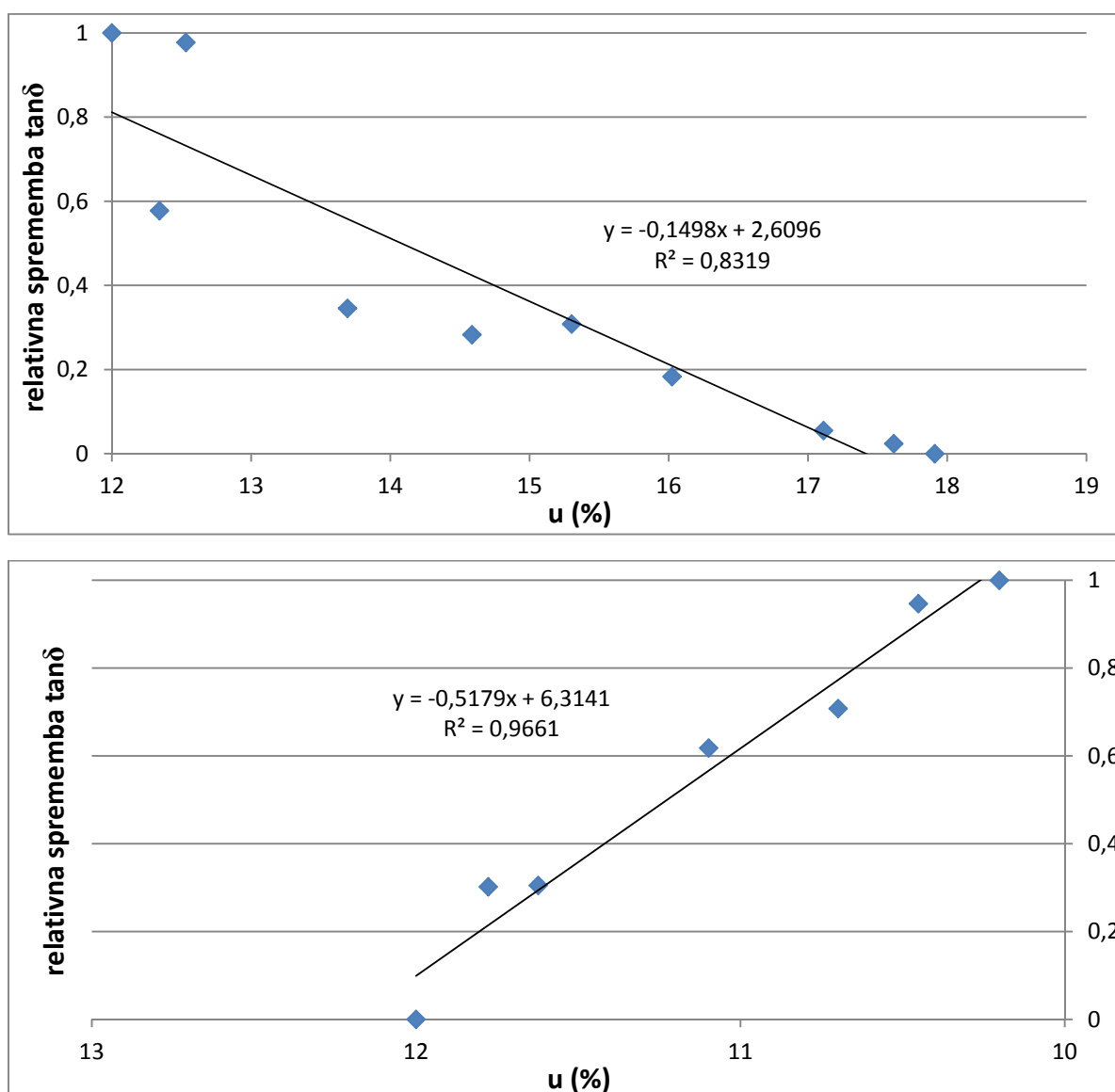
Slika 47: Relativna sprememba $\tan \delta$ smrekovine v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.

