

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE
STOPNJE GRADBENIŠTVO**

Kandidat/-ka:

NIKA ŠUBIC

**IZBOLJŠANJE AKUSTIČNE KLIME PROSTOROV V
VZGOJNO VARSTVENIH USTANOVAH Z UPOŠTEVANJEM
PSIHOFIZIČNEGA ODZIVA UPORABNIKOV**

**IMPROVEMENT OF ROOM ACOUSTICS IN DAY CARE
FACILITIES WHILE CONSIDERING PSYCHOPHYSICAL
RESPONSE OF USERS**

Mentor/-ica:

doc. dr. Roman Kunič

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

doc. dr. Mateja Dovjak

Član komisije:

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 699.844:727(497.4)(043.3)
Avtor: Nika Šubic
Mentor: doc. dr. Roman Kunič, univ. dipl. inž. grad.
Somentorica: doc. dr. Mateja Dovjak, dipl. san. Inž.
Naslov: Izboljšanje akustične klime prostorov v vzgojno varstvenih ustanovah z upoštevanjem psihofizičnega odziva uporabnikov
Tip dokumenta: Magistrsko delo
Obseg in oprema: 91 str., 21 pregl., 19 graf., 35 sl.
Ključne besede: hrup, prostorska akustika, odmevni čas, absorber zvoka, vzgojno varstvene ustanove, psihofizični vpliv, akustične meritve, impedančna cev

Izvleček

Magistrsko delo obravnava problematiko akustične ureditve prostorov vzgojno varstvenih ustanov. Odmevni časi so v le-teh pogosto predolgi, kar ne omogoča optimalnega izvajanja pedagoške aktivnosti, visoka raven hrupa pa tudi negativno vpliva na zdravje zaposlenih in otrok.

Reševanja problema smo se lotili z inovativnim razvojem prototipnih zvočno absorpcijskih elementov, prilagojenih za uporabo v vzgojno varstvenih ustanovah. Takšni elementi morajo izpolnjevati zakonske zahteve za gradbene proizvode, poleg tega pa morajo biti primerni tudi iz zdravstveno-higienskega, ekonomskega in kreativnega vidika. Metode dela obsegajo izračune, laboratorijske meritve absorpcijskega koeficienta, in-situ meritve odmevnega časa in ekvivalentne ravni zvočnega tlaka ter osebno komunikacijo z uporabniki prostora v pogledu njihovega psihofizičnega odziva na obstoječe in na stanje po prenovi.

Izdelanih je bilo pet prototipnih tipov absorpcijskih elementov, ki so se razlikovali glede na sestavo in postavitev v prostoru. Za namen izračuna potrebne količine zvočno absorpcijske površine v prostoru smo izdelali računski program ROC. *In-situ* meritve so bile izvedene pred in po akustični ureditvi igralnice in so pokazale izrazito izboljšanje po vnosu absorpcijskih elementov. Odmevni čas se je skrajšal za 44% iz 0,92 s na samo 0,52 s (v srednjem frekvenčnem območju), ekvivalentna raven zvočnega tlaka pa za 2,5 dB.

Kot ocena ustreznosti je služilo tudi subjektivno mnenje uporabnikov prostora, pridobljeno preko vprašalnika in pogovorov z zaposlenimi, ki so bili nad izvedeno akustično ureditvijo zadovoljni, celo navdušeni: akustična klima se izrazito izboljša, prostor je tišji, akustični elementi pa nemoteči v prostoru.

V zaključku smo podali kriterije (gradbeno-tehnične, zdravstveno-higienske, ekonomske in kreativne) s katerimi se v procesu odločanja izbere končni akustični element.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 699.844:727(497.4)(043.3)
Author: Nika Šubic
Supervisor: Assist. Prof. Roman Kunič, Ph.D.
Co-advisor: Assist. Prof. Mateja Dovjak, Ph.D.
Title: Improvement of room acoustics in day care facilities while considering psychophysical response of users
Document type: M. Sc. Thesis
Notes: 91 p., 21 tab., 19 gr., 35 fig.
Key words: noise, room acoustics, reverberation time, sound absorber, day care facilities, psychophysical response, acoustical measurements, impedance tube

Abstract

The master thesis researches the unsatisfactory acoustic environment of day care facilities which often have too long reverberation times. Consequently, the learning process cannot be executed in the most optimum way, while the high noise levels also negatively affect the health of staff and children.

We approached the problem by developing prototypical sound absorbers customized for implementation in day care facilities. Such elements have to meet the statutory requirements for construction products as well as be appropriate in regards to health, economics and creativity. Working methods include calculations, laboratory measurements of absorption coefficient, *in-situ* measurements of reverberation time and equivalent sound pressure level and personal communication with the staff.

Five types of prototypical absorbers were made, varying by their design and position in the room and a computer program was created for calculating the needed absorptive surface. *In-situ* measurements performed before and after acoustical refurbishment of a playroom showed a notable improvement of acoustical properties of the room after the renovation. Mid-frequency reverberation time was reduced for almost 44% from 0,92 s to 0,52 s, while equivalent sound pressure level dropped for approximately 2,5 dB.

Effectiveness of the acoustical refurbishment was also measured by the staff's subjective opinion, which was obtained in the form of personal communication and a questionnaire. The staff was delighted with the improvements, they believe the space to be much quieter and the sound absorbers unobtrusive.

The criteria relevant for deciding on a most appropriate acoustical element for the specific environment is presented in the conclusion.

ZAHVALA

Za vodenje in pomoč pri izdelavi magistrskega dela se zahvaljujem mentorju doc. dr. Romanu Kuniču ter somentorici doc. dr. Mateji Dovjak.

Hvala Ani Repše in ostalim zaposlenim Vrtca Pod Gradom za kreativno in tehnično sodelovanje ter vse napotke in komentarje.

Zahvalila bi se tudi Luki Pleterskemu iz podjetja Filc d.d. za pomoč pri pridobitvi materiala ter konstruktivne pogovore.

Za vso pomoč pri razumevanju področja prostorske akustike, posojilo merilne opreme, vodenje in podporo pri izvajanju meritev ter vsestransko spodbujanje tekom magistrskega dela se želim iskreno zahvaliti Roku Prislanu.

Kot zadnje pa bi se iskreno zahvalila moji fantastični družini, Martinu in vsem odličnim prijateljem, ki so me podpirali in z menoj uživali v študentskih letih. Brez vaše pomoči, napotkov in spodbude med nastajanjem magistrskega dela mi ne bi uspelo.

KAZALO

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	II
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	III
ZAHVALA.....	IV
KAZALO.....	V
KAZALO PREGLEDNIC	VIII
KAZALO SLIK.....	IX
KAZALO GRAFIKONOV	XI
1 UVOD.....	1
2 CILJI IN HIPOTEZE.....	4
3 ZVOK.....	6
3.1 Širjenje zvoka	6
3.1.1 Zvočno valovanje	6
3.1.1.1 Osnovna oblika zvočnega valovanja	6
3.1.1.2 Kompleksne oblike zvočnega valovanja.....	7
3.1.2 Difuzno zvočno polje	7
3.1.3 Širjenje zvoka po prostoru.....	8
3.1.3.1 Zvočni odboj	8
3.1.3.2 Zvok kot funkcija prostora.....	9
3.2 Zvočno zaznavanje	10
3.2.1 Raven zvočnega tlaka.....	10
3.2.2 Zaznavanje glasnosti zvoka	11
3.2.3 Frekvenčne obtežbe.....	12
3.2.4 Oktavni pasovi.....	12
4 PROSTORSKA AKUSTIKA	14
4.1 Odmevnost prostora.....	14
4.1.1 Vpliv odmevnosti na raven zvočnega tlaka v prostoru	15
4.1.2 Vpliv odmevnosti na jasnost govora.....	15
4.1.3 Odmevni čas	16
4.1.3.1 Računsko določanje odmevnega časa	17
4.1.3.2 Meritve odmevnega časa	18
4.2 Zvočna absorpcija materialov.....	18
4.2.1 Absorpcijski koeficient.....	19
4.2.1.1 Absorpcijski parametri prostora	19
4.2.1.2 Meritve absorpcijskega koeficienta.....	20
4.2.2 Absorberji zvoka.....	21
4.2.2.1 Porozni absorberji.....	22
4.2.2.2 Membranski absorberji	23
4.2.2.3 Perforirani absorberji	24
4.2.2.4 Absorpcija ljudi	25
4.2.3 Umestitev absorberjev v prostor	25

5	PSIHOFIZIČNI VPLIV AKUSTIČNEGA OKOLJA NA ČLOVEKA	26
5.1	Hrup in njegovi vplivi na človeka	26
5.1.1	Ekvivalentna raven zvočnega tlaka	27
5.1.2	Posledice izpostavljenosti hrupu	27
5.1.2.1	Okvara sluha.....	27
5.1.2.2	Druge fiziološke posledice	28
5.1.2.3	Psihološke posledice izpostavljenosti hrupu.....	29
5.1.3	Načini zmanjšanja hrupa	29
5.2	Hrup v prostorih vzgojno varstvenih ustanov	30
5.2.1	Hrup v igralnicah	30
5.2.2	Hrup na delovnem mestu	32
5.2.3	Zmanjševanje hrupa v vzgojno varstvenih ustanovah.....	34
5.3	Oprema, higijenski režim in varnost otrok v vzgojno varstvenih ustanovah	35
5.4	Obstoječe raziskave s področja prostorske akustike prostorov vzgojno varstvenih ustanov	36
6	MERILNE IN RAČUNSKE METODE.....	38
6.1	Meritve zvočno absorpcijskih lastnosti z impedančno cevjo.....	38
6.2	Meritve odmevnega časa	40
6.3	Meritve ekvivalentne ravni hrupa	43
6.4	Računska analiza	44
7	AKUSTIČNE MERITVE, IZRAČUNI IN UREDITEV	46
7.1	Izbira prostora za akustično ureditev	46
7.2	Določitev materialov	48
7.2.1	Filc.....	48
7.2.1.1	Absorpcijske lastnosti	49
7.2.1.2	Drugi kriteriji.....	53
7.2.2	Kamena volna	53
7.3	Določitev potrebne količine absorpcijskega materiala	54
7.4	Sestava zvočno absorpcijskih elementov	56
7.4.1	Stropni elementi	57
7.4.2	Stenski elementi	57
7.4.3	Talni elementi	58
7.4.4	Začasni stenski element.....	59
7.4.5	Začasni prostorski elementi izdelani v vrtcu	59
7.5	Potek meritev odmevnega časa in ekvivalentne ravni zvočnega tlaka.....	60
7.6	Analiza rezultatov	61
7.6.1	Odmevni čas pred in po akustični ureditvi.....	61
7.6.2	Odstopanje rezultatov in merilna natančnost	64
7.6.3	Primerjava meritev v točki S1-M2.....	65
7.6.4	Rezultati meritev ekvivalentne ravni zvočnega tlaka	66
7.6.5	Ujemanje rezultatov meritev z računskim modelom	68
7.6.6	Upoštevanje tehnične smernice in drugih priporočil	70

