

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Bogdan MITKOVSKI

**STRUKTURNE IN AKUSTIČNE LASTNOSTI LESA
ZA TOLKALA**

DIPLOMSKI PROJEKT

Visokošolski strokovni študij – 1. stopnja

Ljubljana, 2013

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Bogdan MITKOVSKI

STRUKTURNE IN AKUSTIČNE LASTNOSTI LESA ZA TOLKALA

DIPLOMSKI PROJEKT
Visokošolski strokovni študij – 1. stopnja

**STRUCTURAL AND ACOUSTICAL PROPERTIES OF WOOD
FOR PERCUSSION INSTRUMENTS**

B. Sc. THESIS
Professional Study Programmes

Ljubljana, 2013

Diplomski projekt je zaključek Visokošolskega strokovnega študija Lesarstvo – 1. stopnja. Delo je bilo opravljeno na Katedri za tehnologijo lesa.

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

Mentor: doc. dr. Aleš Straže

Recenzent: prof. dr. Željko Gorišek

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Diplomski projekt 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 projekt, ki sem ga oddal v elektronski obliki, identičen tiskani verziji.

Bogdan Mitkovski

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dvl
DK	UDK 630*812.12
KG	les/lesena tolkala/akustične lastnosti/struktura lesa
AV	MITKOVSKI, Bogdan
SA	STRAŽE, Aleš (mentor)/GORIŠEK, Željko (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2013
IN	STRUKTURNE IN AKUSTIČNE LASTNOSTI LESA ZA TOLKALA
TD	Diplomsko delo (Visokošolski strokovni študij – 1. stopnja)
OP	IX, 35 str., 6 pregl., 35 sl., 19 vir.
IJ	sl
JJ	sl/en
AI	Raziskali smo vpliv strukture lesa na akustične lastnosti pri lesenih tolkalih. Vizualno smo izbrali les afriškega padouka, robinije in javorja ter izdelali preizkušance manjših dimenzij. S slušnim preverjanjem smo preizkušance najprej razvrstili v 5 kakovostnih razredov, nato pa pri impulzno elastičnem mehanskem vzbujanju izmerili lastno frekvenco in dušenje zvoka ter določili kazalnike akustične kakovosti. Vizualna ocena kakovosti lesa za lesena tolkala se je dobro ujemala z meritvami hitrosti zvoka vzdolž lesnih vlaken ter prečnega specifičnega elastičnega modula. Pri lesu afriškega padouka so potek in orientacija lesnih vlaken ter teksturne posebnosti pomembno vplivale na akustično kakovost preizkušancev; gostota lesa pa neznčilno. Primerljivo instrumentalno in slušno razvrščanje preizkušancev padouka smo dosegli s koeficientom dušenja zvoka ($\tan \delta$) ter z relativno učinkovitostjo akustične pretvorbe (RACE). Pri podobnem povprečnem specifičnem elastičnem modulu (E / ρ) lesa javorja, robinije in padouka smo potrdili bistveno večje dušenje zvoka pri domačih lesnih vrstah.

KEY WORDS DOCUMENTATION

ND	Dvl
DC	UDC 630*812.12
CX	wood/wooden percussion instruments/acoustic properties/wood structure
AU	MITKOVSKI, Bogdan
AA	STRAŽE, Aleš (supervisor)/GORIŠEK, Željko (co-advisor)
PP	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c VIII/34
PB	University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY	2013
TY	STRUCTURAL AND ACOUSTICAL PROPERTIES OF WOOD FOR PERCUSSION INSTRUMENTS
DT	B. Sc. Thesis (Professional Study Programmes)
NO	IX, 35 p., 6 tab., 35 fig., 19 ref.
LA	Sl
AL	sl/en
AB	We investigated the influence of the structure of wood on acoustic properties. We have visually selected planks of African padouk, black locust and maple woods and cut test specimens of smaller dimensions. We have graded the wood specimens into 5 acoustic quality grades by hearing examination and later measured the fundamental frequency and sound damping with elastic mechanical excitation and determined selected acoustic quality indicators. Visual assessment of raw wood quality matched closely to the measurements of the speed of sound along the grain and to the transverse specific modulus of elasticity. Grain angle and texture strongly affected the acoustic quality of African padouk, while density did not have a significant impact. We have reached similar grading between hearing examination and instrumental measurements of test specimens using damping coefficient ($\tan \delta$) and relative acoustic conversion efficiency (RACE). While having similar average values of specific modulus of elasticity (E / ρ), African padouk returned lower damping coefficient than black locust or maple.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO.....	V
KAZALO PREGLEDNIC.....	VII
KAZALO SLIK.....	VIII
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	1
1.2 DELOVNE HIPOTEZE	1
1.3 CILJI NALOGE	1
2 PREGLED LITERATURE	2
2.1 LES IN GLASBILA	2
2.2 LESENA TOLKALA.....	2
2.2.1 Idiofoni	2
2.2.2 Bobni in ostala tolkala.....	3
2.3 NIHAJNI NAČINI	3
2.3.1 Nihajni načini pri melodičnih tolkalih	4
2.4 DUŠENJE MEHANSKIH NIHANJ	5
2.4.1 Notranje trenje	6
2.4.2 Model viskoelastičnosti	6
2.4.3 Metode določanja dušenja	6
2.5 ANATOMSKE, STRUKTURNE IN AKUSTIČNE LASTNOSTI LESA PRI MELODIČNIH TOLKALIH	7
3 MATERIALI IN METODE	10
3.1 LESNE VRSTE.....	10
3.1.1 Izbor eksotične lesne vrste	10
3.1.2 Izbor domačih lesnih vrst	10
3.2 PRIPRAVA IN VIZUALNA OCENA DESK	10
3.3 PRIPRAVA PREIZKUŠANCEV	10
3.3.1 Izdelava preizkušancev	11
3.4 SUBJEKTIVNO OCENJEVANJE PREIZKUŠANCEV	11
3.4.1 Slušno ocenjevanje	11
3.4.2 Vizualno ocenjevanje strukturnih značilnosti lesa.....	12
3.5 RAČUNALNIŠKO PODPRTO OCENJEVANJE AKUSTIČNIH LASTNOSTI PREIZKUŠANCEV	12
3.5.1 Oprema za akustične meritve in analizo	12
3.5.2 Izvajanje meritev.....	12

3.5.3	Določanje dušenja zvoka.....	14
3.5.4	Parametri in izračuni kazalnikov	15
4	REZULTATI IN RAZPRAVA.....	17
4.1	ANATOMSKE ZNAČILNOSTI LESNIH VRST	17
4.2	VIZUALNA OCENA DESK AFRIŠKEGA PADOUKA	19
4.3	VPLIV STRUKTURE NA AKUSTIČNE LASTNOSTI PLOŠČIC AFRIŠKEGA PADOUKA	19
4.4	PRIMERJAVA VIZUALNE IN RAČUNALNIŠKO PODPRTE RAZVRSTITVE DESK AFRIŠKEGA PADOUKA	24
4.5	PRIMERJAVA SLUŠNE IN RAČUNALNIŠKO PODPRTE RAZVRSTITVE PLOŠČIC AFRIŠKEGA PADOUKA.....	25
4.6	PRIMERJAVA LASTNOSTI DOMAČIH LESNIH VRST Z AFRIŠKIM PADOUKOM.....	29
5	SKLEPI	33
6	VIRI	34
ZAHVALA		

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Anatomske lastnosti preizkušanih lesnih vrst.....	17
Preglednica 2: Lastnosti desk in razvrstitev glede na vizualno oceno	19
Preglednica 3: Deleži (%) strukturnih posebnosti pri preizkušancih iz afriškega padouka v razredih akustične kakovosti (1-5).....	20
Preglednica 4: Kazalniki akustičnih lastnosti desk pridobljeni z merjenjem fizikalnih parametrov (v - hitrost zvoka, $\tan \delta$ - dušenje zvoka, E - vzdolžni in prečni elastični modul, E_T / ρ - prečni specifični elastični modul, RACE - relativna učinkovitost akustične pretvorbe)	24
Preglednica 5: Povprečne vrednosti izmerjenih fizikalnih parametrov preizkušancev, za določenih 5 razredov akustične kakovosti (n - število preizkušancev, ρ - gostota, $\tan \delta$ - koeficient dušenja, E - prečni dinamični elastični modul, E / ρ - prečni specifični elastični modul, K - akustični koeficient, ACE - učinkovitost akustične pretvorbe, RACE - relativna učinkovitost akustične pretvorbe)	25
Preglednica 6: Vrednosti izmerjenih kazalnikov akustične kakovosti za uporabljene domače lesne vrste	29

KAZALO SLIK

Slika 1: Marimba z lesenimi ploščicami iz afriškega padouka (foto B. Mitkovski)	3
Slika 2: Vrste nihanj, ki jih lahko zaznamo v prizmi	4
Slika 3: Prikaz prvih treh prečnih nihajnih načinov, ki jih uglasimo pri ploščicah melodičnih tolkal	4
Slika 4: Prvi trije prečni nihajni načini v frekvenčnem spektru (La Favre, 2007b)	5
Slika 5: Kelvin – Voightov model viskoelastičnosti	6
Slika 6: Zvočni signal dušenega nihanja iz katerega lahko določimo koeficient dušenja s pomočjo logaritemskega dekrementa ali s konceptom aditivne sinteze	7
Slika 7: Zveza med koeficientom dušenja in specifičnim elastičnim modulom pri afriškem padouku, ekstrahiranem z različnimi organskimi topili (Brémaud in sod., 2011)... ..	9
Slika 8: Preizkušanci iz afriškega padouka in robinije (levo) ter javorja (desno).....	11
Slika 9: Postavitev desk za izvajanje akustičnih meritev	13
Slika 10: Merilna oprema računalniško podprtega določanja akustičnih lastnosti lesa (foto: B. Mitkovski).....	14
Slika 11: Zajeti zvočni signal (levo) in zajete točke ekstremov iz zvočnega signala (desno)	14
Slika 12: Lesne vrste pod mikroskopsko povečavo v prečni (levo), radialni (v sredini) in tangencialni ravnini (desno)	18
Slika 13: Reprezentativni preizkušanci posameznih razredov akustične kakovosti.....	20
Slika 14: Deleži orientacije preizkušancev na prečnih prerezih po razredih akustične kakovosti	21
Slika 15: Deleži odklona vlaken po razredih akustične kakovosti	21
Slika 16: Preizkušanci z rebrasto (levo) in progasto teksturo (desno)	22
Slika 17: Deleži tekstur po razredih akustične kakovosti.....	23
Slika 18: Delež grč po razredih akustične kakovosti.....	23
Slika 19: Delež razpok po razredih akustične kakovosti.....	23
Slika 20: Izmerjene hitrosti zvoka, pri vzdolžnem vzburjanju desk.....	24
Slika 21: Specifični dinamični moduli izmerjeni pri prečnem vzburjanju desk.....	24
Slika 22: Deleži kakovostnih razredov ploščic, ki smo jih dobili iz posamezne deske	25
Slika 23: Število preizkušancev v posameznih razredih akustične kakovosti.....	26

Slika 24: Povprečne vrednosti gostote po razredih akustične kakovosti.....	26
Slika 25: Dušenje lesa po razredih akustične kakovosti.....	27
Slika 26: Dinamični prečni elastični modul po razredih akustične kakovosti.....	27
Slika 27: Specifični prečni elastični modul po razredih akustične kakovosti	27
Slika 28: Povprečne vrednosti in standardni odkloni akustičnega koeficienta po razredih akustične kakovosti	28
Slika 29: Povprečne vrednosti in standardni odkloni učinkovitosti akustične pretvorbe po razredih akustične kakovosti	28
Slika 30: Relativna učinkovitost akustične pretvorbe za posamezne razrede akustične kakovosti	29
Slika 31: Primerjava koeficienta dušenja preizkušancev med lesnimi vrstami in razredi kakovosti	30
Slika 32: Primerjava prečnih dinamičnih elastičnih modulov med lesnimi vrstami in razredi kakovosti	30
Slika 33: Primerjava prečnih specifičnih dinamičnih modulov med lesnimi vrstami in razredi kakovosti	30
Slika 34: Razmerje med koeficientom dušenja in prečnim specifičnim elastičnim modulom proučevanih lesnih vrst.....	31
Slika 35: Primerjava relativne učinkovitosti akustične pretvorbe med različnimi lesnimi vrstami in razredi akustične kakovosti	32

1 UVOD

Pri omembi lesa in izdelkov iz lesa običajno najprej pomislimo na pohištvo in podobne proizvode, ki jih vsakodnevno v splošni rabi srečujemo v našem bivalnem okolju. Velik potencial ima les v izdelkih, ki jih ne omenjamo pogosto, med te pa bi lahko uvrstili tudi glasbila. Veliko glasbil ali njihovih sestavnih delov je izdelanih prav iz masivnega lesa, saj les nudi izjemne akustične lastnosti, ki jih je zelo težko ali nemogoče posnemati z drugimi materiali. Ožja skupina glasbil, ki neposredno izkoriščajo akustične lastnosti lesa so tolkala. Tovrstna glasbila so lahko le delno kot tudi v celoti izdelana iz lesov različnih lesnih vrst, odvisno od izvedb in njihove namembnosti.

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Za potrebe izdelave lesenih tolkal izbiramo les, ki ima take lastnosti, ki jih za določene inštrumente pričakujemo. Pri tem smo pozorni tako na lesno vrsto, kot tudi na raznolikost znotraj posamezne vrste. S tem v mislih, morajo izdelovalci tovrstnih glasbil predvideti kako se bo določen kos lesa obnesel in odzival v končnem izdelku. Izbira lesa in drugih materialov za izdelavo lesenih tolkal dandanes tako še zelo pogosto temelji le na subjektivni oceni zvočnih lastnosti navkljub razpoložljivosti številnih metod, s katerimi je mogoče natančno določiti zahtevane ali želene fizikalne lastnosti. Izdelovalci teh glasbil se pri tem zanašajo izključno na zaznavne, slušne sposobnosti ter na izkušnje in vizualno poznavanje materiala. Pri tovrstnem izboru in ocenjevanju tako ostajajo nedefinirani ključni merljivi parametri uporabljenih materialov, ki bi lahko zagotavljali predvidljive akustične lastnosti končnega izdelka.

1.2 DELOVNE HIPOTEZE

Domnevamo, da obstajajo fizikalno merljivi kazalniki akustičnih lastnosti lesa, s katerimi lahko les primerljivo vrednotimo, kot to izvajajo izkušeni izdelovalci lesenih glasbil. Hkrati predpostavljamo, da nekatere strukturne lastnosti in posebnosti lesa negativno vplivajo na kakovost zvoka pri lesenih tolkalih. Predvidevamo tudi, da imajo nekatere domače lesne vrste s homogeno strukturo določen potencial za izdelavo lesenih tolkal.