Koeficient dušenja zvoka pri jesenovini se je z večanjem vlažnosti povečeval (slika 48). Vidimo, da tako kot pri spremembi E – modula, tudi tukaj sušenje poteka hitreje kot navlaževanje. Potrebno je opomniti, da pri navlaževanju niso bili zajeti podatki preizkušanca j1a zaradi prevelike variabilnosti vrednosti, kjer ni bilo mogoče izračunati relativne spremembe. Primerjava determinacijskih koeficientov pri adsorpciji in desorpciji nakazuje na precejšno podobnost. Čeprav pri preizkušancu j4a vidimo precej drugačen koeficient naklona je potrebno poudariti, da je glede na ostale preizkušance zajetih manj podatkov. Prav tako lahko tudi vidimo, da so pri adsorpciji nihanja večja na koncu, pri sušenju pa na začetku procesa.



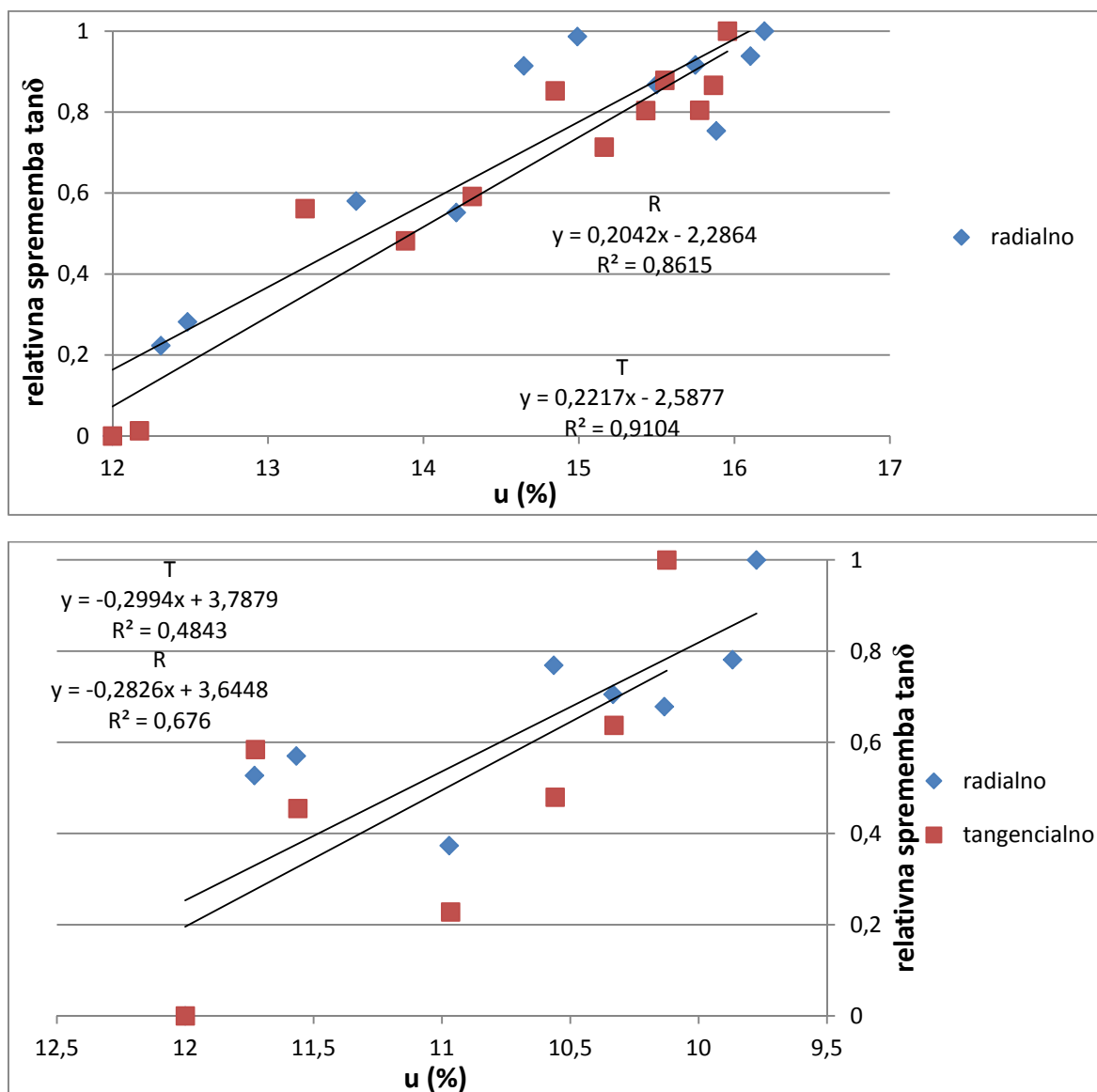
Slika 48: Relativna sprememba $\tan \delta$ pri jesenovini v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.