8	SUBJEKTIVNA OCENA ZAPOSLENIH IN DRUGI SOCIOLOŠKI TER TEHNIČNI	
VIDIKI		73
8.1	Subjektivna ocena zaposlenih v vzgojno varstveni ustanovi	73
8.1.1	Analiza vprašalnika	73
8.1.2	Pogovori z zaposlenimi pred akustično ureditvijo prostorov	74
8.1.3	Pogovori z zaposlenimi po akustični ureditvi prostorov	75
8.1.4	Zaključki pridobljeni iz subjektivne ocene zaposlenih	75
8.2	Primernost zvočno absorpcijskih elementov za vnos v prostore vzgojno varstvenih ustanov	76
8.2.1	Zdravstveno-higienske zahteve	76
8.2.2	Gradbeno-tehnične zahteve	76
8.2.3	Ekonomičnost	77
8.2.4	Vključevanje v kreativno-pedagoški proces	78
9	INTERPRETACIJA REZULTATOV	79
9.1	Akustične meritve in izračuni	79
9.1.1	Preliminarne metode	79
9.1.2	Izvajanje končnih meritev	80
9.1.3	Rezultati končnih meritev	80
9.2	Prototipni akustični elementi	81
9.2.1	Akustične lastnosti zvočno absorpcijskih elementov	81
9.2.2	Druge tehnične in sociološke lastnosti zvočno absorpcijskih elementov	82
9.3	Psihofizičen odziv uporabnikov	82
9.4	Predlogi za nadaljnje delo in končne rešitve	83
10	ZAKLJUČEK	85
VIRI		87
SEZNAM PRILOG		91

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Posledice stresa so čustvene, kognitivne, vedenjske in fiziološke narave.....	29
Preglednica 2: Maksimalni odmevni čas v prostorih namenjenih učnemu procesu. [21].....	32
Preglednica 3: Mejne vrednosti izpostavljenosti hrupu na delovnem mestu. [12].....	32
Preglednica 4: Največje dopustne ekvivalentne ravni hrupa. [12]	33
Preglednica 5: Ekvivalentne ravni hrupa v vzgojno varstvenih ustanovah – predhodne raziskave.	36
Preglednica 6: Vrednosti odmevnega časa v treh igralnicah Vrtca Pod Gradom pred akustično ureditvijo (6.6.2017).....	47
Preglednica 7: Testirani materiali v sklopu preizkusa z impedančno cevjo.	49
Preglednica 8: Testirani vzorci, njihova končna sestava, debelina in odmik od toge podlage.....	50
Preglednica 9: Izbran material – filc.....	53
Preglednica 10: Izbran material – kamena volna	54
Preglednica 11: Računsko določene vrednosti in vrednosti preliminarne meritve odmevnega časa.	54
Preglednica 12: Upoštevane vrste absorpcijskih elementov in pripadajoča površina.....	56
Preglednica 13: Vrste in površine zvočno absorpcijskih elementov v realnem okolju.	60
Preglednica 14: Vrednosti odmevnega časa pred in po akustični ureditvi in medsebojna primerjava (17.6.2017).	62
Preglednica 15: Primerjava povprečnih odmevnih časov različnih frekvenčnih pasov pokaže najbolj izrazit padec na območju srednjih frekvenc.....	62
Preglednica 16: Razmerje med odstotkom vnesenih absorberjev v prostor in padcem odmevnega časa.	66
Preglednica 17: Vrednosti odmevnega časa v fazah 2 in 3.	66
Preglednica 18: Ekvivalentna raven zvočnega tlaka pred in po akustični ureditvi ter hrup ozadja.....	67
Preglednica 19: Določitev efektivne absorpcijske površine z uporabo eksperimentalno določenih faktorjev.....	70
Preglednica 20: Tehnične, zdravstvene in sociološke zahteve za akustično ureditev igralnic.	83
Preglednica 21: Primerjava lastnosti prototipnih akustičnih elementov z akustičnimi proizvodi na trgu.	84

KAZALO SLIK

Slika 1: Shematski prikaz vsebine magistrskega dela.	3
Slika 2: (a) Shematski prikaz območja z višjim (gostejše pike) in nižjim (redkejše pike) zvočnim tlakom, (b) Osnovna oblika zvočnega valovanja – (sinusni) ton in njegovi glavni karakteristiki: valovna dolžina in amplituda. [6]	6
Slika 3: Zvočni odboj od konkavne ovire povzroči ojačanje zvoka v točno določeni točki. [6].....	8
Slika 4: Zaradi stoječega valovanja med dvema vzporednima stenama se zvok dodatno ojača v vozliščih.	8
Slika 5: Zvočni odboj v kotu. V primerih vseh treh različnih virov zvoka se zvočno valovanje vedno odbije nazaj v smer, iz katere je pripotovalo. [6]	9
Slika 6: Zvočni tlak (μPa) in Raven zvočnega tlaka (dB) v vsakdanjem življenju [2]	10
Slika 7: Povezava med foni in decibeli s krivuljami enake glasnosti. [6].....	11
Slika 8: Frekvenčne obtežbe A, B, C in Z. Frekvenčna obtežba A je najpogostejše uporabljena pri akustičnih meritvah, frekvenčna obtežba Z pa meri neobteženo raven zvočnega tlaka. [15].....	12
Slika 9: Srednje frekvence terčnih in oktavnih (odebeljeno) pasov v Hz. [2]	13
Slika 10: Vpliv odmevnosti prostora na nivo zvočnega tlaka: vsak odboj (R) dodatno ojači osnoven direkten zvok (D). [6]	15
Slika 11: Vpliv odmevnosti prostora na jasnost govora [6]	16
Slika 12: Priporočeni odmevni časi glede na namembnost prostora: Prostori namenjeni govoru naj imajo krajši odmevni čas kot prostori namenjeni glasbi, prav tako je še sprejemljivo območje ugodnega odmevnega časa večje pri prostorih namenjenim glasbenim dogodkom. [4].....	16
Slika 13: Zvok ob interakciji z drugim materialom: Razlika v količina absorbiranega in odbitega zvoka v primeru betona (levo) in zvočno absorpcijskega materiala (desno). [7].....	18
Slika 14: Impedančna cev vir.....	20
Slika 15: Ocena razmerja med absorpcijskim koeficientom pri pravokotnem vpadnem kotu in absorpcijskim koeficientom pri naključnem vpadnem kotu [6]	21
Slika 16: Primerjava absorpcijskih lastnosti poroznih in resonančnih absorberjev. [7]	22
Slika 17: Vrste materialov z odprto porasto strukturo: (a) Pena, (b) pesek, (c) bombažna vlakna, (d) material z dvojno porasto strukturo [38].....	22
Slika 18: Tipičen membranski absorber sestavljen iz plošče in zaprte zračne votline, katero je možno zapolniti s poroznim materialom. [5].....	23
Slika 19: Helmholtzov resonator (levo), mehanska analogija Helmholtzovega resonatorja (sredina) in Helmholtzov resonator v obliki perforiranih oblog (desno) [2].....	24
Slika 20: Spreminjanje praga slišnosti zaradi osemurnega delavnika pri izpostavljenosti ravni hrupa 100dB(A) v odvisnosti od frekvence. [15]	28

Slika 21: Optimalni odmevni čas v učilnicah v odvisnosti od prostornine prostora. Običajna učilnica ima prostornino manjšo od 200 m ² , torej bi moral biti odmevni čas prostora manjši od 0,6 s. [20].....	31
Slika 22: Tolerančno polje odmevnega časa v učilnicah dovoljuje 20% odstopanje odmevnega časa v obe smeri. [20]	31
Slika 23: Impedančna cev 1, d ₁ =10 cm.....	38
Slika 24: Impedančna cev 2, d ₂ =2,5 cm.....	38
Slika 25: Potek meritev absorpcijskega koeficienta z manjšo od obeh impedančnih cevi.	39
Slika 26: Postavitev vzorca v impedančno cev na odmiku 20 cm od toge podlage.	39
Slika 27: Izrezana vzorca dveh velikosti, za preizkus absorpcijskega koeficienta v obeh impedančnih ceveh.	39
Slika 28: Pozicije merilnih točk v igralnici 8.....	42
Slika 29: Merilna oprema za izvajanje meritev odmevnega časa in ekvivalentne ravni hrupa: generator zvoka (levo) in akustični analizator (desno).....	43
Slika 30: Skica tlorisa igralnice 8 z vrisano stalno opremo in lučmi. Dimenzije so v metrih...	47
Slika 31: Stropni »V« absorpcijski element.	57
Slika 32: Stenski absorpcijski element.	58
Slika 33: Talni absorpcijski element (dva pisano zelena kvadrata ob steni).	58
Slika 34: Začasni absorpcijski elementi umeščeni v prostor.	59
Slika 35: Igralnica 8 po namestitvi zvočno absorpcijskih elementov.....	61

