

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Simon AVBREHT

AKUSTIČNE LASTNOSTI PANELNIH SISTEMOV

MAGISTRSKA NALOGA
Magistrski študij – 2. stopnja

Ljubljana, 2015

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Simon AVBREHT

AKUSTIČNE LASTNOSTI PANELNIH SISTEMOV

MAGISTRSKA NALOGA
Magistrski študij – 2. stopnja

ACOUSTICAL PROPERTIES OF PANEL SYSTEMS

M. SC. THESIS
Master Study Programmes

Ljubljana, 2015

Magistrsko delo je zaključek magistrskega študija Lesarstva – 2. stopnje. Priprava vzorcev je potekala na Biotehniški fakulteti na Oddelku za lesarstvo.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja imenoval prof. dr. Sergeja Medveda, za recenzenta pa prof. dr. Željka Goriška.

Mentor: prof. dr. Sergej Medved

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Recenzent: prof. dr. Željko Gorišek

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Podpisni/podpisana izjavljam, da je naloga rezultat lastnega raziskovalnega dela. Izjavljam, da je elektronski izvod identičen tiskanemu. Na univerzo neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravici shranitve avtorskega dela v elektronski obliki in reproduciranja ter pravico omogočanja javnega dostopa do avtorskega dela na svetovnem spletu preko Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete.

Simon Avbreht

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Du2
DK	UDK 630*862
KG	panelni sistem/celulozna plošča/akustične lastnosti
AV	AVBREHT, Simon
SA	MEDVED, Sergej (mentor)/GORIŠEK, Željko (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2015
IN	AKUSTIČNE LASTNOSTI PANELNIH SISTEMOV
TD	M. Sc. (Magistrski študij – 2. stopnja)
OP	X, 63 str., 21 pregl., 37 sl., 33 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Ugotavljali smo, kako gostota, debelina in struktura laboratorijskih ter komercialnih plošč vplivajo na njihovo zvočno absorpcijo in izolativnost, pa tudi akustične lastnosti panelnih sistemov, sestavljenih iz teh plošč. Med komercialnimi konstrukcijskimi in izolacijskimi materiali smo uporabili iverno, OSB, vlakneno, furnirno in izolacijsko ploščo ter lahki ploščni kompozit s sredico iz papirnatega satovja. Izdelali smo 2 trislojna panelna sistema. Pri vsakem sta bili zunanji plošči iz istega materiala. Zunanje plošče so bile: iverna, konstrukcijska, furnirna in OSB plošča, za sredico pa smo uporabili klasično izolacijsko ploščo in celulozno ploščo narejeno v laboratoriju. Plošče in sisteme smo testirali v komori, razdeljeni na 2 prostora, in v notranjosti oblepljeni s plamofonom. V enem prostoru komore je bil vir zvoka, v drugem pa sprejemnik zvoka. Panelni sistem smo testirali v 3 korakih. Najprej smo testirali prvi sloj, nato smo mu dodali sredico in v zadnjem koraku še zadnji sloj. Ugotovili smo, da je obnašanje plošč odvisno od zgradbe in njihove gostote. Rezultate smo prikazali glede na nizko, srednje in visoko frekvenčno območje. Plošče z gostejšim zunanjim slojem bolje odbijajo in slabše absorbirajo zvok. Skozi gostejše, debelejšje in bolj homogene plošče (npr. furnirne plošče) se zvok slabše širi zaradi togosti plošč, medtem ko se skozi tanjše plošče zvočne vibracije lažje širijo prav zaradi manjše togosti. Pri redkejših ploščah se zvok lažje absorbira v notranjost plošče, ker je površina plošče bolj porozna in bolj dovzetna za absorpcijo. Dobro absorpcijo panelnih sistemov in s tem zvočno izolacijo zagotavljajo debelejšje in redkejšje plošče z enakomerno strukturo.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Du2

DC UDC 630*862

CX panel system/cellulose board/acoustical properties

AU AVBREHT, Simon

AA MEDVED, Sergej (supervisor)/GORIŠEK, Željko (reviewer)

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

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

PY 2015

TI ACOUSTICAL PROPERTIES PANEL SYSTEMS

DT M. Sc. Thesis (Master Study Programmes)

NO X, 63 p., 21 tab., 37 fig., 33 ref.

LA sl

AL sl/en

AB We have observed how the density, thickness and structure of laboratory and commercial boards affect their sound absorption and insulation; so as the acoustic properties of panel systems composed of such boards. As for commercial construction and insulating materials, chipboard, OSB, fibre, veneer and insulation boards were used, as well as lightweight composite boards with a core of paper honeycomb. We constructed 2 three-ply panel systems. In each, the external plate was made of the same material. The outside boards consisted of particleboard, construction, veneerboard and OSB boards, while the core was made of a classic insulating plate and a laboratory cellulose board. The boards and systems were tested in a chamber divided into 2 spaces, whose interior was laced with plamafone. One area of the chamber contained the sound source and the other one the receiver. A panel system was tested in 3 steps. Firstly, we tested the first layer, then added the core and in the last step the last layer as well. We have found that the behaviour of the boards depends on their structure and density. The results are shown in relation to the low, medium and high frequency range. Boards with a dense outer layer are better at reflecting sound and worse at absorbing it. Less sound passes through denser, thicker and more homogenous boards (eg. veneer), while it spreads more easily through thin boards because of their lower rigidity. Less dense boards absorb sound more easily into the interior because the board surface is more porous and more susceptible to absorption. Good absorption of panel systems and thus good noise insulation is provided by thicker and less dense boards with uniform structures.

KAZALO VSEBINE

Ključna dokumentacijska informacija (KDI).....	III
Key Words Documentation (KDW).....	IV
Kazalo vsebine.....	V
Kazalo preglednic.....	VII
Kazalo slik	VIII
Kazalo prilog.....	X
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	2
1.2 CILJ	2
1.3 DELOVNA HIPOTEZA	2
2 PREGLED OBJAV	3
2.1 ZVOK.....	3
2.2 VALOVANJE	4
2.3 JAKOST ZVOKA	5
2.4 DOJEMANJE ZVOKA.....	7
2.5 HRUP	8
2.6 AKUSTIKA IN ŠIRJENJE ZVOKA	10
2.7 AKUSTIČNE LASTNOSTI MASIVNEGA LESA, LESNIH PLOŠČNIH KOMPOZITOV IN DRUGIH NARAVNIH MATERIALOV	16
2.7.1 Masivni les.....	17
2.7.2 Lesni ploščni kompoziti	18
3 MATERIALI IN METODE	29
3.1 MATERIALI	29
3.1.1 Plošče izdelane v laboratoriju	29
3.1.2 Komercialni konstrukcijski in izolacijski materiali	30
3.1.3 Panelni sistemi	31

3.2	METODE DELA.....	33
3.2.1	Komora.....	33
3.2.2	Oprema za akustične meritve in analizo	35
3.2.3	Izvajanje meritev.....	36
4	REZULTATI IN RAZPRAVA	37
4.1	DOLOČITEV IZHODIŠČNE TOČKE.....	37
4.2	REZULTATI CELULOZNIH PLOŠČ	38
4.3	REZULTATI KOMERCIALNO DOSTOPNIH PLOŠČ	39
4.4	REZULTATI PANELNIH SISTEMOV	42
4.4.1	Panelni sistem s celulozno ploščo	42
4.4.1.1	Panelni sistem: komercialne plošče + celulozna plošča.....	42
4.4.1.2	Panelni sistem: komercialna plošča + celulozna plošča + komercialna plošča	44
4.4.2	Panelni sistem s klasično izolacijsko ploščo	46
4.4.2.1	Panelni sistem: komercialne plošče + klasična izolacijska plošča	46
5	RAZPRAVA	51
6	POVZETEK.....	58
7	VIRI.....	60

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Ocene jakosti zvoka.....	5
Preglednica 2: Poroznost materialov.....	12
Preglednica 3: Koeficient absorpcije zvoka različnih materialov	16
Preglednica 4: Lastnosti lesnih ploščnih kompozitov	19
Preglednica 5: Koeficient absorpcije α lesnih materialov	21
Preglednica 6: Koeficienti absorpcije zvoka pri različnih debelinah	25
Preglednica 7: Gostote in debeline laboratorijskih plošč	30
Preglednica 8: Značilnosti komercialnih plošč	31
Preglednica 9: Osnovna meritev.....	37
Preglednica 10: Absorpcija zvoka celuloznih plošč.....	38
Preglednica 11: Absorpcija zvoka komercialnih plošč	40
Preglednica 12: Panelni sistem: komercialna plošča + celulozna plošča.....	43
Preglednica 13: Panelni sistem: komercialna plošča + celulozna plošča + komercialna plošča	45
Preglednica 14: Panelni sistem: komercialne plošče + klasična izolacijska plošča	47
Preglednica 15: Panelni sistem: komercialna plošča + klasična izolacijska plošča + komercialna plošča.....	49
Preglednica 16: Vrednosti celuloznih plošč (Pa)	51
Preglednica 17: Absorpcija zvoka komercialnih plošč	52
Preglednica 18: Absorpcija zvoka panelnih sistemov s celulozno ploščo in komercialnimi ploščami	53
Preglednica 19: Absorpcija zvoka panelnih sistemov s klasično ploščo in komercialnimi ploščami	54
Preglednica 20: Primerjava panelnih sistemov s celulozno in klasično sredico v visokem frekvenčnem območju	54
Preglednica 21: Ključne frekvence panelnih sistemov s sredico iz celulozne plošče	56
Preglednica 22: Ključne frekvence panelnih sistemov s sredico iz klasične plošče	56

KAZALO SLIK

Slika 1: Zgoščine in razredčine zvočnega valovanja.....	4
Slika 2: Lestvica dojetja zvoka	8
Slika 3: Optimalna absorpcijska stena.....	12
Slika 4: Prikaz širjenja zvoka skozi zrak, akustični material in steno.....	13
Slika 5: Idealizirani potek izolirnosti sten v odvisnosti od frekvence.....	14
Slika 7: Prehod zvoka iz enega prostora v drugi prostor.....	15
Slika 6: Širjenje energije skozi steno	15
Slika 8: Koeficient zvočne absorpcije glede na strukturo različnih vrst lesa	17
Slika 9: Vpliv različnih debelin pri različnih frekvencah na koeficient absorpcije zvoka.....	22
Slika 10: Vpliv debeline absorpcijskega materiala na koeficient absorpcije	23
Slika 11: Vpliv gostote in debeline na koeficient absorpcije zvoka.....	23
Slika 12: Primerjava mešanice riževih lupin (25 %) in poliuretanske pene s čisto poliuretansko peno	26
Slika 13: Primerjava koeficienta absorpcije zvoka za riževe lupine, gumo in lesne skobljance	27
Slika 14: Postopek izdelave laboratorijskih plošč	30
Slika 15: Celulozna in konstrukcijska plošča.....	32
Slika 16: Celulozna in OSB plošča	32
Slika 17: Celulozna in iverna plošča	32
Slika 18: Celulozna in furnirna plošča	32
Slika 19: Klasična in iverna plošča	32
Slika 20: Klasična in OSB plošča	32
Slika 21: Klasična in furnirna plošča	32
Slika 22: Klasična in konstrukcijska plošča	32
Slika 23: Prostor za nameščanje vzorcev	34
Slika 24: Komora z ločeno sprednjo stranico.....	34
Slika 25: Zvočniki	34
Slika 26: Mikrofon	34
Slika 27: Celotna komora	35
Slika 28: Shema meritve	35
Slika 29: Graf celuloznih plošč	39

Slika 30: Absorpcija zvoka komercialnih plošč	41
Slika 31: Panelni sistemi iz celulozne sredice in zunanje plasti iz komercialnih plošč	42
Slika 32: Panelni sistem: komercialne plošče + celulozna plošča	44
Slika 33: Panelni sistem: komercialna plošča + celulozna plošča + komercialna plošča	44
Slika 34: Panelni sistem: komercialna plošča + celulozna plošča + komercialna plošča	46
Slika 35: Panelni sistemi iz komercialne plošče in klasične izolacijske plošče	47
Slika 36: Panelni sistem: komercialne plošče + klasična izolacijska plošča.....	48
Slika 37: Panelni sistem: komercialna plošča + klasična izolacijska plošča + komercialna plošča.....	48
Slika 38: Panelni sistem: komercialna plošča + klasična izolacijska plošča + komercialna plošča.....	50

KAZALO PRILOG

- Priloga 1: Celulozna plošča debeline 4 mm
- Priloga 2: Celulozna plošča debeline 7 mm
- Priloga 3: Celulozna plošča debeline 8 mm
- Priloga 4: Celulozna plošča debeline 17 mm
- Priloga 5: Celulozna plošča debeline 18 mm
- Priloga 6: Celulozna plošča debeline 50 mm
- Priloga 7: Celulozna plošča debeline 76 mm
- Priloga 8: Iverna plošča debeline 12 mm
- Priloga 9: OSB plošča debeline 18 mm
- Priloga 10: Vlaknena plošča debeline 19 mm
- Priloga 11: Furnirna plošča debeline 17 mm
- Priloga 12: Plošča s satovjem debeline 50 mm
- Priloga 13: Klasična izolacijska plošča debeline 50 mm
- Priloga 14: Povprečja absorpcij zvoka komercialnih plošč
- Priloga 15: Panelni sistem s celulozno sredico in zunanjsima slojema iz iverne plošče
- Priloga 16: Panelni sistem s celulozno sredico in zunanjsima slojema iz konstrukcijske plošče
- Priloga 17: Panelni sistem s celulozno sredico in zunanjsima slojema iz furnirne plošče
- Priloga 18: Panelni sistem s celulozno sredico in zunanjsima slojema iz OSB plošče
- Priloga 19: Primerjava panelnih sistemov s celulozno ploščo
- Priloga 20: Panelni sistem s sredico klasične izolacijske plošče in zunanjsima slojema iz iverne plošče
- Priloga 21: Panelni sistem s sredico klasične izolacijske plošče in zunanjsima slojema iz konstrukcijske plošče
- Priloga 22: Panelni sistem s sredico klasične izolacijske plošče in zunanjsima slojema iz furnirne plošče
- Priloga 23: Panelni sistem s sredico klasične izolacijske plošče in zunanjsima slojema iz OSB plošče
- Priloga 24: Primerjava panelnih sistemov s klasično izolacijsko ploščo

1 UVOD

Aktualna tema današnjega časa je med drugimi tudi zvočno onesnaževanje. Zvok je zaželen in koristen, ker omogoča sporazumevanje z drugimi ljudmi in z okolico, kadar pa zvok pri ljudeh vzbuja nemir oziroma povzroča psihofizične težave, pa gre za hrup. Prav zaradi želje po usmerjanju in omejevanju zvoka se poudarja pomen akustičnosti in izolativnosti. Da bi človeku zagotovili zvočno ustrezno delovno in bivalno okolje, je treba poznati akustične značilnosti raznih materialov in njihovo uporabo v konstrukcijah. Optimalno izolacijo dobimo, če kombiniramo različne materiale. Pri tem moramo upoštevati njihovo zvočno absorpcijo pri različnih frekvencah. Vezane in iverne plošče zagotavljajo absorpcijo zvoka v robmočju nižjih frekvenc zvočnega spektra (<500 Hz), umetni porozni materiali pa so bolj učinkoviti v območju srednjih in visokih frekvenc (2000–4000 Hz) (Beranek, 1960, cit. po Bucur, 2006). Za zvočno izolacijo se vse pogosteje uporabljajo naravni materiali (npr.: bombaž, slama, lan, celuloza, konoplja, les ipd.).

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Zvočna izolativnost panelnih sistemov, ki se uporabljajo v lesni gradnji, je odvisna od njihove zgradbe. Pri tem je pomembno poznavanje vpliva gostote, debeline in strukture plošč na njihove akustične lastnosti. Poleg tega je treba za učinkovito zvočno absorpcijo izbrati optimalno kombinacijo plošč v panelnem sistemu. V magistrskem delu smo želeli preveriti razne lastnosti in kombinacije.

1.2 CILJ

V magistrski nalogi smo želeli ugotoviti, kako gostota, debelina in struktura laboratorijsko izdelanih in komercialnih plošč vplivajo na njihovo zvočno absorpcijo in izolativnost, nato pa so nas zanimala še akustične lastnosti panelnih sistemov, sestavljenih iz teh plošč. Namen naloge je ugotoviti, kako uporabljeni lesni ploščni kompoziti iz izolacijskih materialov in iz njih narejeni panelni sistemi vplivajo na absorpcijo ter izolativnost zvoka.

1.3 DELOVNA HIPOTEZA

Predvidevamo, da se bodo razlike v gostoti, debelini in strukturi plošč pokazale v absorpciji in izolativnosti zvoka posamezne plošče in panelnega sistema.

2 PREGLED OBJAV

2.1 ZVOK

Zvok imenujemo vsako mehansko valovanje materialnih delcev v nekem mediju (npr. plini, tekočine, toga telesa), ki imajo maso in elastičnost v slišnem področju frekvenc. Te frekvence so od 16 Hz do 20000 Hz. Če ima valovanje višjo frekvenco od 20000 Hz, to imenujemo ultrazvok, če pa ima valovanje nižjo frekvenco od 16 Hz, pa infrazvok. Nihanje materialnih delcev lahko opišemo kot periodično nihanje tlaka okrog neke ravnotežne lege. Ta je pri zvoku v zraku atmosferski tlak 105 Pa (Črepinšek in Padežnik Gomilšek, 2002; Čudina, 2014; Blauert in Xiang, 2009; Strnad, 2010).

Nihanja v zraku povzročajo zračni ali aerodinamični zvok, v tekočinah tekočinski ali hidrodinamični zvok in v togih telesih strukturalni zvok (tresljaji ali vibracije). Nihanja, ki nastanejo zaradi vibriranja struktur, se prenašajo na okoliški zrak in to slišimo kot zvok. Pri zvoku, tako kot tudi pri vseh valovanjih, so prisotni uklon, lom, absorpcija, interferenca in odboj (Čudina, 2014).

Zvok se v praznem zračnem prostoru širi nemoteno v ravnih linijah. Nemoten zvok je zvok, ki se ne odbija, ne absorbira, se ne uklanja, ne lomi, ne razprši in ni izpostavljen resonanci. Prazen prostor pomeni prostor, v katerem se lahko zvok širi, kot bi se širil teoretično v praznem prostoru (Everest, 2001).

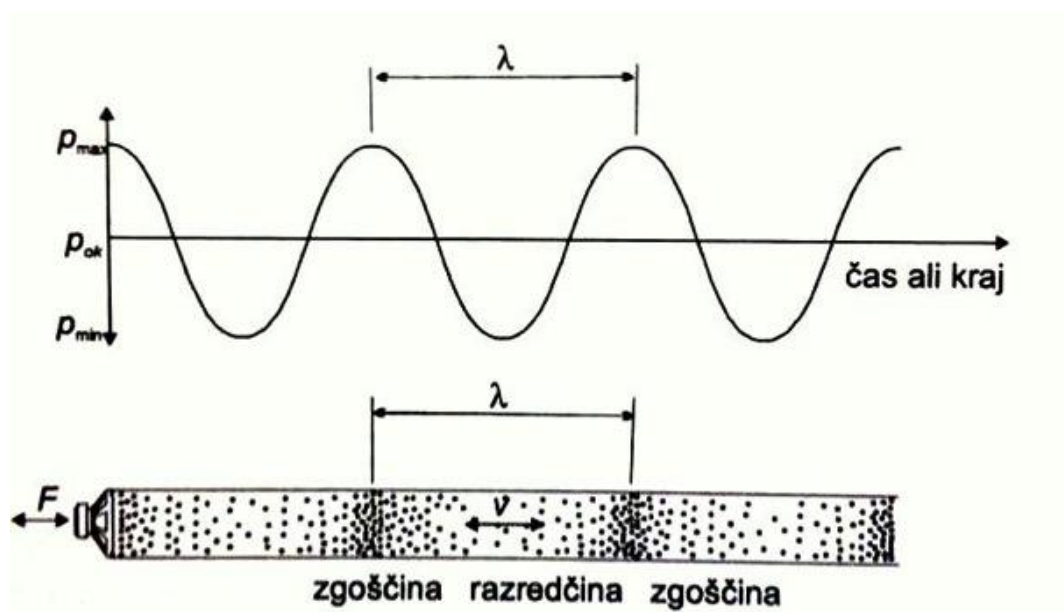
Po leksikonu Fizika (2007) lahko različne vrste zvoka razdelimo po spektru v štiri skupine: ton, zven, šum in pok. Ton je najenostavnejša oblika zvoka, ki ga povzroča sinusno nihanje. Višina tona je odvisna od frekvence – čim višja je frekvenca, tem višji je ton. Jakost tona pa je odvisna od amplitude tega harmoničnega nihanja – čim večja je amplituda, tem večja je jakost tona. Zven je mešanica tonov, katerih frekvence so celoštevilčni mnogokratniki najnižjega tona v mešanici osnovnega tona. Šum označuje mešanico številnih tonov s hitro spreminjajočimi se frekvencami in jakostmi. Pok pa je posledica sunkovitega kratkotrajnega mehanskega nihanja z veliko amplitudo.

2.2 VALOVANJE

Zvočno valovanje se širi od vira energije, ki se prenaša iz ene molekule na druge, zaradi česar nastanejo nihanja v gostoti in tlaku (Fahy, 2001). Zvočno valovanje je definirano s frekvenco, valovno dolžino in hitrostjo širjenja zvoka. Frekvenca f pomeni število nihanj zvočnega tlaka v eni sekundi. Enota je $[s^{-1}]$ ali Hertz [Hz]. Nihanje v mediju oziroma zvočno valovanje se od izvora širi s hitrostjo zvoka c in je odvisno od lastnosti medija, v katerem se širi (enačba 1). Valovna dolžina λ zvočnega valovanja je razdalja med analognima točkama nekega valovanja oziroma med dvema zaporednima hriboma ali zgoščinama. Je razmerje med hitrostjo zvoka c in frekvenco zvoka f , ki jo opišemo z enačbo 2 (Breuer, 1993; Čudina, 2014). Delci v snovi spreminjajo svojo lego vzporedno s smerjo širjenja valovanja, zaradi česar nastanejo v snovi zgoščine in razredčine, ki jih zaznamo kot razliko v tlaku. (Medved, 2014)

$$c = \lambda * f \text{ [m/s]} \quad \dots(1)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = c * T \text{ [m]} \quad \dots(2)$$



Slika 1: Zgoščine in razredčine zvočnega valovanja (Čudina, 2014: 10)

2.3 JAKOST ZVOKA

Jakost zvoka je gostota energijskega toka, torej energija, ki jo valovanje prenese skozi prerez 1 kvadratnega metra v eni sekundi. Izražena je v decibelih in je enaka desetkratnemu desetiškemu logaritmu razmerja med gostoto toka j in referenčno gostoto $j_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ (Črepinšek in Padežnik Gomilšek, 2002; Breuer, 1993) (enačba 3):

$$\text{Jakost} = 10 \log j/j_0 \text{ decibelov} \quad \dots(3)$$

Čudina (2014) navaja, da je jakost zvoka ali glasnost G določena z razliko med ravno zvoka, ki ga ustvarja neusmerjeni vir zvoka in je izmerjena na določenem mestu, ter ravno neposrednega zvoka od istega vira zvoka (pri enaki moči vira), ki je izmerjena v prostem zvočnem polju (gluhi sobi), na razdalji 10 m od vira. V Preglednici 1 je prikazanih nekaj ocen jakosti zvoka.

Preglednica 1: Ocene jakosti zvoka (Čudina, 2014)

Jakost zvoka	dB	J [W/m²]
Meja slišnosti	0	10^{-12}
Šumenje listov	10	10^{-11}
Tiktakanje ure	20	10^{-10}
Tihi pogovor	30	10^{-9}
	40	10^{-8}
	50	10^{-7}
Glasen razgovor	60	10^{-6}
Prometna ulica	70	10^{-5}
Kričanje	80	10^{-4}
Glasna hupa	90	10^{-3}
Motor (močan)	100	10^{-2}
10 motorjev	110	10^{-1}
Letalo pri 1 m	120	$100 = 1$

ZVOČNI TLAK

Zvočni tlak je spreminjajoči se tlak zvočnega valovanja, ki ga povzroča nihanje delcev medija. Merimo ga v paskalih (Pa) (Leksikon Fizika, 2007). Zvočni tlak p pomeni spremembo motnje okoli ravnotežnega tlaka. Matematični zapis spremembe zvočnega tlaka v odvisnosti od kraja in časa dobimo iz valovne enačbe (Čudina, 2014).