Koeficient dušenja ($\tan \delta$) pri adsorpciji je pri hrastovini presenetljiv, saj je glede na ostale vrste ravno obraten. Namreč pri navlaževanju se zmanjšuje, pri sušenju pa povečuje. Na sliki 49 je razvidno tudi, da je razmerje med naklonskima kotoma sušenja in navlaževanja večje kot pri ostalih vrstah, determinacijski koeficient pa je tako pri navlaževanju kot tudi pri sušenju velik.



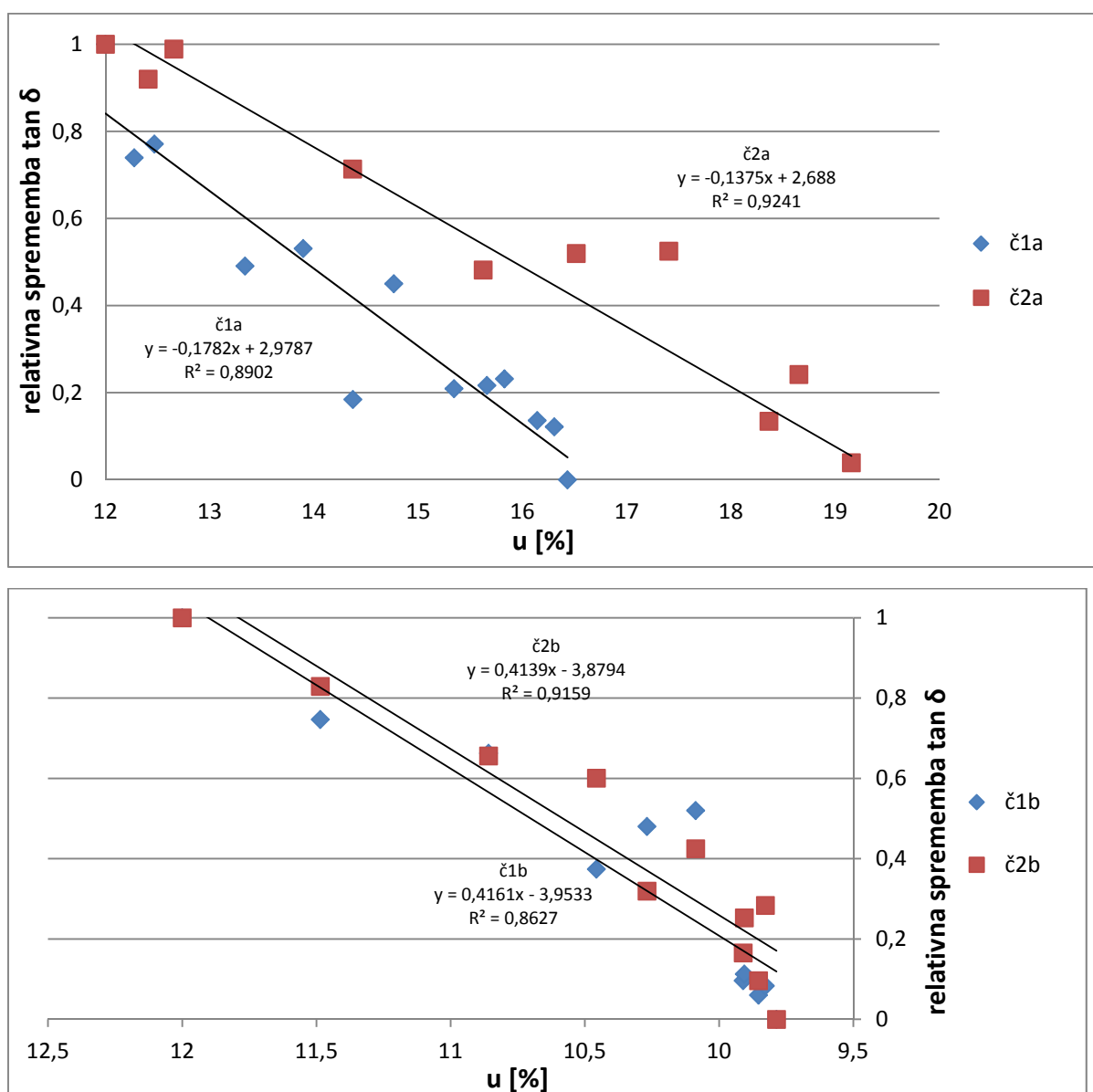
Slika 49: Relativna sprememba $\tan \delta$ pri hrastovini v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.