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Primerjava odmevnih časov treh igralnic pred akustično ureditvijo (6.6.2017). ...	46
Grafikon 2: Primerjava absorpcijskih koeficientov različnih vrst filca pokaže, da je edini relevanten faktor pri izboljšanju absorpcijskih lastnosti debelina materiala.	50
Grafikon 3: Vpliv debeline filca na absorpcijski koeficient: S povečevanjem debeline vzorca iz 20 mm na 80 mm se izrazito poveča zvočna absorpcija materiala tudi pri nižjih frekvencah.	51
Grafikon 4: Vpliv odmika filca od toge podlage na absorpcijski koeficient pokaže, da se z odmikom poveča učinkovito absorpcijsko območje tudi na nižje frekvence.	51
Grafikon 5: Prekrivanje filca z drugimi materiali: V primeru, da se filc prekrije z neporoznim materialom kot je papir, se zvočna absorpcija visokih frekvenc zmanjša.	52
Grafikon 6: Primerjava informativno izmerjenega odmevnega časa z računsko določenimi vrednostmi po kalibraciji modela.	55
Grafikon 7: Računska napoved odmevnega časa po akustični ureditvi. Z izjemo najnižjih dveh obravnavanih oktavnih pasov je razvidno, da bo ciljna vrednost odmevnega časa dosežena.	56
Grafikon 8: Primerjava odmevnih časov pred in po akustični ureditvi pokaže izrazito skrajšanje vrednosti odmevnega časa, kot tudi bolj enakomeren potek preko terčnih pasov po akustični ureditvi.	63
Grafikon 9: Padec odmevnega časa po akustični ureditvi v odvisnosti od terčnega pasu: Najbolj izrazit padec odmevnega časa je izmerjen med terčnimi pasovi 200 Hz in 5000 Hz.	63
Grafikon 10: Odmevni čas pred akustično ureditvijo v odvisnosti od terčnih pasov s pripadajočim odstopanjem rezultatov.	64
Grafikon 11: Odmevni čas po akustični ureditvi v odvisnosti od terčnih pasov s pripadajočim odstopanjem rezultatov.	64
Grafikon 12: Primerjava odmevnih časov v vseh štirih fazah v merilni točki S1-M2 kaže na relativno veliko zmanjšanje odmevnega časa že po 2. fazi ureditve.	65
Grafikon 13: Ekvivalentne ravni zvočnega tlaka pred in po ureditvi ter hrup ozadja.	67
Grafikon 14: Izmerjene razlike v ekvivalentni ravni hrupa po terčnih pasovih.	68
Grafikon 15: Primerjava rezultatov meritev in računske analize odmevnega časa pred akustično ureditvijo: Računski model je bil predhodno dobro umerjen.	68
Grafikon 16: Primerjava rezultatov meritev in računske analize odmevnega časa po akustični ureditvi: Opazno je rahlo odstopanje rezultatov, izmerjene vrednosti so bolj ugodne od napovedanih.	69
Grafikon 17: Primerjava rezultatov meritev in računske analize odmevnega časa po akustični ureditvi ob upoštevanju efektivne absorpcijske površine.	70
Grafikon 18: Primerjava odmevnega časa z določili tehnične smernice in drugimi priporočili.	71
Grafikon 19: Tolerančno območje odmevnega časa v skladu s tehnično smernico v primerjavi z razmerjem T_{60}/T_{opt} pred in po akustični ureditvi.	72

1 UVOD

Zvok je pomemben sestavni del življenja, saj nam služi za medsebojno komunikacijo in zaznavanje okolice. V večini primerov ima zvok pozitiven vpliv na človeka, njegovo počutje in zdravje, občasno pa zvok zaradi previsoke glasnosti, neželene vsebine ali impulzivnosti izzove neugoden odziv poslušalca. Nekateri zvoki pri nas izzovejo ugodje (glasba), določeni zvoki služijo kot opozorilo (sirena), drugi pa nas motijo pri opravljanju dnevnih opravil (ropot). Zvokom, ki so moteči, nadležni ali celo škodljivi, pravimo hrup. Prekomerna izpostavljenost hrupu ima negativne psihofizične posledice: povzroča utrujenost, stres, zmanjšuje produktivnost, negativno vpliva na delovanje raznih notranjih organov in v primeru daljše izpostavljenosti povzroča okvare sluha, zato je potrebno človekovo izpostavljenost visoki ravni hrupa v čim večji meri omejiti. [8] [14] [15]

Akustika je obširna znanstvena veda, ki preučuje zvok, njegov nastanek in prenos od izvora do sprejemnika ter njegovo zaznavanje in dožemanje. V magistrskem delu se posvečamo področju prostorske akustike, ki obravnava širjenje in zaznavanje zvoka znotraj omejenega prostora ter njegove karakteristike. Poznavanje in uporaba dognanj prostorske akustike ima ključno vlogo pri zagotavljanju ustreznih delovnih in bivalnih pogojev, saj lahko s primerno akustično ureditvijo prostora močno izboljšamo kvaliteto bivanja v zaprtem prostoru. Širjenje zvoka znotraj prostora je namreč fizično omejeno: velikost, oblika in akustične lastnosti mejnih ploskev prostora vplivajo na zvočno polje v prostoru in glede na lastnosti omejenega prostora ustvarjajo specifično akustično klimo. Akustične lastnosti prostora opisujemo z akustičnimi parametri. Zelo pomemben parameter je odmevni čas, ki vpliva na jasnost zvoka, raven zvočnega tlaka v prostoru, dožemanje velikosti in oblike prostora, obarvanost zvoka itd. Z zmanjšanjem odmevnega časa lahko pozitivno vplivamo na razumljivost govora in znižamo raven hrupa v prostoru ter s tem izboljšamo zvočno udobje. [1] [2]

Magistrsko delo obravnava akustične lastnosti prostorov v specifičnem okolju - v vzgojno varstvenih ustanovah, kjer večina prebivalstva preživi svoja zgodnja otroška leta, zato je ureditev prostorov z vidika akustike izrednega pomena. V teh ustanovah je zaradi vsakodnevnih dejavnosti mlade populacije določena količina hrupa neizogibna, potrebno pa je hrup obvladovati na način, da se s primernimi ukrepi omili negativen vpliv zaprtega prostora na širjenje hrupa in s tem ustvari primerne bivalne pogoje za otroke in zaposlene.

Raziskave ([16], [26] - [37], [42] – [44]) kažejo, da so odmevni časi v vzgojno varstvenih objektih običajno predolgi, kar ne omogoča optimalnega izvajanja pedagoških dejavnosti, visoka raven hrupa pa negativno vpliva na zdravje zaposlenih in otrok. Ekvivalentne ravni zvočnega tlaka v vrtcih pogosto presegajo 80 dB(A), kar predstavlja tudi že spodnjo opozorilno vrednost izpostavljenosti hrupu na delovnem mestu [12]. Hrupno delovno okolje je znan povzročitelj stresa [16], poleg tega ima visoka raven hrupa negativne vplive na kognitivni razvoj otrok [15] [22] [35].

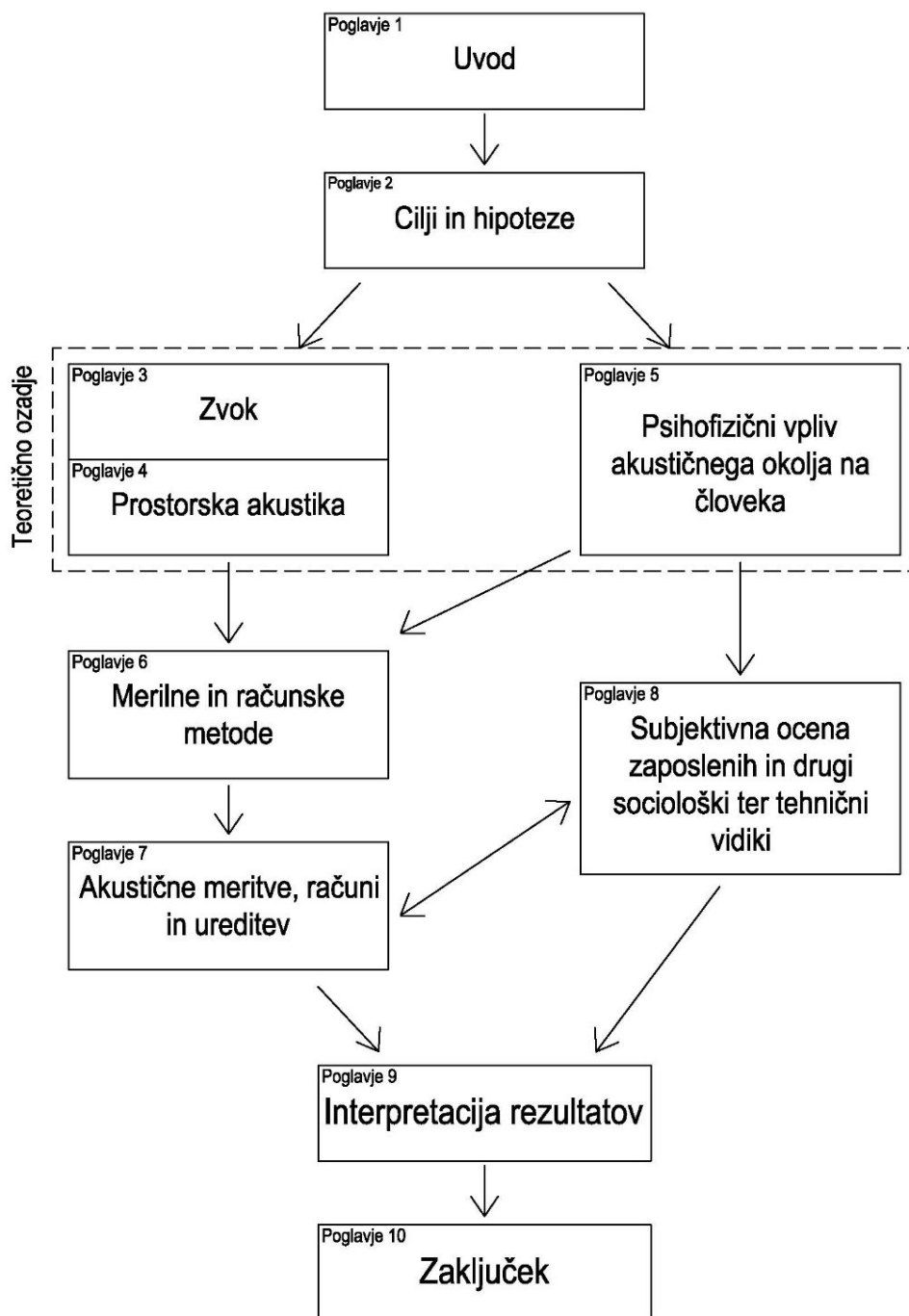
Omenjeni problematiki se posveča premalo pozornosti in kljub naraščajoči ozaveščenosti o škodljivih psihofizičnih učinkih hrupa na človeka je prisotno premalo aktivnega reševanja problema. Zakonodaja na področju akustične ureditve prostorov vzgojno varstvenih ustanov je izjemno pomanjkljiva, ravno tako pa akustične ureditve predstavljajo večjo finančno investicijo, za katero se odločijo le redke institucije.

V Sloveniji so v zadnjih letih potekale raziskave, ki obravnavajo tematiko zvočnega udobja v vrtcih ter negativnih posledic izpostavljenosti visoki ravni hrupa ([16] [42] [43] [44] [57]), vendar se doslej še nihče ni lotil reševanja problema aplikativno. Glavni cilj magistrskega dela je bil razviti nov, enostaven in cenovno dostopen sistem zvočno absorpcijskih elementov, prilagojenih za uporabo v vzgojno varstvenih ustanovah. Takšni elementi morajo v prvi vrsti zadovoljiti kriterijem s področja akustike, hkrati pa še obstoječim predpisom iz ostalih področij, kot n.pr. gradbeništva, varstva pri delu in zdravja na delovnem mestu. Osnovno vodilo pri izbiri materiala za sanacijo prostorske akustike je bilo, naj bo izbrani material ekonomičen, izdelava akustičnih elementov naj se po možnosti vklopi v izobraževalno-kreativni proces, končna uporabna vrednost akustičnih elementov pa naj bo poleg njihove osnovne funkcije tudi estetska. Kot izhodiščni material za izdelavo akustičnih elementov je bil po raziskavi tržišča in ob upoštevanju področja uporabe izbran filc slovenske proizvodnje, ki je cenovno ugoden, enostaven za raznovrstno obdelavo in ima poznane akustične lastnosti, v našem okolju predvsem s področja avtomobilske industrije.