1.3 CILJI NALOGE

V nalogi želimo primerjati zaznavno in subjektivno razvrščanje najpogostejših lesnih vrst za lesena tolkala z nekaterimi njihovimi merljivimi strukturnimi, fizikalnimi in akustičnimi lastnostmi. Hkrati želimo določiti relevantne fizikalne parametre, ki bi se lahko uporabljali za vrednotenje akustičnih lastnosti lesa in razvrščanje le tega pri lesenih tolkalih. Cilj naloge je tudi proučitev potenciala nekaterih domačih lesnih vrst za izdelavo lesenih tolkal. Izsledke naloge bomo primarno uporabili za izboljšanje izdelovanja tolkal kot sta ksilofon in marimba.

2 PREGLED LITERATURE

2.1 LES IN GLASBILA

Les predstavlja surovino, ki je v glasbeni industriji pri večini glasbil nenadomestljiva. Kljub razvoju in tehnološkemu napredku ter poznavanju materialov in njihove raznolikosti, je les pogosto še vedno edini izbor za glasbila vrhunske kakovosti, medtem, ko se nadomestne materiale kot so sintetični polimeri in kompoziti iz ogljikovih vlaken uporablja le v glasbilih nižje kakovosti (Perez in sod., 2011).

Razlogi za uporabo lesa v te namene se skrivajo v njegovih lastnostih. Ob stiku z lesom lahko ugotovimo, da udarjanje po njem vzbuja vibracije, ki jih lahko čutimo, še bolj pa jih slišimo. Te lastnosti so odvisne od lesne vrste in njene anatomske, strukturne in kemijske zgradbe. Za določanje akustične kakovosti lesa, se vse bolj uveljavljajo fizikalno-akustične metode, ki naj bi pokazale pravo kakovost lesa, za uporabo v akustične namene (Hansen, 2006). Akustične sposobnosti lesa torej niso skrivnost, zato je uporabnost tovrstnega materiala za glasbila še kako dobrodošla.

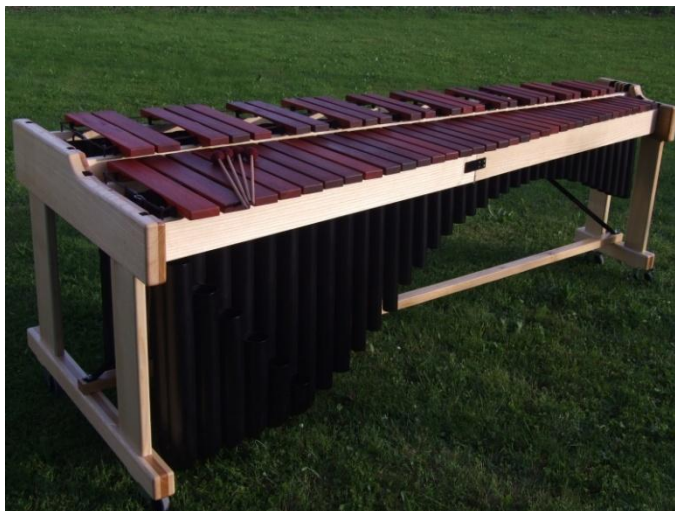
2.2 LESENA TOLKALA

Tolkala so med najstarejšimi glasbili, ki so bila prisotna že v kulturi naših prednikov (Bucur, 2006). V splošnem tolkala običajno uvrstimo v dve skupini imenovani idiofoni in membranofoni. Idiofoni so tolkala, ki sama proizvajajo zvok s tem, ko zaniha snov iz katere so narejena in ne le struna ali opna. Membranofoni pa so glasbila, ki imajo napeto opno iz naravne, ustrojene kože ali umetne mase preko kotla, oboda ali votlega valja, kjer proizvajamo zvok z udarjanjem ali drgnjenjem na opno. Tolkala lahko ločimo še na tista, ki proizvajajo natančno določeno tonsko višino oziroma frekvenco zvoka in tolkala ki nimajo definirane tonske višine (Michels, 2002).

2.2.1 Idiofoni

Med idiofone uvrščamo marimbo, ksilofon, zvončke, vibrafon, zvonove in mnoga druga tolkala, ki jim lahko rečemo tudi melodična tolkala, saj imajo določljivo tonsko višino. Med omenjenimi glasbili le marimba in ksilofon neposredno izkoriščata les za proizvodnjo zvoka, medtem ko ostala glasbila izkoriščajo lastnosti drugih materialov, ki so v večini kovine. Ksilofon je glasbilo sestavljeno iz ogrodja, resonatorjev in vitkih ploščic, ki predstavljajo izvor zvoka. Podobno zgradbo ima tudi marimba (Slika 1), ki je v grobem le povečana različica ksilofona (Michels, 2002). Omenjeni glasbili sta zanimivi predvsem zaradi specifičnega zvoka, ki ga proizvajata. Ploščice, ki jih najdemo na obeh glasbilih, so razlog za izjemne zvočne sposobnosti teh glasbil in predstavljajo področje, kjer se je v zadnjih nekaj desetletjih zgodil velik napredek. Marimba, kot jo v razvitem svetu poznamo danes, je bila razvita šele leta 1984 pri sodelovanju priznane marimbistke in skladateljice

Keiko Abe in podjetja Yamaha, kar pomeni, da je moderna različica glasbila relativno nova v primerjavi z drugimi glasbili (Santos, 2008).



Slika 1: Marimba z lesenimi ploščicami iz afriškega padouka (foto B. Mitkovski)

2.2.2 Bobni in ostala tolkala

Bobni in podobna tolkala, so običajno glasbila z nedoločljivo tonsko višino in zvok proizvajajo posredno preko udarjanja na opno oziroma membrano. V tem primeru les nima neposrednega vpliva na kakovost zvoka, saj le prenaša vibracije iz opne na obod oziroma valj, ki je običajno lesen. Proizvajalci bobnov navajajo, da je kakovost zvoka pri bobnu zelo odvisna od izbire lesa, vendar so te razlike težko določljive. V vsakem primeru je les še vedno najbolj uporabljen material, za izdelavo oboda bobnov.

2.3 NIHAJNI NAČINI

Nihanje podolgovatih ploščatih elementov, t.j. ploščic, lahko opišemo z nihajnimi načini. Znotraj enega takega elementa se ob zunanjem elastičnem vzbujanju namreč pojavi več različnih nihajnih načinov, običajno sočasno. V osnovi je to sinusno oziroma harmonično nihanje. Govorimo o stoječem valovanju, kjer se valovanji z enako valovno dolžino sestavita med seboj pri razširjanju v različnih smereh. V elementih se pojavijo vozli, ki predstavljajo točko mirovanja in hrbti, ki predstavljajo točko največjega odmika (amplitude) od ravnovesne lege in hitrosti (Michels, 2002). Za potrebe preizkušanja moramo vedeti, kdaj se pojavi kateri od nihajnih načinov in kako ga lahko vzbudimo. Najprej opredelimo vrste nihanj v preprostem kvadru, ki predstavlja okvirni model preizkušancev – lesenih ploščic, kjer je nihanje lahko prečno, torzijsko in bočno, poleg teh poznamo še osnovno vzdolžno nihanje, ki ni prikazano na sliki (Slika 2).

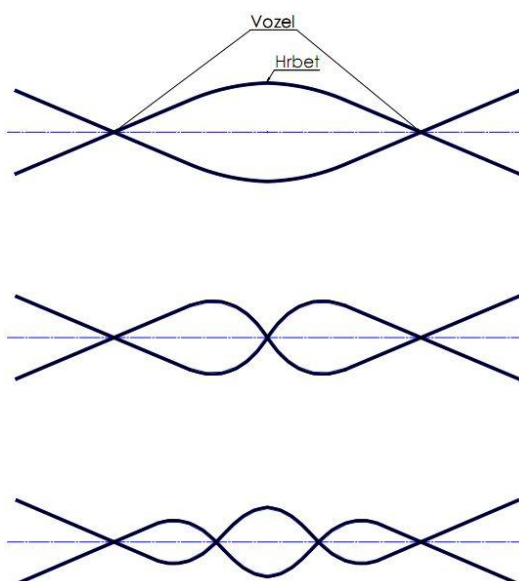


Slika 2: Vrste nihanj, ki jih lahko zaznamo v prizmi

Vsako od nihanj ima več stopenj, t.j. načinov, ki jih preprosto označujemo z zaporedno številko (1. prečni nihajni način, 1. torzijski nihajni način, ...). Na sliki 2 so razvidni le prvi nihajni načini omenjenih vrst nihanj (La Favre, 2007a).

2.3.1 Nihajni načini pri melodičnih tolkalih

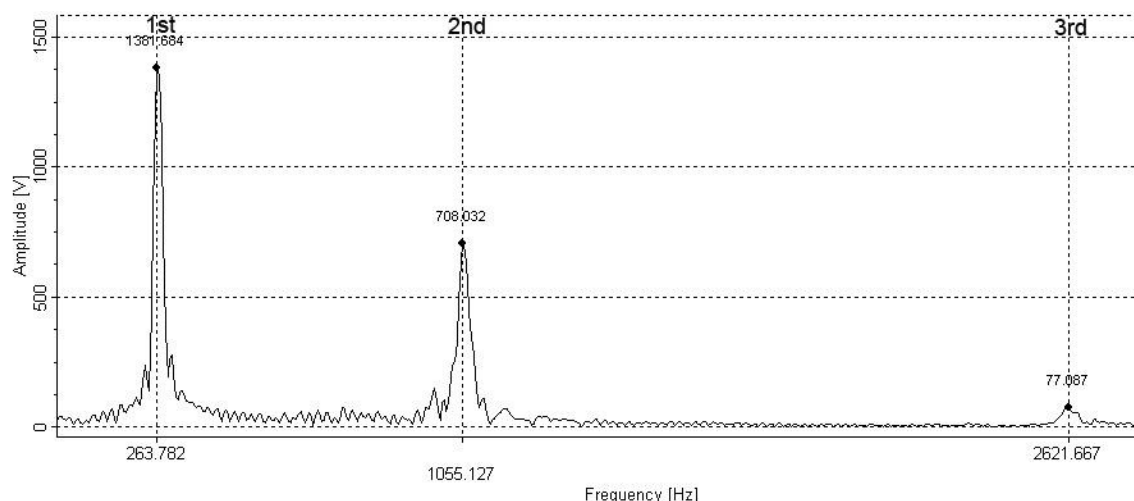
Prečno nihanje je nihanje elementov pravokotno glede na njihovo največjo površino. Poenostavljeno lahko prečno nihanje predstavimo s črtami, ki predstavljajo rob elementov (Slika 3). Prvi prečni nihajni način je tisti, ki ima najnižjo frekvenco nihanja, ki jo lahko zaznamo pri udarjanju na ploščico. Na sliki 3 sta pri prvem načinu označena vozla, ki predstavljata točki oziroma pasova v prizmi, kjer ni vibracij, poleg tega pa še mesto z največjo amplitudo, ki jo imenujemo hrbet. Drugi prečni nihajni način je podoben prvemu,



Slika 3: Prikaz prvih treh prečnih nihajnih načinov, ki jih uglasimo pri ploščicah melodičnih tolkal

le da ima dodaten vozle na sredini dolžine med prvotnima vozloma, kar pomeni da ima dva hrbta. Tretji nihajni način sledi trendu prvih dveh nihajnih načinov, kjer opazimo štiri vozle in tri hrbte. Pozicija hrbta narekuje, kje je potrebno udariti ploščico, da le to maksimalno vzbudimo v želenem nihajnem načinu. Pri melodičnih tolkalih se pogosto uglasijo prve tri prečne nihajne načine, zato jih moramo znati vzbuditi. Princip uglasjevanja ploščic za melodična tolkala temelji na odvzemanju materiala na hrbtu nihajnega načina, katerega želimo uglasiti, s čimer vplivamo na njegovo frekvenco (La Favre, 2007a).

Dodatno lahko nihajne načine spremljamo v frekvenčnem spektru. Slika 4 predstavlja frekvenčni spekter, ki ga lahko pridobimo s Fourierjevo analizo zvočnega signala (FFT), posnetega pri vzbujanju ploščice na marimbi. Na sliki opazimo omenjene tri prečne nihajne načine v razmerju frekvenc 1:4:10 pri ploščici C4, kjer je drugi prečni nihajni način štirikratnik frekvence prvega nihajnega načina in tretji prečni nihajni način desetkratnik frekvence prvega nihajnega načina oziroma osnovne frekvence. To razmerje uglasitve se običajno pojavlja pri vseh melodičnih tolkalih.



Slika 4: Prvi trije prečni nihajni načini v frekvenčnem spektru (La Favre, 2007b)

Poleg prečnih se pri ploščicah melodičnih tolkal pojavljajo tudi drugi nihajni načini. Potrebno jih je poznati, saj je od mesta udarca značilno odvisno nihanje ploščice. (La Favre, 2007b).

2.4 DUŠENJE MEHANSKIH NIHANJ

Dušenje je pojemanje energije mehansko nihajočega sistema, opazno kot manjšanje amplitude nihanja s časom in posledično iznihanje. Dušenje pulzno vzbujenega nihanja je pri lesu pasivno, in je posledica njegovih inherentnih strukturnih lastnosti, ki povzročajo notranje trenje in s tem disipacijo energije. Dušenje je lahko tudi aktivno, kjer se nihajočemu sistemu dovaja dodatna energija za dušenje (Graesser in Wong, 1992, cit. po

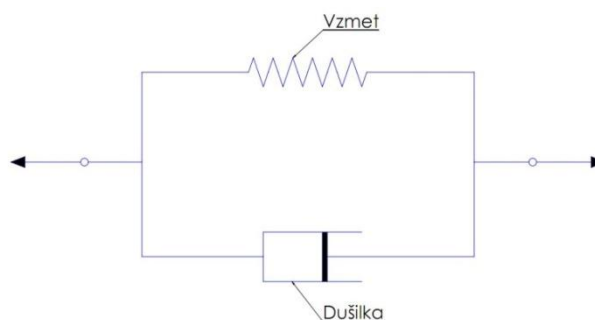
Kutnar, 2003). Pri empiričnem določanju akustične kakovosti lesa, se glasbeni mojstri zanašajo predvsem na zaznavanje dušenja nihanja osnovne frekvence in v manjši meri tudi na amplitudo zvočnega signala (Brancheriau in sod., 2006a, 2006b).

2.4.1 Notranje trenje

Notranje trenje je definirano kot odpor proti elastični deformaciji v določenem časovnem intervalu in povzroča kontinuirano pojevanje mehanske energije v plinih, tekočinah in trdih medijih (Blanter in sod., 2007). Les je viskoelastičen material in se v krajših časovnih intervalih lahko obnaša kot elastičen material, v daljših časovnih intervalih pa kot viskosen material; prav tako se izkazujejo viskozne lastnosti pri večjih obremenitvah, višji vlažnosti in temperaturi. Elastična deformacija je reverzibilna, viskozna deformacija pa ireverzibilna (Gorišek, 2009).