Iz slike 50 je razvidno, da je koeficient dušenja zvoka pri orehovini pri navlaževanju statistično značilneje povezan z lesno vlažnostjo, kot pa pri sušenju. Zanimivo je tudi razmerje koeficienta naklona premice pri adsorpciji in desorpciji, ki je bistveno manjše kot pri ostalih vrstah, kjer je ta v povprečju dvakrat večji. Poleg tega pri sušenju opazimo večja nihanja vrednosti, ki so lahko posledica prisotnega večjega vlažnostnega gradienta v preizkušancu.



Slika 50: Relativna sprememba $\tan \delta$ pri orehovini v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.

Hitrost spremembe koeficienta dušenja zvoka glede na lesno vlažnost je v procesu sušenja lesa češnje bistveno večja, in to za več kot dvakrat, v primerjavi z navlaževanjem. Determinacijski koeficient regresijske premice je tako pri sušenju kot tudi pri navlaževanju zelo velik. Na sliki 51 v procesu adsorpcije opazimo razliko v doseženi končni vlažnosti med obema preizkušancema.



Slika 51: Relativna sprememba $\tan \delta$ pri lesu češnje v odvisnosti od vlažnosti, zgoraj adsorpcija, spodaj desorpcija.

6 SKLEPI

Navlaževanje ali sušenje lesa vpliva na spremembo njegove togosti. Glede na spremembo vlažnosti preizkušancev so spremembe E – modula linearne. V tej nalogi sem ugotovil, da pri procesu desorpcije spremembe modula elastičnosti v povprečju potekajo dvakrat hitreje, kot pri navlaževanju. E – modul se pri navlaževanju zmanjšuje in pri sušenju povečuje.

Iz rezultatov sklepamo, da je do večjih sprememb E – modula prišlo pri navlaževanju, med vsemi vrstami pa nismo zasledili kakšne posebnosti. Izpostavimo lahko predvsem višji elastični modul pri smreki in jesenu, toda z ozirom na precejšnje razlike med samimi preizkušanci. Ti dve vrsti pogosto zasledimo pri glasbilih, zanimivi pa sta vrsti oreha in češnje, ki imata precej slabši E – modul in se prav tako uporabljata pri izdelavi lesenih glasbenih inštrumentov. Ne moremo potrditi, da bi vlažnostni gradient vplival na E – modul, kar lahko pripišemo tudi majhnim prečnim prerezom preizkušancev v eksperimentu. Ta vpliv bi se mogoče pokazal šele pri večjem vlažnostnem gradientu, ki je pogost v procesu sušenja elementov večjega prereza.

Precej zanimive rezultate smo ugotovili pri dušenju zvoka. Tu smo najmanjše koeficiente dušenja zasledili pri jesenovini, smrekovini in lesu češnje. Z gotovostjo ne moremo reči, da koeficient dušenja zvoka z navlaževanjem raste oziroma s sušenjem pada. Rezultati so pokazali, da je ta trend pri nekaterih preizkušancih lahko tudi obraten. Pri spremembi vlažnosti tako pri desorpciji kot adsorpciji je odziv dušenja zvoka hitrejši kot je odziv spremembe mase ali E – modula. Ta ugotovitev pa je lahko bistvenega pomena pri akustiki lesenih glasbil. Sklepamo, da na to vpliva tudi vlažnostni gradient.