Valovno enačbo dobimo iz zakona o ohranitvi mase in gibalne količine oziroma Eulerjeve enačbe ter termodinamičnih principov v akustiki, pri tem pa predpostavljamo, da je masa elementa fluida, na katerega deluje motnja, konstantna. Enodimenzionalna oblika ravnega valovanja ima naslednjo obliko (enačba 4) (Čudina, 2014).

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad \dots (4)$$

Zvočno valovanje se širi skozi elastični medij, ki pa je lahko preprosto sinusno valovanje ali pa superpozicija vrste valovanj enakih ali različnih frekvenc, faz in amplitud. Trenutni zvočni tlak in gibanje delcev medija lahko izmerimo v poljubni točki v prostoru, kjer se širi zvok. Zvočni tlak se v prostoru spreminja v širokih mejah, kar pa vpliva na človeško uho in merilne inštrumente, ki morajo v širokih mejah izmeriti in zaznati zvočne tlake, hitrosti delcev, intenzivnosti in frekvence. V praksi je faktor sprememb zvočnega tlaka čez 10^{10} , zvočne intenzivnosti čez 10^{20} , zvočne moči do 10^{10} in frekvenc do 10^6 . Za ohranitev konstantnega odstotka merilne natančnosti in preglednejšega zapisa zvočnih veličin z velikimi števili so vpeljali logaritemsko merilo za zvočni tlak, zvočno intenzivnost in zvočno moč. Takšna skala se imenuje raven in nadomešča logaritem. Raven podaja logaritemsko razmerje akustičnih veličin z njeno referenčno vrednostjo. Čeprav logaritem nima svoje dimenzije, so ravni dodelili enoto Bell (po izumitelju Bellu), desetinki vrednosti pa decibel (dB), ki je značilna za področje akustike. Vrednost v decibelih podaja raven nad ali pod referenčno ravno, ki je določena z referenčno vrednostjo akustične veličine. Torej je decibel (dB) v akustiki enota, ki je enaka za raven zvočnega tlaka, zvočne intenzivnosti in zvočne moči zvočnih virov. Pri tem se običajno navajajo uporabljene referenčne vrednosti (Čudina, 2014).

Raven zvočne intenzivnosti pomeni del zvočne moči zvočnega vira, ki gre v določeni meri skozi enoto površine in je definirana kot (enačba 5):

$$L_b = 10 \log \frac{I}{I_0} [dB] \quad \dots (5)$$

Pri tem sta I – izmerjena zvočna intenzivnost v W/m^2 in I_0 – referenčna vrednost $10^{-12} W/m^2$ (Čudina, 2014).

Raven zvočne moči je definirana podobno kakor raven zvočne intenzivnosti (enačba 6):

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad \dots (6)$$

Pri tem sta W – zvočna moč v W in W_0 – referenčna vrednost $10^{-12} W$ (Čudina, 2014).

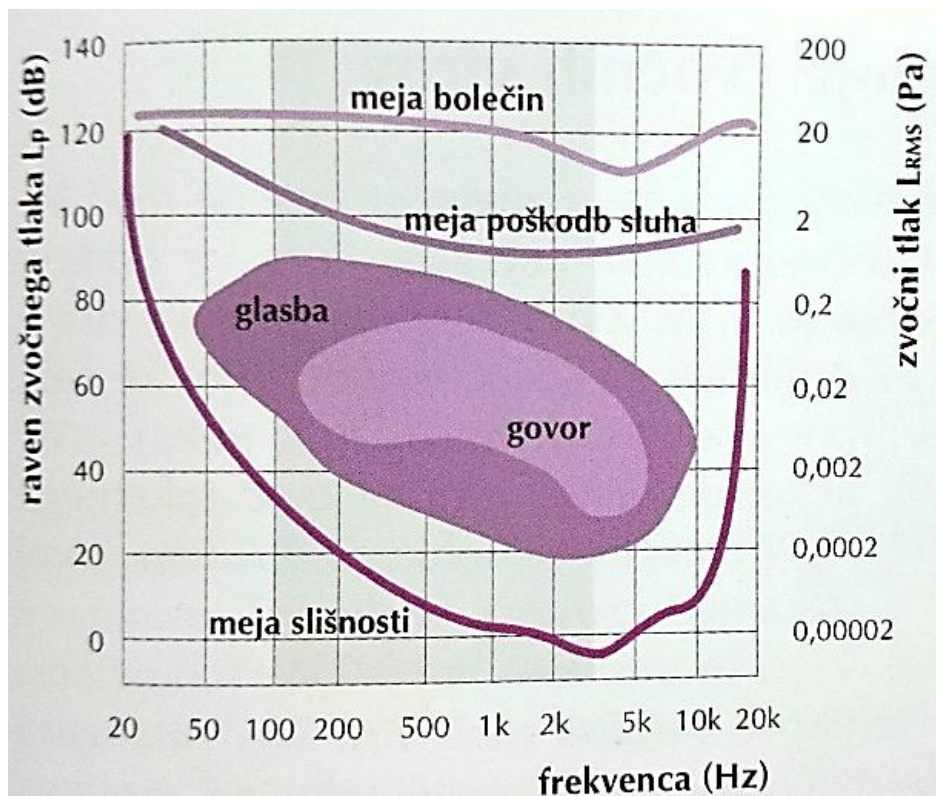
Raven zvočnega tlaka je definirana kot desetkratni logaritem (z osnovo 10) razmerja kvadratov tlakov (enačba 7):

$$L_I = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} [dB] \quad \dots (7)$$

Pri tem je p dejansko izmerjena vrednost RMS v Pa, p_0 pa je referenčna vrednost RMS $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (Čudina, 2014).

2.4 DOJEMANJE ZVOKA

Prag človekovega sluha je omejen na 0 dB, kar predstavlja tlak 2×10^{-5} Pa (Beranek, 1986, cit. po Bucur, 2006) ali energije $10^{-16} W/cm^2$. Človek lahko sliši zelo širok razpon zvočne intenzivnosti, kljub temu pa se bolečina pojavi pri 120 dB (slika 2) (Bucur, 2006, 21).



Slika 2: Lestvica dojemanja zvoka (Medved, 2014)

2.5 HRUP

Hrup je ena od oblik zvočnega valovanja. Vsako zvočno valovanje nosi določeno informacijo. Če je ta informacija razumljiva ali prijetna, imenujemo to signal ali melodija, če pa je informacija nerazumljiva in moteča, pa to imenujemo hrup. Torej je to predvsem subjektivna kategorija, ki vpliva negativno na zdravje in počutje ljudi (Čudina, 2014).

Zvok je v mejah sprejemljivosti znosen in človeku ne predstavlja težav. Zvok kot ovira pa nastane takrat, ko povzroča motnjo, moti spanec in komunikacijo med ljudmi. Negativni vpliv se odraža s poškodbami sluha, slabo koncentracijo, težavami z učenjem ipd. Daljše izpostavljanje hrupu privede do naglušnosti oziroma premika slušnega praga (Zupančič, 2004). Hrup in vibracije ljudje občutimo in vplivajo na celotno telo. Najmočnejši odziv zaznavanja vibracij je v smeri od nog proti glavi in v območju frekvenc od 1 do 80 Hz. Določeni deli telesa pridejo v nekaterih frekvencah v resonančno območje. Resonančna frekvenca glave je približno 20 Hz, prsnega koša 5 Hz in oči 80 Hz. Posledice, ki nastanejo

zaradi prevelikega izpostavljanja hrupu in vibracijam, so lahko mile ali pa zelo hude oblike bolezni (Čudina, 2014).

Čudina (2014) imenuje hrup v naravnem in življenjskem okolju komunalni hrup. To je okoljski hrup, ki se nanaša na vse vire hrupa na prostem. Povzročajo ga: hrup prometa, različni industrijski viri, vojaška, policijska in športna strelišča, različna gradbena dela na prostem, razne glasbene skupine, pogovor ljudi na ulici in vpitje na tekmah, hrup zaradi vetra, grmenja, dežja ipd. Najbolj hrupni deli so v bližini letališč in avtocest.

V določenih primerih je neka stopnja hrupa za ljudi še vedno sprejemljiva. Na primer, pri podjetju Daimler-Benz so poskus popolnega utišanja delovanja motorja kupci zavrnili, ker so želeli med vožnjo slišati motor in s tem pridobiti boljši občutek za vožnjo avta. Popolna tišina naj bi negativno vplivala na počutje ljudi (npr. podzemne zaporniške celice). Takšen občutek lahko dobimo v gluhih sobah, kjer pa lahko preizkušamo absorpcije zvoka različnih zvočnih materialov (Čudina, 2014).

Raven hrupa je različno odvisna od okolja. V velikih urbanih naseljih je raven hrupa precej višja kot v vaseh. Dopustne meje hrupa so različne in se razlikujejo od izvora hrupa. V okolju, kjer so industrijski obrati, lahko stroji dosegajo 87 dB in več, v stanovanjskem naselju pa hrup ne sme presegati 55 dB podnevi in 45 dB ponoči (Čudina, 2014).

Hrup lahko zmanjšamo z inženirskimi metodami – to je na mestu vira in sprejema ter na poti širjenja, ali pa z alternativnimi metodami, ki temeljijo na spremembi percepcije (z dekoracijo, barvami, umetniškimi slikami ipd.) (Čudina, 2014). Godshall in Davis (1969) navajata, da sta dve glavni metodi za nadzor hrupa v stavbah izoliranost od zunanjega vira zvoka in absorpcija zvoka v prostoru.

2.6 AKUSTIKA IN ŠIRJENJE ZVOKA

Akustika je po SSKJ (2001) lastnost oziroma značilnost prostora, da se v njem nekaj dobro sliši. Je znanstvena veda, ki se ukvarja z nastankom, širjenjem in zaznavanjem mehanskih valovanj in nihanj (Medved, 2014).

Lesni materiali se uporabljajo na stenah, stropu ali na tleh, kar je odvisno od namena izolacije. Nekateri avtorji (npr. Cremer in Muller, 1982) menijo, da je že vnaprej možno doseči določeno akustično konstrukcijo z izbiro takšnih površin, ki absorbirajo, odbijajo ali prenašajo zvok. Učinek je odvisen od znanja in spretnosti oblikovalca pri uporabi teh materialov. Absorpcija in odbijanje zvoka sta odvisna predvsem od notranje zgradbe materiala, obdelave površine, načina razporeditve materialov, geometrije ipd. Vezane in iverne plošče, na primer, omogočajo absorpcijo nižjih frekvenc, umetni materiali pa so uporabni za srednje in višje frekvence (Beranek, 1960, cit. po Bucur, 2006).

Gradbene konstrukcije imajo majhno zvočno absorptivnost, zato jo uravnavamo z različnimi oblogami – zvočnimi absorberji. Pri tem se upoštevajo naslednji principi:

- za absorpcijo visokih frekvenc se uporabljajo porozne (vlanaste) snovi,
- obloge na distančnikih absorbirajo zvok nizkih frekvenc,
- perforirane obloge na distančnikih ali na sloju porozne snovi najbolj absorbirajo valovanje srednjih frekvenc (Medved, 2014),
- vezane in iverne plošče omogočajo absorpcijo nižjih frekvenc,
- umetni materiali pa so uporabni za srednje in višje frekvence (Beranek, 1960, cit. po Bucur, 2006).

Absorpcija pomeni sposobnost materiala za absorbiranje zvočne energije. Zvočno valovanje se pri vdoru v pore materiala in trenju nihajočih delcev zraka spreminja v toploto. Pri tem delu se zvočna energija dokončno izgubi. Absorpcija je statična (energijska) vrednost, ki jo dobimo za neskončno absorpcijsko površino in s popolnoma difuznim vpadnim zvočnim poljem. Ta pojav se uporablja pri zvočni izolaciji prostorov. Za merjenje absorbiranega zvoka, ki gre skozi material najpogosteje, uporabljamo absorpcijski koeficient (Čudina, 2014).

Koeficient absorpcije α predstavlja razmerje med absorbirano zvočno močjo na opazovalni površini (P_{absorb}) in zvočno močjo, ki vpade na to površino (P_{vpadla}) (enačba 8):

$$\alpha = \frac{P_{absorb}}{P_{vpadla}} \quad \dots (8)$$

Absorpcijski koeficient je definiran od 0 do 1 in je odvisen od frekvence in vpada zvočnega valovanja. Pri $\alpha = 0$ se vsa zvočna energija odbija nazaj v prostor, pri vrednosti $\alpha = 1$ pa se vsa zvočna energija vpije v absorbent. Koeficient praviloma merimo pri frekvencah od 100 do 3140 Hz. Praktične vrednosti za koeficient absorpcije so od 0,01 za marmor do 0,996 za površine steklene volne, ki se uporablja za oblaganje sten v gluhih sobah. Maksimalne vrednosti za ravne absorpcijske površine so okrog 0,96 (Čudina, 2014).

Na splošno je koeficient absorpcije zvoka nizek v območju nizkih frekvenc in visok v območju visokih frekvenc. Še posebej je visok pri frekvencah, kjer je debelina absorpcijskega materiala enakovredna $\lambda/4$ (λ je valovna dolžina). Debelejši absorpcijski materiali bolj absorbirajo zvok pri nizkih frekvencah (Maekawa, 1994, po Nor in sod., 2004).

Za absorpcijo zvoka uporabljamo različne absorberje (zvočno absorbirne obloge, resonatorje). Absorberji služijo za absorpcijo zvoka in nezaželenih zvokov – hrupa ter zmanjšajo odmevni čas (Arenas in Crocker, 2010). Zvok absorbirajo na disipativnem principu višje frekvence ali na reaktivnem principu nižje frekvence od 1 kHz. Najbolj znan je disipativni princip s pretvorbo zvočnega valovanja v toploto s trenjem v porah absorpcijskega materiala. Delež odbitega in absorbiranega zvoka je odvisen od valovne dolžine zvočnega valovanja. Nad 1000 Hz se večina zvočnega valovanja absorbira, pod to frekvenco pa se neabsorbirano zvočno valovanje najprej uklone in se nato od toge stene v ozadju absorpcijskega materiala odbije.

Zvok pri prehodu skozi snov oslabi. Pri tem jakost zvoka eksponentno pojema (enačba 9):

$$j = j_0 \text{ eks } (-\mu\chi) \quad \dots (9)$$

prav tako amplituda (enačba 10) (Breuer, 1993):

$$\chi_0 \text{ eks } (-1/2\mu\chi) \quad \dots (10)$$

Poroznost daje frakcijo obsega količine zraka v absorbent. To je razmerje skupne prostornine por s skupno prostornino absorbenta. V Preglednici 2 so predstavljene tipične vrednosti poroznosti materialov. Dobri absorbski materiali imajo po navadi veliko poroznost, na primer večina mineralne volne ima poroznost 0,98.

Preglednica 2: Poroznost materialov (Cox in D'Antonio, 2009)

Material	Poroznost
Akustična pena	0,95–0,995
Mineralna volna	0,92–0,99
Vlaknena plošča	0,65–0,80
Perlit	0,60–0,78
Lesna volna	0,50–0,65
Gume	0,44–0,54
Opeka	0,15–0,35
Porozen asfalt	0,18–0,20

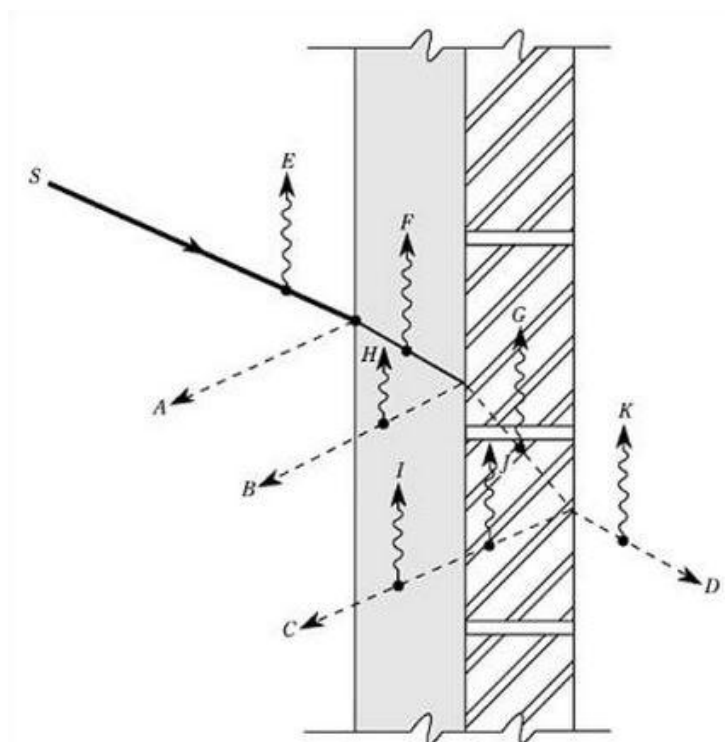
Čudina (2014) navaja, da optimalno absorpcijo dobimo, če je debelina stene (poroznega materiala z zračno rego) vsaj $\lambda/8$, najbolje pa je $\lambda/4$, pri čemer je λ valovna dolžina zvočnega valovanja. Cilj je zajeti maksimalno mogočo amplitudo zvočnega valovanja v pore poroznega materiala (slika 3).



Slika 3: Optimalna absorpcijska stena (Čudina, 2014)

Če zvok (S) potuje po zraku in pride v stik s steno, pokrito z akustičnim materialom, se del vrne nazaj v zrak, kot kaže oznaka A . Del energije (E) se izgubi in spremeni v toploto že med

širjenjem zvoka po zraku, še posebej pri visokih frekvencah. Smer potovanja zvoka je usmerjena navzdol, ker ima akustični material večjo gostoto od zraka. Zaradi vibracij se del toplote izgubi tudi v akustičnem materialu (F). Del zvoka, ki pride naprej do stene, se razgubi na podoben način (B – del zvoka se odbije nazaj, H – del odbitega zvoka se razgubi v akustičnem materialu). Intenzivnost zvoka ves čas postaja šibkejša. V steni se del energije zvoka izgubi in spremeni v toploto (G), del odbije nazaj (C), ostali del pa pride skozi steno (D), pri tem pa se del zvoka stalno izgublja (I, J, K) (Everest, 2001).



Slika 4: Prikaz širjenja zvoka skozi zrak, akustični material in steno (Everest, 2001)

Faktor izgube zvoka pri prenosu se izračuna po enačbi 11 (Braune, 1960, cit. po Bucur, 2006; Čudina, 2014):

$$R = 10 \log \frac{E_e}{E_d} [\text{dB}] \quad \dots (11)$$

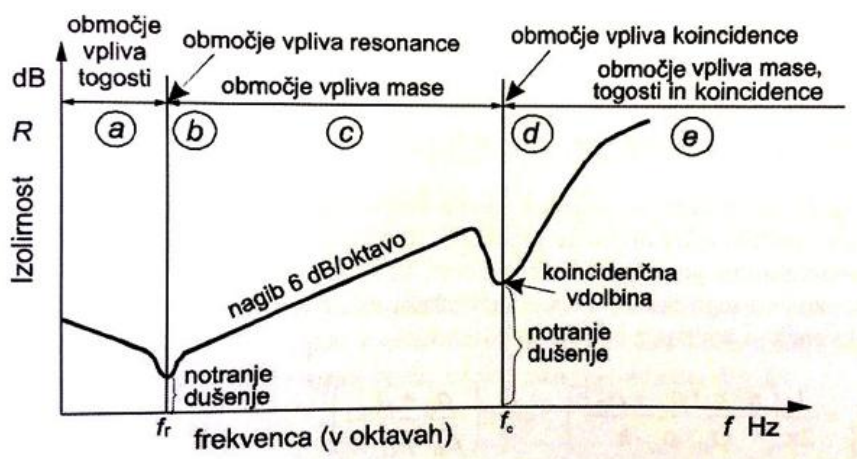
Bucurjeva (2006) navaja, da so za akustiko koncertnih dvoran, opernih sob in predavalnic učinkoviti les in lesni kompoziti. Lesene obloge naredijo zvok bolj svetel, in sicer zaradi

absorbiranja zvoka nižjih frekvenc. Poudarja pa, da so za akustiko izolacije pomembni površinska gostota, kritična frekvenca in faktor dušenja.

Zvočna izoliranost stene ali panela R je definirana kot razlika med vpadno ravno zvočne intenzivnosti in skozi steno prepuščeno ravno zvočne intenzivnosti. Izoliranost pomeni merilo zvočne izolativnosti in je povezana s koeficientom prepustnosti valovanja. Raven zvočne intenzivnosti lahko definiramo z enačbo 12:

$$R = 10 \log \frac{W_{vpadni}}{W_{prenešeni}} [\text{dB}] \quad \dots (12)$$

W_{vpad} je vpadna zvočna moč s strani vira in W_{pren} je sevana zvočna moč, ki seva od pregradne stene na drugo stran pregrade, kjer merimo prepustnost zvoka. Na izoliranost vplivajo togost plošče, resonanca plošče, masa plošče, koincidenčni efekt, vpadni kot valovanja in frekvenca zvoka, torej je izoliranost kombinirana funkcija mase plošč, materiala in oblike (slika 5) (Čudina, 2014).



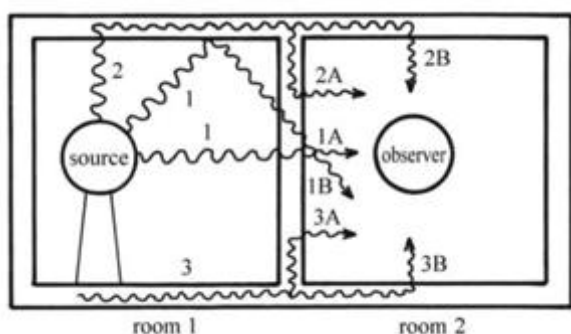
Slika 5: Idealizirani potek izoliranosti sten v odvisnosti od frekvence; f_r je resonančna frekvenca in f_c je kritična frekvenca (Čudina, 2014)

Čudina (2014) prikazuje vplive na izoliranost stene. Upogibna togost plošče vpliva na izoliranost le v območju zelo nizkih frekvenc pod lastno frekvenco (območje a). Masa plošče začne vplivati pri frekvenci, ki je enaka resonančni ali lastni frekvenci plošče. V tem območju je izoliranost določena z notranjim dušenjem stene. Najmočnejši vpliv pri kritični frekvenci ima koincidenčni efekt. Koincidenčni efekt je pojav, ki nastane, ko se zvočno valovanje

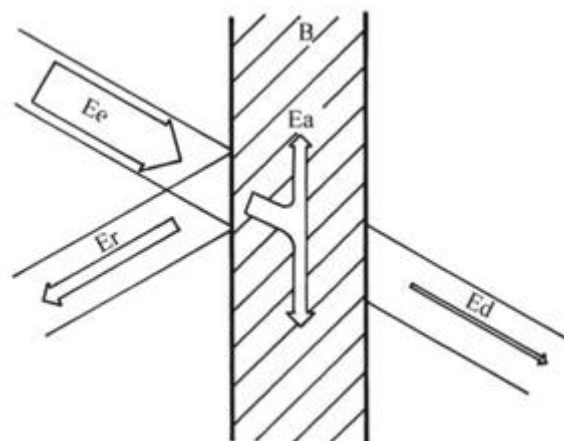
določene frekvence, ki vpade na ploščo, ujame z upogibnim valovanjem v plošči pri tej frekvenci. Zaradi pojava koincideničnega efekta se zmanjša zvočna izolirnost plošče. Pri izolirnosti sta zelo pomembni resonančna in kritična frekvenca plošče, saj, če želimo dušiti frekvence v območju vpliva mase na izolirnost, mora biti lastna frekvenca plošče čim nižja. V nasprotnem primeru pa, če želimo dušiti nizke frekvence, mora imeti glavni vpliv togost plošče, njena resonančna frekvenca pa mora biti med čim višjimi frekvencami.

Izolirnost v visokem frekvenčnem območju (nad 1000 Hz) lahko izboljšamo z dodajanjem absorpcijskega materiala na togo steno. Izolirnost v nizkem frekvenčnem področju izboljšamo s prekritjem absorpcijske plasti z membrano, ki je lahko kovinska folija ali plastična folija s svinčnim vložkom (Čudina, 2014).

Sam prehod zvoka iz enega prostora v drugega lahko poteka skozi sosednjo steno, skozi strop ali skozi tla, kot prikazuje Slika 7. Na Sliki 6 pa je prikazana povezanost oziroma širjenje akustične energije (E_e) v steno absorbirane energije (E_a), odbite energije (E_r) in prenesene energije (E_d). Če je izolacijski material dober, je prenesene energije zelo malo (Bucur, 2006).