2.4.2 Model viskoelastičnosti

Dušenje lahko predstavimo s preprostim modelom viskoelastičnega obnašanja po Kelvin - Voightovem modelu (Slika 5), za katerega mora veljati, da obstaja za vsako napetost v materialu proporcionalna vrednost deformacije, da med obema spremenljivkama obstaja linearna odvisnost ter da je odziv sistema dosežen v neki časovni odvisnosti. Model predstavlja sistem vzporedno vezane vzmeti, ki zagotavlja elastičnost deformacije in dušilke, ki zagotavlja dušenje v telesu. Deformacija je enaka na vzmeti in na dušilki (Kutnar, 2003).



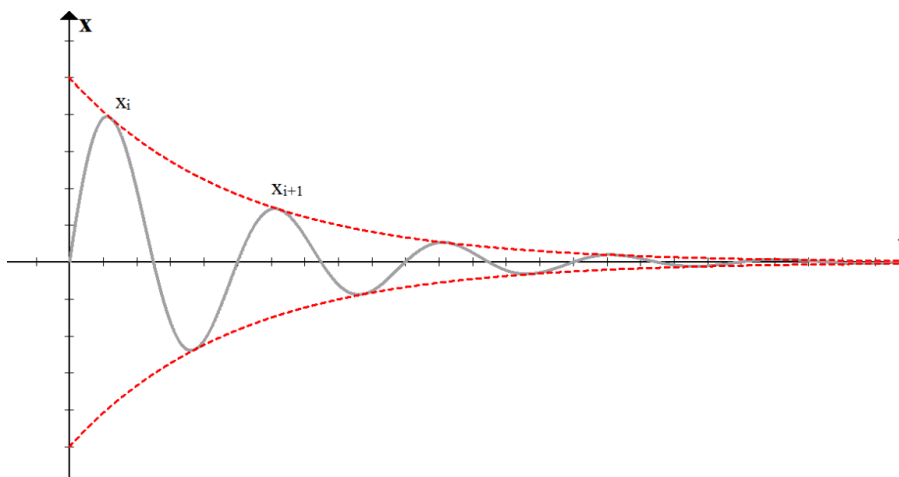
Slika 5: Kelvin – Voightov model viskoelastičnosti

2.4.3 Metode določanja dušenja

Pri lastnem dušenem nihanju se amplituda nihanja eksponentno zmanjšuje. Dušenje lesa lahko določimo z različnimi metodami, najpogosteje pa se uporablja metoda z določanjem logaritemskega dekrementa (δ) in koncept aditivne sinteze. Logaritemski dekrement predstavlja naravni logaritem razmerja zaporednih ekstremov v krivulji odziva nihanja. Pri

primerjavi dveh sosednjih ekstremov x_i in x_{i+1} krivulje dušenega sinusnega nihanja (Slika 6), lahko določimo logaritemski dekrement oziroma dušilni koeficient (Kutnar, 2003).

$$\delta = \ln \frac{x_i}{x_{i+1}} \quad \dots(1)$$



Slika 6: Zvočni signal dušenega nihanja iz katerega lahko določimo koeficient dušenja s pomočjo logaritemskega dekrementa ali s konceptom aditivne sinteze

Koncept aditivne sinteze pa realni časovni zvočni signal definira kot vsoto eksponentno pojemajočih sinusnih nihanj:

$$s(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \beta_i \exp(-\alpha_i t) \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad \dots(2)$$

Oznake:

- β - amplituda zvočnega signala [dB]
- α - časovni koeficient pojemanja zvočnega signala
- f_i - frekvenca nihanja [Hz]
- φ_i - fazni zamik

Koeficient pojemanja (α), ki ga pridobimo iz omenjene enačbe omogoča izračun notranjega trenja ($\tan \delta$) (En. 3) (Brancheriau in sod., 2006b).

2.5 ANATOMSKE, STRUKTURNE IN AKUSTIČNE LASTNOSTI LESA PRI MELODIČNIH TOLKALIH

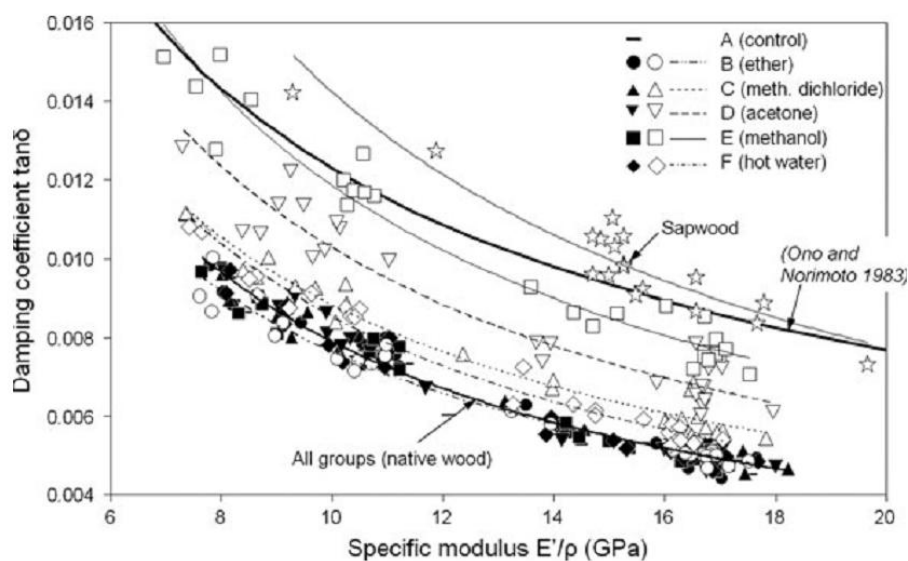
Akustične lastnosti lesa določa več dejavnikov, ki jih najdemo v anatomski in strukturni zgradbi ter kemični sestavi. Pri tolkalih opazimo, da so uporabljene pogosto eksotične

lesne vrste. Večinoma so to difuzno porozni listavci. Lesovi z bolj urejeno strukturo, kjer so vlakna v etažah, pogosteje predstavljajo akustično ustrežnejše materiale. Traheje morajo biti redke in večjega premera. Aksialen parenhim predstavlja ključen dejavnik, ki postavlja mejo med lesovi z dobrimi in slabimi akustičnimi lastnostmi. Pri prvi skupini se vedno pojavlja paratrahealen aksialen parenhim, ki je v stiku s trahejami in ni obilen. Med vrstami s slabimi akustičnimi lastnostmi, pa se praviloma pojavlja obilen apotrahealen parenhim, agregiran ali v širokih trakovih. Parenhimsko tkivo sestavljajo žive celice, ki so mehkejšje od ostalih celic, mehko tkivo pa predstavlja nekakšno oviro oziroma prekinitve, ki onemogočajo širjenje vibracij po vlaknih. Podobno opazimo pri trakovih, kjer imajo akustično boljše vrste kratke trakove v manjših količinah, saj so trakovi prav tako iz parenhimskega tkiva (Brancheriau in sod., 2006a; Aramaki in sod. 2007).

Viskoelastične vibracijske lastnosti lesa so odvisne predvsem od odklona vlaken, mikrofibrilnega kota in vsebnosti ekstraktivov. Na akustične lastnosti lesa z ravnim potekom vlaken ima ključen vpliv mikrofibrilni kot v celični steni. Obataya in sod. (2000), so ugotovili, da je za izvrstne akustične lastnosti resonančnih plošč pri glasbilih, ustrežnejši manjši mikrofibrilni kot v celični steni. Odklon vlaken od vzdolžne usmeritve, t.j. vzdolžni potek vlaken, je prav tako ključnega pomena. Odklon v prvi meri vpliva na mehanske lastnosti, ki so tesno povezane z akustičnimi lastnostmi. Z večanjem odklona vlaken pa mikrofibrilni kot izgublja primarni vpliv na mehanske lastnosti. Z večanjem odklona vlaken so denimo potrdili manjšanje specifičnega elastičnega modula (E / ρ), povečalo pa se je dušenje lesa ($\tan \delta$) (Bremaud in sod., 2010, 2011a).

Pri ksilofonih in marimbah, kjer so nihajoče telo lesene ploščice, je izmed akustičnih lastnosti lesa najpomembnejše njegovo dušenje, ki mora biti čim manjše, medtem ko je za resonančne plošče, ki jih najdemo pri godalih, brenkalih in harfah, pomembnejši visok specifični elastični modul ob zmernih vrednostih koeficienta dušenja. (Obataya in sod., 2000; Ono in Kataoka., 1979, cit. Po Bremaud, 2010).

Pri izbranem lesu za melodična tolkala, afriškem padouku, so Bremaud in sod. (2011b) spoznali, da ekstraktivi inkrustrirani v celično steno pozitivno vplivajo na akustične lastnosti in predvsem zmanjšujejo koeficient dušenja zvoka, medtem ko ekstraktivi v lumnih ne vplivajo na akustične lastnosti lesa. Pomembnost inkrustriranih jedrovinskih snovi v celične stene afriškega padouka, so potrdili z ekstrahiranjem tega lesa v organskih topilih. Po ekstrakcijah v močnejših organskih topilih, se je dušenje zvoka v lesu padouka povečalo (Slika 7).



Slika 7: Zveza med koeficientom dušenja in specifičnim elastičnim modulom pri afriškem padouku, ekstrahiranem z različnimi organskimi topili (Brémaud in sod., 2011)

Grče v lesu naj bi vplivale na hitrost zvočnega valovanja, vendar je njihov vpliv slabo opredeljen, saj se rezultati pri različnih avtorjih razlikujejo. Hitrost valovanja naj bi se na območju grč v lesu zmanjšala od 1% do 4%. Grče vplivajo na obliko širjenja valov, kjer se valovi hitreje širijo okoli grč, v njihovi notranjosti pa zastajajo (Burmester, 1965; Gerhards, 1982, cit. po Hansen, 2006).

3 MATERIALI IN METODE

3.1 LESNE VRSTE

Les je material ki ob vzburjanju emitira zvok, pri tem pa obstajajo razlike med lesnimi vrstami. Od akustičnih lastnosti določene lesne vrste je odvisen način uporabe pri izdelavi glasbil. Vloga lesa pri glasbilih je lahko samo učinkovit prenos vibracij in ojačenje zvoka ali pa tudi neposredno povzročanje zvočnih signalov pri udarcu. Slednje se izkorišča pri že omenjenih melodičnih tolkalih, kjer je za čim boljši zven, zelo pomembna izbrana lesna vrsta in kakovost lesa. V raziskavi smo izbor lesa priredili zahtevam za izdelavo ploščic, ki jih najdemo na ksilofonu in marimbi.

3.1.1 Izbor eksotične lesne vrste

Med najbolj uporabljenimi lesovi za melodična tolkala, kamor uvrščamo ksilofon in marimbo, sta honduraški palisander (*Dalbergia Stevensonii* Standl.) in afriški padouk (*Pterocarpus Soyauxii* Taub.) (Bucur, 2006). Omenjeno vrsto palisandra je zelo težko dobaviti v večjih količinah in je cenovno precej manj ugodna kot padouk, zato smo za potrebe naših preizkusov uporabili samo slednjo eksotično lesno vrsto.

3.1.2 Izbor domačih lesnih vrst

Za izdelavo tolkal se lahko uporabljajo tudi nekatere domače lesne vrste. Za neposredno primerjavo z afriškim padoukom smo izbrali navadno robinijo (*Robinia pseudoacacia* L.) in javor (*Acer* sp.).

3.2 PRIPRAVA IN VIZUALNA OCENA DESK

Pred razžagovanjem kondicioniranih desk v manjše preizkušance ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\phi = 65\%$), ki smo jih dobavili od komercialnega ponudnika, smo najprej izvedli meritve na celih deskah, dolžine 2150 mm, širine 180 mm in debeline 27 mm. Deskam smo izmerili dimenzije ($\Delta x = \pm 1\text{ mm}$) in maso ($\Delta m = \pm 10\text{ dag}$) in iz teh podatkov izračunali povprečno gostoto.

Posamične deske smo tudi vizualno ocenili, kjer smo preverjali orientacijo in potek vlaken, homogenost rasti, teksturo, grčavost, barvni ton ter prisotnost morebitnih drugih posebnosti.

3.3 PRIPRAVA PREIZKUŠANCEV

Preizkušance smo pripravili iz petih večjih robljenih desk, kjer se nismo ozirali na usmeritev vzorcev in potek vlaken, ampak smo zaradi upoštevanja raznolikosti lesa izdelali tako orientirane preizkušance z ravnim potekom vlaken glede na vzdolžno os elementov, kot tudi vzorce z nepravilnim potekom in odklonom. Za afriški padouk je značilna

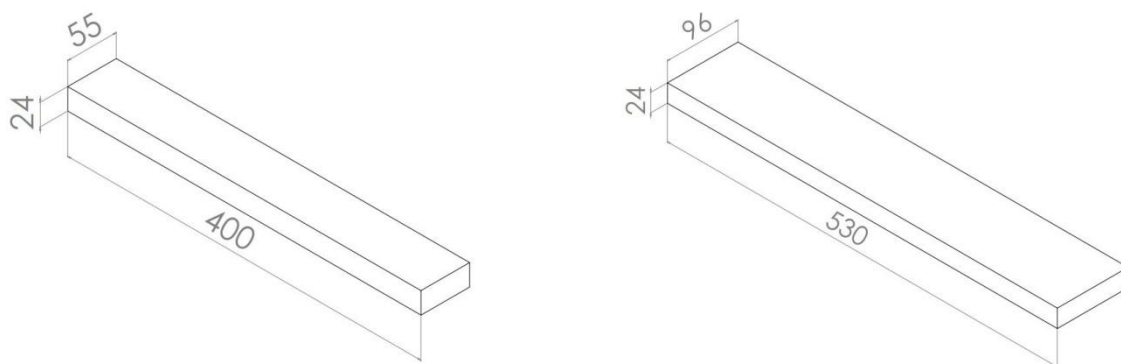
precejšnja raznolikost strukture lesa, zato smo hoteli v raziskavo zajeti vse rastne posebnosti, kot so rebrasta tekstura in izmenično prepletena rast.

3.3.1 Izdelava preizkušancev

Preizkušanci iz lesa padouka in robinije so bili razžagani v vzdolžne elemente, ploščice širine 55 mm, dolžine 400 mm in debeline 24 mm (Slika 8).

Preizkušanci iz lesa javorja so bili nekoliko večji in prav tako vzdolžno orientirani elementi, širine 96 mm, dolžine 530 mm in debeline 24 mm (Slika 8).

Vse izbrane dimenzije preizkušancev so posledica prilagoditve konstrukcijskim zahtevam za kasnejšo rabo pri izdelavi glasbil.



Slika 8: Preizkušanci iz afriškega padouka in robinije (levo) ter javorja (desno)

Število preizkušancev, ki smo jih tako pridobili iz desk lesa padouka je bilo 74. Število preizkušancev, ki smo jih izdelali iz lesa robinije je bilo 15, iz lesa javorja pa smo izdelali 30 ploščic.