Magistrsko delo je sestavljeno iz desetih poglavij. Za prvim uvodnim poglavjem so v poglavju 2 predstavljeni cilji in hipoteze magistrskega dela, poglavja 3 – 5 obsegajo teoretični del, v sklopu katerega so opisane osnovne značilnosti zvočnega valovanja in prostorske akustike ter psihofizični vpliv akustičnega okolja na človeka. Za pridobitev teoretičnega ozadja je bil uporabljen nabor literature z različnih področij v obliki monografij, člankov, zaključnih del, tehničnih standardov, smernic in druge zakonodaje. Praktični del je zajet v poglavjih 6 – 9 in vključuje kombinacijo izračunov, laboratorijskih meritev absorpcijskih lastnosti materialov, *in-situ* meritev odmevnega časa in ekvivalentne ravni zvočnega tlaka ter pogovore in anketiranje uporabnikov prostorov. Metode dela so predstavljene v poglavju 6, poglavje 7 je namenjeno predstavitvi poteka dela, vseh opravljenih meritev in izračunov ter analizi rezultatov, v poglavju 8 so obravnavani sociološki in tehnični vidiki upoštevanji pri akustični ureditvi ter subjektivne ocene zaposlenih pred in po vnosu zvočnih absorberjev v prostor. Zadnji dve poglavji (poglavji 9 in 10) sta namenjeni interpretaciji rezultatov in zaključkom, pridobljenih skozi celotni potek magistrskega dela.

Doprinos magistrskega dela je v celovitem obvladovanju problematike akustične ureditve prostorov vzgojno varstvenih ustanov. Postopek je izveden v fazah, kjer izhajamo iz specifik namembnosti stavbe in njihovih uporabnikov. Izvedemo kombinacijo izračunov, laboratorijskih meritev absorpcijskega koeficienta, *in-situ* meritev odmevnega časa in ekvivalentne ravni zvočnega tlaka ter osebno komunikacijo z uporabniki prostora. V zaključnih priporočilih definiramo kriterije, ki jih je potrebno izpolniti pri izbiri končnih rešitev in predstavljajo pomemben del procesa odločanja.

Shematski pregled poteka magistrskega dela je prikazan na sliki 1.



Slika 1: Shematski prikaz vsebine magistrskega dela.

2 CILJI IN HIPOTEZE

Cilji in pripadajoče hipoteze magistrskega dela so sledeče:

1. cilj: Spoznati problematiko prostorske akustike v vzgojno varstvenih ustanovah.

- Pregledati literaturo s področja zvoka in prostorske akustike ter hrupa in njegovih vplivov na človeka,
- Pregledati aktualno zakonodajo o ureditvi vzgojno varstvenih ustanov, smernice in standarde s področja prostorske akustike ter druge pravne akte z relevantnih področij,
- Analizirati predhodne raziskave o akustiki šolskih in predšolskih prostorov, ravneh hrupa znotraj učilnic in igralnic ter vplivu hrupa na človeka.

Hipoteza 1: Predvidevamo, da dobra akustična ureditev prostorov pozitivno vpliva na razpoloženje in zdravje uporabnikov.

2. cilj: Preučiti trenutno stanje ter želje in potrebe uporabnikov v izbranem vrtcu.

- Izvesti pogovore s pedagogi in organizatorjem zdravstveno-higienskega režima o trenutnem stanju akustičnega udobja v igralnicah,
- Izdelati anketni vprašalnik o zaznavanju hrupnosti v prostorih vzgojno varstvene ustanove,
- Pridobiti informacije o higienskih, prostorskih in drugih predlogih oziroma omejitvah glede vnosa zvočnih absorberjev v igralnice,
- Izvesti preliminarne meritve odmevnega časa v izbranih prostorih in izbrati najprimernejši prostor za akustično ureditev.

Hipoteza 2: Sklepamo, da so akustične ureditve prostorov vzgojno varstvenih ustanov nezadovoljive.

3. cilj: Določiti absorpcijske koeficiente izbranih materialov.

- Izbrati materiale za testiranje, kateri bi bili potencialno primerni za vnos v prostore vzgojno varstvenih ustanov,
- Izvesti meritve absorpcijskega koeficienta z impedančno cevjo,
- Analizirati rezultate in izbrati najprimernejše sestave zvočnih absorberjev z akustičnega vidika.

Hipoteza 3: Predpostavimo, da je filc primeren material za izdelavo zvočnih absorberjev z akustičnega vidika.

4. cilj: Izdelati program za račun odmevnega časa prostorov.

- Zbrati in obdelati baze podatkov,
- Izdelati program za račun odmevnega časa ob upoštevanju zahtev za akustično ureditev učilnic,
- Kalibrirati računski model in napovedati potrebne količine absorpcijskega materiala za obravnavan prostor.

Hipoteza 4: Predvidevamo, da je z računskim programom možna napoved odmevnega časa prostora zadovoljive natančnosti.

5. cilj: Izvesti *in-situ* meritve odmevnega časa in ekvivalentne ravni hrupa.

- Izvesti meritve odmevnega časa pred in po akustični ureditvi ob upoštevanju standarda ISO 3382-2,
- izvesti vmesne meritve za namen informativne analize spreminjanja odmevnega časa ob dodajanju absorpcijskega materiala v prostor,
- Izvesti meritve ekvivalentne ravni hrupa pred in po akustični ureditvi.

Hipoteza 5: Predpostavimo, da bo vnos zvočno absorpcijskih elementov v prostor občutno skrajšal odmevni čas in ekvivalentno raven hrupa v prostoru, v smeri doseganja zahtevanih optimalnih vrednosti določenih s tehnično smernico [20].

6. cilj: Analizirati stanje po ureditvi in subjektivne ocene zaposlenih.

- Analizirati rezultate meritev,
- Izvesti pogovore z uporabniki prostora po akustični ureditvi.

Hipoteza 6: Domnevamo, da bodo rezultati meritev in rezultati subjektivne ocene zaposlenih pokazali, da je možno akustično udobje prostorov vzgojno varstvenih ustanov izrazito izboljšati.

7. cilj: Izdelati kriterije, ki jih je potrebno izpolniti pri izbiri končnih rešitev in bodo predstavljali pomemben del v procesu odločanja med akustično ureditvijo prostorov.

Hipoteza 7: Predvidevamo, da bodo končni predlagani akustični elementi ob upoštevanju vseh kriterijev z gradbeno-tehničnega, zdravstveno-higienskega, ekonomičnega in kreativnega vidika ustrezni za vnos v relevantno okolje.

3 ZVOK

Zvok lahko obravnavamo na dva različna načina: kot valovanje, ki se širi po mediju, ali kot dražljaj, ki vzbudi slušni mehanizem. Obe definiciji sta pravilni, razlikujeta se le v tem, ali zvok obravnavamo iz fizikalnega vidika ali z vidika človeškega zaznavanja. Za razumevanje načel prostorske akustike je potrebno poznavanje obeh vidikov zvoka in njune medsebojne povezanosti, zato so v sklopu poglavja predstavljene tako osnovne fizikalne lastnosti zvoka, kot tudi človeško zaznavanje le-tega. [1]

3.1 Širjenje zvoka

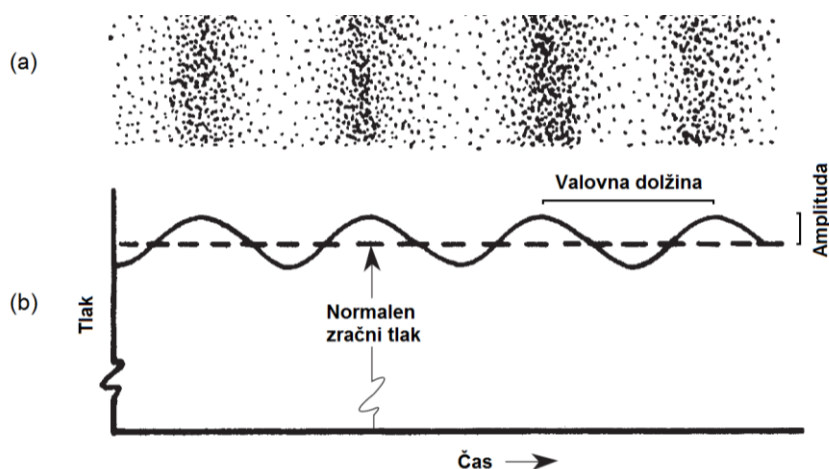
Zvok je valovanje, ki se širi po mediju (plinu, kapljevini, trdnini) in nastane kot posledica vibracije izvora. Lahko se širi v obliki longitudinalnega ali transversalnega valovanja, vendar je transversalno valovanje zvoka možno le v trdinah. V sklopu magistrskega dela se omejimo na širjenje zvoka po zraku, ki je edini relevantni medij v prostorski akustiki. [5] [6]

3.1.1 Zvočno valovanje

Obnašanje akustičnih spremenljivk, kot so zvočni tlak, hitrost delcev in pomik delcev opisujemo z **ravnim valom**, za katerega velja, da je izbrana spremenljivka v času t konstantna v ravnini, ki je pravokotna na smer valovanja. To ravnino imenujemo valovna fronta. [2]

3.1.1.1 Osnovna oblika zvočnega valovanja

Najosnovnejši obliki zvočnega valovanja, ki ima obliko sinusne krivulje pravimo **ton** (Slika 2) in jo v celoti opisujemo s frekvenco, valovno dolžino, amplitudo in fazo. [6]



Slika 2: (a) Shematski prikaz območja z višjim (gostejše pike) in nižjim (redkejša pike) zvočnim tlakom, (b) Osnovna oblika zvočnega valovanja – (sinusni) ton in njegovi glavni karakteristiki: valovna dolžina in amplituda. [6]

Valovna dolžina (λ) je razdalja, ki jo val prepotuje v času enega cikla, **frekvenca** (f) pa podaja število ciklov na sekundo in jo merimo v Hertzi (Hz); 1 Hz = 1 cikel na sekundo. Razmerje med valovno dolžino in frekvenco je obratno sorazmerno, povezava s hitrostjo zvoka je izražena v naslednji enačbi [6] [7] :

$$c = f * \lambda \quad (1)$$

Pri tem upoštevamo, da je približna hitrost zvoka v zraku pri normalnih okoljskih pogojih $c = 343$ m/s. [5]