7 POVZETEK

Za čim boljši glasbeni inštrument je potrebna primerna izbrana lesna vrsta, ustrezna kakovost lesa, čvrsta in primerna konstrukcija kot tudi končna obdelava. Vsak inštrument je sam po sebi unikat, toda ročno izdelani inštrumenti imajo poleg tega veliko višjo dodano vrednost. Kakovost lesa lahko ocenjujemo na več načinov: vizualno (estetsko), s pregledom mehanskih in fizikalnih lastnosti, z vidika obdelovalnosti ali pa celo trajnosti. Za izdelovalce glasbil je najbolj referenčno ocenjevanje po fizikalnih in mehanskih lastnostih, ki pa jih lahko določamo z destruktivnimi ali nedestruktivnimi metodami.

Najboljše in najprimernejše lesne vrste za kitare in violine so izdelovalci izbrali že pred stoletji. Na vrhu sta resonančna smrekovina in les javorja rebraša, sledijo jima tropske vrste kot so: brazilski palisander, mahagoni in ebenovina. Lahko bi rekli, da vse vrste z izjemno konstantnimi oz. enakomernimi anatomskimi strukturami in visokimi akustičnimi lastnostmi razvrščamo kot »resonančni les«.

Pri eksperimentalnem delu smo uporabili šest lesnih vrst: bukev (*Fagus sylvatica* L.), jesen (*Fraxinus excelsior* L.), smreko (*Picea abies* Mill.), hrast (*Quercus* sp.), češnja (*Prunus avium*) in oreh (*Juglans regia* L.). Naključno izbran material smo dobili v obliki žaganic dolžine 0,6 m kvadratnega prereza 2 x 2 cm, ki smo jih obdelali na manjše dimenzije. Sledilo je kondicioniranje preizkušancev v komori pri standardnih pogojih ($T = 20\text{ °C}$ in $\varphi = 65\%$). Preizkušance smo nato razdelili v dve skupini; eno smo sušili in drugo navlaževali.

Navlaževane in sušече preizkušance smo najprej v krajših, kasneje pa v daljših časovnih intervalih mehansko vzbujali in določali njihove akustične karakteristike ter sočasno spremljali tudi spremembo vlažnosti. Uporabili smo resonančno metodo, kjer smo preizkušance postavili na podpore in z lesenim kladivcem elastično impulzno vzbujali prosto prečno nihanje. Zvok smo zajeli s kondenzatorskim mikrofonom, ki smo ga postavili na sredino vzorca oz. na mesto kjer je nihanje največje. Mikrofon smo povezali z modulom za zajem podatkov in z računalnikom.

Rezultati so pokazali tipične uravnovesne krivulje dinamike sušenja oziroma navlaževanja glede na čas. Eksperimenta sušenja in navlaževanja sta potekala približno tri tedne. Kot pričakovano so končne vlažnosti pri osušenih preizkušancih variirale od 9,1 % do 9,8 %. Večje variiranje vlažnosti se je pojavilo pri navlaževanju in sicer od 16,0 % do 19,2 %. Polovični uravnovesni časi variirajo glede na lesno vrsto, prav tako pa tudi med posameznimi preizkušanci znotraj vrste. Tako se je najhitreje uravnovesila smrekovina – 976 minut, najdlje pa je potreboval les hrasta – 3485 minut. V obeh primerih, t.j. pri adsorpciji in desorpciji, smo za začetno vlažnost lesa predpostavili 12 %.

Ugotovili smo, da sprememba vlažnosti (navlaževanje ali sušenje) vpliva na togost lesa. E – modul se je pri navlaževanju zmanjševal, pri sušenju pa povečeval in to dvakrat hitreje. Zasledili smo predvsem višji modul elastičnosti pri smrekovini in jesenovini, nismo pa mogli potrditi, da bi nanj vplival vlažnostni gradient. Drugačni rezultati pa so bili pri dušenju zvoka, kjer lahko govorimo o vplivu vlažnostnega gradienta, saj so bile spremembe veliko hitrejše, kot pa so bile spremembe lesne vlažnosti. Ne moremo z gotovostjo reči, da koeficient dušenja zvoka z navlaževanjem raste in s sušenjem pada, ker je bil trend pri nekaterih preizkušancih tudi obraten.