3.4 SUBJEKTIVNO OCENJEVANJE PREIZKUŠANCEV

3.4.1 Slušno ocenjevanje

Najprej smo izdelane preizkušance ocenjevali s slušnim zaznavanjem kakovosti zvoka ob elastičnem udarjanju – vzbujanju posamične ploščice z udarjalko. Na osnovi natančnega poslušanja kakovosti zvoka posamičnih ploščic, smo določili in razvrstili preizkušance v 5 kakovostnih razredov akustičnih lastnosti. Pri ocenjevanju smo bili pozorni predvsem na dušenje zvoka ploščic oziroma na dolžino iznihanja zvočnega signala. Razrede smo označili s številkami od 1 do 5, kjer je razred 1 najslabši in 5 najboljši. Za definiranje mej razredov in statističnega vzorca, smo poiskali ploščico z najmanjšim in z največjim dušenjem, katere so bile skrajne vrednosti za omenjene razrede, preostale pa smo razvrstili znotraj postavljenih mej. Razrede smo nato določili linearno glede na dušilne lastnosti ploščic. Razvrstitev preizkušancev je bila izvedena v dveh ponovitvah. Vizualne lastnosti lesa so bile pri tem ocenjevanju izključene. V praksi bi za izdelavo kvalitetnih melodičnih

tolkal uporabili le preizkušance iz 4. in 5. razreda in morda tudi nekatere preizkušance iz 3. razreda, medtem ko bi se ploščicam iz prvih dveh razredov izognili.

Slušno razvrščanje v razrede smo izvedli le za preizkušance iz padouka, medtem, ko so bili preizkušanci iz javorja in robinije namenjeni le primerjavi s padoukom, kjer zaradi manjšega števila razpoložljivih preizkušancev razvrščanje v razrede ni bilo mogoče. Poleg tega smo pri teh vrstah zaznali bistveno večje dušenje zvoka kot pri padouku, kar dodatno oteži in onemogoča slušno razvrščanje.

3.4.2 Vizualno ocenjevanje strukturnih značilnosti lesa

Pri lesu afriškega padouka smo izvedli tudi vizualno ocenjevanje preizkušancev, da bi določili, kako struktura lesne vrste in njene rastne posebnosti vplivajo na kakovost zvoka. Primarni namen tega dela je določitev relevantnih kriterijev vizualne izbire lesa, s katerimi bi olajšali izbiro najbolj ustrezne vstopne surovine. Pri vizualnem ocenjevanju lesa je bila definirana:

- ✓ čelna orientiranost preizkušancev (radialna; pol radialna; tangencialna),
- ✓ vzdolžni potek vlaken v preizkušancih (brez odklona; manjši odklon vlaken; neenakomeren / naključen odklon vlaken),
- ✓ vsebnost rastnih posebnosti (paralelni potek vlaken; izmenično prepletena rast; rebrasta tekstura),
- ✓ prisotnost grč na posameznem preizkušancu in
- ✓ prisotnost vizualno zaznavnih razpok.

3.5 RAČUNALNIŠKO PODPRTO OCENJEVANJE AKUSTIČNIH LASTNOSTI PREIZKUŠANCEV

3.5.1 Oprema za akustične meritve in analizo

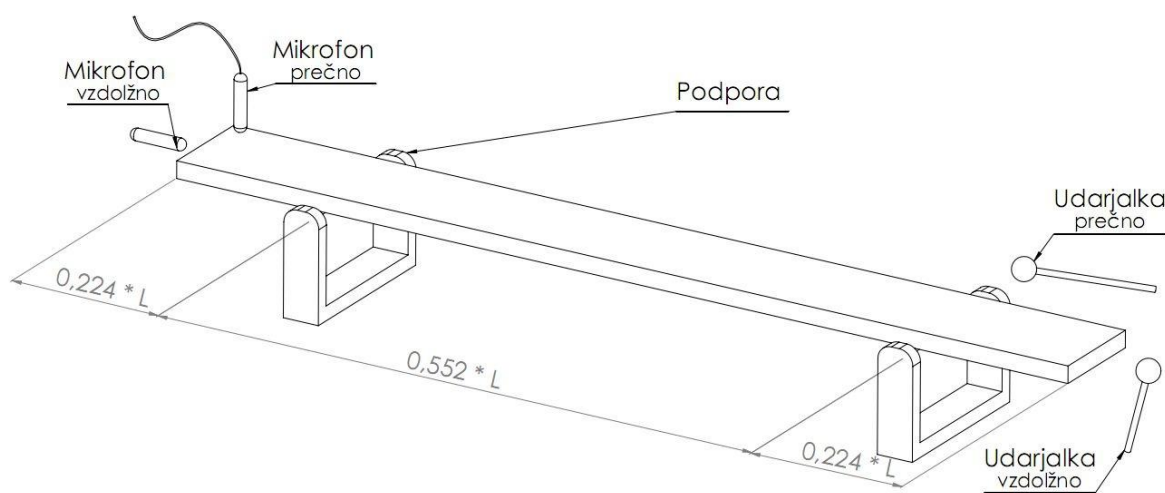
Za meritve in snemanje zvočnega signala smo uporabili kondenzatorski mikrofonski PCB-130D20, ki smo ga povezali na osebni računalnik preko NI-9234, kartice za zajem signalov, proizvajalca National Instruments Ltd. Vse meritve smo zajeli v časovni zvočni signal ($t = 3s$), v 24 bitni resoluciji z 51200 vzorci na sekundo. Nadaljnja obdelava in analiza signalov je potekala v programu LabVIEW 8.0 ®.

3.5.2 Izvajanje meritev

Težava zaznavnega slušnega ocenjevanja je ponovljivost rezultatov. Ocena je subjektivna in odvisna od osebe, ki ocenjuje akustične lastnosti lesa. Zanesljivejšo ponovljivost rezultatov ne glede na okoliščine, smo zato poskušali doseči z meritvami fizikalnih veličin,

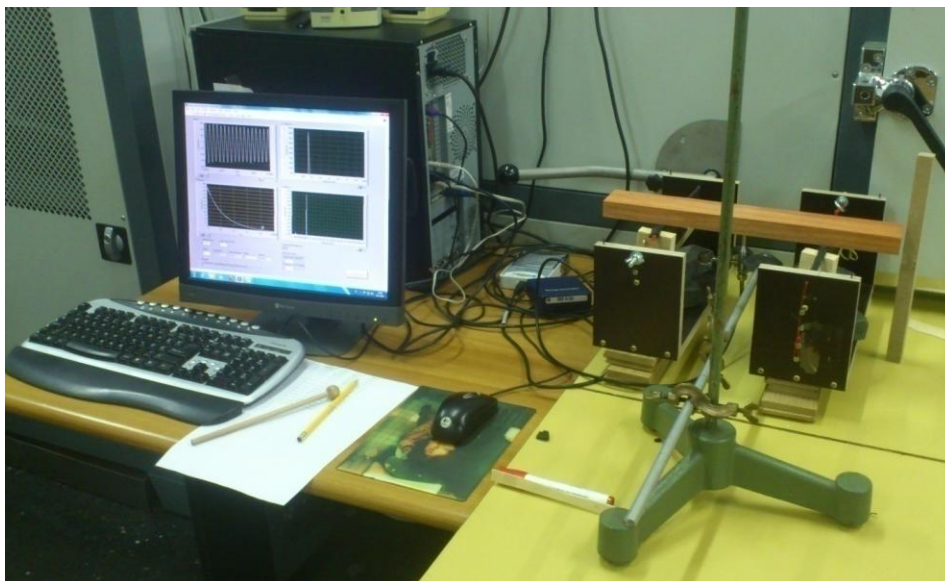
ki bi omogočile vpogled v akustične lastnosti posamične ploščice – preizkušanca in njene ustreznosti za uporabo za lesena tolkala.

Prvi korak pri akustičnih meritvah je predstavljal mehansko elastično vzbujanje desk v prečni in vzdolžni smeri z impulznim udarjanjem z udarjalko s toga leseno kroglico. Mikrofon s katerim smo snemali zvočni signal je bil postavljen zrcalno na nasprotni strani deske, glede na mesto udarca (Slika 9). Omenjeno postavitve so pri svojih raziskavah uporabili tudi Brancheriau in sod. (2006a, 2006b, 2010) in Aramaki in sod. (2007). Posamično desko smo pri tem položili na dve najlonski elastični podpori. Podpori sta bili postavljeni na mestih vozlov 1. prečnega nihajnega načina. S tem podpore minimalno vplivajo na način in dušenje nihanja deske. Mesta vozlov se nahajajo na 22,4 % dolžine deske (Bucur, 2006).



Slika 9: Postavitev desk za izvajanje akustičnih meritev

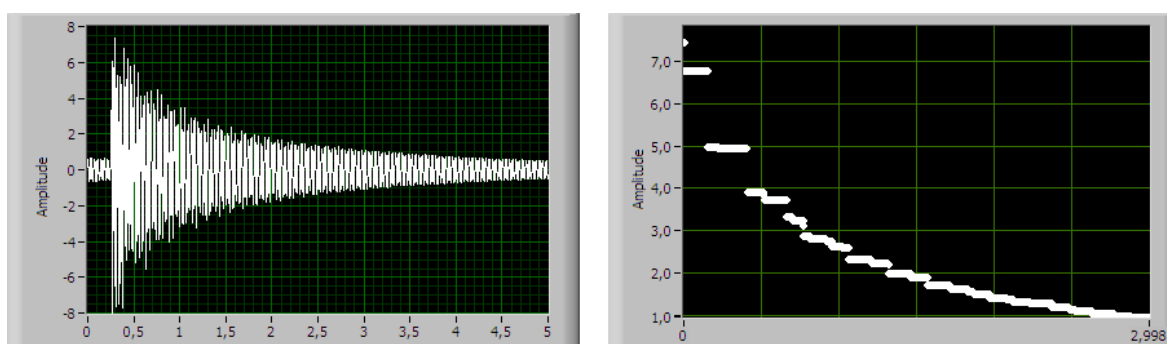
Za merjenje fizikalnih parametrov preizkušancev smo uporabili enako merilno verigo kot za deske, meritve pa so potekale identično, z izjemo lege mikrofona, ki smo ga premaknili s konca na sredino preizkušanca, ker je na sredini ploščice nihanje v prvem prečnem nihajnem načinu najmočnejše in na tem mestu mikrofon najlažje zazna osnovno frekvenco nihanja, ki je za nadaljnje izračune predstavljala relevanten parameter. S preizkušanjem različnih mest udarca smo določili, da je za naše potrebe najboljša kombinacija sredinsko nameščenega mikrofona, z udarjanjem ploščice na sredini njene dolžine (Slika 10).



Slika 10: Merilna oprema računalniško podprtega določanja akustičnih lastnosti lesa (foto: B. Mitkovski)

3.5.3 Določanje dušenja zvoka

Za določanje dušenja zajetega zvočnega signala pri vzburjanju ploščic smo v programu LabVIEW 8.0 ® diskretizirali časovni signal v koordinatah zaporednih amplitud in z metodo najmanjših kvadratov prilagodili eksponentno pojemajočemu modelu (Slika 11). Iz modela smo v programu izračunali trenutno časovno dušenje (α), z njim pa s pomočjo osnovne frekvence (f_1) še koeficient dušenja zvoka ($\tan \delta$) (En. 3). Na sliki 11 lahko vidimo primer posnetega časovnega signala in desno določitev točk posamičnih amplitud signala za prilagoditev eksponentnemu modelu.



Slika 11: Zajeti zvočni signal (levo) in zajete točke ekstremov iz zvočnega signala (desno)

3.5.4 Parametri in izračuni kazalnikov

Podatki, ki smo jih izmerili direktno pri vzburjanju z elastičnim udarjanjem (Brancheriau in sod., 2006b), so bili:

- ✓ osnovna frekvenca zvočnega signala (f_1)
- ✓ amplituda zvočnega signala (β)
- ✓ trenutno dušenje osnovne frekvence (α)

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

- ✓ koeficient dušenja zvoka

$$\tan \delta = \frac{2\alpha}{\pi f_1} \quad \dots(3)$$

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

- ✓ prečni dinamični elastični modul [Pa]

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

Oznake:

- L - dolžina preizkušanca [m],
- ρ - gostota [kg / m^3],
- f_n - frekvenca [Hz], kjer n predstavlja nihajni način ($n = 1$),
- A - prečni prerez preizkušanca [m^2],
- I - vztrajnostni moment [m^4], ki je za pravokotne prereze $I = bh^3/12$, kjer je b širina in h višina obdelovanca ter
- k_i - korekcijski koeficient, ki je odvisen od nihajnega načina oziroma posredno od uporabljene frekvence; za prvi nihajni način je $k_i = 4,730$.

Hitrost zvoka je bil eden izmed kazalnikov, ki smo jih izračunali za vzdolžno vzburjanje deske (Bucur, 2006):

- ✓ hitrost zvoka [m / s]

$$v = \lambda_n \times f_n = \frac{2L}{n} \times f_n \quad \dots(5)$$

Za izračun sta potrebna:

- λ - valovna dolžina nihanja v n-tem nihajnem načinu [m]
- L - dolžina deske [m]

Vzdolžni dinamični elastični modul smo izračunali s produktom gostote (ρ) in hitrosti zvoka (v) (Bucur, 2006):

- ✓ vzdolžni dinamični elastični modul [$\text{Pa} \times \text{m}^3 / \text{kg}$]

$$E_{dinL} = \rho \times v \quad \dots(6)$$

Akustične karakteristike lesa smo vrednotili z določitvijo naslednjih parametrov (Roohnia in sod., 2011):

- ✓ specifični elastični modul [$\text{Pa} \times \text{m}^3 / \text{kg}$]

$$E_{sp} = \frac{E}{\rho} \quad \dots(7)$$

- ✓ akustični koeficient [$\text{m}^4 / \text{s} \times \text{kg}$]

$$K = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}} \quad \dots(8)$$

- ✓ učinkovitost akustične pretvorbe - ACE [$\text{m}^4 / \text{s} \times \text{kg}$] (angl. »Acoustical Conversion Efficiency«)

$$ACE = \frac{K}{\tan \delta} \quad \dots(9)$$

Kot dodaten kazalnik smo dodali še RACE (angl. »Relative Acoustical Conversion Efficiency«), ki je tako kot specifični elastični modul (E_{sp}) in koeficient dušenja ($\tan \delta$) neodvisen od gostote lesa. Če upoštevamo, da je gostota celične stene relativno konstantna ($1500 \text{ kg} / \text{m}^3$), naj bi bil ta kazalnik neposredno odvisen od mikrostrukture celične stene (Obataya in sod., 2000):

- ✓ relativna učinkovitost akustične pretvorbe - RACE [km / s]

$$RACE = \frac{\sqrt{E_{sp}}}{\tan \delta} \quad \dots(10)$$

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

4.1 ANATOMSKE ZNAČILNOSTI LESNIH VRST

Za izbrane lesne vrste smo izdelali mikroskopske preparate in primerjali anatomske lastnosti lesnih vrst med seboj. Vsi podatki so zbrani v preglednici 1, sliko preparatov vseh treh vrst pod mikroskopom pa lahko vidimo na sliki 12. Kako določene anatomske lastnosti lesa vplivajo na akustične lastnosti lahko razberemo v točki 2.5.