Slika 6: Prehod zvoka iz enega prostora v drugi prostor (Beranek, 1962, po Bucur, 2006)



Slika 7: Širjenje energije skozi steno (Braune, 1960, po Bucur, 2006)

Pri prenosu zvoka iz enega prostora v drugega je bilo ugotovljeno, da se zvok pri vseh frekvencah najbolje absorbira v tla z valneno oblogo, najmanj pa v opečnat zid. Nekaj podatkov iz raziskave je prikazanih v spodnji tabeli (Beranek 1962, Braune, 1960, cit. po Bucur, 2006).

Preglednica 3: Koeficient absorpcije zvoka različnih materialov (Beranek, 1986, po Bucur, 2006)

Material	Debelina (cm)	Koeficient pri frekvencah (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Opečnata stena	46	0,02	0,02	0,0	0,04	0,05	0,05
Lesena stena	2	0,04	0,30	0,20	0,15	0,20	0,10
Lakiran les	5	0,1	-	0,05	-	0,04	0,04
Lesne plošče	-	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Steklo	-	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Lesena tla, borova smola	-	0,05	0,04	0,06	0,09	0,10	0,22
Volnene obloge	1,5	0,20	0,25	0,35	0,40	0,50	0,75

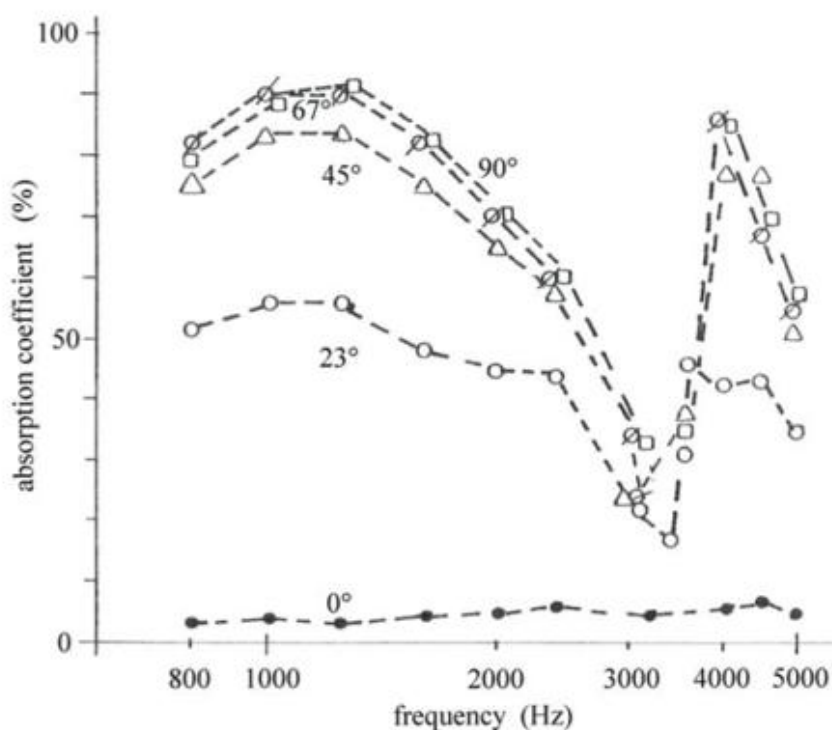
2.7 AKUSTIČNE LASTNOSTI MASIVNEGA LESA, LESNIH PLOŠČNIH KOMPOZITOV IN DRUGIH NARAVNIH MATERIALOV

Masivni les in lesne kompozite uvrščamo med materiale z dobrimi akustičnimi lastnostmi (absorpcija zvoka, difuzija zvoka ipd.). Zaradi svoje lastnosti absorbiranja zvoka les dobro vpliva na jakost zvoka in akustiko v prostoru. Absorpcija zvoka je močno povezana s strukturo materiala, površinsko obdelavo, vrsto montaže idr. Na primer, vezane in iverne plošče zagotavljajo absorpcijo zvoka v regiji nižjih frekvenc zvočnega spektra (<500 Hz), umetni porozni materiali pa so izredno učinkoviti v regiji srednjih in visokih frekvenc (2000–4000 Hz) (Beranek, 1960, cit. po Bucur, 2006).

V arhitekturni akustiki je splošno sprejeto, da težji materiali omogočajo boljšo zvočno, izolacijo še posebej, če npr. podvojimo težo materiala. Vendar na vibriranje stene poleg teže materiala vplivajo tudi drugi dejavniki, npr. naravne frekvence, ki jih povzročajo ukrivljeni valovi, in togost konstrukcije. Za zvočno izolacijo sten so bistveni površinska masa, kritična frekvenca in faktor dušenja. Kritična frekvenca je takrat, ko je hitrost ukrivljenih valov enaka hitrosti poševnega vala. Kritična frekvenca za les je nizka (pod 1000 Hz) (Čudina, 2014).

2.7.1 Masivni les

Raziskave o povezavi med koeficientom zvočne absorpcije in strukturo različnih vrst lesa so naredili npr. Watanabe in sod. (1967), Hayashi (1984) (cit. po Bucur, 2006) (slika 8). Uporabili so japonsko cedro, jelko, javor in vrbo. Meritve so opravljali na ploščah s premerom 31–100 mm in debelino 2–11 mm v frekvencah 90–6500 Hz. Vzorci so bili odrezani po glavni osi pod različnimi koti in položeni v zvočno polje. Spodnji graf prikazuje absorpcijski koeficient za javor. Pri $\alpha = 0^\circ$ frekvenčno območje ne vpliva toliko kot pri $\alpha = 90^\circ$. Na to vpliva gibanje zraka v lesnih celicah. Poleg tega je bil pri vseh vzorcih, ki so bili tanki (10 mm), absorpcijski koeficient majhen in dokaj konstanten pri vseh frekvencah (Bucur, 2006).



Slika 8: Koeficient zvočne absorpcije javorja glede na različne kote odreza (Watanabe in sod., 1967, po Bucur, 2006)

Egan (1988, cit. po Bucur, 2006) navaja, da je znižanje energije pri prenosu zvoka skozi material izguba pri prenosu zvoka. Bolj kot je material masiven, večja je prenosna izguba. Kljub temu pa je zaradi naključnih učinkov prenosna izguba pri nekaterih frekvencah veliko manjša, kot če bi jo določali le na podlagi mase materiala.

2.7.2 Lesni ploščni kompoziti

Med lesne ploščne kompozite uvrščamo plošče, ki se razlikujejo po zgradbi in morfologiji uporabljenih gradnikov.

Lesni ploščni kompoziti so enostavnejši inženirski lesni materiali, ker lahko z dezintegracijo lesa in integracijo v ploščne kompozite dosežemo želene lastnosti. Osnovni gradnik kompozita so lahko vlakno, iver ali furnir. Njegova struktura je lahko različna – z večjo prepletenostjo gradnikov se zmanjša delovanje po dolžini in širini. Prav tako je trdnost plošč izenačena v prečni vzdolžni smeri, kar zagotavlja dobre mehanske lastnosti (razen pri OSB), poleg tega pa so plošče tudi dobro odporne proti pokanju, vijačenju in žebljanju. Ker omogočajo izredno toplotno in zvočno izolativnost, lahko trdimo, da so ekološko sprejemljiv material. Uporabljajo se predvsem za izdelavo montažnih hiš, za predelne stene, podloge za parkete in talne obloge ter pri izdelavi ostrešij (Medved, 2010).

Opis osnovnih lesnih ploščnih kompozitov

- Furnirna plošča: Izdelana je iz lihega števila furnirnih listov, ki so med seboj zlepljeni pod pravim kotom. Lastnosti furnirnih plošč so odvisne predvsem od vrste lesa, ki je lahko bukovina, brezovina ali topolovina. Plošče imajo gostoto med 500 in 750 kg/m³ in debelino med 4 in 50 mm.
- OSB ali iverna plošča z usmerjenim iverjem: Izdelana je iz večjih kosov ploščatih iveri (smreka, bor) dolgih do 200 mm, širokih do 50 mm in debelih do 2 mm. Iveri so razdeljene glede na velikost, in sicer so v zunanjem sloju večje kot v srednjem. Plošče imajo gostoto med 550 in 750 kg/m³ in debelino med 6 in 40 mm.
- Iverne plošče: Narejene so iz dveh finejših zunanjih slojev in grobega srednjega sloja. Največkrat se za izdelavo uporablja les iglavcev. Izdelane plošče imajo gostoto med 550 in 750 kg/m³ in debelino med 4 in 40 mm. V gradbene namene se uporabljajo tudi iverne plošče z odprtinami, zaradi česar so lažje in imajo dobre akustične lastnosti.
- Vlaknene plošče: Njihova gostota je med 250 in 1000 kg/m³. Izdelane so iz vlaken, pridobljenih z razvlaknjevanjem sekancev različnih lesnih vrst. Za lahke vlaknene plošče se uporablja predvsem les iglavcev, za gostejše (nad 800 kg/m³) pa les trdih

listavcev. Izdelane plošče imajo gostoto med 250 in 1000 kg/m³ in debelino med 4 in 80 mm (Medved, 2010).

Wassilief (1996) je opisal zvočno absorpcijo materialov iz lesa. Zvočno absorpcijo materiala iz lesa je mogoče opisati s pomočjo Rayleighevega modela. V Rayleighevem modelu sta iverna in vlaknena plošča obravnavani kot večslojni material, ki je postavljen vzporedno glede na smer zvočnega valovanja. Pri opisanem modelu so uporabni naslednji parametri: upornost in upor proti zvočnemu toku, poroznost in gradbeni oziroma strukturni faktor.

Pri uporabi lesnih ploščnih kompozitov v gradbene namene morajo imeti poleg velike dimenzijske stabilnosti, majhnega debelinskega nabreka, mehanskih in toplotno izolacijskih lastnosti še dobre akustično izolacijske lastnosti. V Preglednici 4 so podane lastnosti lesnih ploščnih kompozitov (Medved, 2010).

Preglednica 4: Lastnosti lesnih ploščnih kompozitov (Medved, 2010)

	Furnirna plošča	OSB	Iverna plošča	Iverokal	Izolacijska vlaknena plošča	MDF	HDF
Gostota kg/m ³	650	650	650	400	300	650	850
Upogibna trdnost	+++	++	+	—	——	+	++
Modul elastičnosti	+++	++	+	—	——	+	++
Strižna trdnost	++	/	/	/	/	/	/
Razslojna trdnost	/	++	++	—	——	+	++
Sorpcijske lastnosti	++	+	—	——	——	—	□
Toplotna izolacija	□	□	□	+	+++	□	—
Zvočna izolacija	□	□	□	+	+++	□	—

+++ zelo dobro, ++ dobro, + zmerno dobro, □, — zmerno slabo, — slabo, —— zelo slabo

Vpliv debeline, gostote in vlage na akustične lastnosti

V Preglednici 4 vidimo, da je zvočna izolacija v večji meri odvisna od gostote plošč. Plošče, ki imajo manjšo gostoto, imajo boljšo zvočno izolacijo (npr. izolacijska vlaknena plošča). Ena od učinkovitih možnosti zvočne izolacije je uporaba panelnega sistema iz zunanjih furnirnih ali OSB plošč (zaradi dobrih drugih lastnosti – upogibna trdnost, elastičnost, strižna trdnost ipd.) in sredice iz izolacijske vlaknene plošče.

Ena od raziskav, ki sta jo avtorja Godshall in Davis opravila že leta 1969, se ukvarja z značilnostmi akustične absorpcije lesnih ploščnih materialov. Ti materiali se pogosto uporabljajo kot končni izdelki za notranjost stavb, ker imajo dobre akustične in absorpcijske lastnosti. Preizkuse so opravljali na različnih lesnih ploščah po metodi impedančne cevi. Glavno vprašanje raziskave je bilo, kakšen bi bil vpliv vlage na lastnosti absorpcije zvoka lesnih plošč. Vlažnost namreč vpliva na prenos in absorpcijo zvoka lesnih materialov. Vzorci so bili izpostavljeni trem različnim vlažnostim (30 %, 50 % in 80 %) pri sobni temperaturi. Rezultati niso pokazali pomembnih sprememb v koeficientu absorpcije zvoka, ne glede na vlažnost, material in frekvenco. Pojavile so se sicer majhne spremembe, ki pa ne pomenijo zaznavnega trenda. Avtorja sklepata, da značilnosti zvočne absorpcije lesnih materialov niso odvisne od relativne vlažnosti v območju 30 %–80 % pri sobni temperaturi.

Ob tem sta ugotovila, da imajo gladke površine preskušancev nižje vrednost koeficienta absorpcije zvoka kot pa preskušanci z grobimi površinami in luknjami:

- preskušanec izolacijske stropne plošče brez lukenj ni pokazal boljših vrednosti koeficienta absorpcije zvoka kot iverne in vezane plošče;
- preskušanec izolacijske stropne plošče z luknjami in razpokami ima večji koeficient absorpcije zvoka pri visokih frekvencah;
- preskušanec perforirane lesne plošče, ki ima zadaj 2,5 mm zračnega prostora, ima veliko višjo vrednost koeficienta absorpcije zvoka kot katera druga gladka površina;
- perforiranemu preskušancu lesne plošče, ki ima zadaj dodanih 2,5 mm lesnih vlaken, se prav tako poveča vrednost koeficienta absorpcije zvoka, kar je enako vrednosti 5 cm lesnih vlaken.

V študiji o ivernih ploščah Xu in sod. (2004) navajajo povezavo med koeficientom absorpcije zvoka, frekvenco zvočnega valovanja ter gostoto in debelino plošč (preglednica 5). Ugotovili so, da se je koeficient absorpcije zvoka povečal pri manjšanju gostote ivernih plošč, kar je posledica majhne gostote ter povečanje trenja med ploščo in zvočnim valovanjem. Ugotovili so tudi, da se je koeficient absorpcije zvoka z večanjem gostote nižal. Pojasnjujejo še, da so plošče z gostoto $0,15 \text{ g/cm}^3$ primerne za izolacijske plošče ter da se lahko koeficient absorpcije primerja z izolativnostjo plošče.

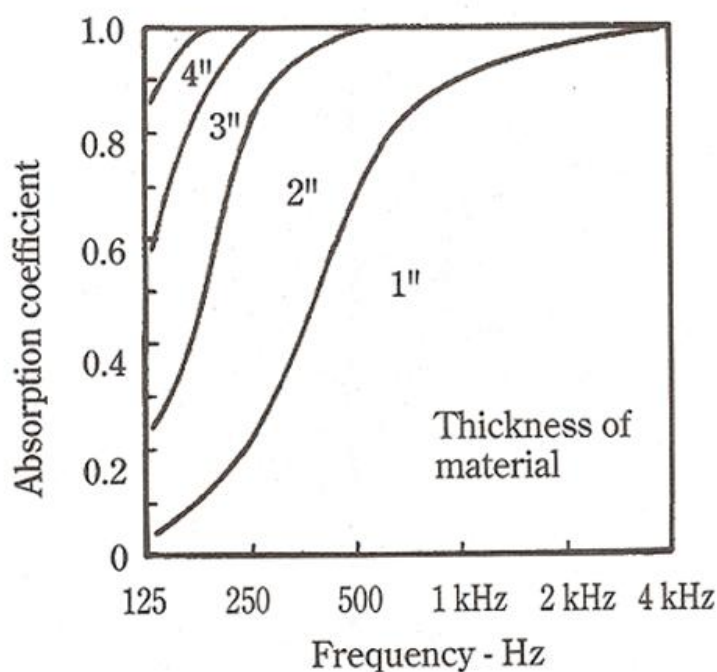
Preglednica 5: Koeficient absorpcije α lesnih materialov (Xu in sod., 2004)

Material	gostota (g/cm^3)	debelina (mm)	frekvenca zvoka (Hz)				
			125	250	500	1000	2000
Masivni les (bor)	0,52	19	0,09	0,1	0,12	0,08	0,08
Vežan les	0,55	12	0,25	0,14	0,07	0,04	0,1
Iverna plošča	0,65	20	0,26	0,08	0,08	0,06	0,08
Nizko gostotna iverna plošča	0,3	30	0,06	0,15	0,37	0,65	0,52
Izolacijska vlakninska plošča	0,22	12,7	0,04	0,06	0,14	0,38	0,69
Nizko gostotna vlakninska plošča	0,25	12	0,006	0,02	0,08	0,35	0,71
Vežan les	0,55	9,5	0,28	0,22	0,17	0,09	0,1

V raziskavi vlaknenih plošč so Kawasaki in sod. (1998) ugotovili, da je koeficient absorpcije zvoka vlaknenih plošč z nizko gostoto v glavnem odvisen od gostote in frekvence zvočnega valovanja. Pri ploščah z nizko gostoto ($0,05\text{--}0,2 \text{ g/cm}^3$) so ugotovili, da se koeficient absorpcije zvoka postopno večja s frekvenco zvočnega valovanja in gostoto plošče. Pri ploščah z gostoto nad $0,30 \text{ g/cm}^3$ pa se je koeficient absorpcije zvoka manjšal do frekvence 1250 Hz, za tem pa spet povečal. Ugotovili so, da ima pri ploščah z nizko gostoto velik pomen količina vlaken, posledica pa je v nižjem koeficientu trenja na površini plošče. Zaradi zmanjšane količine zvočne energije, ki se pretvori v toplotno energijo, je posledično koeficient trenja nižji. Pojasnjujejo pa, da se zvok pri ploščah z gostoto, višjo od $0,30 \text{ g/cm}^3$, odbije, in sicer

zaradi zaprtosti površine in onemogoča penetracijo zvočnega valovanja s površine plošče v globino.

Everest (2001) prikazuje vpliv različnih debelin pri različnih frekvencah na koeficient absorpcije zvoka, pri katerem je absorbent pritrjen neposredno na podlago. Pričakuje se, da debelejši material bolje absorbira zvok, kar pa velja za nizke frekvence.

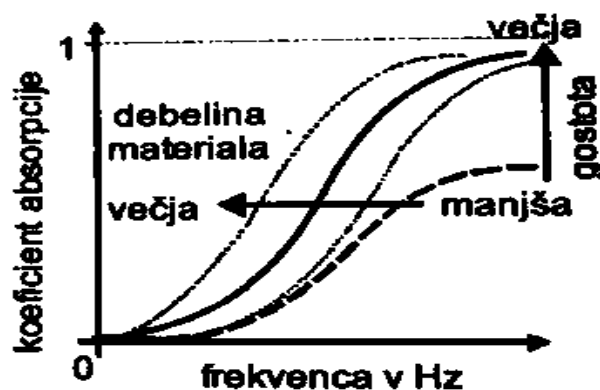


Slika 9: Vpliv različnih debelin pri različnih frekvencah na koeficient absorpcije zvoka (Everest, 2001)

Iz grafa (slika 9) je razvidno, da je razlika v absorpcijskem koeficientu pri frekvenci 500 Hz majhna in da ne pride do večje absorpcije zvočnega valovanja, če debelino povečamo z 2 palcev (50,8 mm) na 4 palce (101,6 mm). V svoji študiji absorpcijskih materialov Seddeq (2009) pojasnjuje, da je pri nizkih frekvencah debelejši material boljši absorber zvoka. Posledica je, da je pri nizkih frekvencah večja valovna dolžina zvoka in pri višjih valovnih dolžinah zvoka lahko debelejši material bolj absorbira zvok.

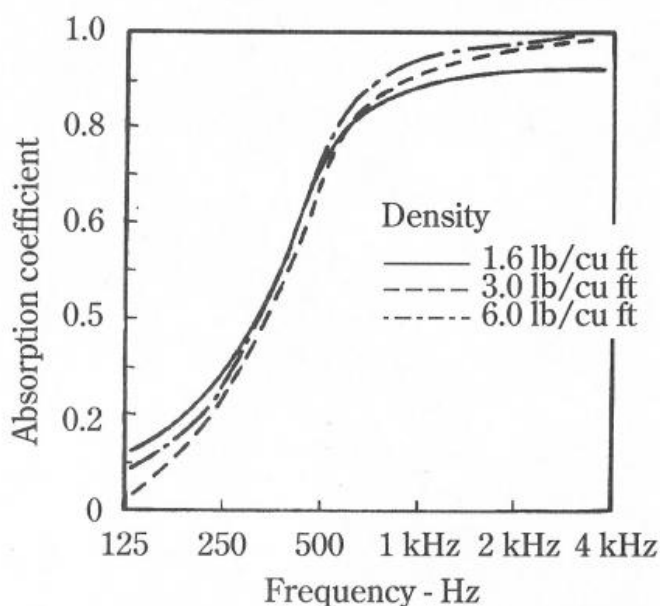
Čudina (2014) v raziskavi vpliva debeline absorpcijskega materiala na koeficient absorpcije pojasnjuje, da se pri večji gostoti absorpcijskega materiala zviša koeficient absorpcije, medtem ko večja debelina absorpcijskega materiala pomakne koeficient absorpcije proti

nižjim frekvencam. To pomeni, da bi lahko z zadostno debelino dušili hrup pri vseh frekvencah, vendar se v praksi zaradi ekonomskih razlogov omejujemo na debeline od 20 cm in največ do 30 cm, oziroma na frekvence nad 1000 Hz.



Slika 10: Vpliv debeline absorpcijskega materiala na koeficient absorpcije (Čudina, 2014)

Everest (2001) pojasnjuje vpliv gostote in debeline ter razporeditev vlaken na koeficient absorpcije zvoka. Graf (slika 11) prikazuje relativno majhno razliko v absorpcijskem koeficientu, čeprav gostota variira v razponu približno od 4 do 1. Pri nizki gostoti so vlakna razporejena z relativno velikim razmikom, kar vpliva na boljšo absorpcijo zvoka. Pri izredno gostih ploščah pa je površinski odboj zvoka velik, kar pomeni, da je absorpcija zvoka majhna.



Slika 11: Vpliv gostote in debeline na koeficient absorpcije zvoka (Everest, 2001)

2.7.3 Drugi materiali

Zulkifli in sod. (2010) so preučevali učinek poroznega sloja kokosovih vlaken in perforirane plošče na koeficient absorpcije zvoka. Pojasnjujejo, da sloj kokosovih vlaken kot absorpcijska podlaga perforirane plošče dobro vpliva na absorpcijo zvoka in da ima koeficient absorpcije zvoka visoke vrednosti tako pri nizkih kot tudi pri visokih frekvencah. Rezultati kažejo, da ima porozni sloj kokosovih vlaken debeline 20 mm maksimalno vrednost koeficienta absorpcije zvoka 0,97 v območju frekvenc 2750–2825 Hz. Ugotovili so, da dajejo kokosova vlakna s perforirano ploščo večjo vrednost koeficienta absorpcije zvoka pri nižjih frekvencah (600–2400 Hz). Pojasnjujejo pa, da je optimalna vrednost koeficienta absorpcije zvoka za kokosova vlakna s perforirano ploščo okoli 0,94–0,95 v frekvenčnem razponu 2600–2700 Hz. V podobni raziskavi kokosovih vlaken pa Zulkifli in sod. (2008) navajajo, da je optimalna vrednost koeficienta absorpcije zvoka kokosovih vlaken s perforirano ploščo 0,7–0,8 v frekvenčnem območju 1000–1800 Hz in brez perforirane plošče 0,78 pri frekvenci 2000 Hz.

Podobno raziskavo so naredili Nor in sod. (2004), v kateri so preizkušali kokosova vlakna na absorpcijo zvoka s primerjavo mikroperforiranih plošč ter večslojnih plošč kokosovih vlaken pri različnih frekvencah. Pri prvem testu so primerjali koeficient absorpcije zvoka vzorcev kokosovih vlaken debeline 20 mm brez zračnih prostorov za ploščo in z zračnim prostorom za ploščo, ki je bil 50 mm. Ugotovili so, da ima vzorec brez zračnih prostorov koeficient absorpcije zvoka nižji po celotnem spektru frekvenc. Pri drugem testu so primerjali koeficient absorpcije zvoka vzorcev kokosovih vlaken z mikroperforirano ploščo aluminija debeline 1 mm in vzorcem brez mikroperforirane aluminijaste plošče. Rezultati kažejo, da je bil pri vzorcu z mikroperforirano aluminijasto ploščo vrhunec koeficienta absorpcije zvoka pri nižjih frekvencah in koeficient absorpcije zvoka se je znižal v območju visokih frekvenc, kar je posledica resonančne frekvence mikroperforirane aluminijaste plošče. Pri zadnjem testu so primerjali koeficient absorpcije zvoka večslojnih vzorcev kokosovih vlaken z mikroperforiranimi aluminijastimi ploščami in brez mikroperforiranih aluminijastih plošč. Ugotovili so, da je v primeru uporabe mikroperforiranih plošč koeficient absorpcije zvoka močno upadal v območju visokih frekvenc. Pojasnjujejo, da je zato večslojne plošče kokosovih vlaken smiselno uporabiti v nizkem spektru frekvenc. V skupnem pogledu absorpskega materiala iz kokosovih vlaken pa menijo, da so kokosova vlakna zelo dober absorber v vseh področjih frekvenc.