8 VIRI

- Barducci I., Pasqualini G. 1948. Misura dell'attrito interno e delle costanti elastiche del legno. *Nuovo Cimento*, 1, 5:416–466
- Barlow C.Y. 1997. Materials selection for musical instruments. *Proc Inst Acoust*, 19, 5:69–78
- Beldie I.P. 1968. The determination of the modulus of shear of spruce wood. *Holz Roh Werkst.*, 26: 261–266
- Bucur V. 1980. Modifications des propriétés acoustiques du bois de résonance sous l'effet de sollicitations de longue durée. *Ann Sci Forest*, 37, 3:249–264
- Bucur V. 1979. Wood failure testing with ultrasonic method. V: *Proc 4th Symp on Nondestructive Testing of Wood*, Vancouver, 28–30 Aug.: 223–226
- Bucur V., Ghelmeziu N. 1977. The influence of long term loading on acoustic properties of resonance woods (in Rumanian). *Ind Lemn*, 28, 4:171–180
- Bucur V. 2006. *Acoustics of wood*. Berlin, Springer Verlag: 393 str.
- Brancheriau L., Kouchade C., Brémaud I. 2010. Internal friction measurement of tropical species by various acoustic methods. *Journal of Wood Science*, 56: 371-379
- Brémaud I., Gril J., Thibaut B. 2011a. Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data. *Wood Science and Technology*, 45: 735-754
- Chiesa V. 1987. Influenza dell'intensita delle intro-flessioni sui parametri elastici del legno di abete rosso «di risonanza». *Tesi di laurea in Scienze Forestali*, Università di Firenze

- Delune L. 1977. Le bois dans les industries de la musique. *Rev Forest Fr*, 29, 2:143–149
http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/21128/RFF_1977_2_143.pdf?sequence=1
- Dünnwald H. 1990. An extended method of objectively determining the sound quality of violins. *Acustica*, 71:269–276
- Fengel D., Wegener G. 1989. *Wood. Chemistry, ultrastructure, reactions*. Berlin, DeGruyter: 613 str.
- Fukada E., Yasuda S., Kohara J., Okamoto H. 1956. Dynamic Young's modulus and piezoelectric constants of old timbers. *Bull Kabayasi Inst Phys Res*, 6:104–107
- Gadd C. 1984. Stress relaxation of wood. *J Catgut Acoust Soc*, 41:17–18
- Ghelmeziu N., Beldie I.P. 1972. On the characteristics of resonance spruce wood. *Catgut Acoust Soc Newslika*, 17:10–16
- Gough C.E. 2001. Physical aspects of the perception of violin tone. V: *Proc ISMA 2001*, Perugia, Italy: 117–122
- Gorišek Ž. 2009. *Les: zgradba in lastnosti: njegova variabilnost in heterogenost*. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 178 str.
- Haines D. 1979. On musical instrument wood. *Catgut Acoust Soc Newsl*, 1, 31:23–32
- Hansen H. 2006. *Acoustic Studies on Wood*. Master Thesis. Christchurch, University of Canterbury, The New Zealand School of Forestry: 146 str.
- Holz D. 1967a. Untersuchungen an Resonanzhölzern. II. Mitteilung: Beurteilung von