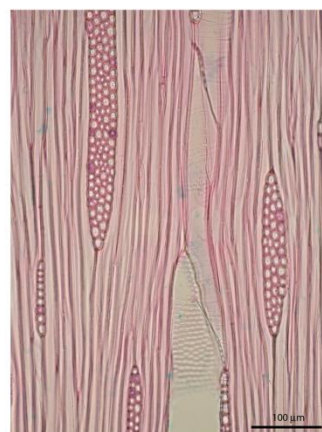
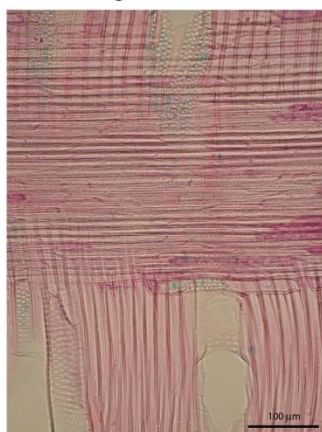
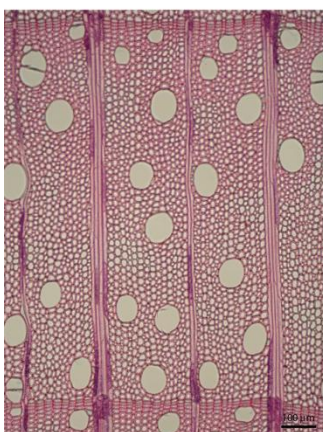
Preglednica 1: Anatomske lastnosti preizkušenih lesnih vrst

Lesna vrsta	<i>Pterocarpus soyauxii</i> Taub. Padouk	<i>Acer</i> sp. Javor	<i>Robinia pseudoacacia</i> L. Robinia
TRAHEJE			
Razpored (število por v nizu)	difuzno porozno; pore v radialnih nizih (2 - 3)	difuzno porozno; pore v radialnih nizih (2 - 3), občasno do 4 pore nizu ali več v grozdu	venčasto porozno; pore v radialnih nizih (2 - 3) in v grozdih (v ranem in kasnem lesu)
Dimenzije	(115 - 295) μm	(44 - 80) μm	(130 - 220) μm
Perforirane ploščice	enostavne	enostavne	enostavne
Intervaskularne pike	izmenične	izmenične	izmenične
Vključki	tile in gumozni depoziti v trahejah	/	zelo otiljene traheje ranega lesa
VLAKNA			
Tip vlaken	libriformna vlakna	libriformna vlakna	traheide in neseptirana vlakna
Posebnosti	/	/	vazicentrično razporejene traheide
TRAKOVI			
Gostota trakov (tangencialno)	12 - 17 trakov na mm	6 - 14 trakov na mm	6 - 8 trakov na mm
Širina (število celic)	izključno enoredni	večredni (1 - 6)	večredni (2 - 6)
Višina	do 500 μm		(500 - 1000) μm , pogosto tudi več kot 1000 μm
Tip	homocehularni iz ležečih celic	homocehularni iz ležečih celic	homocehularni iz ležečih celic
AKSIALNI PARENHIM			
Apotrahealen	difuzen v kratkih tangencialnih pasovih	difuzen v pasovih, marginalen	/
Paratrahealen	krilast in zlivajoč	pri lesu javorja se pojavlja le redko	pičel in vazicentričen; v ranem lesu obilen
ANORGANSKI VKLJUČKI			
Tip	prizmatični kristali	prizmatični kristali	prizmatični kristali
Lokacija	v celicah aksialnega parenhima	v celicah aksialnega parenhima	v celicah aksialnega parenhima in celicah trakov
POSEBNOSTI			
Etažna struktura celic	etažna razporeditev trakov, aksialnega parenhima, trahejnih členov in vlaken	/	makroskopsko je etažna razporeditev težko opazna; etažno razporejen aksialen parenhim in trahejni členi

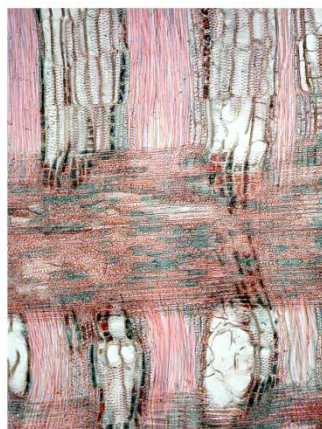
afriški padouk



javor



navadna robinija



Slika 12: Lesne vrste pod mikroskopsko povečavo v prečni (levo), radialni (v sredini) in tangencialni ravnini (desno)

4.2 VIZUALNA OCENA DESK AFRIŠKEGA PADOUKA

Vizualno ocenjevanje desk se v osnovi sklada z grobim standardnim ocenjevanjem žaganega lesa in je hkrati temeljitejše ter specifično zaradi izbrane lesne vrste in namena uporabe. Preglednica 2 prikazuje vizualno ocenjene lastnosti desk afriškega padouka. V nadaljevanju bomo opazili kako se strukturne lastnosti odražajo v akustični kakovosti lesa.

Preglednica 2: Lastnosti desk in razvrstitev glede na vizualno oceno

Deska	Lastnost	Opis
1	Čelna orientacija	tangencialna
	Struktura	nehomogena struktura
	Odklon vlaken	večje odstopanje od vzdolžne osi
	Tekstura	vidna rebrasta tekstura
	Drugo	svetlejša barva
2	Čelna orientacija	radialna do polradialna
	Struktura	različne širine branik
	Odklon vlaken	raven potek vlaken
	Tekstura	izmenično prepletena rast v zmernem obsegu
	Drugo	
3	Čelna orientacija	strogo radialna
	Struktura	manj homogena struktura
	Odklon vlaken	manjše odstopanje od vzdolžne osi
	Tekstura	izrazitejša izmenično prepletena rast
	Drugo	
4	Čelna orientacija	polradialna do tangencialna
	Struktura	homogena struktura
	Odklon vlaken	manjše odstopanje od vzdolžne osi
	Tekstura	
	Drugo	
5	Čelna orientacija	radialna
	Struktura	homogena struktura
	Odklon vlaken	raven potek vlaken
	Tekstura	izmenično prepletena rast v zmernem obsegu
	Drugo	svetlejša barva

4.3 VPLIV STRUKTURE NA AKUSTIČNE LASTNOSTI PLOŠČIC AFRIŠKEGA PADOUKA

Kako se rastne značilnosti in druge posebnosti kažejo v akustični kakovosti ploščic smo raziskali pri vizualnem pregledu preizkušancev pri katerem smo ocenili dejavnike opisane v točki 3.4.2. V preglednici 3 so predstavljene strukturne posebnosti afriškega padouka, ugotovljene v posameznih razredih, razvidne tudi iz reprezentativnih preizkušancev (Slika 13). Za določeno lastnost, ki se v kateremkoli razredu pojavi v večinskem deležu, lahko trdimo, da ključno vpliva na akustične kakovost.



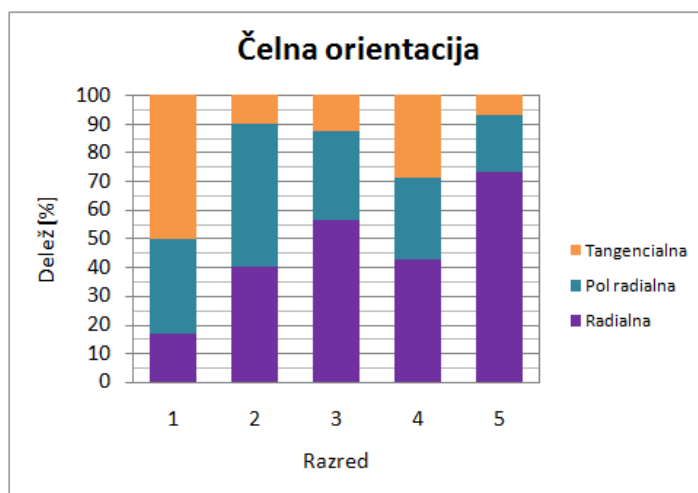
Slika 13: Reprezentativni preizkušanci posameznih razredov akustične kakovosti

Preglednica 3: Deleži (%) strukturnih posebnosti pri preizkušancih iz afriškega padouka v razredih akustične kakovosti (1-5)

Čelna orientacija	%	1	2	3	4	5
	Radialna	16,7	40,0	56,3	42,9	73,3
	Pol radialna	33,3	50,0	31,3	28,6	20,0
	Tangencialna	50,0	10,0	12,5	28,6	6,7
Potek vlaken	%	1	2	3	4	5
	Brez deviacije	0,0	30,0	62,5	61,9	80,0
	Majhen odklon	41,7	50,0	25,0	28,6	20,0
	Večji/nepravilen odklon	58,3	20,0	12,5	9,5	0,0
Tekstura	%	1	2	3	4	5
	Normalna	58,3	30,0	18,8	47,6	46,7
	Izmenično prepletena	33,3	30,0	81,3	52,4	53,3
	Rebrasta	8,3	40,0	0,0	0,0	0,0
Grče	%	1	2	3	4	5
	Prisotne	25,0	10,0	12,5	23,8	6,7
	Brez	75,0	90,0	87,5	76,2	93,3
Razpoke	%	1	2	3	4	5
	Prisotne	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Brez	75,0	100,0	100,0	100,0	100,0

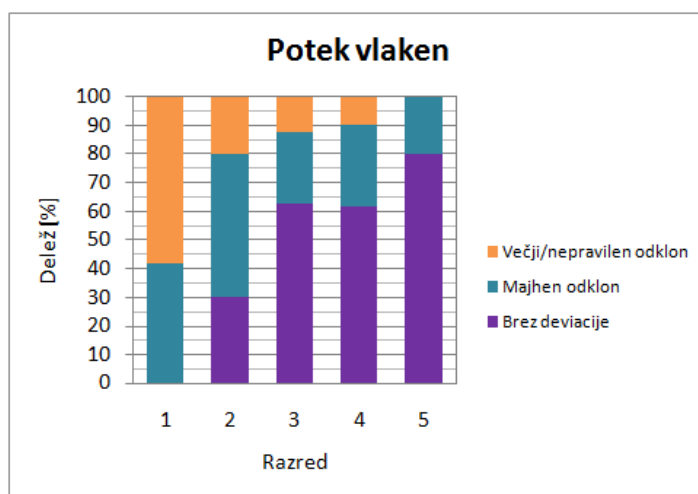
Čelna orientacija je ena tistih lastnosti ploščic, ki jo vizualno najlažje opazimo, vendar ta ne predstavlja ključne strukturne lastnosti, ki bi vplivala na akustične lastnosti, saj na akustično kakovost lesa večinoma vpliva potek vlaken vzdolž nihajočih ploščic. Običajno pričakujemo pri radialnih deskah bolj enakomeren potek vlaken kot pri tangencialnih. Razlog za to bi lahko iskali pri načinu primarnega razžagovanja hlodovine. Tangencialne deske so običajno žagane vzporedno s strženom drevesa. Pri konični obliki debla

spoznamo, da bodo vlakna na robu deske diagonalno odklonjena. Podobno sicer lahko pričakujemo pri radialnih deskah, vendar se lahko pri nadaljnji mehanski obdelavi temu izognemo lažje kot pri odklonu v tangencialni smeri. Dokaj zanesljivo lahko trdimo, da delež radialnih desk narašča od prvega proti petemu razredu (Slika 14).



Slika 14: Deleži orientacije preizkušancev na prečnih prerezi po razredih akustične kakovosti

Delež ravnega poteka vlaken se povečuje od prvega do petega razreda akustične kakovosti (Slika 15). Večji odkloni vlaken, negativno vplivajo na akustične lastnosti lesa (Brémaud, 2010, 2011a). Opazimo, da je delež nepravilno odklonjenih vlaken največji prav v prvem razredu in neznaten v petem razredu. V kolikšni meri bo odklon vlaken vplival na akustično kakovost ploščic je odvisno predvsem od izrazitosti tega odklona in ali je le ta prisoten tako na ravnini največje ploskve kot na bočni ravnini elementa. Za izbiro lesa za tolkala je to nedvomno eden pomembnejših vidnih kazalnikov v kombinaciji s čelno orientacijo.



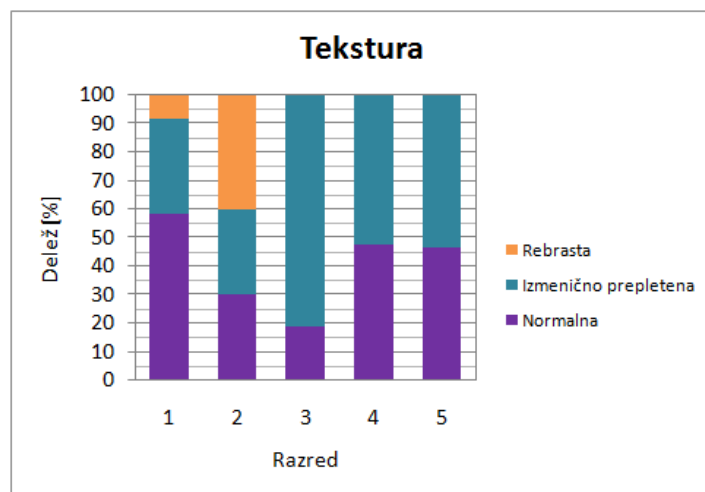
Slika 15: Deleži odklona vlaken po razredih akustične kakovosti

Naslednji vizualni znaki, za katere smo domnevali, da imajo vpliv na akustične lastnosti v lesu so bile značilnosti teksture. Pri tem moramo poudariti, da je za les padouka značilno, da vsebuje dve rastni posebnosti katerima smo namenili posebno pozornost in sicer progasto ter rebrasto teksturo. Progasta tekstura je značilnost lesa, kjer lahko vidimo izmenično prepletene pasove vlaken, ki so posledica izmenično zavite rasti dreves, rebrasta tekstura pa je posledica valovitosti vlaken v tangencialni smeri. Za obe napaki z vidika akustičnih lastnosti lahko trdimo, da imajo negativen vpliv, če upoštevamo ugotovitve glede odklona vlaken (Bremaud, 2010). Opazimo jih lahko na uporabljenih preizkušancih iz lesa padouka na sliki 16.