Ismail in sod. (2010) so raziskali akustične lastnosti črne sladkorne palme *Arenga pinnata*. Testirali so koeficient absorpcije zvoka plošč pri različnih debelinah (10 mm, 20 mm, 30 mm in 40 mm) ter vzorce primerjali z vzorci komercialnih palm in bambusa. Ugotovili so, da je imel vzorec palme *Arenga pinnata* višje vrednosti koeficienta absorpcije zvoka od ostalih materialov (0,75–0,9) v območju frekvenc 2000–5000 Hz. Nekoliko nižje vrednosti je imel v spektru nizkih frekvenc. Pojasnjujejo, da je optimalna debelina za vrednost koeficienta absorpcije zvoka 40 mm.

Med dobre izolacijske materiale so AL-Rahman in sod. (2012) uvrstili zvočne izolacijske plošče iz palmovih vlaken. V raziskavi so ugotovili, da so imeli vzorci dobre lastnosti tako pri nizkih kakor tudi pri visokih frekvencah. Pri debelejših vzorcih se je pri nizki in visoki frekvenci z dodatkom lateksa koeficient absorpcije zvoka bistveno povečal, in sicer zaradi togosti in poroznosti materiala.

Preglednica 6: Koeficienti absorpcije zvoka pri različnih debelinah (AL-Rahman in sod., 2012)

Debelina vzorca (mm)	Frekvenca (Hz)	Koeficient absorpcije zvoka
20	3884	0,64
30	4978–5000	0,83
40	4950–5000	0,84
50	4950–5000	0,86

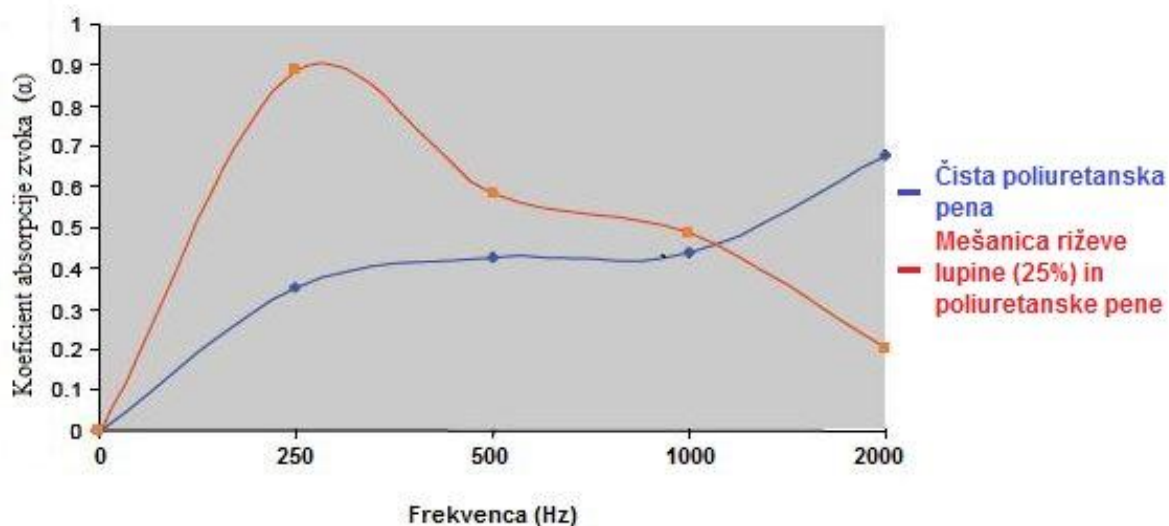
AL-Rahman in sod. (2012) navajajo vpliv gostote plošč palmovih vlaken na koeficient absorpcije zvoka pri enaki debelini. Rezultati kažejo, da povečanje gostote vpliva na povečanje koeficienta absorpcije zvoka, še posebej pri visokih frekvencah, pri nizkih frekvencah pa je ta razlika zelo majhna.

Saadatinia idr. (2008) so raziskali dve vrsti kmetijskih ostankov (pšenice in slame) z mešanjem zrn trepetlike za uporabo zvočnih izolacijskih plošč. Plošče so bile narejene z različnimi deleži mešanice zrn trepetlike in različnih gostot. Testiranje je potekalo pri različnih frekvencah (250, 500, 1000, 2000 in 5000 Hz). Ugotovili so, da se do frekvence zvoka 2000 Hz absorpcija zvoka poveča, na 4000 Hz pa se koeficient absorpcije zvoka zniža. Najboljšo absorpcijo zvoka pod frekvenco 1000 Hz je imela plošča z gostoto 0,4 g/cm³ (30 %

slame). Pri absorpciji zvoka pri frekvenci nad 1000 Hz je bila najboljša plošča z gostoto $0,2 \text{ g/cm}^3$ (30 % slame).

Yang in sod. (2003) opisujejo preizkus zvočne izolativnosti plošč, narejenih iz kombinacije lesnih iveri in riževe slame. Ugotovili so, da bolj porozni materiali v širšem spektru frekvenc bolje izolirajo zvok. Pojasnjujejo, da nizka gostota sama po sebi ne vpliva tako intenzivno na akustične lastnosti materiala. Z višanjem frekvence zvočnega valovanja se zvišuje zvočna izolativnost materiala.

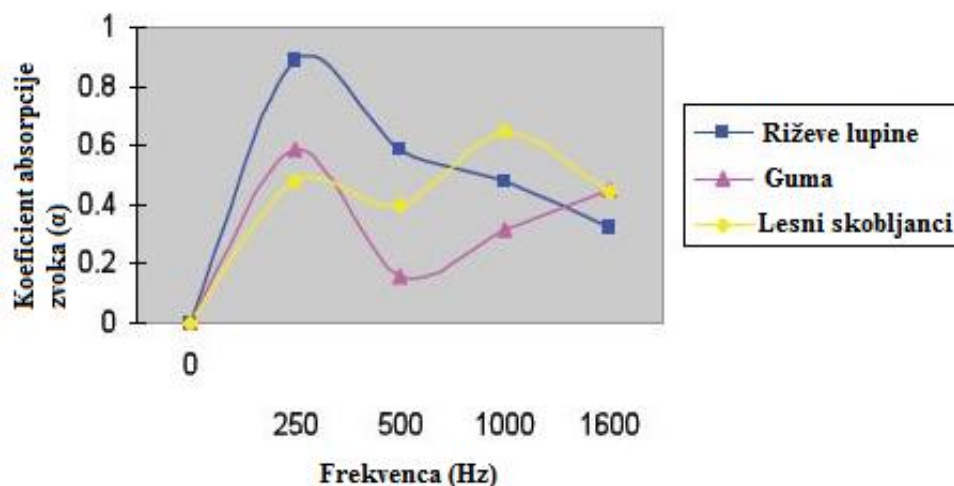
V študiji akustičnih lastnosti ostankov riževih lupin Mahzan in sod. (2009) opisujejo vpliv mešanice riževe lupine s poliuretansko peno ter primerjavo riževe lupine z gumo in lesenimi oblanci na koeficient absorpcije zvoka. Test je bil najprej narejen med mešanico riževih lupin (25 %) in poliuretanske pene ter čisto poliuretansko peno. Rezultati kažejo, da je bil koeficient absorpcije zvoka višji pri mešanici riževih lupin (25 %) s poliuretansko peno pri nizkih frekvencah. Pri višjih frekvencah je imela višje vrednosti koeficienta absorpcije zvoka čista poliuretanska pena.



Slika 12: Primerjava mešanice riževih lupin (25 %) in poliuretanske pene s čisto poliuretansko peno (Mahzan in sod., 2009)

Pri primerjavi koeficienta absorpcije zvoka ostankov riževih lupin z gumo in lesnimi skobljanci so ugotovili, da imajo v območju frekvence od 0 do 500 Hz ostanki riževih lupin višje vrednosti koeficienta absorpcije zvoka kot pa guma in lesni skobljanci. Pojasnjujejo, da

so ostanki riževih lupin potencial iz ekološkega vidika, saj se ta odpadni material lahko uporablja kot absorpcijski materiali na področju nizkih frekvenc (Mahzan in sod., 2009).



Slika 13: Primerjava koeficienta absorpcije zvoka za riževe lupine, gumo in lesne skobljance (Mahzan in sod., 2009)

V raziskavi zvočno izolacijskih plošč avtor Dalmeijer (2013) ugotavlja, da je slama odličen zvočni izolator. Vzorec je bil sestavljen iz kombinacije bele slame, zemlje in ometa ter izveden po standardu ISO 140-3. Bela slama je bila debela 460 mm in je imela gostoto 120–130 kg/m³. Vzorec je imel na eni strani slame omet debeline 25 mm, na drugi strani slame pa omet debeline 35 mm. Avtor prikazuje rezultat vrednosti vzorca, ki je imel 53 dB pri gostoti 120–130 kg/m³ in pojasnjuje, da je vzorec dober zvočni izolator pri spektru nizkih frekvenc ter da ima bistveno boljše rezultate od večine materialov, ki imajo višjo gostoto in slabšo vrednost dB.

Zvočne lastnosti absorpcijskih materialov so pomembne ne le za zmanjšanje hrupa, ampak tudi za nadzor odmevnega časa v koncertnih dvoranah in drugih akustičnih prostorih. Avtorji Na in sod. (2007) so preučili možnosti uporabe mikrovladen tkanin kot zvočnega absorpcijskega materiala. Testirali so tkanine iz mikrovladen in primerjali koeficiente absorpcije zvoka s konvencionalnimi tkaninami. Rezultati so pokazali, da je absorpcija zvoka boljša pri tkaninah iz mikrovladen in to pri isti debelini ter masi. Ugotovljeno je bilo, da je imela gostota tkanine največji vpliv na koeficient zvoka. Pri gostoti 0,14 g/cm³ je bila vrednost koeficienta absorpcije zvoka najvišja.

V podobni raziskavi vpliva mikrovlagen na absorpcijo zvoka so Krucinska in sod. (2014) preučili bombaž in mikrovlakna celuloze. Ugotovili so, da se z dodajanjem mikrovlagen celuloze in bombaža poveča absorpcija zvoka v materialu, kar vpliva na boljši koeficient absorpcije zvoka. Že pri 20-odstotni vsebnosti mikrovlagen v naravnem materialu se koeficient absorpcije zvoka bistveno poveča. Pojasnjujejo, da pojav povečanja absorpcije nastane zaradi mikrostruktur in votlosti teh vlaken.

V raziskavi luffa vlaken in odpadkov preje so Karademir in sod. (2011) testirali vpliv vlaken luffe in preje na koeficient absorpcije zvoka. Ugotovili so, da s 30-odstotnim dodatkom vlaken luffe in preje v območju frekvenc od 3400 do 4750 Hz povzroči bistveno zvišanje koeficienta absorpcije zvoka. Pojasnjujejo, da dodana vlakna luffe in preje vzorcu izboljšajo koeficient absorpcije zvoka po celotnem spektru frekvenc.

Arenas in Crocker (2010) ugotavljata, da se pri vlaknatih materialih del absorbirane energije poveča, saj je za vibracijo vlaken v notranjosti potrebna dodatna energija, ki pa se odraža v večji absorpciji zvoka.

3 MATERIALI IN METODE

Pri eksperimentalnem delu smo uporabili lesne ploščne kompozite in izolacijske materiale, ki se uporabljajo v lesni gradnji, ter iz njih pripravljene panelne sisteme. Absorpcijo zvoka smo določili tako celotni plošči kot tudi posameznemu sloju pri frekvencah med 50 in 16000 Hz.

Dobljene vrednosti smo nato razdelili v tri območja, in sicer v nizko, srednje in visoko območje. Razdelitev je temeljila na frekvencah, pri katerih smo opravljali meritve. Frekvence smo določili glede na že opravljene raziskave.

- V nizkem območju so bile frekvence: 52, 63, 80, 100, 125, 160, 200 in 250 Hz (Osipov in sod., 1997).
- V srednjem območju so bile frekvence: 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150 in 4000 Hz.
- V visokem območju so bile frekvence: 5000, 6300, 8000, 10000, 12000, 14000 in 16000 Hz.

3.1 MATERIALI

3.1.1 Plošče izdelane v laboratoriju

Za izdelavo plošč smo uporabili celulozna vlakna ZIMICELL, ki so imela 3-odstotno vlažnost. Za oblepljanje vlaken smo uporabili urea formaldehidno lepilo in utrjevalec amonijev sulfat. Delež lepila je bil 15-odstoten, delež utrjevalca pa 3-odstoten. S pomočjo stroja za oblepljanje smo celulozna vlakna oblepili in jih natresli v lesen okvir dimenzij 500 x 500. Pogačo smo stisnili v stiskalnici s 50 bar. Postopek smo ponovili še za druge plošče in vsako stisnili na različno debelino. Dobili smo plošče, ki so se razlikovale po debelini in gostoti. Debelino plošč smo določili s pomočjo različno debelih letev, ki smo jih vstavili v stiskalnico pred stiskanjem. Izjema so bile 4, 7 in 8 mm plošče, ki smo jih stisnili brez letev. Razlika v gostoti plošč je nastala zaradi različne količine celuloznih vlaken v posamezni plošči (preglednica 7).

Preglednica 7: Gostote in debeline laboratorijskih plošč

Debelina (mm)	Gostota (g/cm ³)
4	0,473
7	1,049
8	0,529
17	0,44
18	0,582
50	0,1
76	0,103

Debelina plošč je bila izmerjena z mikrometrom, in sicer smo debelino izmerili na robovih.

Za posamezno ploščo smo torej opravili štiri meritve.

**Slika 14: Postopek izdelave laboratorijskih plošč**

3.1.2 Komercialni konstrukcijski in izolacijski materiali

Komercialne konstrukcijske in izolacijske materiale (ploščne kompozite) smo uporabili za primerjavo in zato, da smo dobili referenčne vrednosti. Kasneje so bili uporabljeni v panelnem sistemu. Ti materiali so imeli naslednje značilnosti (preglednica 8):

Preglednica 8: Značilnosti komercialnih plošč

Vrsta plošče	Debelina (mm)	Gostota (g/cm ³)	Lepilo
Trislojna iverna	12	0,715	urea formaldehidno
Trislojna iverna	20	0,531	urea formaldehidno
Trislojna iverna	22	0,615	melamin formaldehidno
OSB	18	0,654	urea formaldehidno
Vlaknena	19	0,764	urea formaldehidno
Furnirna	17	0,786	urea formaldehidno
Izolacijska plošča iz lesnih vlaken	50	0,154	urea formaldehidno
Lahki ploščni kompozit s sredico iz papirnatega satovja	50	0,336	urea formaldehidno

3.1.3 Panelni sistemi

Izdelali smo dva trislojna panelna sistema. Pri vsakem sta bili zunanji plošči iz istega materiala. Zunanje plošče so bile: iverna, konstrukcijska, furnirna in OSB plošča.

1. panelni sistem

Za sredico smo uporabili celulozno ploščo izdelano v laboratorju debeline 50 mm in gostote 0,100 g/cm³. Za zunanji plošči smo uporabili:

- iverno ploščo debeline 20 mm in gostote 0,531 g/cm³ (slika 17);
- konstrukcijsko ploščo debeline 22 mm in gostote 0,70 g/cm³ (slika 15);
- furnirno ploščo debeline 17 mm in gostote 0,786 g/cm³ (slika 18);
- OSB ploščo debeline 18 mm in gostote 0,654 g/cm³ (slika 16).



**Slika 17: Celulozna in
iverna plošča**



**Slika 15: Celulozna in
konstrukcijska plošča**



**Slika 18: Celulozna in
furnirna plošča**



**Slika 16: Celulozna in
OSB plošča**

2. panelni sistem

Za sredico smo uporabili komercialno klasično izolacijsko ploščo debeline 50 mm in gostote $0,154 \text{ g/cm}^3$. Za zunanji plošči smo uporabili:

- iverno ploščo debeline 20 mm in gostote $0,531 \text{ g/cm}^3$ (slika 19);
- konstrukcijsko ploščo debeline 22 mm in gostote $0,70 \text{ g/cm}^3$ (slika 22);
- furnirno ploščo debeline 17 mm in gostote $0,786 \text{ g/cm}^3$ (slika 21);
- OSB ploščo debeline 18 mm in gostote $0,654 \text{ g/cm}^3$ (slika 20).



**Slika 19: Klasična in
iverna plošča**



**Slika 22: Klasična in
konstrukcijska plošča**



**Slika 21: Klasična in
furnirna plošča**



**Slika 20: Klasična in OSB
plošča**

3.2 METODE DELA

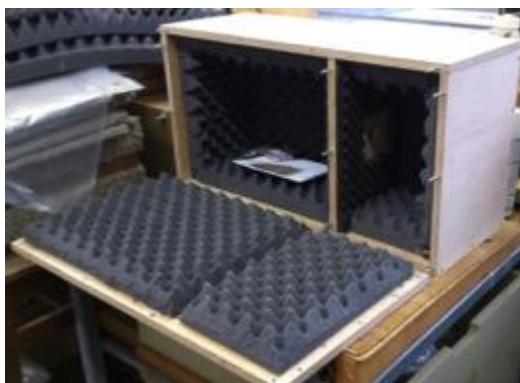
Za izvedbo naloge smo uporabili lesne ploščne kompozite in izolacijske materiale, ki se uporabljajo v lesni gradnji, ter iz njih pripravljene panelne sisteme. Iz plošč smo izžagali vzorce dimenzij 100 x 100 mm. Akustične lastnosti smo najprej preverjali na posamezni plošči, nato pa na celotnem panelnem sistemu pri frekvencah med 50 Hz in 16000 Hz. S testiranjem reference smo dobili jakost zvoka skozi komoro brez plošče, nato pa smo testirali plošče in dobili jakost zvoka, ki je prišel skozi ploščo. Za izračun absorpcije zvoka smo uporabili jakost zvoka reference in jakost zvoka pri prehodu skozi ploščo (enačba 13):

$$\text{Absorpcija zvoka} = \frac{j_{pl}}{j_{ref}} \cdot 100 \% \quad \dots(13)$$

3.2.1 Komora

Komoro smo izdelali iz vezanih plošč debeline 18 mm. Razdeljena je bila na dva prostora z namenom, da bi bil mikrofona, ki zaznava zvočni tlak, izoliran od zunanjih šumov. Sprednja stranica zaradi lažje vstavitve vzorcev v komoro ni bila fiksno pritrjena, po vstavitvi vzorcev pa smo jo privijali na konstrukcijo komore (Slika 24). Komora je imela dimenzije 750 x 400 x 280 mm. Notranji prostor komore, kjer je bil vir zvoka (zvočniki) (Slika 25), je imel dimenzije 490 x 364 x 264 mm in prostornino 0,047 m³. Notranji prostor, kjer je bil mikrofona (Slika 26), pa je imel dimenzije 240 x 364 x 264 mm in prostornino 0,023 m³. Vezane plošče so bile na notranji strani komore oblepljene s plamofonom. Plamofon je penast absorbent, ki se uporablja za absorpcijo zvoka. Komoro smo oblepili zato, da smo v njej zmanjšali odmevni čas zvoka in komoro akustično omejili od zunanjega prostora. V pregradno stranico, ki loči vir zvoka od mikrofona, smo izvrtali luknjo s premerom 30 mm (Slika 23). Ta služi širjenju zvoka iz enega prostora komore v drugi prostor komore brez ovir. V prostor komore, kjer je mikrofona, smo vstavljali testirne plošče in panelne sisteme. Vse vzorce smo pritrdili na pregradno stranico s trakom iz gume. Ta namreč ne prenaša zvočnih vibracij na konstrukcijo komore in posledično ne vpliva na rezultate testiranja plošč. Mikrofona je bil vstavljen v manjši prostor iz zunanje strani skozi luknjo s premerom 10 mm na eni od stranic v komoro. Zaradi visoke občutljivosti mikrofona se ta ni dotikal komore in je bil pritrjen na stojalo, ki je

bilo zunaj komore. Zvočniki so bili pritrjeni na vezano ploščo, ta pa je bila postavljena med stranice v komori. Celotna komora je bila postavljena na površino s pokritim plamofonom. Plamofon je vse vibracije, ki so nastale, absorbiral. Zvočniki in mikrofoni so bili povezani z računalnikom (Slika 27).



Slika 24: Komora z ločeno sprednjo stranico



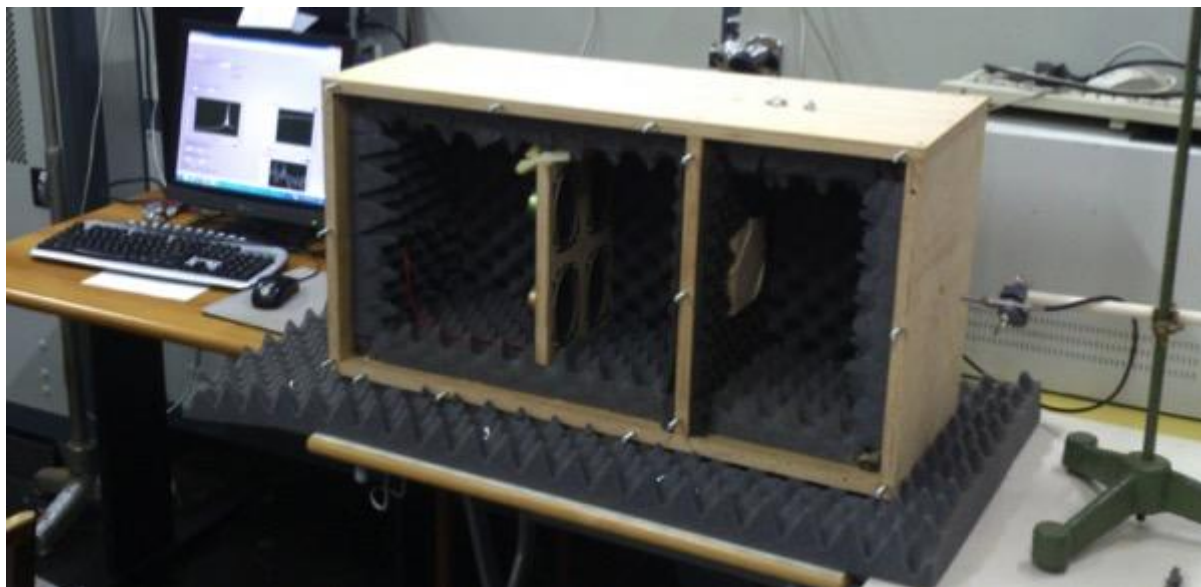
Slika 23: Prostor za nameščanje vzorcev



Slika 26: Mikrofoni



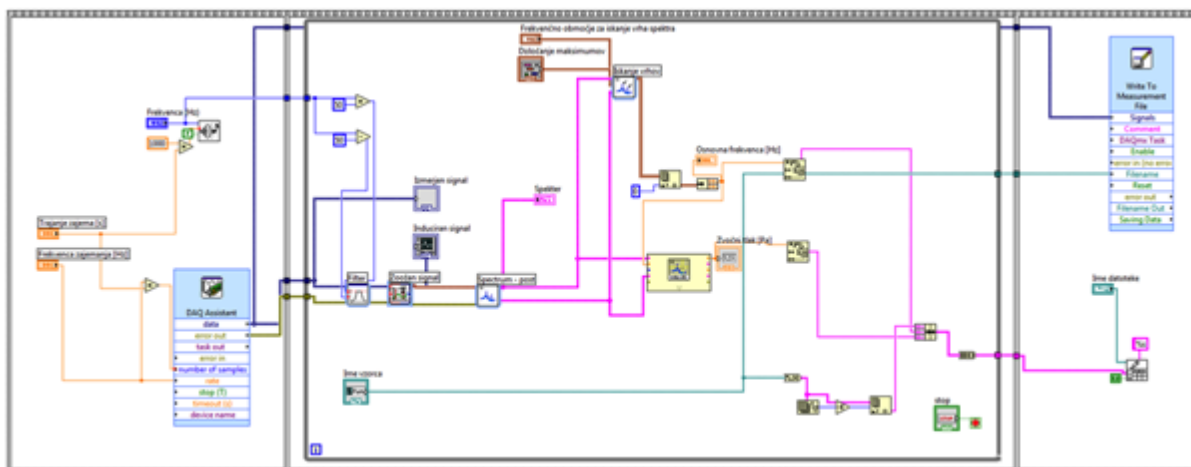
Slika 25: Zvočniki



Slika 27: Celotna komora

3.2.2 Oprema za akustične meritve in analizo

Za meritve in snemanje zvočnega signala smo uporabili kondenzatorski mikrofoni PCB–130D20, ki smo ga povezali z osebnim računalnikom 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 s 51200 vzorci na sekundo. Nadaljnja obdelava in analiza signalov je potekala v programu LabVIEW 8.0 ® (slika 28).