- Resonanzholz der Oregon pine (*Pseudotsuga menziessii*) auf der Grundlage der Rohdichteverteilung über dem Stammquerschnitt sowie des Harzgehaltes. Arch Forstwesen, 16, 1:37–50
- Holz D. 1967b. Untersuchungen an Resonanzholz. III. Mitteilung: über die gleichzeitige Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls und der Dämpfung an Holzsteben im hörbaren Frequenzbereich. Holztechnologie, 8, 4:221–224
- Holz D. 1984. On some relations between anatomic properties and acoustical qualities of resonance wood. Holztechnologie, 25, 1:31–36
- Holz D. 1981. Zum Alterungsverhalten des Werkstoffes Holz – einige Ansichten, Untersuchungen, Ergebnisse. Holztechnologie, 22, 2:80–85
- Hutchins C.M. (ed) 1975. Benchmark papers in acoustics. Musical acoustics. Part I: violin family components. Part II: violin family functions. Hutchinson and Ross, Dowden, USA, distributed by Academic Press
- Kutnar A. 2003. Analiza leznih in dušilnih lastnosti lesa. Diplomsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 44 str Obataya E., Ono T., Norimoto M. 2000. Vibrational properties of wood along the grain. Journal of Material Science, 35: 2993-3001
- Meyer J. 1984. Tonal quality of violins. Catgut Acoust Soc Newsl, 41:10 (Abstract)
- Ono T. 1993. Effects of varnishing on acoustical characteristics of wood used for musical instrument soundboards. J Acoust Soc Jpn (E), 14, 6:397–407
- Pérez Martínez M.A., Poletti P., Espert G. 2011. Vibration Testing for the Evaluation of the Effects of Moisture Content on the In-Plane Elastic Constants of Wood Used in Musical Instruments. V: Vibration and Structural Acoustics Analysis. Vasques C.M.A., Dias Rodrigues J. (ur.). Berlin, Springer Verlag: 21-57

- Pishik I.I., Fefilon V.V., Burkovskaya V.I. 1971. Chemical composition and chemical properties of new and old wood (in Russian). *Lesnoi J*, 14, 6:89–93
- Richardson BE (1986) Wood for the guitar. *Proc Inst Acoust* 18(1):107–112
- Richardson B.E. 1988. Vibrations of stringed musical instruments. *Univ Wales Rev*, 3:13–20
- Schleske M. 1990. Speed of sound and damping of spruce in relation to the direction of grains and rays. *Catgut Acoust J*, 1, 6, 2:16–20
- Schleske M. 2002a. Empirical tools in contemporary violin making, part I. Analysis of design, materials, varnish and normal modes. *Catgut Acoust Soc J*, 4, 5, 2:50–64
- Schleske M. 2002b. Empirical tools in contemporary violin making, part II. Psycho-acoustic analysis and use of acoustical tools. *Catgut Acoust Soc J*, 4, 5, 2:43–61
- Sobue N., Okayasu S. 1992. Effects of continuous vibration on dynamic viscoelasticity of wood. *J Soc Mat Sci Jpn*, 41, 461:164–169
- Spycher M., Francis W. M. R. Schwarze, Steiger R. 2007. Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties. *Wood Science and Technology* 2008, 42: 325-342
- Šali S., 2001. O kitari – od drevesa do zvoka. *EPTA bilten*, 3: 87-89
- Šali S. 2002. O kitari – od drevesa do zvoka. *EPTA bilten*, 4: 65-69
- Šali S. 2002. O kitari – od drevesa do zvoka. *EPTA bilten*, 4: 73-76
- Šali S. 2003. O kitari – od drevesa do zvoka. *EPTA bilten*, 6: 61-64

- 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 Products* 2011, 69: 171-181
- Weinreich G. 1983. Violin radiativity. Concepts and measurements. V: *Proc SMAC '83*, Royal Swedish Academy of Music, Stockholm, : 99–109
- Zhang T., Bai S., Bardet S., Almeras T. Thibaut B., Beauchene J. 2011. Radial variations of vibrational properties of three tropical woods. *Journal of Wood Science*, 57: 377-386

ZAHVALA

Za izvedbo magistrske naloge se lepo zahvaljujem svojemu mentorju, prof. dr. Željku Gorišku in asistentu dr. Alešu Stražetu, ki mi je vedno nudil pomoč pri eksperimentalnem delu magistrske naloge kot tudi pri recenziji dela.

Zahvaljujem se tudi tehničnemu sodelavcu Luki Kržetu, ki mi je bil na razpolago zlasti pri izdelavi preizkušancev.

Končno gre zahvala tudi moji družini, sorodnikom in prijateljem, še posebej očetu in materi, ki sta mi v času študija, predvsem po nezgodi, nudila največjo podporo ter motivacijo. Zahvala gre tudi vsem sošolcem za vso pomoč v času študija.