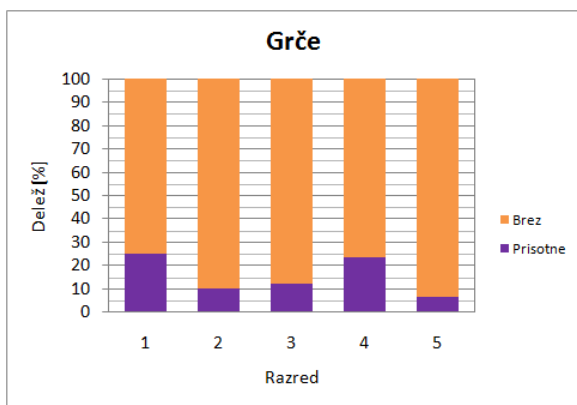
Slika 16: Preizkušanci z rebrasto (levo) in progasto teksturo (desno)

Rebrasta tekstura se je pojavila samo v prvem in drugem razredu (Slika 17), kar pritrjuje naši predpostavki o značilnem vplivu odklona vlaken. Manj pričakovani pa so rezultati o izmenično prepletenih vlaknih, kjer prihaja prav tako do odklona vlaken. Delež izmenično prepletene teksture se pravzaprav povečuje proti višjim razredom, kar pa ne pomeni, da le ta izboljšuje akustične lastnosti. Kot opazimo, je delež preizkušancev s progasto teksturo izredno velik. Pri vizualni oceni, smo prišli do spoznanja, da je ta posebnost pravzaprav prisotna na večini ploščic. Kljub tej napaki, pa so nekatere ploščice še vedno kazale izredne akustične lastnosti; preizkušanci pa so lahko bili v določenih razredih zaradi že nekaterih drugih omenjenih napak. Tako ne moremo trditi, da progasta tekstura kakorkoli pozitivno vpliva na akustične lastnosti. Ta posebnost je očitno neizbežna pri lesu padouka in na to ne moremo nikakor vplivati pri nakupu ali pri mehanski obdelavi kot bi lahko to poizkušali z izžagovanjem neustreznih delov desk z nepravilnim potekom vlaken.

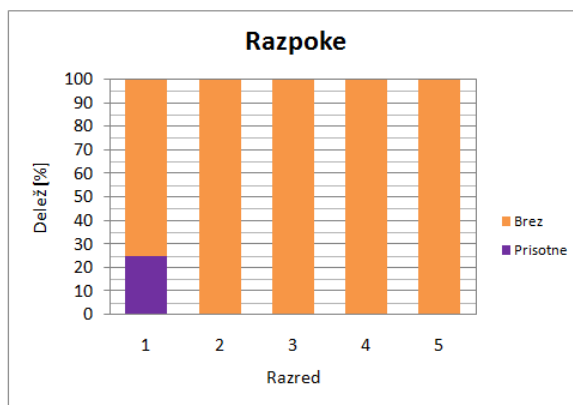


Slika 17: Deleži tekstur po razredih akustične kakovosti

Akustično kakovost preizkušancev smo primerjali še z ugotavljanjem grč in razpok, kjer smo imeli nekaj manj jasnih rezultatov. Grče bistveno ne vplivajo na delitev v akustične razrede, saj so prisotne v podobnem deležu v vseh razredih (Slika 18). Opozoriti moramo, da so bile vse grče na preizkušancih majhnega premera (< 10 mm). Pričakovali smo negativen vpliv zaradi deorientacije vlaken ob grčah, kar pa bi verjetno dosegli pri grčah večjega premera.



Slika 18: Delež grč po razredih akustične kakovosti



Slika 19: Delež razpok po razredih akustične kakovosti

Razpok si pri glasbilih ne želimo in bi se jih poskušali znebiti še pred izdelavo kakršnega koli izdelka. Vse razpoke, ki smo jih opazili, so se pojavile na preizkušancih v prvem razredu (Slika 19). Pri večji količini razpokanih ploščic bi zagotovo dobili podoben rezultat, kjer bi se neustrezni kosi znašli v prvem ali drugem razredu, saj razpoke znatno poslabšajo akustične lastnosti s tem, ko predstavljajo oviro za širjenje vibracij po vlaknih.

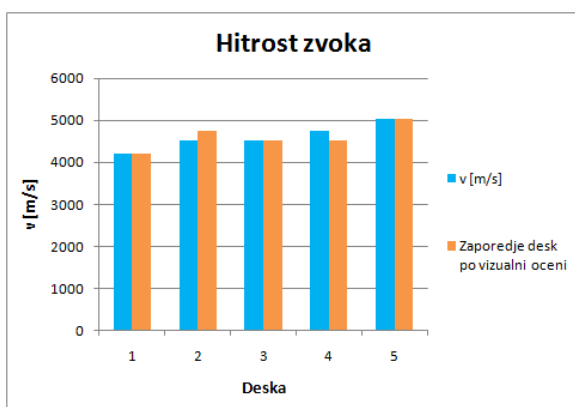
4.4 PRIMERJAVA VIZUALNE IN RAČUNALNIŠKO PODPRTE RAZVRSTITVE DESK AFRIŠKEGA PADOUKA

Rezultate akustičnih meritev, ki smo jih izvedli na deskah lahko vidimo v preglednici 4, kjer so zbrani izmerjeni kazalniki akustične kakovosti, ki smo jih opredelili v točki 3.5.4. Deske smo pri tem razvrstili glede na večinski delež izdelanih ploščic z oceno, ki je enaka oceni deske.

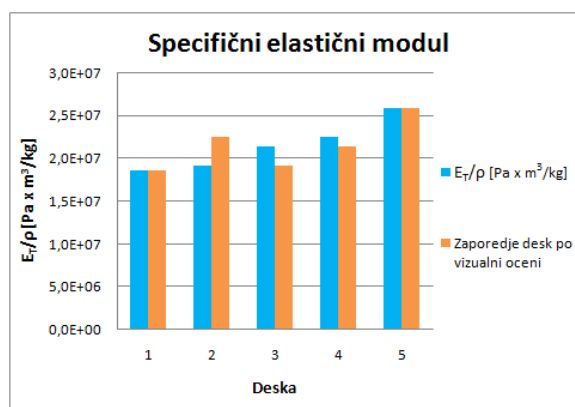
Preglednica 4: Kazalniki akustičnih lastnosti desk pridobljeni z merjenjem fizikalnih parametrov (v - hitrost zvoka, $\tan \delta$ - dušenje zvoka, E - vzdolžni in prečni elastični modul, E_T / ρ - prečni specifični elastični modul, RACE - relativna učinkovitost akustične pretvorbe)

Deska	v [m/s]	$\tan \delta$	E_L [Pa]	E_T [Pa]	E_T / ρ [Pa $\times$ m ³ /kg]	RACE [km/s]
1	4199	0,0217	$1,09 \times 10^{10}$	$1,15 \times 10^{10}$	$1,85 \times 10^7$	199
2	4520	0,0181	$1,55 \times 10^{10}$	$1,46 \times 10^{10}$	$1,91 \times 10^7$	241
3	4524	0,0173	$1,67 \times 10^{10}$	$1,59 \times 10^{10}$	$2,13 \times 10^7$	267
4	4755	0,0210	$1,72 \times 10^{10}$	$1,71 \times 10^{10}$	$2,24 \times 10^7$	225
5	5042	0,0170	$1,54 \times 10^{10}$	$1,56 \times 10^{10}$	$2,58 \times 10^7$	299

Med kazalniki, ki najbolj sovpadajo z razvrstitvijo ploščic v razrede akustične kakovosti sta hitrost zvoka (Slika 20) izmerjena z vzdolžnim vzbujanjem ter specifični prečni elastični modul (Slika 21) izmerjen s prečnim vzbujanjem. Poleg izmerjenih vrednosti, smo v sliki dodali še razvrstitev dobljeno z vizualno oceno. Opazimo, da sta najboljša in najslabša deska ekvivalentno razvrščeni po obeh metodah, vmesne deske pa so razvrščene le približno. Razvidno je, da je vizualna razvrstitev dovolj ustrezna za oceno akustične kakovosti desk za izdelavo lesenih tolkal. Izkaže se tudi, da omenjeni akustični kazalniki (v_L , E_T / ρ) omogočajo podobno razvrščanje kot vizualno ocenjevanje. Vedeti pa moramo, da pri nakupu žaganega lesa na skladišču pri dobavitelju ne moremo uporabljati vse potrebne opreme za merjenje akustičnih lastnosti in se moramo povsem zanesti na sposobnosti vizualne zaznave.

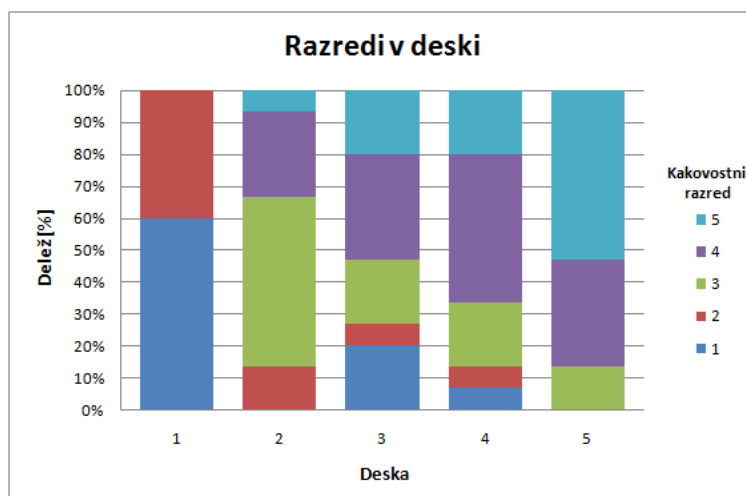


Slika 20: Izmerjene hitrosti zvoka, pri vzdolžnem vzbujanju desk



Slika 21: Specifični dinamični moduli izmerjeni pri prečnem vzbujanju desk

Ostali določeni kazalniki so manj uporabni za tovrstno ocenjevanje kakovosti desk. Že v osnovi je pri posamezni deski lahko prisotnih veliko različnih segmentov, ki lahko vplivajo na meritev celotne deske. Znotraj deske se lahko tako pojavijo razpoke, lokaliziran odklon vlaken ali grče, ki bi znižale oceno celotne deske. Na sliki 22 denimo opazimo, da je iz iste deske mogoče dobiti ploščice iz vseh kakovostnih razredov. To nakazuje, da merjenje proučevanih akustičnih lastnosti na celotnih deskah ni dovolj za natančno kakovostno razvrščanje. V praksi poleg tega težimo tudi k temu, da iz vsake deske izberemo le najboljše dele desk, le teh pa želimo v deski v čim večjem obsegu. Kot vidimo, za hitro in enostavno izbiro žaganega lesa tako zadostuje le vizualna ocena strukturnih lastnosti, za katere smo že ugotovili da so v veliki meri povezane z akustičnimi lastnostmi.



Slika 22: Deleži kakovostnih razredov ploščic, ki smo jih dobili iz posamezne deske

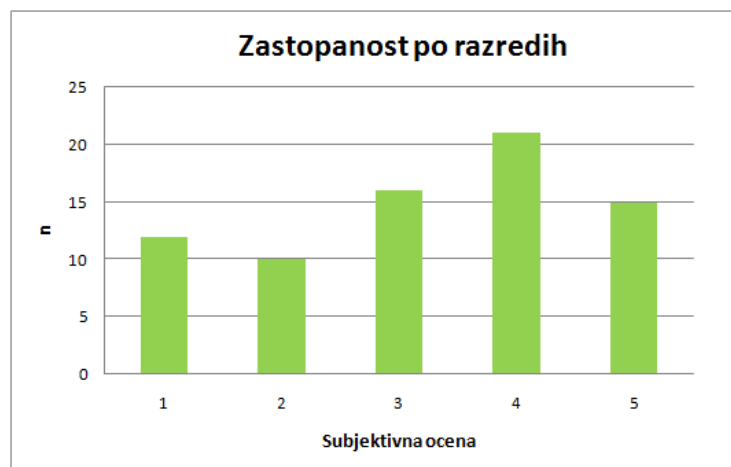
4.5 PRIMERJAVA SLUŠNE IN RAČUNALNIŠKO PODPRTE RAZVRSTITVE PLOŠČIC AFRIŠKEGA PADOUKA

Za vsak posamezen razred akustične kakovosti smo izračunali povprečno vrednost vsakega parametra in standardni odklon, kjer je to bilo mogoče. Preglednica 5 prikazuje zbrane povprečne vrednosti kazalnikov, ki smo jih opredelili v točki 3.5.4.

Preglednica 5: Povprečne vrednosti izmerjenih fizikalnih parametrov preizkušancev, za določenih 5 razredov akustične kakovosti (n - število preizkušancev, ρ - gostota, $\tan \delta$ - koeficient dušenja, E - prečni dinamični elastični modul, E/ρ - prečni specifični elastični modul, K - akustični koeficient, ACE - učinkovitost akustične pretvorbe, RACE - relativna učinkovitost akustične pretvorbe)

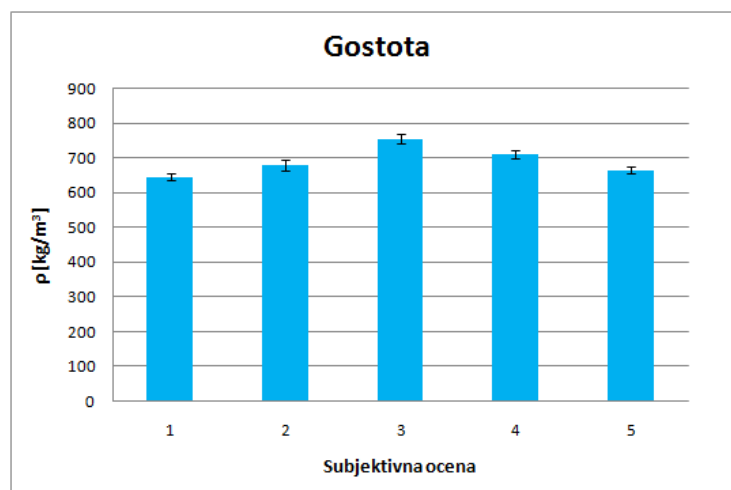
Subj. razred	n	ρ [kg/m ³]	$\tan \delta$	E [Pa]	E/ρ [Pa x m ³ /kg]	K [m ⁴ /s x kg]	ACE [m ⁴ /s x kg]	RACE [km/s]
1	12	646	0,01176	$1,05 \times 10^{10}$	$1,61 \times 10^7$	6,19	553,9	359,5
2	10	678	0,008874	$1,20 \times 10^{10}$	$1,78 \times 10^7$	6,36	718,8	476,6
3	16	756	0,008055	$1,48 \times 10^{10}$	$1,98 \times 10^7$	6,04	762,9	557,0
4	21	710	0,007404	$1,50 \times 10^{10}$	$2,13 \times 10^7$	6,63	906,5	626,3
5	15	666	0,006932	$1,49 \times 10^{10}$	$2,24 \times 10^7$	7,18	1042,7	684,8

Pri številu preizkušancev v posameznih razredih smo potrdili naključno porazdelitev (Slika 23), z večjim številom preizkušancev v višjih kakovostnih razredih. Ta porazdelitev je lahko posledica nenaključne izbire surovine, kjer smo sledili zgolj vizualnim lastnostim (preglednica 2).