Slika 28: Shema meritve

3.2.3 Izvajanje meritev

Pred testiranjem vzorcev smo opravili test brez vzorca in dobili referenco. Vse meritve smo opravili v frekvenčnem območju med 50 in 16000 Hz. V komoro smo vstavili vzorec in ga pritrdili z gumijastim trakom, nato smo z vijaki pritrdili sprednjo stranico komore in vstavili mikrofona. Z računalniškim programom smo generirali zvočni signal, ki je trajal 3 s. Pri vsaki frekvenci smo na istem vzorcu test ponovili trikrat. Po vsaki opravljeni meritvi smo iz komore odstranili mikrofona in vzorec. Podatki so se sproti shranjevali v računalnik.

Pri panelnih sistemih smo za zunanje sloje uporabili iverno, konstrukcijsko, furnirno in OSB ploščo, za sredico pa smo uporabili klasično izolacijsko ploščo in laboratorijsko celulozno ploščo. Izmed vseh narejenih celuloznih plošč smo uporabili ploščo debeline 50 mm, zaradi iste debeline, kot je bila klasična izolacijska plošča in zaradi njene kompaktnosti. Panelni sistem smo testirali v treh korakih. Najprej smo testirali prvi sloj, nato smo mu dodali sredico in v zadnjem koraku dodali še zadnji sloj.

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

Pri eksperimentu smo ugotovili, da je obnašanje plošč odvisno od zgradbe in njihove gostote, kar je prikazano v spodnjih preglednicah. Rezultati so prikazani v nizkem, srednjem in visokem frekvenčnem območju.

4.1 DOLOČITEV IZHODIŠČNE TOČKE

Vse materiale smo merili pri istih frekvencah. Referenčna meritev, torej meritev brez vmesnih plošč, nam je pokazala, koliko zvoka preide iz prostora A v prostor B, kar je predstavljalo osnovo za analizo podatkov (Preglednica 9).

Preglednica 9: Osnovna meritev

Frekvenca [Hz]	Referenca [Pa]
52	103,77
63	101,02
80	102,07
100	103,18
125	102,98
160	107,14
200	104,43
250	89,76
315	75,03
400	79,01
500	77,89
630	74,79
800	65,39

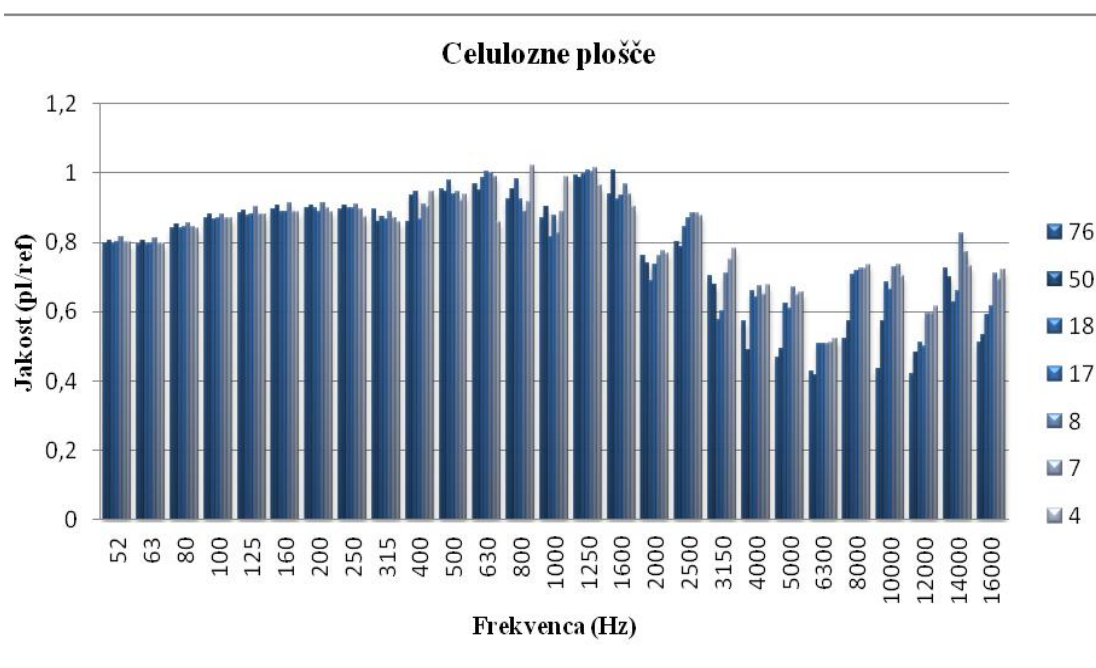
1000	62,11
1250	73,93
1600	64,50
2000	71,83
2500	74,36
3150	74,87
4000	80,86
5000	76,84
6300	71,30
8000	74,82
10000	73,98
12000	71,87
14000	48,72
16000	69,55

4.2 REZULTATI CELULOZNIH PLOŠČ

Uporabili smo vzorce različnih debelin in gostot, da bi preverili vpliv teh lastnosti na absorpcijo zvoka. Glede na to, da se zaradi stiskanja plošče po zgradbi razlikujejo, smo preverili tudi vpliv zgradbe na absorpcijo zvoka. Testirali smo celulozne plošče različnih debelin in gostot (preglednica 10, priloga 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7).

Preglednica 10: Absorpcija zvoka celuloznih plošč

Frekvenca [Hz]	Absorpcija zvoka [Pa]						
	4 mm	7 mm	8 mm	17 mm	18 mm	50 mm	76 mm
52	0,80	0,80	0,82	0,80	0,80	0,81	0,80
63	0,80	0,80	0,81	0,80	0,79	0,80	0,79
80	0,84	0,84	0,86	0,84	0,84	0,85	0,84
100	0,87	0,87	0,88	0,87	0,87	0,88	0,87
125	0,88	0,88	0,90	0,88	0,88	0,89	0,88
160	0,89	0,89	0,91	0,89	0,89	0,90	0,89
200	0,89	0,90	0,91	0,89	0,90	0,91	0,90
250	0,87	0,89	0,91	0,90	0,90	0,90	0,89
315	0,86	0,87	0,89	0,87	0,87	0,86	0,89
400	0,94	0,90	0,91	0,86	0,94	0,93	0,86
500	0,94	0,92	0,94	0,94	0,98	0,95	0,95
630	0,86	0,99	1,00	1,00	0,99	0,95	0,97
800	1,02	0,92	0,89	0,92	0,98	0,95	0,92
1000	0,99	0,89	0,83	0,88	0,81	0,90	0,87
1250	0,96	1,02	1,00	1,01	1,00	0,99	0,99
1600	0,90	0,94	0,97	0,94	0,92	1,01	0,94
2000	0,77	0,77	0,76	0,74	0,69	0,74	0,76
2500	0,87	0,88	0,89	0,87	0,84	0,79	0,80
3150	0,78	0,75	0,71	0,60	0,58	0,68	0,70
4000	0,68	0,65	0,67	0,64	0,66	0,49	0,57
5000	0,66	0,65	0,67	0,61	0,62	0,49	0,47
6300	0,52	0,51	0,51	0,51	0,51	0,42	0,43
8000	0,74	0,73	0,73	0,72	0,71	0,57	0,52
10000	0,70	0,73	0,73	0,66	0,68	0,57	0,44
12000	0,62	0,59	0,59	0,50	0,51	0,48	0,42
14000	0,73	0,77	0,82	0,66	0,63	0,70	0,72
16000	0,72	0,69	0,71	0,62	0,59	0,53	0,51



Slika 29: Graf celuloznih plošč

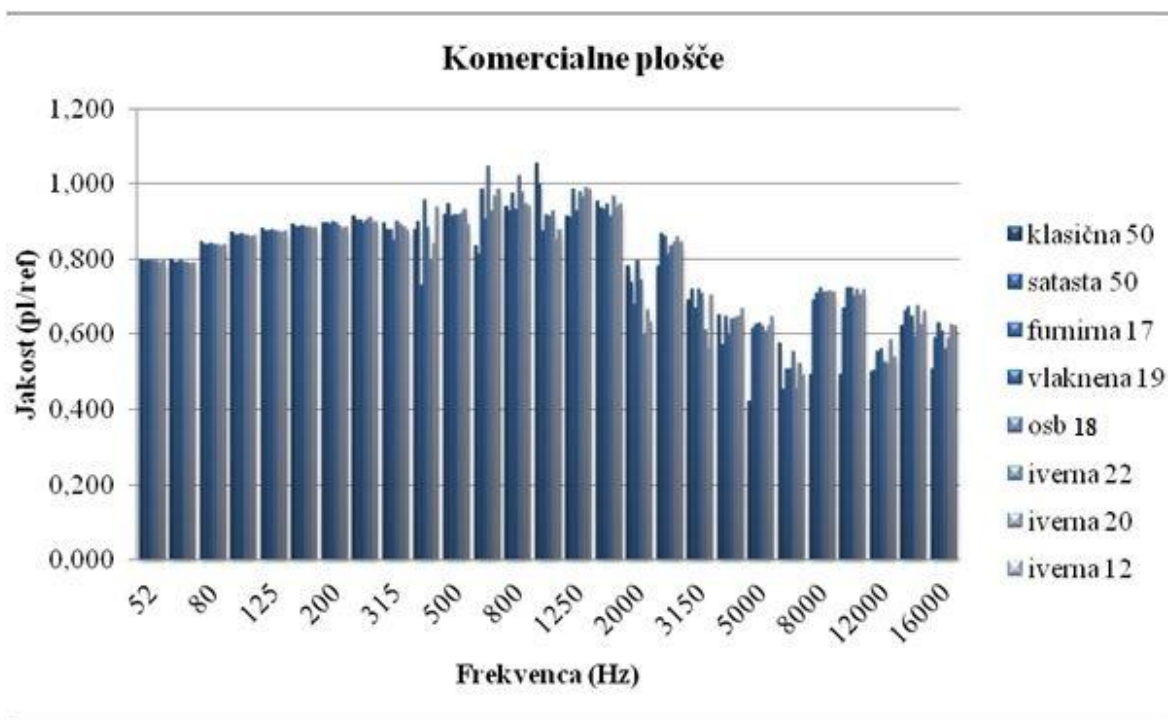
Graf (slika 29) kaže, da je v nizkem frekvenčnem območju razlika med ploščami minimalna oziroma skoraj neopazna. Vidimo, da gostota in debelina vplivata na absorpcijske lastnosti predvsem v srednjem in visokem frekvenčnem območju. V srednjem frekvenčnem območju je absorpcija najvišja pri debelejših ploščah z nizko gostoto (18, 50, 76 mm), najmanjše vrednosti absorpcije pa so pri tanjših in gostejših ploščah (4, 7 mm). Pri visokih frekvencah so najvišje vrednosti absorpcije prav tako pri debelejših in redkejših ploščah.

4.3 REZULTATI KOMERCIALNO DOSTOPNIH PLOŠČ

Testirali smo plošče, ki so komercialno dostopne in se uporabljajo v konstrukcijah. Preverili smo vpliv njihove zgradbe, debeline in gostote na akustične lastnosti plošč (preglednica 11, priloga 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14).

Preglednica 11: Absorpcija zvoka komercialnih plošč

	Absorpcija zvoka [Pa]							
	Iverna plošča			OSB pl.	Vlaknena pl.	Furnirna pl.	Plošča s satovjem	Klasična pl.
Frekvenca [Hz]	12 mm	20 mm	22 mm	18 mm	19 mm	17 mm	50 mm	50 mm
52	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
63	0,79	0,78	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
80	0,83	0,83	0,83	0,83	0,84	0,83	0,83	0,84
100	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,87
125	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,88
160	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,89
200	0,88	0,88	0,88	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
250	0,89	0,89	0,90	0,90	0,89	0,90	0,90	0,91
315	0,87	0,88	0,89	0,89	0,84	0,87	0,87	0,89
400	0,93	0,84	0,79	0,88	0,95	0,73	0,89	0,87
500	0,89	0,93	0,92	0,91	0,91	0,91	0,94	0,91
630	0,98	0,96	0,92	1,04	0,90	0,98	0,81	0,83
800	0,94	0,94	0,97	1,02	0,93	0,97	0,92	0,93
1000	0,87	0,85	0,92	0,91	0,91	0,87	1,00	1,05
1250	0,98	0,98	0,96	0,97	0,92	0,98	0,90	0,91
1600	0,94	0,93	0,96	0,91	0,94	0,93	0,93	0,95
2000	0,63	0,66	0,60	0,74	0,79	0,68	0,73	0,77
2500	0,84	0,85	0,84	0,83	0,81	0,85	0,86	0,78
3150	0,70	0,56	0,61	0,70	0,71	0,67	0,71	0,69
4000	0,66	0,64	0,64	0,64	0,59	0,64	0,57	0,64
5000	0,64	0,62	0,60	0,62	0,62	0,62	0,61	0,41
6300	0,49	0,52	0,45	0,55	0,50	0,50	0,45	0,57
8000	0,71	0,71	0,71	0,71	0,72	0,71	0,69	0,49
10000	0,71	0,70	0,71	0,69	0,72	0,72	0,66	0,49
12000	0,53	0,58	0,52	0,52	0,55	0,55	0,50	0,49
14000	0,66	0,62	0,67	0,59	0,64	0,67	0,66	0,62
16000	0,62	0,63	0,58	0,56	0,60	0,62	0,59	0,50



Slika 30: Absorpcija zvoka komercialnih plošč

Tudi pri komercialno dostopnih ploščah, torej pri ploščah, kjer so osnovni gradniki narejeni iz lesa, lahko opazimo majhne razlike v nizkem frekvenčnem območju, medtem ko so razlike v srednjem in visokem frekvenčnem območju bistveno večje. V srednjem frekvenčnem območju vidimo, da so gostota, debelina in struktura vplivale na absorpcijske lastnosti. V tem območju so imele najboljše vrednosti absorpcije zvoka iverna plošča pri vseh debelinah, furnirna plošča, vlaknena plošča in plošča s satovjem. Najmanjše vrednosti absorpcije zvoka pa sta imeli OSB in klasična plošča. Razlike med vrednostmi v srednjem sloju so nastale zaradi strukture. Plošče z gostejšim zunanjim slojem in redkejšim srednjim slojem so imele boljše vrednosti od plošč z enakomerno strukturo. V visokem frekvenčnem območju pa je bilo ravno obratno – plošče z enakomerno strukturo so imele višje vrednosti absorpcije zvoka (slika 30).

4.4 REZULTATI PANELNIH SISTEMOV

Testirali smo dva različna panelna sistema. Za prvi sistem smo za sredico uporabili celulozno ploščo izdelano v laboratorju debeline 50 mm, pri drugem sistemu pa smo za sredico uporabili klasično izolacijsko ploščo debeline 50 mm. Za zunanja sloja panelnega sistema smo uporabili štiri različne komercialne plošče.

4.4.1 Panelni sistem s celulozno ploščo

Rezultate smo podali za panelni sistem s sredico celulozne plošče in zunanjimi sloji iz: iverne plošče, konstrukcijske plošče, furnirne plošče in OSB plošče (priloga 14, 15, 16, 17, 18, 19).

4.4.1.1 Panelni sistem: komercialne plošče + celulozna plošča

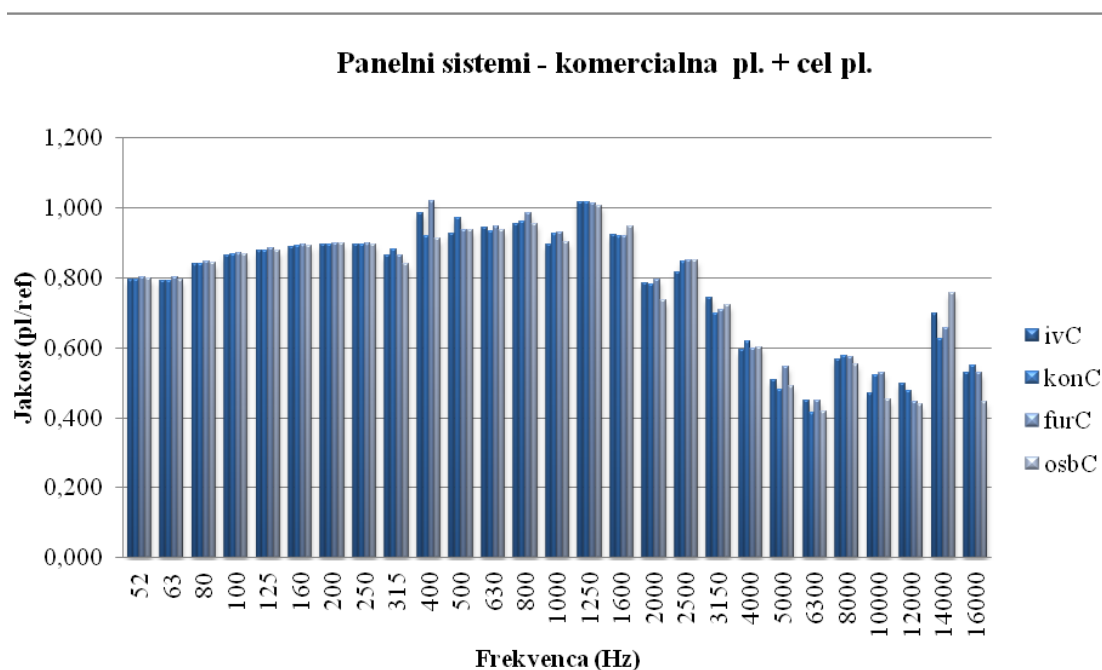
Sistem je bil sestavljen iz ene zunanje komercialne plošče in celulozne sredice (slika 31). Zanimalo nas je, kako se sistem odziva v različnih slojih, zato smo najprej testirali sistem z eno ploščo, nato pa še z dvema (preglednica 12). Različne plošče smo kombinirali zaradi različnih akustičnih lastnosti vsake plošče.



Slika 31: Panelni sistemi iz celulozne sredice in zunanje plasti iz komercialnih plošč

Preglednica 12: Panelni sistem: komercialna plošča + celulozna plošča

Absorpcija zvoka [Pa]				
frekvenca	Iv - C	Kon - C	Fur - C	OSB - C
52	0,79	0,79	0,80	0,79
63	0,79	0,79	0,80	0,79
80	0,84	0,84	0,84	0,84
100	0,86	0,86	0,87	0,86
125	0,87	0,87	0,88	0,87
160	0,89	0,89	0,89	0,89
200	0,89	0,89	0,89	0,89
250	0,89	0,89	0,89	0,89
315	0,86	0,88	0,86	0,84
400	0,98	0,91	1,02	0,91
500	0,92	0,97	0,93	0,93
630	0,94	0,93	0,94	0,93
800	0,95	0,95	0,98	0,95
1000	0,89	0,92	0,92	0,90
1250	1,01	1,01	1,01	1,00
1600	0,92	0,91	0,92	0,94
2000	0,78	0,78	0,79	0,73
2500	0,81	0,84	0,85	0,84
3150	0,74	0,69	0,70	0,72
4000	0,59	0,61	0,59	0,60
5000	0,50	0,48	0,54	0,49
6300	0,44	0,41	0,44	0,41
8000	0,56	0,57	0,57	0,55
10000	0,47	0,52	0,52	0,45
12000	0,49	0,47	0,44	0,44
14000	0,69	0,62	0,65	0,75
16000	0,52	0,54	0,53	0,44



Slika 32: Panelni sistem: komercialne plošče + celulozna plošča

Iz grafa (slika 32) je razvidno, da so razlike v nizkem frekvenčnem območju med sistemi majhne, v srednjem in visokem frekvenčnem območju pa so razlike večje. Največja odstopanja se pojavljajo pri frekvencah 400 Hz in 14000 Hz.

4.4.1.2 Panelni sistem: komercialna plošča + celulozna plošča + komercialna plošča

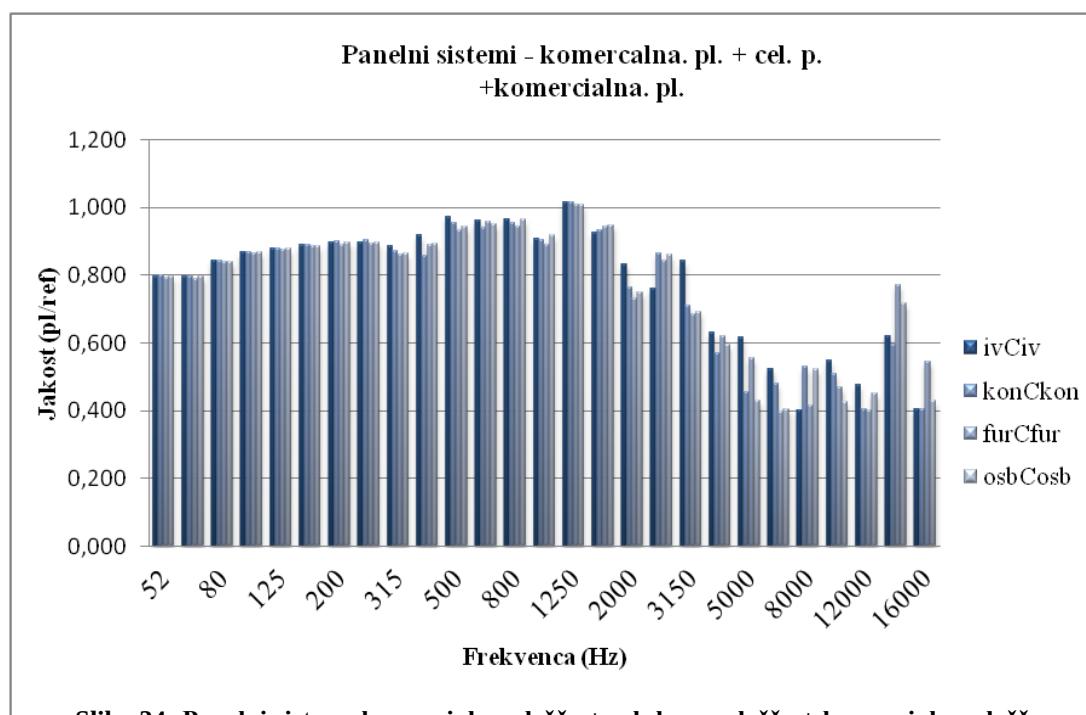
Sistem je bil sestavljen iz dveh zunanjih komercialnih plošč in celulozne sredice (slika 33, preglednica 13).



Slika 33: Panelni sistem: komercialna plošča + celulozna plošča + komercialna plošča

Preglednica 13: Panelni sistem: komercialna plošča + celulozna plošča + komercialna plošča

Absorpcija zvoka [Pa]				
frekvenca	Iv – C – Iv	Kon – C – Kon	Fur – C – Fur	OSB – C – OSB
52	0,79	0,79	0,79	0,79
63	0,79	0,79	0,79	0,79
80	0,84	0,84	0,83	0,84
100	0,86	0,86	0,86	0,86
125	0,87	0,88	0,87	0,87
160	0,88	0,89	0,88	0,88
200	0,89	0,89	0,89	0,89
250	0,89	0,90	0,89	0,89
315	0,88	0,87	0,85	0,86
400	0,91	0,85	0,88	0,89
500	0,97	0,95	0,93	0,94
630	0,96	0,94	0,95	0,95
800	0,96	0,95	0,94	0,96
1000	0,90	0,90	0,88	0,91
1250	1,01	1,01	1,00	1,00
1600	0,92	0,93	0,94	0,94
2000	0,83	0,76	0,72	0,75
2500	0,75	0,86	0,84	0,86
3150	0,84	0,71	0,68	0,69
4000	0,63	0,56	0,62	0,59
5000	0,61	0,45	0,55	0,43
6300	0,52	0,48	0,39	0,40
8000	0,40	0,53	0,41	0,52
10000	0,54	0,50	0,47	0,42
12000	0,47	0,40	0,40	0,45
14000	0,62	0,59	0,77	0,71
16000	0,40	0,40	0,54	0,42



Slika 34: Panelni sistem: komercialna plošča + celulozna plošča + komercialna plošča

V nizkem in srednjem frekvenčnem območju so razlike med sistemi minimalne, pri visokih frekvencah pa je razlika večja. Najvišje vrednosti absorpcije zvoka imata sistema z zunanjsima konstrukcijskima in OSB ploščama, ker imata plošči podobni strukturi (slika 34).

4.4.2 Panelni sistem s klasično izolacijsko ploščo

Drugi panelni sistemi so bili sestavljeni iz klasične izolacijske plošče in zunanjih slojev komercialnih plošč (iverne plošče, konstrukcijske plošče, furnirne plošče in OSB plošče)(priloga 20, 21, 22, 23, 24).