Odmik zvočnega vala od ravnovesne lege je opisan z **amplitudo** (Slika 2). Amplitudo lahko izmerimo v vsaki točki valovanja, vendar je načeloma najbolj relevantna na vrhu vala, kjer ima največjo vrednost. [6]

Faza je karakteristika zvočnega valovanja, ki določa na katerem delu vala se v času t nahajamo. S fazo opisujemo fazni zamik, to je zamik začetka valovanja. [6]

3.1.1.2 Kompleksne oblike zvočnega valovanja

Zvoke okolja definiramo kot kompleksne zvoke in jih delimo na periodične in neperiodične. Periodični kompleksni zvok oziroma **zven** ima ponavljajočo se obliko valovanja in določeno valovno dolžino, ki ni tako pravilna kot pri čistem tonu. Valovna oblika zvena je sestavljena iz več sorodnih tonov (harmonij). Neperiodični kompleksni zvok imenujemo **šum** in ima neurejeno obliko valovanja, saj se valovna oblika in valovna dolžina spreminjata skozi čas. Primer šuma je loputanje z vrati in govor. [8] [11]

Tako za periodične kot za neperiodične kompleksne zvoke velja, da so sestavljeni iz niza harmonskih valov ali čistih tonov, to je valov z eno samo frekvenčno komponento. [6]

3.1.2 Difuzno zvočno polje

Difuzno zvočno polje je definirano kot zvočno polje po katerem je »gostota« zvočne energije enakomerna in se zvok širi v vse smeri z enako verjetnostjo. Idealno difuzno zvočno polje v prostoru ne obstaja, vendar ga velikokrat uporabimo kot teoretični približek realnemu stanju. Območja neposredno ob izvoru zvoka ne moremo opisati na tak način, kot tudi ne na območju ob ovirah, saj je tam »gostota« energije večja. Visoka stopnja difuznosti zagotavlja enakomeren zvočni odziv po prostoru in hkrati oteži lociranje izvora zvoka. V prostorih, kjer je difuzija zvočnega polja slaba, se lahko pojavijo neželeni akustični pojavi, kot na primer stoječe valovanje (glej poglavje 3.1.3.1). [2] [6]

Difuzno zvočno polje je pomemben koncept v tehniški akustiki, saj na tem idealiziranem konceptu temelji veliko merilnih postopkov. [3]

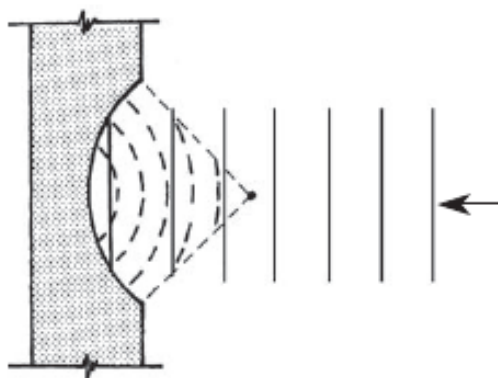
3.1.3 Širjenje zvoka po prostoru

Širjenje zvočnega valovanja znotraj zaprtega prostora je omejeno, zato se zvočno polje v prostoru razlikuje od zvočnega polja na prostem. Ob interakciji zvočnega valovanja z mejnimi ploskvami prostora se pojavijo zvočni pojavi kot je odboj, uklon, lom in absorpcija zvoka. Prostorska akustika se ukvarja predvsem z absorpcijo zvoka in zvočnim odbojem, slednji bo obravnavan v okviru tega poglavja.

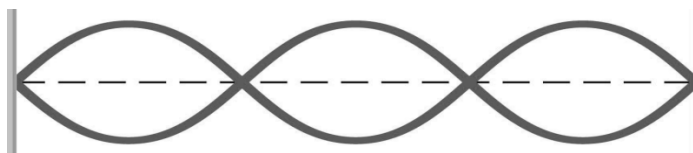
3.1.3.1 Zvočni odboj

Odboj zvoka je odvisen zlasti od oblike ovire in njene površine. Ko je površina ovire gladka, sta vpadni in odbojni kot zvoka enaka (zrcalni odboj), v kolikor pa je površina drugega medija hrapava, se bo odboj razpršil v več smeri (difuzni odboj). [6]

Pogosto se zaradi specifične oblike prostora pojavijo ojačitve zvoka v določeni točki prostora, kot na primer pri konkavni obliki ovire (Slika 3) oziroma v primeru dveh vzporednih ovir, ko lahko nastane stoječe valovanje (Slika 4), ki povzroči ojačitev zvoka v vozliščih valovanja [6].

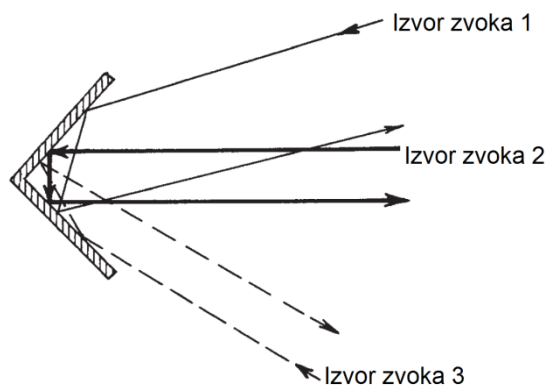


Slika 3: Zvočni odboj od konkavne ovire povzroči ojačanje zvoka v točno določeni točki. [6]



Slika 4: Zaradi stoječega valovanja med dvema vzporednima stenama se zvok dodatno ojača v vozliščih.

Zvok se od ovir lahko odbije tudi večkrat, predvsem v vogalih prostora, kot je prikazano na sliki 5. Ob dvojnem odboju od medsebojno pravokotnih gladkih površin se zvok odbije nazaj v smeri vpadnega signala [6].



Slika 5: Zvočni odboj v kotu. V primerih vseh treh različnih virov zvoka se zvočno valovanje vedno odbije nazaj v smer, iz katere je pripotovalo. [6]

3.1.3.2 Zvok kot funkcija prostora

Zvok v zaprtem prostoru je sestavljen iz treh komponent: direktni (neposredni) zvok, zgodnji odboji in odmevni zvok. Vse tri komponente so vedno prisotne, vendar se razmerje med njimi spreminja glede na obliko in velikost prostora ter vrsto in pozicijo površin v prostoru. [8]

Direktni zvok potuje po najkrajši možni poti od izvora do sprejemnika. Ta komponenta zvoka prenaša zvočni signal v nespremenjeni obliki in se obnaša kot zvok v prostem polju. [8]

Zgodnji odboji so zvok, ki se odbije od bližnjih ploskev in kmalu za direktnim zvokom pripotuje do sprejemnika. Zgodnji odboji ojačajo direktni zvok in človeku pomagajo pri zaznavanju prostora. Na podlagi zaznavanja zgodnjih odbojev je mogoče bolje oceniti velikost prostora in razdaljo do zvočnega vira. [8]

Zvok, ki se je že večkrat odbil od mejnih ploskev prostora in do sprejemnika pride z večjim časovnim zamikom imenujemo **odmevni zvok**. Za razliko od direktnega zvoka in zgodnjih odbojev je izvor odmevnega zvoka težje locirati, saj večkrat odbita zvočna valovanja prihajajo do sprejemnika po kompleksni poti in iz mnogih različnih smeri. [8]

3.2 Zvočno zaznavanje

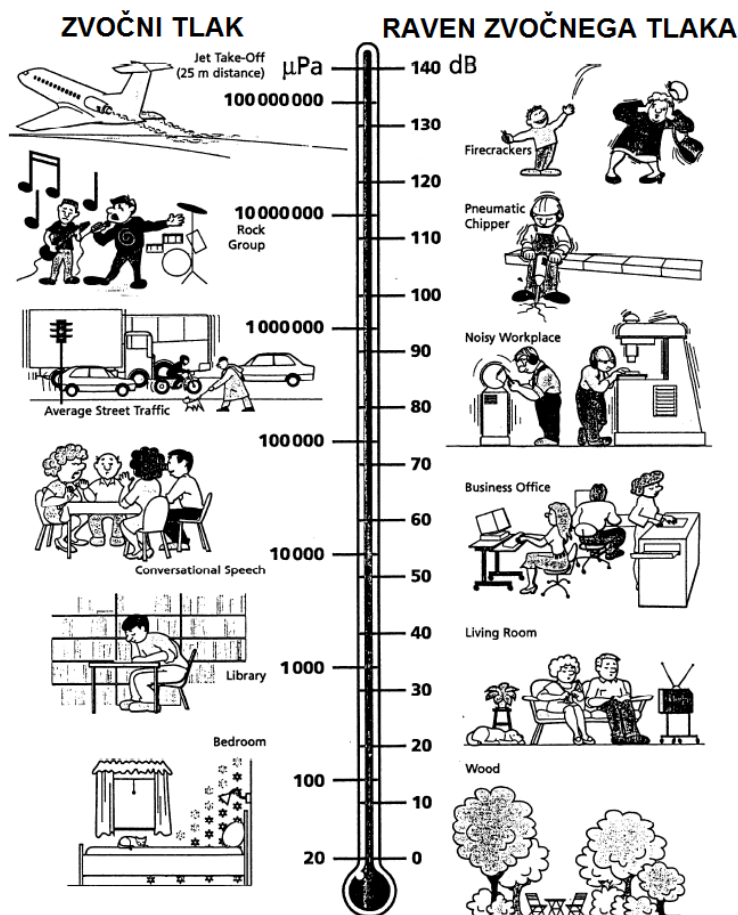
V zraku se zvok izraža kot nihanje zračnega tlaka. Človeško uho zaznava spremembe v zračnem tlaku kot različne zvoke, pri čemer zaznava razlike v višini (frekvenca) in razlike v glasnosti zvoka (amplituda).