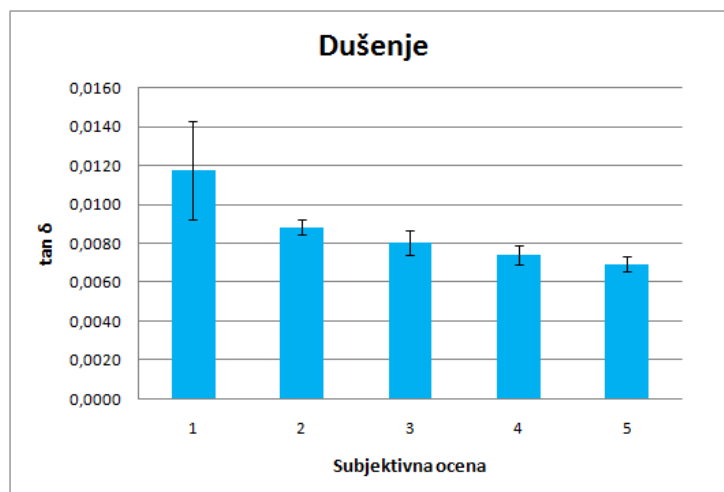
Slika 23: Število preizkušancev v posameznih razredih akustične kakovosti

Gostota preizkušancev je osnovna proučevana fizikalna veličina, ki pa ne daje rezultatov, s katerimi bi lahko ocenjevali in razvrščali les po njegovih akustičnih lastnostih. Višjo povprečno gostoto smo potrdili v srednjih kakovostnih razredih, v najnižjem in najvišjem pa je bila manjša (Slika 24). Iz tega lahko sklepamo, da gostota ni odločilen dejavnik, ki določa akustične lastnosti lesa, in lahko zaključimo, da les z visoko gostoto ne predstavlja nujno kakovostne surovine, za izdelavo ploščic pri melodičnih tolkalih.



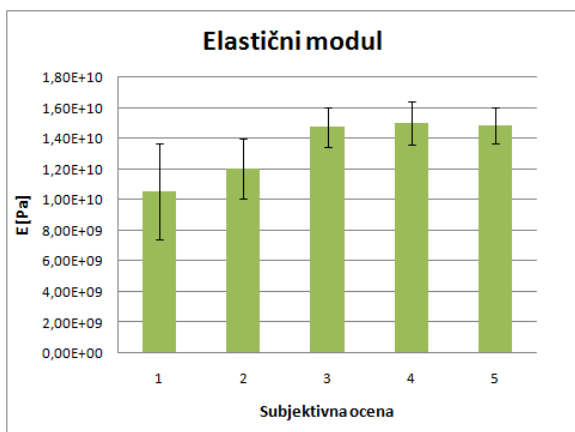
Slika 24: Povprečne vrednosti gostote po razredih akustične kakovosti

Koeficient dušenja na drugi strani prikazuje jasno sliko o primerljivosti slušne in instrumentalne razvrstitve preizkušancev (Slika 25). Že za samo dušenje opazimo, da je lahko kazalnik, ki bi ustrezno ovrednotil akustični potencial preizkušancev. Manjše dušenje predstavlja boljše zvočne lastnosti. Rezultati so pričakovani, ker je slušna razvrstitev temeljila predvsem na poslušanju dušenja vsakega elementa oziroma dolžino zvena ploščic.

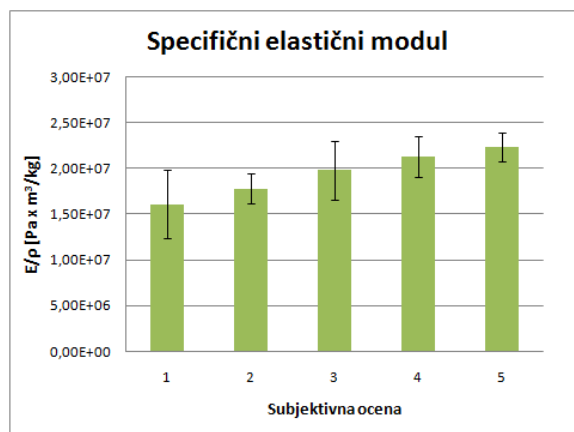


Slika 25: Dušenje lesa po razredih akustične kakovosti

Izračun dinamičnega elastičnega modula temelji na gostoti in osnovni frekvenci, ki sta edini spremenljivki v formuli, medtem ko so ostali potrebni parametri konstantni pri vseh preizkušancih kar je jasno razvidno iz formule 4. Iz izračunov gostote smo ugotovili, da le ti ne prikazujejo želenih vrednosti, podobno pa lahko pričakujemo pri dinamičnem elastičnem modulu. Ta parameter primarno prikazuje mehanske lastnosti, ki vemo da so tesno odvisne od strukturnih lastnosti lesa. Tako je vidno, da je modul elastičnosti



Slika 26: Dinamični prečni elastični modul po razredih akustične kakovosti

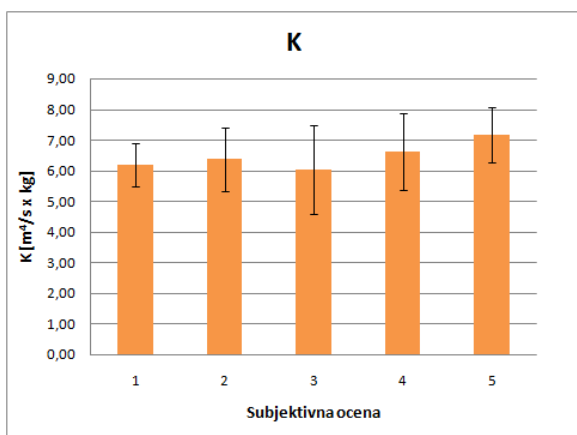


Slika 27: Specifični prečni elastični modul po razredih akustične kakovosti

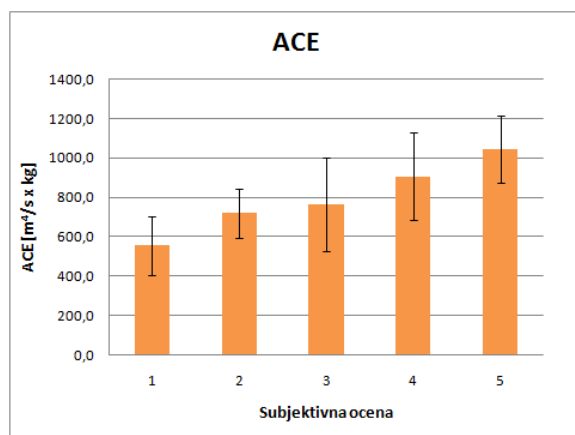
najmanjši v prvem razredu, nekoliko večji v drugem, medtem ko je v ostalih treh razredih višji in se po povprečni vrednosti kot tudi po standardnem odklonu ti trije razredi bistveno ne razlikujejo (Slika 26). Razlogi za to verjamemo, da prihajajo iz strukturne sestave lesa. Kot smo že ugotovili, se v nižjih razredih pogosto pojavljajo večji odkloni vlaken, rebrasta tekstura in razpoke, ki negativno vplivajo na mehanske lastnosti, to pa je verjetno poglavitni razlog za nižji dinamični elastični modul v prvem in drugem razredu.

Dinamični elastični modul je odvisen od gostote. Ker smo ugotovili, da gostota ni ustrezen parameter za razvrščanje lesa glede akustične kakovosti, je specifični elastični modul, ki je neodvisen od gostote eden tistih parametrov, ki lahko nakazuje zvočno kakovost ploščic. Slednji parameter dovolj zanesljivo prikazuje razlike v akustičnih lastnostih med posameznimi razredi znotraj iste vrste lesa (Slika 27).

Akustični koeficient je bil naslednji kazalnik, ki smo ga izračunali. V prvi vrsti, je bil koeficient izbran za izračun ACE. Izkaže se, da ta koeficient samostojno ne moremo uporabiti v namen razvrščanja oziroma vrednotenja akustičnih lastnosti, saj slabo sovпада s slušno razvrstitvijo (Slika 28).



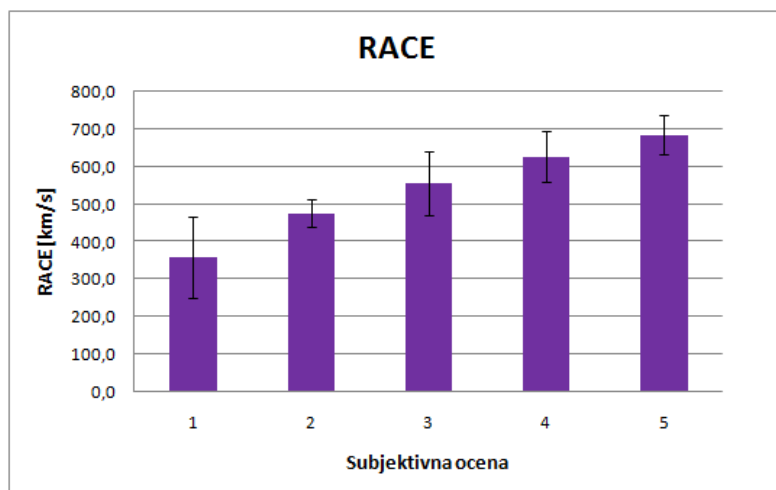
Slika 28: Povprečne vrednosti in standardni odkloni akustičnega koeficienta po razredih akustične kakovosti



Slika 29: Povprečne vrednosti in standardni odkloni učinkovitosti akustične pretvorbe po razredih akustične kakovosti

Nekoliko bolj ustrezno smo uspeli preizkušance razvrstiti s kazalnikom učinkovitosti akustične pretvorbe ali ACE. Vrednosti tega kazalnika glede na slušno razvrstitev relativno dobro sovpadajo; kljub vsemu vrednosti ne naraščajo povsem proporcionalno z višanjem razreda akustične kakovosti, slabost pa je hkrati precej velik standardni odklon (Slika 29).

Za najbolj primerne med proučevanimi spremenljivkami za razvrščanje lesa po akustični kakovosti se je izkazal koeficient RACE (Slika 30) oziroma relativna učinkovitost akustične pretvorbe. Ta koeficient je namreč neodvisen od gostote. Študije dokazujejo, da naj bi bil ta kazalnik odraz mikrostrukture celične stene (Obataya in sod., 2000).



Slika 30: Relativna učinkovitost akustične pretvorbe za posamezne razrede akustične kakovosti

4.6 PRIMERJAVA LASTNOSTI DOMAČIH LESNIH VRST Z AFRIŠKIM PADOUKOM

Za les afriškega padouka vemo, da ima dobre akustične lastnosti in se zato zelo pogosto uporablja za izdelavo različnih glasbil. Za primerjavo z afriškim padoukom smo vključili les javorja in robinije, vrednosti izmerjenih kazalnikov slednjih vrst pa so zapisane v preglednici 6.

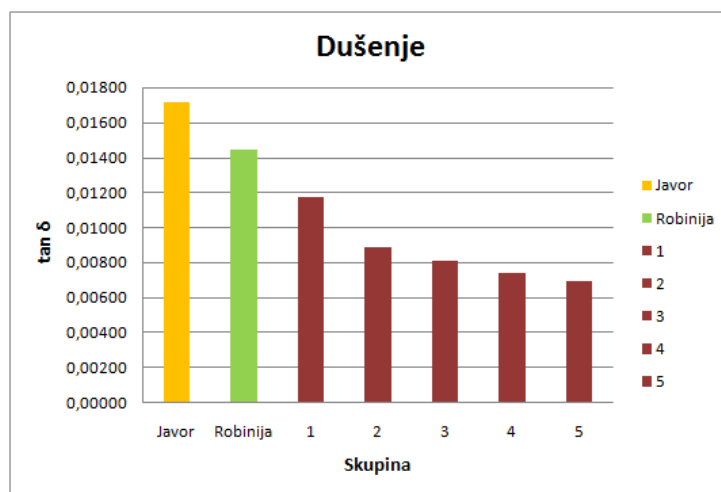
Preglednica 6: Vrednosti izmerjenih kazalnikov akustične kakovosti za uporabljene domače lesne vrste

Lesna vrsta	ρ [kg/m ³]	$\tan \delta$	E [Pa]	E/ρ [Pa x m ³ /kg]	K [m ⁴ /s x kg]	ACE [m ⁴ /s x kg]	RACE [km/s]
Javor	625	0,01713	$1,14 \times 10^{10}$	$1,82 \times 10^7$	6,82	412,3	257,9
Robinija	753	0,01442	$1,66 \times 10^{10}$	$2,21 \times 10^7$	6,26	440,3	330,1

Za gostoto lesa smo že pri afriškem padouku ugotovili, da ne predstavlja merodajnega kazalnika za razvrščanje lesa glede akustičnih lastnosti. Osnovna primerjava gostot lesa javorja, robinije in padouka potrjuje, da ima les javorja najnižjo gostoto, les robinije pa primerljivo gostoto z afriškim padoukom (Preg. 5 in 6), iz česar pa ne moremo sklepati katera lesna vrsta ima boljše akustične lastnosti. Tudi druge študije potrjujejo, da gostota ne vpliva na akustično kakovost ploščic, ampak na druge dejavnike, ki so povezani s tehnološkimi ovirami pri izdelavi tolkal:

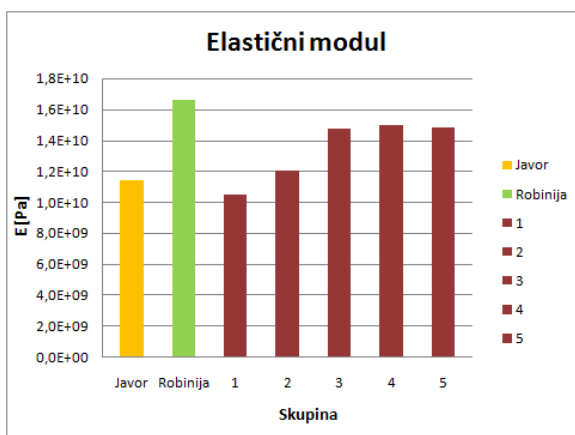
- ✓ zaradi manjše mase, ploščice manjših dimenzij bolj odskakujejo med igranjem na glasbilo
- ✓ ploščice z manjšo gostoto so bolj dovzetne na mehanske poškodbe kot so odtisi zaradi udarcev ter lom ploščic in so manj stabilne
- ✓ z gostoto je povezana tudi jakost emitiranega zvoka oziroma »akustična moč« (Brancheriau in sod., 2006a; Aramaki in sod., 2007).