4.4.2.1 Panelni sistem: komercialne plošče + klasična izolacijska plošča

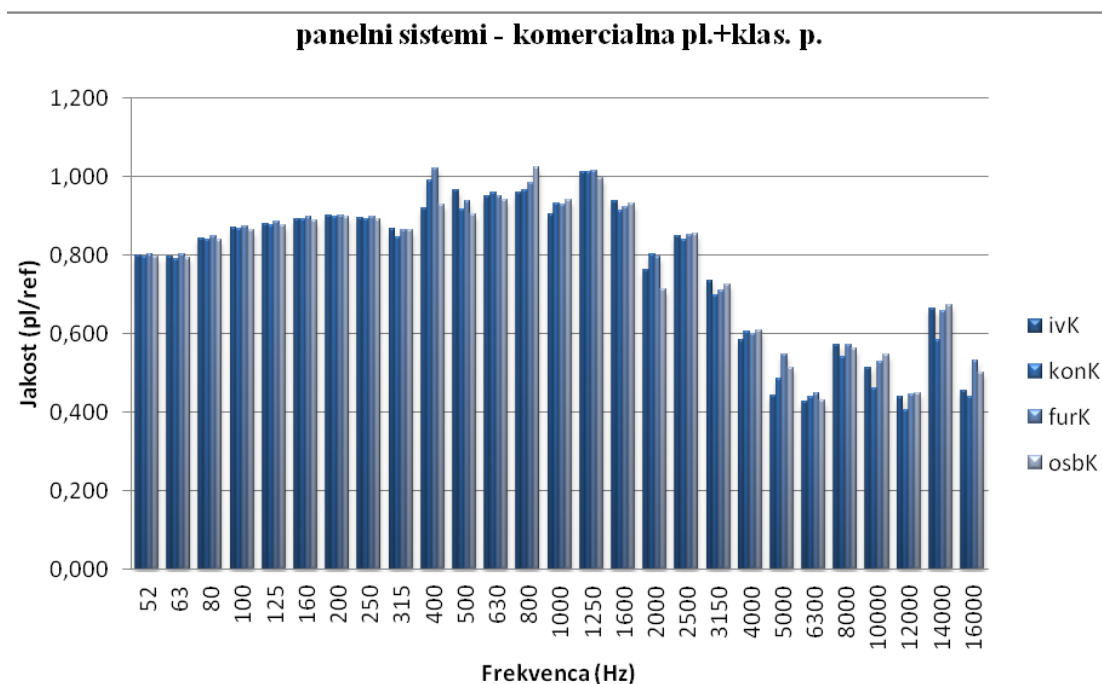
Sistem je bil sestavljen iz ene zunanje komercialne plošče in klasične izolacijske sredice. Zanimalo nas je, kako se sistem odziva v različnih slojih, zato smo najprej testirali sistem z eno ploščo, nato pa še z dvema. Različne plošče smo kombinirali zaradi različnih akustičnih lastnosti vsake plošče (slika 35, preglednica 14).



Slika 35: Panelni sistemi iz komercialne plošče in klasične izolacijske plošče

Preglednica 14: Panelni sistem: komercialne plošče + klasična izolacijska plošča

Absorpcija zvoka [Pa]				
frekvenca	Iv - K	Kon - K	Fur - K	OSB - K
52	0,79	0,79	0,80	0,79
63	0,79	0,79	0,80	0,79
80	0,84	0,83	0,84	0,83
100	0,86	0,86	0,87	0,86
125	0,88	0,87	0,88	0,87
160	0,89	0,89	0,89	0,88
200	0,90	0,89	0,89	0,89
250	0,89	0,89	0,89	0,89
315	0,86	0,84	0,86	0,86
400	0,92	0,98	1,02	0,92
500	0,96	0,91	0,93	0,90
630	0,94	0,96	0,94	0,94
800	0,95	0,96	0,98	1,02
1000	0,90	0,93	0,92	0,94
1250	1,01	1,01	1,01	0,99
1600	0,93	0,91	0,92	0,93
2000	0,76	0,80	0,79	0,71
2500	0,84	0,83	0,85	0,85
3150	0,73	0,69	0,70	0,72
4000	0,58	0,60	0,59	0,60
5000	0,44	0,48	0,54	0,51
6300	0,42	0,43	0,44	0,42
8000	0,57	0,54	0,57	0,56
10000	0,51	0,46	0,52	0,54
12000	0,43	0,40	0,44	0,44
14000	0,66	0,58	0,65	0,67
16000	0,45	0,44	0,53	0,50



Slika 36: Panelni sistem: komercialne plošče + klasična izolacijska plošča

Iz grafa (slika 36) je razvidno, da so razlike v nizkem frekvenčnem območju med sistemi majhne, v srednjem in visokem frekvenčnem območju pa so razlike večje. Pri zelo visokih frekvencah je imela konstrukcijska plošča najvišje vrednosti absorpcije.

4.4.2.2 Panelni sistem: komercialna plošča + klasična izolacijska + komercialna plošča

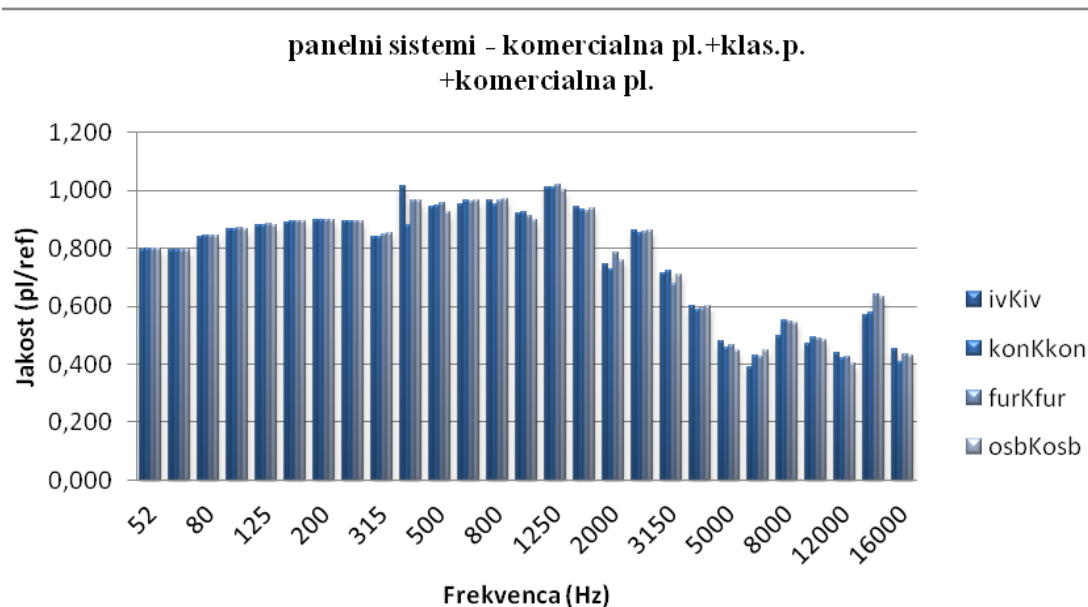
Sistem je bil sestavljen iz dveh zunanjih komercialnih plošč in klasične izolacijske sredice (slika 37, preglednica 15).



Slika 37: Panelni sistem: komercialna plošča + klasična izolacijska plošča + komercialna plošča

Preglednica 15: Panelni sistem: komercialna plošča + klasična izolacijska plošča + komercialna plošča

Absorpcija zvoka [Pa]				
frekvenca	Iv – K – Iv	Kon – K – Kon	Fur – K – Fur	OSB – K – OSB
52	0,79	0,79	0,79	0,79
63	0,79	0,79	0,79	0,79
80	0,83	0,84	0,84	0,84
100	0,86	0,86	0,86	0,86
125	0,87	0,88	0,88	0,87
160	0,89	0,89	0,89	0,89
200	0,89	0,89	0,89	0,89
250	0,89	0,89	0,89	0,89
315	0,83	0,83	0,84	0,85
400	1,01	0,88	0,96	0,96
500	0,94	0,94	0,95	0,92
630	0,95	0,96	0,95	0,96
800	0,96	0,94	0,96	0,96
1000	0,92	0,92	0,91	0,89
1250	1,01	1,00	1,02	1,00
1600	0,94	0,93	0,92	0,93
2000	0,74	0,72	0,78	0,76
2500	0,86	0,85	0,85	0,86
3150	0,71	0,72	0,67	0,70
4000	0,60	0,58	0,59	0,60
5000	0,47	0,45	0,46	0,44
6300	0,38	0,43	0,42	0,44
8000	0,49	0,55	0,54	0,54
10000	0,46	0,49	0,48	0,48
12000	0,43	0,41	0,42	0,40
14000	0,57	0,57	0,64	0,63
16000	0,45	0,40	0,43	0,42



Slika 38: Panelni sistem: komercialna plošča + klasična izolacijska plošča + komercialna plošča

V nizkem in srednjem frekvenčnem območju so razlike med sistemi minimalne, pri visokih frekvencah pa je razlika večja. Sklepamo lahko, da se največja razlika med ploščami pojavi zaradi strukture in gostote. Te razlike so pri vsaki frekvenci različne (slika 38).

5 RAZPRAVA

Glede na nekatere raziskave, omenjene v teoretičnih izhodiščih, lahko trdimo, da na absorpcijo zvoka vplivajo razni dejavniki, npr. debelina plošče, gostota plošče in struktura plošče. V nadaljevanju bodo predstavljeni rezultati za posamezno ploščo in panelni sistem.

Celulozna plošča:

Razlike med različno debelimi ploščami v nizkem frekvenčnem območju so zanemarljive. V srednjem frekvenčnem območju so bile vrednosti pri tanjših in gostejših ploščah nižje. Debelejše plošče z nižjo gostoto bolje absorbirajo zvok zaradi tega, ker so v debelejših ploščah vlakna razporejena enakomerneje kot pri tanjših ploščah, kjer sta zunanji plasti plošče gostejši od srednje plasti. Podoben trend kot v srednjem frekvenčnem območju se je pojavil tudi v višjem frekvenčnem območju. Podobno, kot navaja Everest (2001), smo ugotovili, da so pri ploščah z nizko gostoto vlakna razporejena z relativno velikim razmikom, kar vpliva na boljšo absorpcijo zvoka. Pri gostejših ploščah je površinski odboj zvoka velik, kar pomeni, da je absorpcija zvoka majhna (preglednica 16).

Preglednica 16: Vrednosti celuloznih plošč (Pa)

	Nizko frekvenčno območje (52–250 Hz)	Srednje frekvenčno območje (315–4000 Hz)	Visoko frekvenčno območje (5000–16000 Hz)
4 mm	0,80–0,89	0,68–1,02	0,52–0,73
7 mm	0,80–0,90	0,65–1,02	0,51–0,77
8 mm	0,81–0,91	0,67–1	0,51–0,82
17 mm	0,80–0,90	0,60–1,01	0,50–0,72
18 mm	0,79–0,90	0,58–1	0,51–0,71
50 mm	0,80–0,91	0,49–1,01	0,42–0,70
76 mm	0,79–0,90	0,57–0,99	0,42–0,72

Komercialne plošče:

Pri komercialnih ploščah smo ugotovili, da se med sabo razlikujejo v strukturi, gostoti in debelini. V nizkem frekvenčnem območju se pri ivernih ploščah z različnimi gostotami in debelinami niso pokazale pomembne razlike. V srednjem in visokem frekvenčnem območju sta na plošče vplivali predvsem debelina in gostota plošč. Iverna plošča z debelino 20 mm in z najnižjo gostoto je najmanj absorbirala zvok v teh dveh območjih, medtem ko je imela iverna plošča z debelino 22 mm najboljše absorpcijske lastnost prav zaradi debeline. V nizkem frekvenčnem območju so bile razlike med drugimi ploščami majhne, kljub temu pa je imela najboljšo absorpcijo vlaknena plošča zaradi visoke gostote. V srednjem frekvenčnem območju sta zvok najbolje absorbirali plošča s satovjem in vlaknena plošča. Plošča s satovjem ima posebno strukturo – zunanja sloja sta zelo gosta, notranji pa je sestavljen iz redkega papirnatega sloja. V visokem frekvenčnem območju je zvok najbolje absorbirala klasična plošča zaradi majhne gostote, velike debeline in enakomerne strukture (preglednica 17). Kot navajajo Kawasaki in sod. (1998), se pri redkejših ploščah večji del zvočne energije spremeni v toploto in s tem se zmanjša koeficient absorpcije zvoka.

Preglednica 17: Absorpcija zvoka komercialnih plošč

	Absorpcija zvoka [Pa]							
	Iverna plošča			OSB pl.	Vlaknena pl.	Furnirna pl.	Plošča s satovjem	Klasična pl.
Frekvenca [Hz]	12 mm	20 mm	22 mm	18 mm	19 mm	17 mm	50 mm	50 mm
52–250	0,79–0,89	0,78–0,89	0,79–0,90	0,79–0,90	0,79–0,89	0,79–0,90	0,79–0,90	0,79–0,91
315–4000	0,63–0,98	0,64–0,98	0,61–0,97	0,64–1,04	0,59–0,95	0,64–0,98	0,57–1	0,64–1,05
5000–16000	0,49–0,71	0,52–0,71	0,45–0,71	0,52–0,71	0,50–0,72	0,50–0,72	0,45–0,69	0,41–0,62

Panelni sistemi s komercialnimi ploščami in sredico iz celulozne plošče:

V nizkem frekvenčnem območju med ploščami in sistemi ni pomembnih razlik. V srednjem frekvenčnem območju so razlike med ploščo in sistemom očitne predvsem pri konstrukcijski plošči. Razlogi so lahko v debelini, saj je bil sistem s konstrukcijsko ploščo najdebelejši. V

visokem frekvenčnem območju sta največ zvoka absorbirala sistema s konstrukcijsko in OSB ploščo. Ti dve plošči sta si podobni po strukturi (v prerezu imata enakomerno razporejene delce) in po gostoti. Vsi sistemi z dvema ploščama so bili le v visokem frekvenčnem območju učinkovitejši od sistemov z eno ploščo (preglednica 18).

Preglednica 18: Absorpcija zvoka panelnih sistemov s celulozno ploščo in komercialnimi ploščami

Absorpcija zvoka [Pa]								
frekvenca	Iv - C	Iv - C - Iv	Kon - C	Kon - C -Kon	Fur - C	Fur - C - Fur	OSB - C	OSB - C - OSB
Nizko frekvenčno območje	0,79– 0,89	0,79– 0,89	0,79– 0,89	0,79– 0,90	0,80– 0,89	0,79– 0,89	0,79– 0,89	0,79–0,89
Srednje frekvenčno območje	0,59– 1,01	0,63– 1,01	0,61– 1,01	0,56– 1,01	0,59– 1,01	0,62–1	0,60–1	0,59–1
Visoko frekvenčno območje	0,44– 0,69	0,40– 0,62	0,41– 0,62	0,40– 0,59	0,44– 0,65	0,39– 0,77	0,41– 0,75	0,40–0,71

Panelni sistemi s komercialnimi ploščami in sredico iz klasične plošče:

Ugotovili smo, da so sistemi z dvema ploščama absorbirali več zvoka kot sistemi z eno zunanjo ploščo. Tudi pri sistemih s klasično ploščo opazimo, da se največje razlike med sistemi z eno in sistemi z dvema komercialnima ploščama pojavljajo v visokem frekvenčnem območju. V visokem frekvenčnem območju je sistem z dvema iveranima ploščama najbolj absorbiral zvok. Zunanja sloja iverne plošče sta gostejša od notranjega sloja, zaradi česar se velik del zvoka odbije že od zunanje plasti sistema. Del zvoka, ki potuje skozi klasično ploščo, se nato odbije od druge iverne plošče panelnega sistema in se v klasični plošči spremeni v toploto, preostanek pa potuje naprej do sprejemnika zvoka (preglednica 19).

Preglednica 19: Absorpcija zvoka panelnih sistemov s klasično ploščo in komercialnimi ploščami

Absorpcija zvoka [Pa]								
frekvenca	Iv - K	Iv - K - Iv	Kon - K	Kon - K - Kon	Fur - K	Fur - K - Fur	OSB - K	OSB - K - OSB
Nizko frekvenčno območje	0,79– 0,90	0,79– 0,89	0,79– 0,89	0,79– 0,89	0,80– 0,89	0,79– 0,89	0,79– 0,89	0,79–0,89
Srednje frekvenčno območje	0,58– 1,01	0,60– 1,01	0,60– 1,01	0,58–1	0,59– 1,01	0,59– 1,02	0,60– 1,02	0,60–1
Visoko frekvenčno območje	0,42– 0,66	0,38– 0,57	0,40– 0,58	0,40– 0,57	0,44– 0,65	0,42– 0,64	0,42– 0,67	0,40–0,63

Primerjava panelnih sistemov s sredico iz klasične in celulozne plošče v visokem frekvenčnem območju:

Ker smo opazili, da se največje razlike med sistemi pojavljajo prav v visokem frekvenčnem območju, smo naredili primerjavo obeh sistemov (Preglednica 20). V srednjem frekvenčnem območju so bili sistemi s celulozno ploščo boljši le pri iverni plošči (Iv – C) in OSB plošči (OSB – C – OSB). Pri večini plošč, razen pri furnirni, so imeli boljše vrednosti absorpcije sistemi s sredico iz klasične plošče, ne glede na število zunanjih plošč. Sistemi s furnirno ploščo so imeli podobne vrednosti, ne glede na sredico. Glede na druge plošče je furnirna plošča po zgradbi najbolj homogena, ker je sestavljena iz križno lepljenih furnirjev.

Preglednica 20: Primerjava panelnih sistemov s celulozno in klasično sredico v visokem frekvenčnem območju

CELULOZNA SREDICA		KLASIČNA SREDICA	
Iv – C	Iv – C – Iv	Iv – K	Iv – K – Iv
0,44–0,69	0,40–0,62	0,42–0,66	0,38–0,58
Kon – C	Kon – C – Kon	Kon – K	Kon – K – Kon
0,41–0,62	0,40–0,59	0,40–0,58	0,40–0,57
Fur – C	Fur – C – Fur	Fur – K	Fur – K – Fur
0,44–0,65	0,39–0,77	0,44–0,65	0,42–0,64
OSB – C	OSB – C – OSB	OSB – K	OSB – K – OSB
0,41–0,75	0,40–0,71	0,42–0,67	0,40–0,63

Če primerjamo klasično in celulozno ploščo kot sredico panelnega sistema, ugotovimo, da je v večini primerov klasična plošča boljši zvočni absorber. Klasična plošča je že v osnovi namenjena za izolacijo. Celulozna plošča ima pri debelini 50 mm gostoto $0,1 \text{ g/cm}^3$, klasična pa $0,154 \text{ g/cm}^3$, kar kaže na vpliv gostote na akustične lastnosti plošče in panelnega sistema. Ker so se plošče bolj razlikovale v visokem frekvenčnem območju, smo primerjali rezultate klasične in celulozne plošče, kjer je klasična plošča imela boljše vrednosti absorpcije (0,41–0,62) kot celulozna (0,42–0,70). V srednjem frekvenčnem območju je imela celulozna plošča (0,49–1,01), ki ni bila v panelnem sistemu, boljše vrednosti absorpcije od klasične plošče (0,64–1,05).

Ključne frekvence:

Za bolj pregledno primerjavo rezultatov smo izpostavili ključne – standardne frekvence, in sicer: 63 Hz, 125 Hz in 250 Hz v nizkem frekvenčnem območju, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz in 4000 Hz v srednjem frekvenčnem območju ter 8000 Hz in 16000 Hz v visokem frekvenčnem območju (preglednica 21).

V preglednici 21 so izpostavljene ključne frekvence panelnih sistemov s sredico iz celulozne plošče, v preglednici 22 pa ključne frekvence panelnih sistemov s sredico iz klasične plošče.

Preglednica 21: Ključne frekvence panelnih sistemov s sredico iz celulozne plošče

Absorpcija zvoka [Pa]								
frekvenca	Iv		Kon		Fur		OSB	
	Iv - C	Iv - C - Iv	Kon - C	Kon - C - Kon	Fur - C	Fur - C - Fur	OSB - C	OSB - C - OSB
63	0,79	0,79	0,79	0,79	0,80	0,79	0,79	0,79
125	0,87	0,87	0,87	0,88	0,88	0,87	0,87	0,88
250	0,89	0,89	0,89	0,90	0,89	0,89	0,89	0,89
500	0,92	0,97	0,97	0,95	0,93	0,93	0,93	0,94
1000	0,89	0,90	0,92	0,90	0,92	0,88	0,90	0,91
2000	0,78	0,83	0,78	0,76	0,79	0,72	0,73	0,75
4000	0,59	0,63	0,61	0,69	0,59	0,62	0,60	0,59
8000	0,56	0,40	0,57	0,53	0,57	0,41	0,55	0,52
16000	0,52	0,40	0,54	0,40	0,53	0,54	0,44	0,42

Preglednica 22: Ključne frekvence panelnih sistemov s sredico iz klasične plošče

Absorpcija zvoka [Pa]								
frekvenca	Iv		Kon		Fur		OSB	
	Iv - K	Iv - K - Iv	Kon - K	Kon - K - Kon	Fur - K	Fur - K - Fur	OSB - K	OSB - K - OSB
63	0,79	0,79	0,79	0,79	0,80	0,79	0,79	0,79
125	0,88	0,87	0,87	0,88	0,88	0,88	0,87	0,87
250	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
500	0,96	0,94	0,91	0,94	0,93	0,95	0,90	0,92
1000	0,90	0,92	0,93	0,92	0,92	0,91	0,94	0,89
2000	0,76	0,74	0,80	0,72	0,79	0,78	0,71	0,76
4000	0,58	0,60	0,60	0,58	0,59	0,59	0,60	0,60
8000	0,57	0,49	0,54	0,55	0,57	0,54	0,56	0,54
16000	0,45	0,45	0,44	0,40	0,53	0,43	0,50	0,42

Glede na celotne rezultate sklepamo, da plošče z gostejšim zunanjim slojem bolje odbijajo in slabše absorbirajo zvok. Skozi gostejše, debelejšje in bolj homogene plošče (npr. furnirna plošča) se zvok slabše širi zaradi togosti plošč, medtem ko se skozi tanjše plošče zvočne vibracije lažje širijo zaradi manjše togosti. Pri redkejših ploščah se zvok lažje absorbira v notranjost plošče, ker je površina plošče poroznejša in bolj dovzetna za absorpcijo. Zvok se v redkejših ploščah lažje razprši, in sicer zaradi veliko zračnega prostora med vlakni. Zvočno valovanje se pri trenju delcev zraka spreminja v toploto (podobno navaja tudi Čudina, 2014).

Pri panelnih sistemih smo ugotovili, da dobro absorpcijo in s tem zvočno izolacijo zagotavljajo debelejšje in redkejšje plošče z enakomerno strukturo. Furnirna plošča v sistemu nima pomembnega vpliva na izboljšanje izolativnosti in absorpcije zvoka. Pri drugih ploščah so te razlike nekoliko pomembnejše.

6 POVZETEK

V magistrski nalogi smo želeli ugotoviti, kako gostota, debelina in struktura celuloznih in komercialnih plošč vplivajo na njihovo absorpcijo in izolativnost zvoka, nato pa so nas zanimala še akustične lastnosti panelnih sistemov, sestavljenih iz teh plošč.

Za izdelavo laboratorijskih plošč smo uporabili celulozna vlakna ZIMICELL, ki so imela 3-odstotno vlažnost. Za oblepljanje vlaken smo uporabili urea formaldehidno lepilo in utrjevalec amonijev sulfat. Med komercialnimi konstrukcijskimi in izolacijskimi materiali smo uporabili iverno, OSB, vlakneno, furnirno in izolacijsko ploščo ter lahki ploščni kompozit s sredico iz papirnatega satovja. Izdelali smo dva trislojna panelna sistema. Pri vsakem sta bili zunanji plošči iz istega materiala. Zunanje plošče so bile: iverna, konstrukcijska, furnirna in OSB plošča, za sredico pa smo uporabili klasično izolacijsko ploščo in celulozno ploščo izdelano v laboratoriju.

Plošče in sisteme smo testirali v komori, ki je bila razdeljena na dva prostora in v notranjosti oblepljena s plamofonom. V enem prostoru komore je bil vir zvoka, v drugem pa sprejemnik zvoka. Panelni sistem smo testirali v treh korakih. Najprej smo testirali prvi sloj, nato smo mu dodali sredico in v zadnjem koraku še zadnji sloj.

Ugotovili smo, da je obnašanje plošč odvisno od zgradbe in njihove gostote. Rezultate smo prikazali glede na nizko, srednje in visoko frekvenčno območje.