3.2.1 Raven zvočnega tlaka

Zvočni tlak (P) izmerimo kot amplitudo zvočnega valovanja, t.j. deviacijo zvočnega pritiska od osnovnega atmosferskega pritiska ter zanj uporabljamo enoto Pascal [Pa]. [6]

Dinamični razpon zaznave zvočnega tlaka je pri človeku zelo velik: $2 \cdot 10^{-6}$ Pa – 200 Pa, zato se pri opisovanju zvočnega tlaka raje poslužujemo zapisa v decibelih [dB], ki so izraženi v logaritemskem merilu. Zvočni tlak po enačbi (2) pretvorimo v novo akustično količino imenovano raven zvočnega tlaka (SPL). Slušno območje izraženo z ravno zvočnega tlaka je tako od 0 dB do 120 dB, ki je lažje predstavljiva. Izkaže se, da z logaritemsko skalo bolje opišemo percepcijo glasnosti zvoka kot z linearno skalo (Slika 6). [7] [8]

$$SPL = 20 * \log_{10} \left(\frac{P_{dejanski}}{P_{referenčni}} \right) = 10 * \log_{10} \left(\frac{P_{dejanski}^2}{P_{referenčni}^2} \right) \quad (2)$$

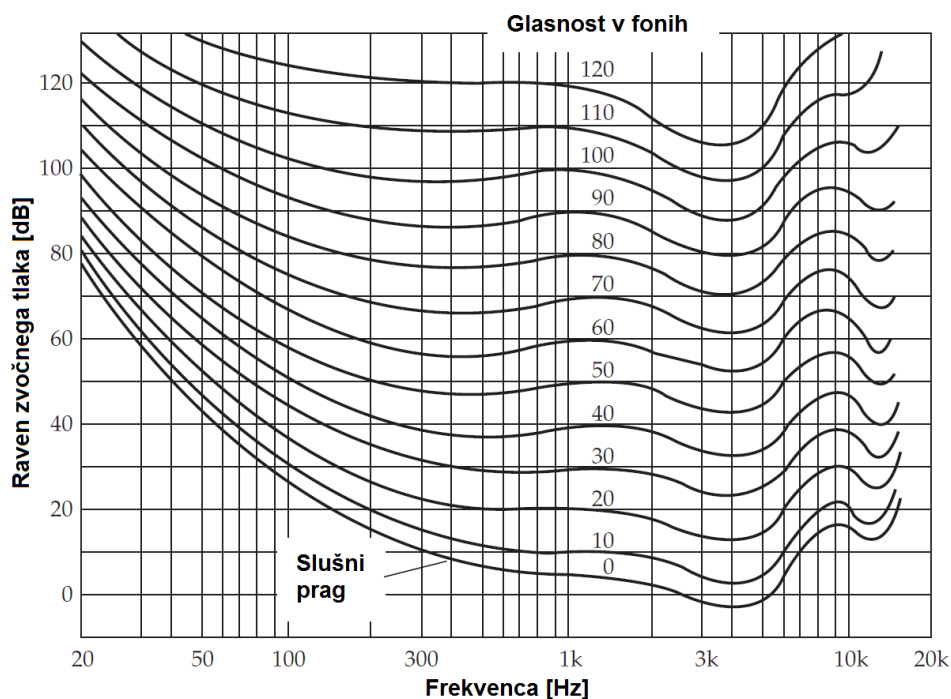


Slika 6: Zvočni tlak (μPa) in Raven zvočnega tlaka (dB) v vsakdanjem življenju [2]

3.2.2 Zaznavanje glasnosti zvoka

Glasnost zvoka kot jo zazna človeško uho, je sicer povezana z ravno zvočnega tlaka, vendar je odvisna tudi od frekvenčnih in časovnih karakteristik zvočnega signala. Če se omejimo na čiste tone, lahko glasnost z ravno zvočnega tlaka povežemo s krivuljami enake glasnosti, s katerimi jo ovrednotimo. Uvedena količina je poimenovana fon. [7] [9]

Primerjava med zaznano glasnostjo in izmerjeno ravno zvočnega tlaka je prikazana na sliki 7.



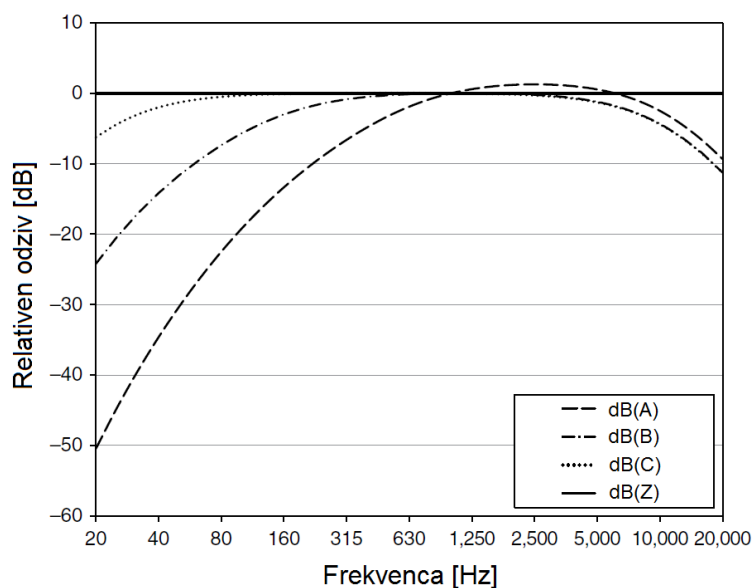
Slika 7: Povezava med foni in decibeli s krivuljami enake glasnosti. [6]

Kot osnovo za primerjavo med frekvencami se vzame frekvenco 1.000 Hz, pri kateri lestvici decibelov ter fonov sovpadata. Pri frekvenci 1000 Hz velja, da človek sliši zvok dvakrat glasneje, če se jakost zvoka poveča za 10 dB, medtem ko se pri drugih frekvencah to razmerje spreminja. [7] [9]

Človeško uho je najbolj občutljivo na frekvence nekje med 2.000 Hz in 5.000 Hz. Zvoke teh frekvenc slišimo že pri ravni zvočnega tlaka, ki je manjša kot 0 dB, medtem ko smo za zelo visoke in zelo nizke frekvence manj občutljivi. [9] Z višanjem glasnosti v fonih so krivulje enake glasnosti vedno bolj frekvenčno enakomerne. Sprememba glasnosti pomeni, da je naša frekvenčna zaznava zvoka odvisna od tega, pri kateri glasnosti zvok poslušamo.

3.2.3 Frekvenčne obtežbe

Ker se dožemanje glasnosti zvoka razlikuje od dejanskih izmerjenih ravni zvočnega tlaka, se pri merjenju glasnosti uporabljajo frekvenčne obtežbe (angl. *Weighting*). S frekvenčno obtežbo ob merjenju prilagodimo ravni zvočnega tlaka pri določenih frekvencah (Slika 8). Merilni inštrumenti za merjenje ravni zvočnega tlaka so zasnovani tako, da obtežijo (t.j. znižajo ali zvišajo) energijski prispevek določenih frekvenčnih pasov glede na občutljivost človeškega ušesa. Najpogosteje uporabljana frekvenčna obtežba je imenovana A-obtežba, pri kateri znižamo nivo zvočnega tlaka na najnižjih in najvišjih frekvencah po krivulji, katere oblika je približno inverzna krivulji enake glasnosti (Slika 7). Dobljeno raven zvočnega tlaka imenujemo L_{pA} in ji pripišemo enoto dB(A). [4] [5]



Slika 8: Frekvenčne obtežbe A, B, C in Z. Frekvenčna obtežba A je najpogosteje uporabljena pri akustičnih meritvah, frekvenčna obtežba Z pa meri neobteženo raven zvočnega tlaka. [15]

3.2.4 Oktavni pasovi

Večina zvokov v naravi je širokopasovnih, kar pomeni, da zajemajo večje frekvenčno območje. Čeprav je dožemanje glasnosti frekvenčno odvisno, je nesmiselno podajati raven zvočnega tlaka pri prav vsaki frekvenci, zato se slušno območje razdeli na frekvenčne pasove, najpogosteje na oktave ali terčne pasove. Oktavni pas definira razmerje mejnih frekvenc 1:2, kar pomeni, da je najvišja frekvenca znotraj oktavnega pasu dvakratnik najnižje frekvence, vsaka oktava pa je definirana s centralno frekvenco, ki je izračunana kot geometrična sredina mejnih frekvenc: oktavni pasovi sledijo logaritemski lestvici. [2] [7]

$$f_l = \frac{f_c}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

$$f_u = f_c * \sqrt{2} \quad (4)$$

$$f_c = \sqrt{f_l * f_u} \quad (5)$$

f_l .. spodnja mejna frekvenca [Hz]

f_u .. zgornja mejna frekvenca [Hz]

f_c .. centralna frekvenca [Hz]

Bolj natančno se slušno območje lahko razdeli na terčne pasove, ki predstavljajo tretjino oktave:

$$f_l = \frac{f_c}{2^{\frac{1}{6}}} \quad (6)$$

$$f_u = f_c * 2^{\frac{1}{6}} \quad (7)$$

$$f_c = \sqrt{f_l * f_u} \quad (8)$$

Za človeško slušno območje (20 Hz - 20.000 Hz) se uporabljajo standardizirani oktavni (odebeljeni) in terčni pasovi, kot je prikazano na sliki 9.

20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000	20000					

Slika 9: Srednje frekvence terčnih in oktavnih (odebeljeno) pasov v Hz. [2]

4 PROSTORSKA AKUSTIKA

Ker se večina zvočnih valov preden dosežejo poslušalca večkrat odbije od sten, stropa, tal in drugih predmetov znotraj prostora, imajo fizične lastnosti prostora (velikost, oblika, vrsta površin v prostoru) velik vpliv pri določanju narave zvoka, ki ga sliši poslušalec. Povezanost fizičnih lastnosti prostora z objektivnimi karakteristikami zvočnega polja v prostoru in subjektivnim zaznavanjem le-teh obravnava prostorska akustika. [1]

V okviru akustične analize prostora se izvajajo analitični računi, računalniške simulacije ter *in-situ* meritve, s katerimi določamo akustične parametre prostora. Med akustične parametre uvrščamo odmevni čas (T_{60}), indeks razumljivosti govora (STI – *speech transmission index*), indeks jasnosti (C - *clarity*), zvočna podpora (G - *sound strength*), absorpcija prostora (A) itd. Vsi akustični parametri niso vedno relevantni, saj je med akustično analizo pomembno tudi poznavanje fizikalnih lastnosti prostora, njegove namembnosti in potreb uporabnikov. [1] [10]

Dve bistveni in v sklopu magistrskega dela najpomembnejši tematiki prostorske akustike sta odmevnost prostora in zvočna absorpcija materialov.

4.1 Odmevnost prostora

Ko izklopimo zvočni vir v nekem prostoru in preden nastopi tišina, zvok še nekaj časa vztraja v prostoru [1]. Ta zvočni pojav imenujemo odmevnost in ga opisujemo z odmevnim časom (T_{60}), definiranim v poglavju 4.1.3.