Kazalnik za katerega lahko z gotovostjo trdimo, da omogoča ustrezno vrednotenje akustičnih lastnosti lesa, tako znotraj iste lesne vrste, kot tudi med različnimi lesnimi vrstami, je koeficient dušenja, saj smo slušno primerjali lastnosti vseh treh lesnih vrst ter jih razvrstili v enako zaporedje (Slika 31). Zaporedje sovпада s slušno oceno, kjer smo javor postavili na zadnje, robinijo pa na predzadnje mesto. Obe vrsti sta pri tem kazalniku slabši od vseh razredov padouka. Glede na to, da za izdelavo ploščic za ksilofon ali marimbo praktično ustrezajo le preizkušanci afriškega padouka od tretjega razreda naprej, bi se proučevanim domačim lesnim vrstam izognili.

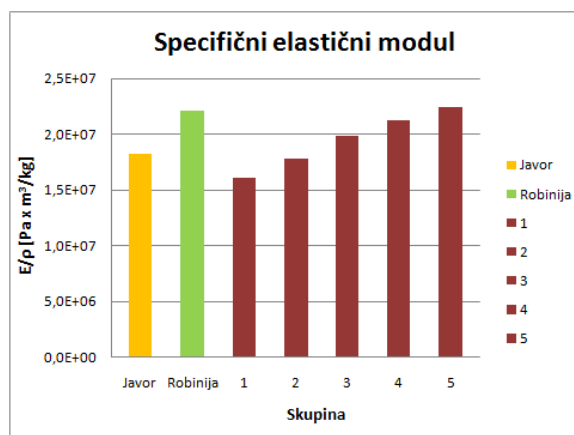


Slika 31: Primerjava koeficienta dušenja preizkušancev med lesnimi vrstami in razredi kakovosti

Primerjava dinamičnega in specifičnega elastičnega modula teh lesnih vrst pokaže nekoliko drugačna razmerja (Slika 32 in 33). Les robinije ima višjo gostoto od padouka, kar neposredno vpliva na izračun dinamičnega elastičnega modula. Tako ima robinija najvišji dinamični elastični modul izmed izbranih lesnih vrst. Pri specifičnem elastičnem



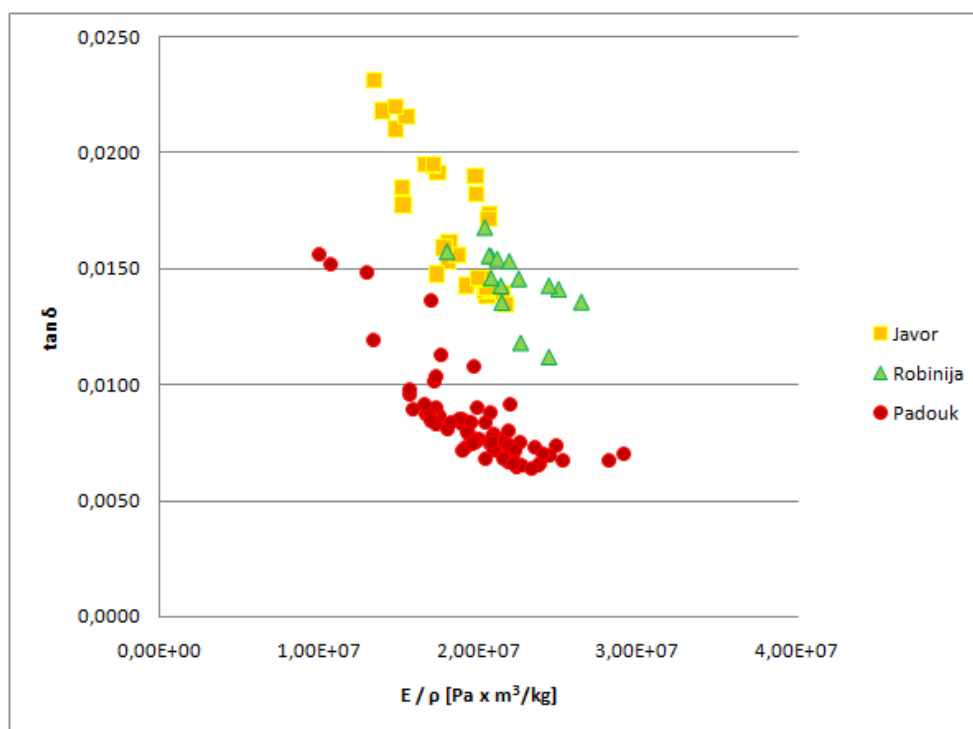
Slika 32: Primerjava prečnih dinamičnih elastičnih modulov med lesnimi vrstami in razredi kakovosti



Slika 33: Primerjava prečnih specifičnih dinamičnih modulov med lesnimi vrstami in razredi kakovosti

modulu pa kot zanimivost opazimo, da razlike med dinamičnim elastičnim modulom najboljšega razreda padouka in robinije ni več. To dokazuje, da ima afriški padouk za svojo gostoto boljše mehanske lastnosti kot robinija. Ugotovitev nasprotuje rezultatom in trendu pri izmerjenih dušilnih lastnosti lesa, kar nakazuje da zgolj z vrednostjo specifičnega elastičnega modula ne moremo ustrezno razvrščati preizkušance različnih lesnih vrst.

Boljšo analizo omogoča hkratna primerjava koeficienta dušenja in prečnega specifičnega elastičnega modula. Na sliki 34 je graf razmerja med omenjenima kazalnikoma, kjer so razločno vidne razlike med lesnimi vrstami. Medtem ko so povprečni specifični elastični moduli vseh vrst približno enaki, ima padouk precej nižji koeficient dušenja, razen pri nekaj preizkušancih najnižjega kakovostnega razreda. Eden od razlogov za to, so lahko inkrustrirani ekstraktivi pri padouku, ki znižujejo njegove dušilne lastnosti (Bremaud, 2011b). Obenem opazimo, da se z nižanjem dušenja povečuje tudi specifični elastični modul in obratno.

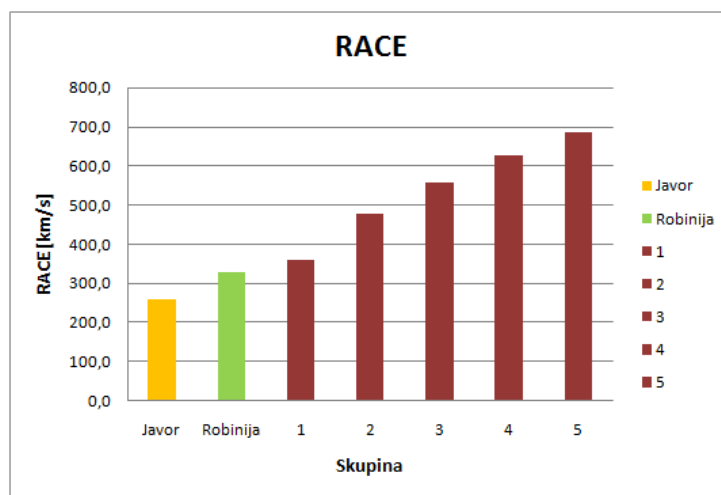


Slika 34: Razmerje med koeficientom dušenja in prečnim specifičnim elastičnim modulom proučevanih lesnih vrst

Akustični koeficient smo že pri primerjavi petih razredov padouka izločili kot morebiten ustrezen kazalnik, v primerjavi različnih lesnih vrst pa je razvrstitev še bolj neustrezna. Ugotovili smo že, da je ta koeficient le posredni kazalnik, ki je potreben za izračun kazalnika ACE. Iz preglednice 5 in 6 lahko opazimo zelo ustrezno razvrstitev lesnih vrst

po akustičnih lastnostih, kljub temu, da razredi pri padouku niso enakomerno razvrščeni. Predpostavljamo, da so vrednosti kazalnika preveč odvisne od gostote lesa, ki je nismo potrdili kot merodajno vrednost za določanje akustičnih lastnosti lesa.

Za zadnjo primerjavo smo ponovno uporabili kazalnik RACE, ki je samo potrdil naše izsledke, do katerih smo prišli že pri primerjanju razredov padouka. Za les javorja in robinije smo ugotovili, da se ne moreta enakovredno kosati z lesom padouka, s tem kazalnikom, pa lahko to tudi potrdimo (Slika 35).



Slika 35: Primerjava relativne učinkovitosti akustične pretvorbe med različnimi lesnimi vrstami in razredi akustične kakovosti

5 SKLEPI

Primarni namen diplomskega dela je bil določitev kazalnikov akustične kakovosti, s katerimi bi lahko ustrezno vrednotili, razvrščali ter primerjali posamične kose lesa in različne lesne vrste. S fizikalnimi meritvami in z računalniško podprtim razvrščanjem smo prišli do sklepa, da obstajajo kazalniki, s katerimi lahko zanesljivo ocenimo akustično kakovost lesa.

Pri vrednotenju celotnih desk smo ugotovili, da lastnosti ploščic, ki jih pridobimo iz desk ne moremo napovedati zanesljivo. Opazili smo, da iz posamične deske pridobimo ploščice iz vseh kakovostnih razredov pri čemer je prevladujoč razred ploščic enak oceni kakovosti deske. Za izbiro surovine na nivoju desk se tako lahko zanesemo že na vizualno oceno, ki temelji na strukturnih lastnostih lesa. Vrednotenje z izmerjenimi kazalniki pa je sprejemljivo tudi pri določanju hitrosti zvoka vzdolž desk ter s prečnim specifičnim dinamičnim modulom.

Pri vizualni oceni smo potrdili našo hipotezo, da določene strukturne lastnosti, negativno vplivajo na akustične lastnosti. Z večanjem odklona vlaken se slabšajo mehanske in akustične lastnosti. Za čelno orientacijo smo potrdili, da je lahko znak, ki nakazuje uporabnost, če pri tem hkrati upoštevamo še odklon vlaken. Radialni preizkušanci so se v večini izkazali za boljše od tangencialnih. Dodatno lahko potrdimo, da rebrasta tekstura v lesu ni primerna za izdelavo ploščic za melodična tolkala, medtem ko je progasta tekstura pri lesu padouka neizbežna.

Za najbolj ustrezna fizikalno merljiva kazalnika pri razvrščanju lesenih ploščic po akustični kakovosti sta se obnesla koeficient dušenja ($\tan \delta$) ter relativna učinkovitost akustične pretvorbe (RACE). Z obema kazalnikoma smo dobili trenda, ki sta podobna kot pri slušni razvrstitvi. Kot pogojno ustrezen kazalnik je mogoče uporabiti tudi prečni specifični elastični modul (E / ρ), s katerim smo zelo ustrezno razvrstili preizkušance znotraj iste lesne vrste. Za primerjavo več lesnih vrst pa je potrebno ta kazalnik hkrati primerjati še z dušilnimi lastnostmi posamične lesne vrste. Tako ugotavljamo, da so akustične lastnosti lesnih vrst tesno povezane z njihovimi osnovnimi mehanskimi lastnostmi, t.j. togostjo. Razlike, ki smo jih opazili med lesnimi vrstami pri dušenju zvoka so lahko tudi odraz razlik v njihovi kemični sestavi, kjer imajo pomembno vlogo nizkomolekularne ekstraktivne snovi.

Primerjava lesa javorja in robinije z afriškim padoukom pokaže, da sta obe domači lesni vrsti v akustičnih lastnostih slabši tudi od najnižjega razreda padouka, kar nismo pričakovali. Preizkušeni domači vrsti ne bi bili primerni za izdelavo ploščic za ksilofon ali marimbo.

6 VIRI

- Aramaki M., Baillères H., Brancheriau L., Kronland-Martinet R., Ystad S. 2007. Sound quality assessment of wood for xylophone bars. *Journal of the Acoustical Society of America*, 121 (4): 2407-2420
- Blanter M.S., Golovin, I.S., Neuhäuser H., Sinning H.-R. 2007. *Internal Friction in Metallic Materials*. Springer Series in Material Science, Vol. 90. Berlin, Springer Verlag: 539 str.
- Brancheriau L., Baillères H., Détienne P., Kronland R., Metzger B. 2006a. Classifying xylophone bar materials by perceptual, signal processing and wood anatomy analysis. *Annals of Forest Science*, 63: 73-81
- Brancheriau L., Baillères H., Détienne P., Gril J., Kronland R. 2006b. Key signal and wood anatomy parameters related to the acoustic quality of wood for xylophone-type percussion instruments. *Journal of Wood Science*, 52: 270-274
- 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., Cabrolhier P., Gril J., Clair B., Gérard J., Minato K., Thibaut B. 2010. Identification of anisotropic vibrational properties of Padauk wood with interlocked grain. *Wood Science and Technology*, 44: 355-367
- 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
- Brémaud I., Amusant N., Minato K., Gril J., Thibaut B. 2011b. Effects of extractives on vibrational properties of African Padauk (*Pterocarpus soyauxii* Taub.). *Wood Science and Technology*, 45: 461-472
- Bucur V. 2006. *Acoustics of wood*. Berlin, Springer Verlag: 393 str.
- Gorišek Ž. 2009. *Les: zgradba in lastnosti: njegova variabilnost in heterogenost*. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 178 str.
- Hansen H. 2006. *Acoustic Studies on Wood*. Master Thesis. Christchurch, University of Canterbury, The New Zealand School of Forestry: 146 str.
- Kutnar A. 2003. *Analiza leznih in dušilnih lastnosti lesa*. Diplomsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 44 str.
- La Favre J. 2007a. *Tuning the Marimba Bar and Resonator*.
<http://www.lafavre.us/tuning-marimba.htm> (oktober 2013)
- La Favre J. 2007b. *Position of Mallet Blow on Bar - Effect on Bar Timbre (sound quality)*
<http://www.lafavre.us/FFT-mallet-position.htm> (oktober 2013)
- Michels U. 2002. *Glasbeni atlas*. Ljubljana, DZS d. d.: 573 str.
- Obataya E., Ono T., Norimoto M. 2000. Vibrational properties of wood along the grain. *Journal of Material Science*, 35 (2000): 2993-3001

- 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
- Roohnia M., Tajdini A., Manouchehri N. 2011. Assessing wood in sounding boards considering the ratio of acoustical anisotropy. NDT&E International, 44 (2011): 13-20
- Santos J.M.A. 2008. A performance guide and theoretical study of Keiko Abe's Marimba d'Amore and Prism Rhapsody for Marimba and Orchestra. Doctoral dissertation. Texas, University of North Texas, College of Music: 56 str.

ZAHVALA

Zahvaljujem se doc. dr. Alešu Stražetu, za mentorstvo pri izdelavi diplomskega projekta, za njegovo dostopnost pri vprašanjih ter željo po raziskovanju na izbranem področju.

Zahvaljujem se recenzentu prof. dr. Željku Gorišku za recenzijo, njegove nasvete in smernice pri izdelavi diplomskega projekta.

Zahvaljujem se tudi vsem domačim in prijateljem, ki so vedno izkazovali podporo pri mojih interesih in mi vedno nudili pomoč pri ustvarjanju.