Absorpcijo zvoka smo računali po enačbi 14, za stopnjo izolativnosti:

$$R_E = 10 \cdot \log(j_1/j_2) = L_1 - L_2 \quad \dots (14)$$

Kjer je: j_1 je jakost zvoka pri viru (W/m^2); j_2 je jakost zvoka pri sprejemniku (W/m^2); L_1 je glasnost zvoka pri viru (dB); L_2 je glasnost zvoka pri sprejemniku (dB).

Plošče z gostejšim zunanjim slojem bolje odbijajo in slabše absorbirajo zvok. Skozi gostejše, debelejša in bolj homogene plošče (npr. furnirna plošča) se zvok slabše širi zaradi togosti plošč, medtem ko se skozi tanjše plošče zvočne vibracije lažje širijo prav zaradi manjše

togosti. Pri redkejših ploščah se zvok lažje absorbira v notranjost plošče, ker je površina plošče poroznejša in bolj dovzetna za absorpcijo. Pri panelnih sistemih smo ugotovili, da dobro absorpcijo in s tem zvočno izolacijo zagotavljajo debelejše in redkejše plošče z enakomerno strukturo.

7 VIRI

- Al-Rahman L. A., Raja R. I., Rahman R. A., Ibrahim Z. 2012. Acoustic properties of innovative material from date palm fibre. American journal of applied sciences, 9, 9: 1390-1395
<http://thescipub.com/PDF/ajassp.2012.1390.1395>
- Arenas J. P., Crocker M. J. 2010. Recent trends in porous sound-absorbing materials. Sound & vibration. <http://www.sandv.com/downloads/1007croc.pdf>: 6 str.
- Blauert J., Xiang N. 2009. Acoustics for engineers. Berlin, Springer-Verlag: 253 str.
- Breuer H. 1993. Atlas klasične in moderne fizike. Ljubljana, Državna založba Slovenije: 400 str.
- Bucur V. 2006. Acoustics of wood. Berlin, New York, Springer: 393 str
- Cox T. J., D'Antonio P. 2009. Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application. London, New York, Taylor & Francis: 476 str.
- Črepinšek L., Padežnik Gomilšek J. 2002. Tehniška fizika. Maribor, Fakulteta za strojništvo: 197 str.
- Čudina M. 2014. Tehnična akustika – merjenje, vrednotenje in zmanjševanje hrupa in vibracij. Ljubljana, Fakulteta za strojništvo: 332 str.
- Dalmeijer R. 2013. Straw-bale sound isolation and acoustics. The last straw – the international journal of straw bale and natural building. <http://thelaststraw.org/strawbale-sound-isolation-acoustics/>.
- Everest F. A. 2001. The master handbook of acoustics. New York, McGraw-Hill: 615 str.
- Fizika (leksikon). 2007. Tržič, Učila International: 476 str.

Fahy F. J. 2001. Foundations of engineering acoustics. San Diego, Academic press: 443 str.

Godshall W. D., Davis J. H. 1969. Acoustical absorption properties of wood-base panel materials. Forest Service research paper: <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplrp/fplrp104.pdf>: 11 str.

Ismail L., Ghazali M. I., Mahzan S., Zaidi A. M. A. 2010. Sound absorption of *arenga pinnata* natural fiber. International Science Index, 4, 7: <http://www.waset.org/publications/8239>: 3 str.

Karademir A., Aydemir C., Yenidogan S. 2011. Sound absorption and print density properties of recycled sheets made from waste paper and agricultural plant fibres. African journal of agricultural research, 6, 28: http://www.academicjournals.org/article/article1380816044_Karademir%20et%20al.pdf: 9 str.

Kawasaki T., Zhang M., Kawai S. 1998. Manufacture and properties of ultra-low-density fiberboard. Journal of wood science, 44,5: 354–360

Krucinska I., Gliscinska E., Michalak M., Ciechanska D., Kazimierczak J., Bloda A. 2014. Sound-absorbing green composites based on cellulose ultra-short/ultra-fine fibers. Textile Research Journal: <http://trj.sagepub.com/content/early/2014/10/15/0040517514553873.abstract>: 20 str.

Maekawa Z., Lord P. 1994. Environmental and architectural acoustics. V: Nor M. J. M., Jamaluddin M., Tamiri F. M. 2004. A preliminary study of sound absorption using multi-layer coconut coir fibers. Electronic journal Technical acoustics, 3: <http://www.ejta.org/en/tamiri1>: 8 str.

Mahzan S., Ahmad Zaidi A.M., Ghazali M.I., Yahya M.N., Ismail M. 2009. Investigation on sound absorption of rice-husk reinforced composite. V: Malaysian technical universities conference on engineering and technology: <http://eprints.uthm.edu.my/2784/1/019-022.pdf>: 4 str.

Medved S. 2014. Gradbena fizika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo: 328 str.

Medved S. 2010. Lesni ploščni kompoziti v arhitekturi. V: Nove tehnologije v gradnji z lesom. Dujič B., Kitek Kuzman M. (ur.). Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 42–49

Na Y., Lancaster J., Casali J., Cho G. 2007. Sound absorption coefficients of micro-fiber fabrics by reverberation room method. Textile research journal., 77, 5: <http://perso.ensait.fr/vromanp/documents/publications/Na-2007.pdf>: 7 str.

Nor M. J. M., Jamaluddin M., Tamiri F. M. 2004. A preliminary study of sound absorption using multi-layer coconut coir fibers. Electronic journal Technical acoustics, 3: <http://www.ejta.org/en/tamiri1>: 8 str.

Osipov A., Mees P., Vermeir G. 1997. Low-frequency airborne sound transmission through single partitions in buildings. Applied acoustics, 52, 3/4: 273–288

Saadatinia M., Ebrahimi G., Tajvidi M. 2008. Comparing sound absorption characteristic of acoustic boards made of Aspen particles and different percentage of Wheat and Barely straws. 17th World Conference on Nondestructive Testing: <http://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/73.pdf>, 6 str.

Seddeq H. S., 2009. Factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials. Australian journal of basic and applied sciences, 3, 4: <http://ajbasweb.com/old/ajbas/2009/4610-4617.pdf>: 8 str.

Strnad J. 2010. Svet nihanj in valovanj. Ljubljana, DMFA – založništvo: 197 str.

Zupančič D. 2004. Ovira v arhitekturi. Arhitektura, raziskave, 2, <http://www.dlib.si/details/URN:NBN:SI:doc-KUEFSIVW>, 6 str.

Zulkifli R., Zulkarnain, Mohd Nor M.J. 2010. Noise control using coconut coir fiber sound

absorber with porous layer backing and perforated panel. American journal of applied sciences, 7, 2: 260–264.

Zulkifli R., Mohd Nor M. J., Mat Tahir M. F., Ismail A. R., Nuawi M. Z. 2008. Acoustic properties of multi-layer coir fibres sound absorption panel. Journal of applied sciences, 8, 20: <http://www.docsdirect.com/pdfs/ansinet/jas/2008/3709-3714.pdf>: 6 str.

Wassilief C. 1996. Sound absorption of wood-based materials. Applied acoustics, 48, 4: 339–356

Xu J., Widyorini R., Han G., Kawai S., Sugawara R. 2004. Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core. Journal of wood science, 50, 1: 62–67

Yang H. S., Kim D. J., Kim H. J. 2003. Rice straw–wood particle composite for sound absorbing wooden construction materials. Bioresource Technology, 86, 2: 117–121.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Sergeju Medvedu za usmerjanje pri pisanju magistrske naloge in izvajanju meritev. Zahvaljujem se tudi prof. dr. Željku Gorišku za recenzijo naloge, tehniškemu sodelavcu Janezu Renku za pomoč v laboratoriju, doc. dr. Alešu Stražetu za svetovanje in pomoč pri meritvah ter vsem, ki so mi pri tem kakorkoli pomagali.

PRILOGE

Priloga 1: Celulozna plošča debeline 4 mm

Frekvenca	Referenca [Pa]	cel. pl. 4	absorbiran zvok cel. pl. 4
52	103,77	82,92	20,10
63	101,02	80,47	20,34
80	102,07	85,91	15,83
100	103,18	89,62	13,15
125	102,98	90,50	12,12
160	107,14	94,98	11,35
200	104,43	92,62	11,31
250	89,76	78,20	12,88
315	75,03	64,30	14,30
400	79,01	74,55	5,65
500	77,89	73,19	6,04
630	74,79	64,10	14,29
800	65,39	66,72	-2,04
1000	62,11	61,47	1,03
1250	73,93	71,10	3,83
1600	64,50	58,24	9,71
2000	71,83	55,14	23,23
2500	74,36	65,06	12,50
3150	74,87	58,47	21,90
4000	80,86	54,62	32,45
<i>5000</i>	<i>76,84</i>	<i>50,45</i>	<i>34,34</i>
<i>6300</i>	<i>71,30</i>	<i>37,04</i>	<i>48,05</i>
<i>8000</i>	<i>74,82</i>	<i>55,02</i>	<i>26,46</i>
<i>10000</i>	<i>73,98</i>	<i>52,03</i>	<i>29,68</i>
<i>12000</i>	<i>71,87</i>	<i>44,21</i>	<i>38,48</i>
<i>14000</i>	<i>48,72</i>	<i>35,55</i>	<i>27,02</i>
<i>16000</i>	<i>69,55</i>	<i>50,06</i>	<i>28,02</i>

Priloga 2: Celulozna plošča debeline 7 mm

Frekvenca	Referenca	cel. pl. 7	absorbiran zvok cel. pl. 7
52	103,77	83,15	19,87
63	101,02	80,64	20,17
80	102,07	86,10	15,64
100	103,18	89,77	13,00
125	102,98	90,63	11,99
160	107,14	95,14	11,20
200	104,43	93,82	10,16
250	89,76	80,31	10,53
315	75,03	65,30	12,96
400	79,01	71,16	9,94
500	77,89	71,55	8,15
630	74,79	73,80	1,32
800	65,39	59,84	8,49
1000	62,11	55,03	11,40
1250	73,93	75,06	-1,52
1600	64,50	60,48	6,23
2000	71,83	55,53	22,69
2500	74,36	65,77	11,55
3150	74,87	56,24	24,88
4000	80,86	52,39	35,21
<i>5000</i>	<i>76,84</i>	<i>49,66</i>	<i>35,38</i>
<i>6300</i>	<i>71,30</i>	<i>36,50</i>	<i>48,80</i>
<i>8000</i>	<i>74,82</i>	<i>54,27</i>	<i>27,47</i>
<i>10000</i>	<i>73,98</i>	<i>54,34</i>	<i>26,56</i>
<i>12000</i>	<i>71,87</i>	<i>42,75</i>	<i>40,51</i>
<i>14000</i>	<i>48,72</i>	<i>37,49</i>	<i>23,06</i>
<i>16000</i>	<i>69,55</i>	<i>47,99</i>	<i>31,00</i>

Priloga 3: Celulozna plošča debeline 8 mm

Frekvenca	Referenca	Cel. pl. 8	Absorbiran zvok cel. pl. 8
52	103,77	84,64	18,44
63	101,02	82,03	18,80
80	102,07	87,36	14,41
100	103,18	90,89	11,91
125	102,98	92,71	9,97
160	107,14	97,68	8,83
200	104,43	95,19	8,84
250	89,76	81,52	9,19
315	75,03	66,61	11,22
400	79,01	71,72	9,23
500	77,89	73,59	5,52
630	74,79	74,84	-0,08
800	65,39	57,98	11,32
1000	62,11	51,37	17,29
1250	73,93	74,21	-0,45
1600	64,50	62,46	3,16
2000	71,83	54,66	23,89
2500	74,36	65,82	11,47
3150	74,87	53,23	28,91
4000	80,86	54,35	32,77
<i>5000</i>	<i>76,84</i>	<i>51,50</i>	<i>32,97</i>
<i>6300</i>	<i>71,30</i>	<i>36,10</i>	<i>49,36</i>
<i>8000</i>	<i>74,82</i>	<i>54,29</i>	<i>27,43</i>
<i>10000</i>	<i>73,98</i>	<i>53,95</i>	<i>27,07</i>
<i>12000</i>	<i>71,87</i>	<i>42,58</i>	<i>40,75</i>
<i>14000</i>	<i>48,72</i>	<i>40,16</i>	<i>17,55</i>
<i>16000</i>	<i>69,55</i>	<i>49,35</i>	<i>29,04</i>

Priloga 4: Celulozna plošča debeline 17 mm

Frekvenca	Referenca	Cel. pl. 17	Absorbiran zvok cel. pl. 17
52	103,77	83,13	19,88
63	101,02	80,53	20,27
80	102,07	86,01	15,72
100	103,18	89,71	13,05
125	102,98	90,62	11,99
160	107,14	95,15	11,18
200	104,43	92,80	11,13
250	89,76	80,56	10,24
315	75,03	64,91	13,47
400	79,01	68,33	13,50
500	77,89	72,98	6,30
630	74,79	75,13	-0,46
800	65,39	60,26	7,84
1000	62,11	54,45	12,33
1250	73,93	74,45	-0,70
1600	64,50	60,37	6,39
2000	71,83	52,89	26,35
2500	74,36	64,65	13,04
3150	74,87	45,01	39,88
4000	80,86	51,84	35,87
<i>5000</i>	<i>76,84</i>	<i>46,82</i>	<i>39,06</i>
<i>6300</i>	<i>71,30</i>	<i>36,15</i>	<i>49,29</i>
<i>8000</i>	<i>74,82</i>	<i>53,53</i>	<i>28,45</i>
<i>10000</i>	<i>73,98</i>	<i>48,95</i>	<i>33,83</i>
<i>12000</i>	<i>71,87</i>	<i>35,79</i>	<i>50,18</i>
<i>14000</i>	<i>48,72</i>	<i>32,02</i>	<i>34,26</i>
<i>16000</i>	<i>69,55</i>	<i>42,90</i>	<i>38,31</i>

Priloga 5: Celulozna plošča debeline 18 mm

Frekvenca	Referenca	Cel. pl. 18	Absorbiran zvok cel. pl. 18
52	103,77	82,73	20,27
63	101,02	80,13	20,62
80	102,07	85,67	16,06
100	103,18	89,35	13,39
125	102,98	90,28	12,32
160	107,14	94,90	11,41
200	104,43	93,67	10,29
250	89,76	80,61	10,18
315	75,03	65,39	12,84
400	79,01	74,54	5,65
500	77,89	76,20	2,16
630	74,79	73,69	1,45
800	65,39	64,22	1,78
1000	62,11	50,57	18,57
1250	73,93	73,65	0,37
1600	64,50	59,50	7,74
2000	71,83	49,42	31,19
2500	74,36	62,70	15,68
3150	74,87	43,21	42,28
4000	80,86	53,18	34,22
<i>5000</i>	<i>76,84</i>	<i>47,87</i>	<i>37,69</i>
<i>6300</i>	<i>71,30</i>	<i>36,24</i>	<i>49,15</i>
<i>8000</i>	<i>74,82</i>	<i>52,91</i>	<i>29,27</i>
<i>10000</i>	<i>73,98</i>	<i>50,65</i>	<i>31,53</i>
<i>12000</i>	<i>71,87</i>	<i>36,61</i>	<i>49,05</i>
<i>14000</i>	<i>48,72</i>	<i>30,57</i>	<i>37,24</i>
<i>16000</i>	<i>69,55</i>	<i>41,11</i>	<i>40,88</i>

Priloga 6: Celulozna plošča debeline 50 mm

Frekvenca	Referenca	Cel. pl. 50	Absorbiran zvok cel. pl. 50
52	103,77	83,58	19,45
63	101,02	81,15	19,65
80	102,07	86,77	14,98
100	103,18	90,69	12,12
125	102,98	91,63	11,01
160	107,14	96,88	9,56
200	104,43	94,67	9,34
250	89,76	81,18	9,55
315	75,03	64,49	14,03
400	79,01	73,71	6,70
500	77,89	73,72	5,34
630	74,79	70,81	5,30
800	65,39	62,33	4,66
1000	62,11	55,99	9,84
1250	73,93	72,90	1,38
1600	64,50	64,87	-0,57
2000	71,83	53,13	26,02
2500	74,36	58,43	21,42
3150	74,87	50,70	32,27
4000	80,86	39,52	51,11
<i>5000</i>	<i>76,84</i>	<i>37,78</i>	<i>50,82</i>
<i>6300</i>	<i>71,30</i>	<i>29,69</i>	<i>58,35</i>
<i>8000</i>	<i>74,82</i>	<i>42,73</i>	<i>42,89</i>
<i>10000</i>	<i>73,98</i>	<i>42,31</i>	<i>42,79</i>
<i>12000</i>	<i>71,87</i>	<i>34,63</i>	<i>51,80</i>
<i>14000</i>	<i>48,72</i>	<i>34,12</i>	<i>29,95</i>
<i>16000</i>	<i>69,55</i>	<i>36,97</i>	<i>46,84</i>

Priloga 7: Celulozna plošča debeline 76 mm

Frekvenca	Referenca	Cel. pl. 76	Absorbiran zvok cel. pl. 76
52	103,77	82,68	20,32
63	101,02	80,23	20,57
80	102,07	85,84	15,89
100	103,18	89,65	13,10
125	102,98	90,80	11,81
160	107,14	95,74	10,63
200	104,43	93,90	10,07
250	89,76	80,28	10,55
315	75,03	66,98	10,72
400	79,01	67,80	14,18
500	77,89	74,21	4,72
630	74,79	72,23	3,40
800	65,39	60,43	7,57
1000	62,11	53,97	13,09
1250	73,93	73,38	0,74
1600	64,50	60,38	6,38
2000	71,83	54,69	23,84
2500	74,36	59,59	19,85
3150	74,87	52,56	29,79
4000	80,86	46,29	42,73
<i>5000</i>	<i>76,84</i>	<i>35,99</i>	<i>53,16</i>
<i>6300</i>	<i>71,30</i>	<i>30,40</i>	<i>57,35</i>
<i>8000</i>	<i>74,82</i>	<i>38,91</i>	<i>47,98</i>
<i>10000</i>	<i>73,98</i>	<i>32,22</i>	<i>56,44</i>
<i>12000</i>	<i>71,87</i>	<i>30,18</i>	<i>57,99</i>
<i>14000</i>	<i>48,72</i>	<i>35,24</i>	<i>27,66</i>
<i>16000</i>	<i>69,55</i>	<i>35,41</i>	<i>49,08</i>

Priloga 8: Iverna plošča debeline 12 mm; 20 mm; 22 mm

Frekvenca	Referenca	absorbiran zvok iver12	absorbiran zvok iver20	absorbiran zvok iver22
52	103,77	20,57	20,84	20,65
63	101,02	20,93	21,23	21,02
80	102,07	16,25	16,58	16,35
100	103,18	13,66	13,95	13,70
125	102,98	12,63	12,91	12,69
160	107,14	11,72	11,97	11,72
200	104,43	11,55	11,84	11,36
250	89,76	10,27	10,22	9,18
315	75,03	12,14	11,39	10,98
400	79,01	6,31	15,74	20,45
500	77,89	10,94	7,02	7,82
630	74,79	1,35	3,26	7,35
800	65,39	5,86	5,26	2,20
1000	62,11	12,13	14,87	7,31
1250	73,93	1,62	1,06	3,64
1600	64,50	5,53	6,07	3,27
2000	71,83	36,60	33,52	39,82
2500	74,36	15,45	14,11	15,44
3150	74,87	29,66	43,48	39,02
4000	80,86	33,31	35,43	35,64
5000	76,84	35,27	37,85	39,13
6300	71,30	50,90	47,95	54,50
8000	74,82	28,68	28,53	28,68
10000	73,98	28,27	29,59	28,29
12000	71,87	46,11	41,53	48,04
14000	48,72	33,73	37,54	32,44
16000	69,55	37,83	37,31	41,23

Priloga 9: OSB plošča debeline 18 mm

Frekvenca	Referenca	OSB plošča	Absorbiran zvok OSB
52	103,77	82,58	20,42
63	101,02	79,99	20,81
80	102,07	85,47	16,26
100	103,18	89,08	13,67
125	102,98	90,01	12,59
160	107,14	94,85	11,47
200	104,43	93,54	10,42
250	89,76	80,97	9,80
315	75,03	67,40	10,17
400	79,01	69,90	11,54
500	77,89	71,32	8,44
630	74,79	78,17	-4,52
800	65,39	66,71	-2,03
1000	62,11	56,76	8,62
1250	73,93	72,30	2,21
1600	64,50	58,97	8,57
2000	71,83	53,45	25,59
2500	74,36	61,91	16,75
3150	74,87	53,04	29,17
4000	80,86	51,76	35,98
<i>5000</i>	<i>76,84</i>	<i>47,72</i>	<i>37,90</i>
<i>6300</i>	<i>71,30</i>	<i>39,36</i>	<i>44,79</i>
<i>8000</i>	<i>74,82</i>	<i>53,35</i>	<i>28,70</i>
<i>10000</i>	<i>73,98</i>	<i>51,74</i>	<i>30,07</i>
<i>12000</i>	<i>71,87</i>	<i>37,67</i>	<i>47,58</i>
<i>14000</i>	<i>48,72</i>	<i>28,83</i>	<i>40,83</i>
<i>16000</i>	<i>69,55</i>	<i>39,01</i>	<i>43,91</i>

Priloga 10: Vlaknena plošča debeline 19 mm

Frekvenca	Referenca	Vlaknena plošča	Absorbiran zvok vlaknena pl.
52	103,77	82,74	20,26
63	101,02	80,16	20,65
80	102,07	85,76	15,98
100	103,18	89,32	13,44
125	102,98	90,19	12,42
160	107,14	95,06	11,28
200	104,43	93,75	10,22
250	89,76	80,33	10,51
315	75,03	63,53	15,32
400	79,01	75,65	4,26
500	77,89	71,49	8,23
630	74,79	67,90	9,21
800	65,39	60,88	6,90
1000	62,11	56,98	8,27
1250	73,93	68,52	7,32
1600	64,50	61,07	5,32
2000	71,83	57,04	20,59
2500	74,36	60,52	18,62
3150	74,87	53,82	28,12
4000	80,86	48,24	40,34
<i>5000</i>	<i>76,84</i>	<i>48,34</i>	<i>37,09</i>
<i>6300</i>	<i>71,30</i>	<i>36,17</i>	<i>49,27</i>
<i>8000</i>	<i>74,82</i>	<i>54,14</i>	<i>27,64</i>
<i>10000</i>	<i>73,98</i>	<i>53,43</i>	<i>27,78</i>
<i>12000</i>	<i>71,87</i>	<i>40,20</i>	<i>44,06</i>
<i>14000</i>	<i>48,72</i>	<i>31,59</i>	<i>35,17</i>
<i>16000</i>	<i>69,55</i>	<i>42,33</i>	<i>39,14</i>

Priloga 11: Furnirna plošča debeline 17 mm

Frekvenca	Referenca	Furnirna pl.	Absorbiran zvok furnir
52	103,77	82,54	20,46
63	101,02	79,96	20,85
80	102,07	85,51	16,23
100	103,18	89,13	13,62
125	102,98	90,03	12,57
160	107,14	94,74	11,58
200	104,43	92,97	10,97
250	89,76	80,93	9,84
315	75,03	65,77	12,34
400	79,01	57,72	26,94
500	77,89	71,13	8,68
630	74,79	73,79	1,34
800	65,39	63,78	2,46
1000	62,11	54,21	12,72
1250	73,93	72,96	1,32
1600	64,50	60,04	6,92
2000	71,83	48,90	31,92
2500	74,36	63,77	14,24
3150	74,87	50,18	32,97
4000	80,86	52,34	35,26
<i>5000</i>	<i>76,84</i>	<i>48,17</i>	<i>37,32</i>
<i>6300</i>	<i>71,30</i>	<i>36,00</i>	<i>49,50</i>
<i>8000</i>	<i>74,82</i>	<i>53,09</i>	<i>29,05</i>
<i>10000</i>	<i>73,98</i>	<i>53,34</i>	<i>27,90</i>
<i>12000</i>	<i>71,87</i>	<i>39,73</i>	<i>44,72</i>
<i>14000</i>	<i>48,72</i>	<i>32,73</i>	<i>32,82</i>
<i>16000</i>	<i>69,55</i>	<i>43,62</i>	<i>37,28</i>