Odmevnost prostora v veliki meri definira akustično klimo prostora, saj vpliva na:

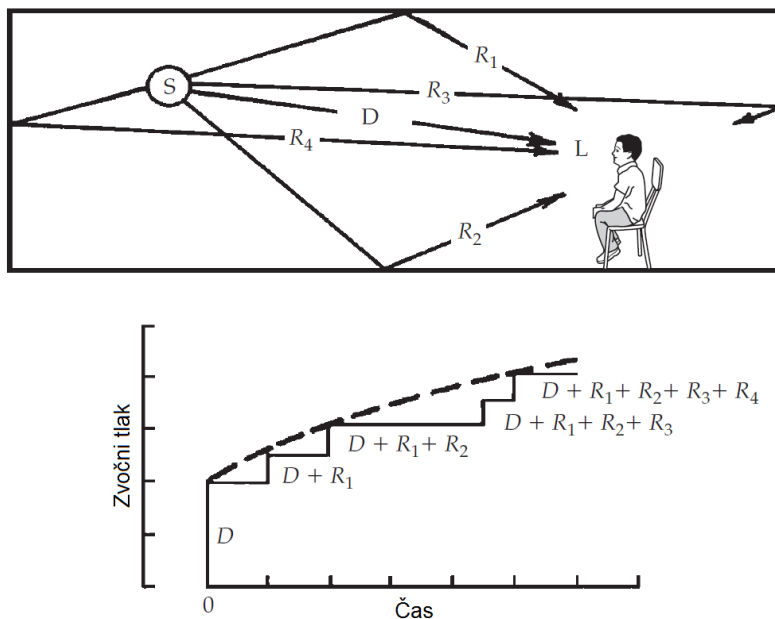
- raven zvočnega tlaka v prostoru,
- jasnost zvoka,
- dožemanje velikosti in oblike prostora,
- pojav odmeva,
- obarvanost zvoka,
- dožemanje izvora zvoka ... [1]

Čeprav se odmevnost smatra za nezaželeno lastnost, je določena mera odmevnosti v prostoru zaželena oziroma celo potrebna za udobje bivanja. Idealna količina odmevnosti pa je odvisna od namembnosti prostora, saj z različnimi nivoji odmevnosti dosežemo različne akustične učinke.

Prostori, obravnavani v sklopu magistrske naloge, so učilnice in predavalnice, to so prostori, v katerih je predvsem pomembna dobra razumljivost govora in ugodno delovno okolje. V takih prostorih ima največji pomen vpliv odmevnosti na dvig ravni zvočnega tlaka ter vpliv na jasnost govora. [6]

4.1.1 Vpliv odmevnosti na raven zvočnega tlaka v prostoru

Vpliv odmevnosti na raven zvočnega tlaka v prostoru je prikazan na sliki 10:



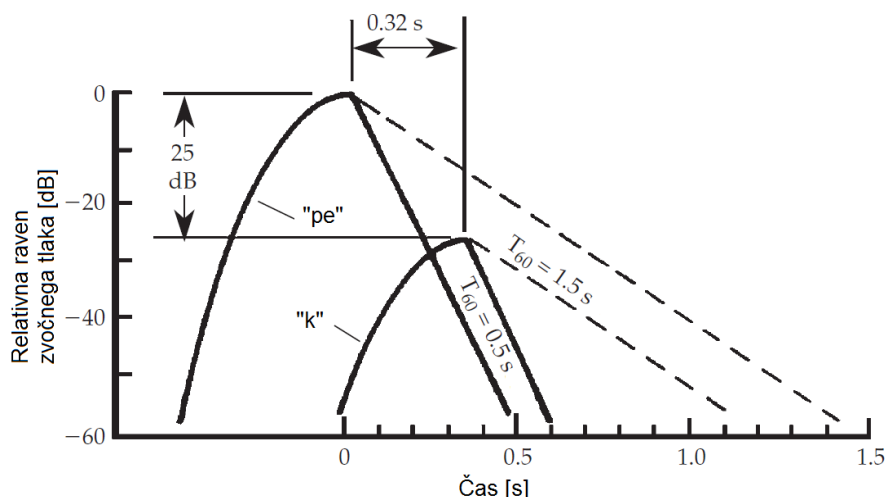
Slika 10: Vpliv odmevnosti prostora na nivo zvočnega tlaka: vsak odboj (R) dodatno ojači osnoven direkten zvok (D). [6]

Poslušalec najprej sliši direktni zvok, ki ima najkrajšo pot, kmalu za tem pa do poslušalca prispejo tudi prvi odboji. Vsak odboj nekoliko dvigne raven zvočnega tlaka, dokler do poslušalca ne prispejo prav vsi odboji. Takrat je zvok dosegel maksimalno raven zvočnega tlaka, ki se ohranja v kolikor vira zvoka ne izklopimo. [6]

Poleg karakteristik prostora na stopnjo odmevnosti vpliva tudi frekvenčna karakteristika oddajane zvoka, zato je potrebno pri akustični analizi prostora preveriti odmevnost v različnih oktavni pasovih. [6]

4.1.2 Vpliv odmevnosti na jasnost govora

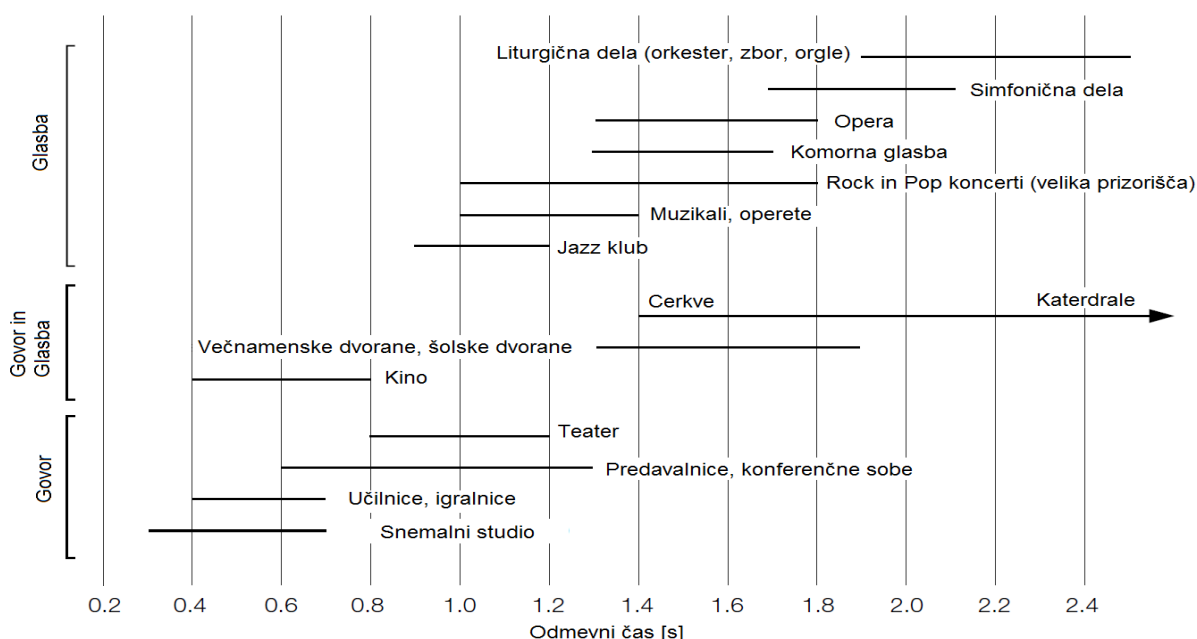
Vpliv odmevnosti prostora na jasnost govora je prikazan na sliki 11. Skicirana je izgovorjava besede »pek«, sestavljene iz zlogov »pe« in »k«, ki dosegata različne ravni zvočnega tlaka. Ko je odmevnosti v prostoru malo, prvi zlog dovolj hitro zamre in tako normalno slišimo še drugi zlog (polna črta). V primeru da je stopnja odmevnosti višja, lahko zaradi odmeva prvega zloga ne slišimo drugega zloga, ki ima manjšo raven zvočnega tlaka (črtkana črta). Tako lahko besedo »pek« zamenjamo za kakšno drugo, na primer »pet«. [6]



Slika 11: Vpliv odmevnosti prostora na jasnost govora [6]

4.1.3 Odmevni čas

Odmevni čas (T_{60}) je definiran kot čas, ki je potreben, da raven zvočnega tlaka v prostoru pade za 60 dB po tem, ko se vir zvoka izklopi. Kratek odmevni čas pomeni, da ima prostor zelo nizko stopnjo odmevnosti, medtem ko imajo zelo odmevni prostori temu primerno daljši odmevni čas. Odmevni čas je karakteristika vsakega posameznega prostora zato se tudi njegova optimalna vrednost spreminja glede na lastnosti in namembnost prostora. Odmevni čas z velikostjo prostora narašča, saj zvok po prostoru potuje dalj časa preden se odbije in na splošno želimo, da imajo prostori namenjeni govoru krajše odmevne čase kot prostori namenjeni glasbi. Na sliki 12 so prikazana priporočena območja idealnih odmevnih časov glede na namembnost prostora [6] [7].



Slika 12: Priporočeni odmevni časi glede na namembnost prostora: Prostori namenjeni govoru naj imajo krajši odmevni čas kot prostori namenjeni glasbi, prav tako je še sprejemljivo območje ugodnega odmevnega časa večje pri prostorih namenjenim glasbenim dogodkom. [4]

4.1.3.1 Računsko določanje odmevnega časa

Odmevni čas ima velik vpliv na akustične lastnosti prostora in je zato za akustično analizo pomembna ocena odmevnega časa. V ta namen je bilo skozi zgodovino razvitih več enačb. Dve najširše uporabljeni enačbi sta Sabinova ter Eyring-Norrisova, kateri za izračun odmevnega časa navaja tehnična smernica TSG-1-005:2012 : Zaščita pred hrupom v stavbah [20].

Sabinova enačba:

$$T_{60,S} = \frac{0,163 * V}{A + (4mV)} \quad (9)$$

Eyring-Norrisova enačba:

$$T_{60,Ey} = \frac{0,163 * V}{-S * \ln(1 - \bar{\alpha}) + (4mV)} \quad (10)$$

$T_{60,S}$... odmevni čas izračunan po Sabinovi enačbi [s]

$T_{60,Ey}$... odmevni čas izračunan po Eyring-Norrisovi enačbi [s]

V ... volumen prostora [m^3]

A ... ekvivalentna absorpcijska površina prostora [m^2]

S ... vse površine v prostoru [m^2]

$\bar{\alpha}$... srednji koeficient absorpcije vseh površin v prostoru

m ... konstanta zvočne atenuacije v zraku [m^{-1}]

Odmevni čas prostora ni enoštevilčna vrednost, saj se zaradi različnih absorpcijskih koeficientov materialov razlikuje po frekvenčnih pasovih. Zato se pri navajanju odmevnega časa vedno navede frekvenčno območje za katero velja.

Omeniti je potrebno, da se natančnost računa po Sabinovi formuli zmanjša v primeru velike količine absorpcijskih elementov v prostoru, zato je priporočljiva uporaba enačbe le v primerih, ko je srednji koeficient absorpcije vseh površin v prostoru manjši od 0,20 [20].