Priloga 12: Plošča s satovjem debeline 50 mm

Frekvenca	Referenca	Satasta plošča	Absorbiran zvok sat.
52	103,77	82,33	20,66
63	101,02	79,92	20,89
80	102,07	85,53	16,21
100	103,18	89,04	13,71
125	102,98	90,04	12,56
160	107,14	94,81	11,51
200	104,43	93,67	10,30
250	89,76	80,88	9,90
315	75,03	65,75	12,36
400	79,01	70,93	10,23
500	77,89	73,75	5,31
630	74,79	60,74	18,78
800	65,39	60,55	7,40
1000	62,11	62,13	-0,02
1250	73,93	67,18	9,14
1600	64,50	60,42	6,32
2000	71,83	52,97	26,25
2500	74,36	64,52	13,24
3150	74,87	53,80	28,15
4000	80,86	46,19	42,88
<i>5000</i>	<i>76,84</i>	<i>47,33</i>	<i>38,41</i>
<i>6300</i>	<i>71,30</i>	<i>32,28</i>	<i>54,73</i>
<i>8000</i>	<i>74,82</i>	<i>51,65</i>	<i>30,97</i>
<i>10000</i>	<i>73,98</i>	<i>49,37</i>	<i>33,27</i>
<i>12000</i>	<i>71,87</i>	<i>36,25</i>	<i>49,56</i>
<i>14000</i>	<i>48,72</i>	<i>32,28</i>	<i>33,74</i>
<i>16000</i>	<i>69,55</i>	<i>41,02</i>	<i>41,02</i>

Priloga 13: Klasična izolacijska plošča debeline 50 mm

Frekvenca	Referenca	Klasična plošča	Absorbiran zvok klas. pl.
52	103,77	82,91	20,1
63	101,02	80,49	20,3
80	102,07	86,19	15,6
100	103,18	89,89	12,9
125	102,98	90,84	11,8
160	107,14	95,63	10,7
200	104,43	93,39	10,6
250	89,76	82,12	8,5
315	75,03	67,06	10,6
400	79,01	69,40	12,2
500	77,89	71,45	8,3
630	74,79	62,26	16,7
800	65,39	61,31	6,2
1000	62,11	65,42	-5,3
1250	73,93	67,48	8,7
1600	64,50	61,51	4,6
2000	71,83	55,92	22,1
2500	74,36	58,13	21,8
3150	74,87	51,73	30,9
4000	80,86	52,49	35,1
<i>5000</i>	<i>76,84</i>	<i>32,13</i>	<i>58,2</i>
<i>6300</i>	<i>71,30</i>	<i>40,94</i>	<i>42,6</i>
<i>8000</i>	<i>74,82</i>	<i>36,80</i>	<i>50,8</i>
<i>10000</i>	<i>73,98</i>	<i>36,41</i>	<i>50,8</i>
<i>12000</i>	<i>71,87</i>	<i>35,80</i>	<i>50,2</i>
<i>14000</i>	<i>48,72</i>	<i>30,36</i>	<i>37,7</i>
<i>16000</i>	<i>69,55</i>	<i>35,17</i>	<i>49,4</i>

Priloga 14: Povprečja absorpcij zvoka komercialnih plošč

	referenca	iver12	iver20	iver22	OSB pl.	vlaknena pl.	furnirna pl.	satasta pl.	klasična pl.
Nizko	93,4	12,4	13,1	13,6	11,8	12,6	13,8	13,5	13,2
Srednje	71	17,5	19,2	18,3	15,6	16,9	17,2	16,7	15,5
Visoko	69,6	37,3	37,2	38,9	39,1	37,2	36,9	40,2	48,5

Priloga 15: Panelni sistem s celulozno sredico in zunanjsima slojema iz iverne plošče

frekvenca	referenca	TEST			ABSORPCIJA ZVOKA [Pa]		
		iv	ivC	ivCiv	iv	ivC	ivCiv
52	103,77	82,75	82,49	82,65	21,02	21,28	21,12
63	101,02	80,34	79,97	80,20	20,68	21,05	20,82
80	102,07	85,91	85,69	86,03	16,16	16,38	16,04
100	103,18	89,51	89,27	89,42	13,67	13,91	13,76
125	102,98	90,45	90,33	90,44	12,53	12,65	12,54
160	107,14	95,22	95,32	95,15	11,92	11,82	11,99
200	104,43	93,95	93,60	93,64	10,48	10,83	10,79
250	89,76	80,64	80,42	80,42	9,12	9,34	9,34
315	75,03	65,72	64,74	66,44	9,31	10,29	8,59
400	79,01	74,73	77,82	72,63	4,28	1,19	6,38
500	77,89	71,66	72,07	75,75	6,23	5,82	2,14
630	74,79	72,19	70,64	71,79	2,60	4,15	3,00
800	65,39	60,94	62,28	63,06	4,45	3,11	2,33
1000	62,11	55,76	55,64	56,27	6,35	6,47	5,84
1250	73,93	75,43	75,05	74,91	-1,50	-1,12	-0,98
1600	64,5	61,68	59,63	59,60	2,82	4,87	4,90
2000	71,83	53,45	56,43	59,86	18,38	15,40	11,97
2500	74,36	65,02	60,61	56,40	9,34	13,75	17,96
3150	74,87	45,14	55,68	63,18	29,73	19,19	11,69
4000	80,86	52,44	47,97	50,95	28,42	32,89	29,91
5000	76,84	46,06	38,97	47,38	30,78	37,87	29,46
6300	71,3	38,94	31,92	37,24	32,36	39,38	34,06
8000	74,82	53,95	42,30	30,01	20,87	32,52	44,81
10000	73,98	49,37	34,81	40,47	24,61	39,17	33,51
12000	71,87	46,32	35,85	34,30	25,55	36,02	37,57
14000	48,72	30,86	34,02	30,26	17,86	14,70	18,46
16000	69,55	45,28	36,71	28,02	24,27	32,84	41,53

Priloga 16: Panelni sistem s celulozno sredico in zunanjsima slojema iz konstrukcijske plošče

frekvenca	referenca	TEST			ABSORPCIJA ZVOKA [Pa]		
		kon	konC	konCkon	kon	konC	konCkon
52	103,77	82,85	82,53	82,87	20,92	21,24	20,90
63	101,02	80,39	80,08	80,42	20,63	20,94	20,60
80	102,07	85,86	85,72	85,97	16,21	16,35	16,10
100	103,18	89,50	89,36	89,59	13,68	13,82	13,59
125	102,98	90,41	90,30	90,61	12,57	12,68	12,37
160	107,14	95,37	95,55	95,32	11,77	11,59	11,82
200	104,43	93,87	93,66	93,92	10,56	10,77	10,51
250	89,76	80,32	80,34	81,13	9,44	9,42	8,63
315	75,03	63,72	66,23	65,43	11,31	8,80	9,60
400	79,01	74,00	72,57	67,60	5,01	6,44	11,41
500	77,89	72,44	75,63	74,25	5,45	2,26	3,64
630	74,79	71,62	69,81	70,34	3,17	4,98	4,45
800	65,39	61,73	62,73	62,47	3,66	2,66	2,92
1000	62,11	57,42	57,56	56,15	4,69	4,55	5,96
1250	73,93	75,05	75,15	74,95	-1,12	-1,22	-1,02
1600	64,5	59,70	59,20	60,16	4,80	5,30	4,34
2000	71,83	52,89	56,15	54,92	18,94	15,68	16,91
2500	74,36	64,91	62,97	64,35	9,45	11,39	10,01
3150	74,87	47,74	52,36	53,16	27,13	22,51	21,71
4000	80,86	51,54	49,95	45,95	29,32	30,91	34,91
5000	76,84	46,80	36,93	34,90	30,04	39,91	41,94
6300	71,3	38,36	29,49	34,29	32,94	41,81	37,01
8000	74,82	52,45	43,27	39,73	22,37	31,55	35,09
10000	73,98	48,24	38,51	37,60	25,74	35,47	36,38
12000	71,87	39,55	34,33	28,91	32,32	37,54	42,96
14000	48,72	30,52	30,41	28,98	18,20	18,31	19,74
16000	69,55	45,93	38,20	28,09	23,62	31,35	41,46

Priloga 17: Panelni sistem s celulozno sredico in zunanjsima slojema iz furnirne plošče

frekvenca	referenca	TEST			ABSORPCIJA ZVOKA [Pa]		
		fur	furC	furCfur	fur	furC	furCfur
52	103,77	81,06	83,32	82,26	22,71	21,33	21,51
63	101,02	83,57	80,85	79,77	17,45	20,95	21,25
80	102,07	86,61	86,44	85,50	15,46	16,45	16,57
100	103,18	90,20	90,03	89,16	12,98	13,84	14,02
125	102,98	91,11	91,16	90,07	11,87	12,63	12,91
160	107,14	96,26	96,04	94,95	10,88	12,22	12,19
200	104,43	94,31	93,91	93,01	10,12	11,12	11,42
250	89,76	80,70	80,52	79,97	9,06	9,02	9,79
315	75,03	64,74	64,72	64,48	10,29	10,01	10,55
400	79,01	74,13	80,66	70,21	4,88	7,49	8,80
500	77,89	71,91	72,90	72,71	5,98	4,96	5,18
630	74,79	70,98	70,90	71,70	3,81	2,25	3,09
800	65,39	61,29	64,40	61,67	4,10	3,10	3,72
1000	62,11	56,16	57,66	55,19	5,95	6,41	6,92
1250	73,93	75,27	74,91	74,58	-1,34	-0,95	-0,65
1600	64,5	60,24	59,41	60,87	4,26	5,23	3,63
2000	71,83	54,08	57,09	52,38	17,75	13,84	19,45
2500	74,36	65,61	63,34	62,77	8,75	11,37	11,59
3150	74,87	50,95	53,00	51,18	23,92	27,25	23,69
4000	80,86	49,16	48,42	50,19	31,70	31,64	30,67
5000	76,84	50,65	41,96	42,58	26,19	35,96	34,26
6300	71,3	39,27	32,03	28,28	32,03	42,45	43,02
8000	74,82	54,42	42,82	31,12	20,40	32,45	43,70
10000	73,98	51,94	39,04	34,77	22,04	41,66	39,21
12000	71,87	39,93	31,94	28,84	31,94	42,69	43,03
14000	48,72	31,67	31,98	37,59	17,05	12,57	11,13
16000	69,55	43,33	36,86	37,77	26,22	36,09	31,78

Priloga 18: Panelni sistem s celulozno sredico in zunanjsima slojema iz OSB plošče

frekvenca	referenca	TEST			ABSORPCIJA ZVOKA [Pa]		
		OSB	OSBC	OSBCOSB	OSB	OSBC	OSBCOSB
52	103,77	82,79	82,91	82,74	20,98	20,86	21,03
63	101,02	80,44	80,41	80,33	20,58	20,61	20,69
80	102,07	86,19	86,03	85,76	15,88	16,04	16,31
100	103,18	89,76	89,61	89,39	13,42	13,57	13,79
125	102,98	90,58	90,52	90,31	12,40	12,46	12,67
160	107,14	96,06	95,57	95,02	11,08	11,57	12,12
200	104,43	94,32	93,84	93,78	10,11	10,59	10,65
250	89,76	80,56	80,49	80,56	9,20	9,27	9,20
315	75,03	63,42	63,07	64,71	11,61	11,96	10,32
400	79,01	72,97	72,22	70,66	6,04	6,79	8,35
500	77,89	70,68	73,04	73,32	7,21	4,85	4,57
630	74,79	70,35	70,00	71,06	4,44	4,79	3,73
800	65,39	61,38	62,35	63,15	4,01	3,04	2,24
1000	62,11	55,34	55,96	57,09	6,77	6,15	5,02
1250	73,93	74,87	74,35	74,49	-0,94	-0,42	-0,56
1600	64,5	61,39	61,11	60,94	3,11	3,39	3,56
2000	71,83	52,84	52,89	53,91	18,99	18,94	17,92
2500	74,36	65,65	63,10	64,06	8,71	11,26	10,30
3150	74,87	50,94	54,03	51,68	23,93	20,84	23,19
4000	80,86	49,60	48,48	48,11	31,26	32,38	32,75
5000	76,84	46,75	37,63	33,02	30,09	39,21	43,82
6300	71,3	39,23	29,68	28,82	32,07	41,62	42,48
8000	74,82	54,73	41,26	39,07	20,09	33,56	35,75
10000	73,98	50,55	33,59	31,37	23,43	40,39	42,61
12000	71,87	39,61	31,64	32,50	32,26	40,23	39,37
14000	48,72	29,79	36,88	34,87	18,93	11,84	13,85
16000	69,55	45,71	31,06	29,78	23,84	38,49	39,77

Priloga 19: Primerjava panelnih sistemov s celulozno ploščo

frekvenca	referenca	ABSORPCIJA ZVOKA [Pa]			
		ivCiv	konCkon	furCfur	OSBCOSB
52	103,77	21,12	20,90	21,51	21,03
63	101,02	20,82	20,60	21,25	20,69
80	102,07	16,04	16,10	16,57	16,31
100	103,18	13,76	13,59	14,02	13,79
125	102,98	12,54	12,37	12,91	12,67
160	107,14	11,99	11,82	12,19	12,12
200	104,43	10,79	10,51	11,42	10,65
250	89,76	9,34	8,63	9,79	9,20
315	75,03	8,59	9,60	10,55	10,32
400	79,01	6,38	11,41	8,80	8,35
500	77,89	2,14	3,64	5,18	4,57
630	74,79	3,00	4,45	3,09	3,73
800	65,39	2,33	2,92	3,72	2,24
1000	62,11	5,84	5,96	6,92	5,02
1250	73,93	-0,98	-1,02	-0,65	-0,56
1600	64,5	4,90	4,34	3,63	3,56
2000	71,83	11,97	16,91	19,45	17,92
2500	74,36	17,96	10,01	11,59	10,30
3150	74,87	11,69	21,71	23,69	23,19
4000	80,86	29,91	34,91	30,67	32,75
5000	76,84	29,46	41,94	34,26	43,82
6300	71,3	34,06	37,01	43,02	42,48
8000	74,82	44,81	35,09	43,70	35,75
10000	73,98	33,51	36,38	39,21	42,61
12000	71,87	37,57	42,96	43,03	39,37
14000	48,72	18,46	19,74	11,13	13,85
16000	69,55	41,53	41,46	31,78	39,77

Priloga 20: Panelni sistem s sredico klasične izolacijske plošče in zunanjima slojema iz iverne plošče

frekvenca	referenca	TEST			ABSORPCIJA ZVOKA [Pa]		
		iv	ivK	ivKiv	iv	ivK	ivKiv
52	103,77	82,75	82,87	82,46	21,02	20,90	21,31
63	101,02	80,34	80,40	79,95	20,68	20,62	21,07
80	102,07	85,91	85,99	85,65	16,16	16,08	16,42
100	103,18	89,51	89,66	89,30	13,67	13,52	13,88
125	102,98	90,45	90,60	90,40	12,53	12,38	12,58
160	107,14	95,22	95,60	95,34	11,92	11,54	11,80
200	104,43	93,95	94,11	93,49	10,48	10,32	10,94
250	89,76	80,64	80,15	80,06	9,12	9,61	9,70
315	75,03	65,72	65,10	62,91	9,31	9,93	12,12
400	79,01	74,73	72,71	79,94	4,28	6,30	-0,93
500	77,89	71,66	75,20	73,23	6,23	2,69	4,66
630	74,79	72,19	71,00	71,10	2,60	3,79	3,69
800	65,39	60,94	62,71	63,03	4,45	2,68	2,36
1000	62,11	55,76	56,05	57,14	6,35	6,06	4,97
1250	73,93	75,43	74,64	74,76	-1,50	-0,71	-0,83
1600	64,5	61,68	60,42	60,71	2,82	4,08	3,79
2000	71,83	53,45	54,81	53,36	18,38	17,02	18,47
2500	74,36	65,02	63,02	64,15	9,34	11,34	10,21
3150	74,87	45,14	54,98	53,30	29,73	19,89	21,57
4000	80,86	52,44	47,22	48,64	28,42	33,64	32,22
5000	76,84	46,06	33,98	36,81	30,78	42,86	40,03
6300	71,3	38,94	30,49	27,70	32,36	40,81	43,60
8000	74,82	53,95	42,76	37,23	20,87	32,06	37,59
10000	73,98	49,37	37,97	34,69	24,61	36,01	39,29
12000	71,87	46,32	31,50	31,49	25,55	40,37	40,38
14000	48,72	30,86	32,28	27,77	17,86	16,44	20,95
16000	69,55	45,28	31,63	31,52	24,27	37,92	38,03

Priloga 21: Panelni sistem s sredico klasične izolacijske plošče in zunanjima slojema iz konstrukcijske plošče

frekvenca	referenca	TEST			ABSORPCIJA ZVOKA [Pa]		
		kon	konK	konKkon	kon	konK	konKkon
52	103,77	82,85	82,47	82,66	20,92	21,30	21,11
63	101,02	80,39	79,87	80,14	20,63	21,15	20,88
80	102,07	85,86	85,55	85,82	16,21	16,52	16,25
100	103,18	89,50	89,25	89,51	13,68	13,93	13,67
125	102,98	90,41	90,17	90,71	12,57	12,81	12,27
160	107,14	95,37	95,57	95,44	11,77	11,57	11,70
200	104,43	93,87	93,67	93,60	10,56	10,76	10,83
250	89,76	80,32	80,07	80,23	9,44	9,69	9,53
315	75,03	63,72	63,44	62,95	11,31	11,59	12,08
400	79,01	74,00	78,17	69,58	5,01	0,84	9,43
500	77,89	72,44	71,38	73,54	5,45	6,51	4,35
630	74,79	71,62	71,77	72,00	3,17	3,02	2,79
800	65,39	61,73	63,10	62,05	3,66	2,29	3,34
1000	62,11	57,42	57,85	57,48	4,69	4,26	4,63
1250	73,93	75,05	74,69	74,57	-1,12	-0,76	-0,64
1600	64,5	59,70	58,95	60,05	4,80	5,55	4,45
2000	71,83	52,89	57,58	52,18	18,94	14,25	19,65
2500	74,36	64,91	62,30	63,33	9,45	12,06	11,03
3150	74,87	47,74	52,18	53,91	27,13	22,69	20,96
4000	80,86	51,54	49,02	47,49	29,32	31,84	33,37
5000	76,84	46,80	37,16	35,20	30,04	39,68	41,64
6300	71,3	38,36	31,21	30,71	32,94	40,09	40,59
8000	74,82	52,45	40,39	41,25	22,37	34,43	33,57
10000	73,98	48,24	34,09	36,49	25,74	39,89	37,49
12000	71,87	39,55	28,99	30,04	32,32	42,88	41,83
14000	48,72	30,52	28,36	28,21	18,20	20,36	20,51
16000	69,55	45,93	30,60	28,44	23,62	38,95	41,11

Priloga 22: Panelni sistem s sredico klasične izolacijske plošče in zunanjima slojema iz furnirne plošče

frekvenca	referenca	TEST			ABSORPCIJA ZVOKA [Pa]		
		fur	furK	furKfur	fur	furK	furKfur
52	103,77	81,06	83,32	82,83	22,71	20,45	20,94
63	101,02	83,57	80,85	80,35	17,45	20,17	20,67
80	102,07	86,61	86,44	86,05	15,46	15,63	16,02
100	103,18	90,20	90,03	89,71	12,98	13,15	13,47
125	102,98	91,11	91,16	90,94	11,87	11,82	12,04
160	107,14	96,26	96,04	95,58	10,88	11,10	11,56
200	104,43	94,31	93,91	93,46	10,12	10,52	10,97
250	89,76	80,70	80,52	80,17	9,06	9,24	9,59
315	75,03	64,74	64,72	63,43	10,29	10,31	11,60
400	79,01	74,13	80,66	76,30	4,88	-1,65	2,71
500	77,89	71,91	72,90	74,31	5,98	4,99	3,58
630	74,79	70,98	70,90	71,63	3,81	3,89	3,16
800	65,39	61,29	64,40	63,17	4,10	0,99	2,22
1000	62,11	56,16	57,66	56,51	5,95	4,45	5,60
1250	73,93	75,27	74,91	75,42	-1,34	-0,98	-1,49
1600	64,5	60,24	59,41	59,90	4,26	5,09	4,60
2000	71,83	54,08	57,09	56,19	17,75	14,74	15,64
2500	74,36	65,61	63,34	63,59	8,75	11,02	10,77
3150	74,87	50,95	53,00	50,58	23,92	21,87	24,29
4000	80,86	49,16	48,42	47,93	31,70	32,44	32,93
5000	76,84	50,65	41,96	35,75	26,19	34,88	41,09
6300	71,3	39,27	32,03	30,40	32,03	39,27	40,90
8000	74,82	54,42	42,82	40,98	20,40	32,00	33,84
10000	73,98	51,94	39,04	36,11	22,04	34,94	37,87
12000	71,87	39,93	31,94	30,40	31,94	39,93	41,47
14000	48,72	31,67	31,98	31,16	17,05	16,74	17,56
16000	69,55	43,33	36,86	30,23	26,22	32,69	39,32

Priloga 23: Panelni sistem s sredico klasične izolacijske plošče in zunanjima slojema iz OSB plošče

frekvenca	referenca	TEST			ABSORPCIJA ZVOKA [Pa]		
		OSB	OSBK	OSBKOSB	OSB	OSBK	OSBKOSB
52	103,77	82,79	82,57	82,64	20,98	21,20	21,13
63	101,02	80,44	80,07	80,16	20,58	20,95	20,86
80	102,07	86,19	85,62	85,81	15,88	16,45	16,26
100	103,18	89,76	89,23	89,44	13,42	13,95	13,74
125	102,98	90,58	90,11	90,44	12,40	12,87	12,54
160	107,14	96,06	95,20	95,50	11,08	11,94	11,64
200	104,43	94,32	93,76	93,65	10,11	10,67	10,78
250	89,76	80,56	79,92	80,23	9,20	9,84	9,53
315	75,03	63,42	64,87	63,77	11,61	10,16	11,26
400	79,01	72,97	73,25	76,29	6,04	5,76	2,72
500	77,89	70,68	70,43	71,83	7,21	7,46	6,06
630	74,79	70,35	70,43	72,09	4,44	4,36	2,70
800	65,39	61,38	66,86	63,36	4,01	-1,47	2,03
1000	62,11	55,34	58,42	55,83	6,77	3,69	6,28
1250	73,93	74,87	73,53	73,95	-0,94	0,40	-0,02
1600	64,5	61,39	59,96	60,41	3,11	4,54	4,09
2000	71,83	52,84	51,27	54,56	18,99	20,56	17,27
2500	74,36	65,65	63,49	64,03	8,71	10,87	10,33
3150	74,87	50,94	54,36	53,02	23,93	20,51	21,85
4000	80,86	49,60	49,26	48,54	31,26	31,60	32,32
5000	76,84	46,75	39,28	34,26	30,09	37,56	42,58
6300	71,3	39,23	30,53	32,04	32,07	40,77	39,26
8000	74,82	54,73	42,05	40,39	20,09	32,77	34,43
10000	73,98	50,55	40,32	35,60	23,43	33,66	38,38
12000	71,87	39,61	32,18	28,95	32,26	39,69	42,92
14000	48,72	29,79	32,75	30,85	18,93	15,97	17,87
16000	69,55	45,71	34,81	29,77	23,84	34,74	39,78

Priloga 24: Primerjava panelnih sistemov s klasično izolacijsko ploščo

frekvenca	referenca	ABSORPCIJA ZVOKA [Pa]			
		ivKiv	konKkon	furKfur	OSBKOSB
52	103,77	21,31	21,11	20,94	21,13
63	101,02	21,07	20,88	20,67	20,86
80	102,07	16,42	16,25	16,02	16,26
100	103,18	13,88	13,67	13,47	13,74
125	102,98	12,58	12,27	12,04	12,54
160	107,14	11,80	11,70	11,56	11,64
200	104,43	10,94	10,83	10,97	10,78
250	89,76	9,70	9,53	9,59	9,53
315	75,03	12,12	12,08	11,60	11,26
400	79,01	-0,93	9,43	2,71	2,72
500	77,89	4,66	4,35	3,58	6,06
630	74,79	3,69	2,79	3,16	2,70
800	65,39	2,36	3,34	2,22	2,03
1000	62,11	4,97	4,63	5,60	6,28
1250	73,93	-0,83	-0,64	-1,49	-0,02
1600	64,5	3,79	4,45	4,60	4,09
2000	71,83	18,47	19,65	15,64	17,27
2500	74,36	10,21	11,03	10,77	10,33
3150	74,87	21,57	20,96	24,29	21,85
4000	80,86	32,22	33,37	32,93	32,32
5000	76,84	40,03	41,64	41,09	42,58
6300	71,3	43,60	40,59	40,90	39,26
8000	74,82	37,59	33,57	33,84	34,43
10000	73,98	39,29	37,49	37,87	38,38
12000	71,87	40,38	41,83	41,47	42,92
14000	48,72	20,95	20,51	17,56	17,87
16000	69,55	38,03	41,11	39,32	39,78