Za izračun odmevnega časa po zgornjih enačbah je ključno poznavanje točnih dimenzij prostora in vseh elementov v njem ter uporabljenih materialov in njihovih absorpcijskih koeficientov. Pridobitev vseh podatkov je dokaj zahtevna, razen v primeru zelo preprostih prostorov, hkrati pa se v enačbah ne upošteva vpliv oblike prostora in razporeditve absorpcijskih površin po prostoru, saj te temeljijo na predpostavki difuznega zvočnega polja. Zato je za točno določanje odmevnega časa T_{60} bolj priporočljivo izvajanje *in-situ* meritev.

4.1.3.2 Meritve odmevnega časa

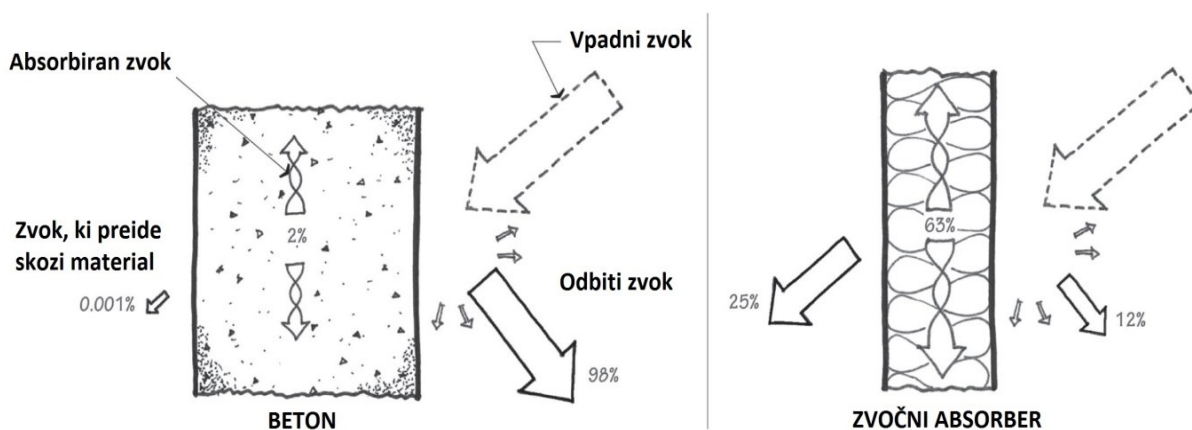
Odmevni čas, kakor tudi druge akustične parametre prostora najbolj zanesljivo določimo z meritvami na terenu. Osnoven princip meritev temelji na generiranju šuma, katerega se nato hipno prekine in izmeri čas vztrajanja odmevnega zvoka v prostoru (poglavje 6.2). Pri tem je pomembno, da je raven zvočnega tlaka generiranega šuma dovolj visoka, ter da je šum takšen, da zajema široko frekvenčno območje. V prostorski akustiki se običajno v ta namen uporablja **roza šum**, to je šum, ki ima enako zvočno energijo preko vseh frekvenčnih pasov [2].

Ker je v praksi težko izmeriti 60 dB upada ravni zvočnega tlaka, se pogosto odmevni čas določa na podlagi manjšega upada ravni zvočnega tlaka in se vrednosti ekstrapolira na velikost upada 60 dB. V tem primeru se izmerjene odmevne čase temu primerno označi: T_{20} predstavlja upad zvoka s 5 dB na 25 dB pod prvotno ravno zvočnega tlaka, T_{30} pa upad zvoka s 5 dB na 35 dB pod prvotno ravno zvočnega tlaka. [23]

Meritve odmevnega časa se praviloma izvaja v praznem prostoru, saj ljudje predstavljajo ne le vir hrupa, temveč tudi absorpcijsko površino in s tem vplivajo na izmerjene vrednosti.

4.2 Zvočna absorpcija materialov

Količina odmevnega zvoka v prostoru je odvisna od zvočno absorpcijskih zmožnosti mejnih površin v prostoru. Ob odboju zvočnega valovanja od površine se del zvočne energije absorbira v oviri. Temu procesu pravimo zvočna absorpcija. Kako in koliko zvočne energije se absorbira je odvisno od materiala, iz katerega je ovira, ter od frekvence zvoka. [6] [7]



Slika 13: Zvok ob interakciji z drugim materialom: Razlika v količina absorbiranega in odbitega zvoka v primeru betona (levo) in zvočno absorpcijskega materiala (desno). [7]

4.2.1 Absorpcijski koeficient

Sposobnost absorpcije zvoka določenega materiala je podana z absorpcijskim koeficientom α . Absorpcijski koeficient lahko zavzame vrednosti od 0 do 1 in predstavlja razmerje odbite in absorbirane zvočne energije: popolnoma zvočno odbojen material ima absorpcijski koeficient $\alpha=0$, medtem ko ima material, ki absorbira 100% zvočne energije absorpcijski koeficient $\alpha=1$. Absorpcijski koeficient materiala ni enoštevilska vrednost, saj je frekvenčno odvisen, zato je pri njegovem navajanju potrebno podati tudi frekvenčno območje (oktavni pas) za katero vrednost velja. [6] [41]

Za namene hitre primerjave materialov se občasno uporablja koeficient zmanjšanja hrupa (*NRC – noise reduction coefficient*), ki predstavlja povprečje absorpcijskih koeficientov štirih oktavnih pasov od 250Hz do 2000Hz:

$$NRC = \frac{\alpha_{250Hz} + \alpha_{500Hz} + \alpha_{1000Hz} + \alpha_{2000Hz}}{4}, \quad (11)$$

Vrednosti *NRC* se zaokrožuje na 0,05 natančno [7].

Poleg frekvenčnega območja je potrebno definirati tudi vpadni kot, za katerega vrednost absorpcijskega koeficienta materiala velja, saj se le-ta spreminja z vpadnim kotom zvoka. Običajno se za elemente privzame povprečen absorpcijski koeficient glede na vse možne vpadne kote zvoka (difuzni koeficient absorpcije), možno pa je tudi definirati absorpcijski koeficient pri določenem vpadnem kotu. Slednje velja v primeru, ko so meritve absorpcijskega koeficienta izvedene z impedančno cevjo (poglavje 4.2.1.2). [6]

4.2.1.1 Absorpcijski parametri prostora

Na podlagi absorpcijskega koeficienta se lahko izračuna parameter prostora, t.j. ekvivalentna absorpcijska površina prostora [6]:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i * S_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (12)$$

A ... ekvivalentna absorpcijska površina prostora [m^2]

α_i ... absorpcijski koeficient materiala i

S_i ... površina materiala i [m^2]

Ekvivalentna absorpcijska površina predstavlja namišljeno površino z absorpcijskih koeficientom $\alpha=1$, ki absorbira enako količino zvoka kot vse ostale površine in predmeti v prostoru skupaj [41].

Absorpcijske lastnosti prostora je možno izraziti s povprečnim absorpcijskim koeficientom vseh površin v prostoru, ki ga izračunamo iz razmerja ekvivalentne absorpcijske površine prostora in seštevek vseh upoštevanih površin [6]:

$$\bar{\alpha} = \frac{A}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (13)$$

$\bar{\alpha}$... srednji koeficient absorpcije vseh površin v prostoru

A ... ekvivalentna absorpcijska površina prostora [m²]

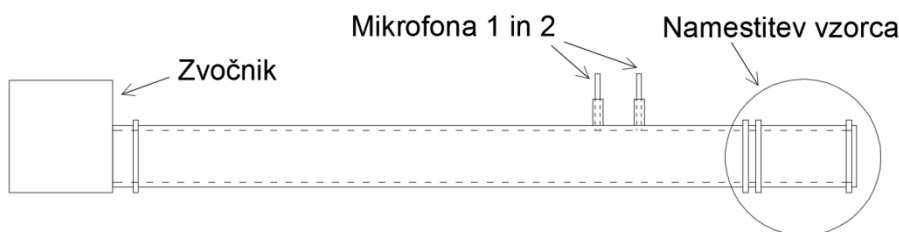
S_i ... površina materiala i [m²]

4.2.1.2 Meritve absorpcijskega koeficienta

Vrednosti absorpcijskega koeficienta materiala se pridobi na podlagi meritev, katere se izvajajo v odmevnici oziroma s pomočjo impedančne cevi. Poznani so določeni računski modeli za napovedovanje absorpcijskega koeficienta, vendar je le-to zahtevno in velikokrat nenatančno, zato je za pridobitev točnih vrednosti absorpcijske lastnosti potrebno izmeriti.

Odmevnica je prostor z zelo dolgim odmevnim časom, v katerem se ustvari difuzno zvočno polje, zato je pomembno, da je prostor dovolj velik (> 150 m³) ter da so stene, strop in tla čim bolj odbojna. Absorpcijski koeficient materiala v odmevnici izmerimo tako, da v prostor vnesemo večji vzorec materiala (> 10 m²) in izvedemo meritve odmevnega časa. Iz spremembe odmevnega časa prostora brez in z vzorcem dobimo absorpcijski koeficient testiranega materiala v difuznem zvočnem polju. [52]

Merjenje absorpcijskega koeficienta z metodo odmevnice določa standard ISO 354 [52].



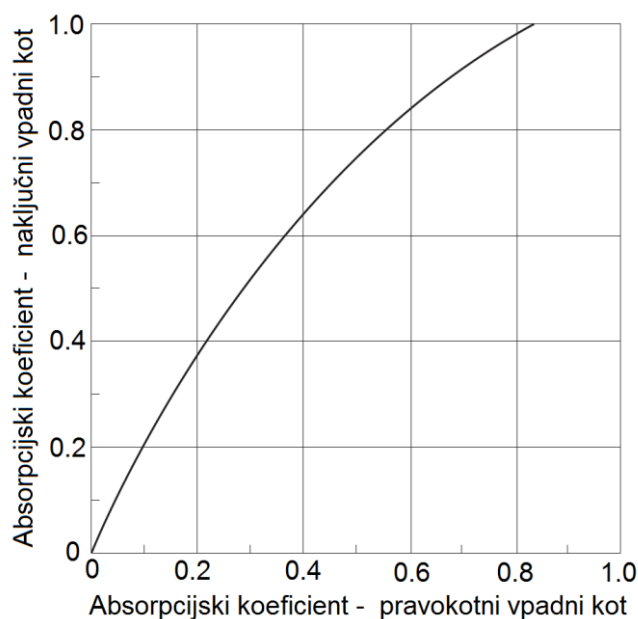
Slika 14: Impedančna cev.

Druga metoda za določanje absorpcijskega koeficienta materiala je preizkus z impedančno cevjo. Impedančna cev je sestavljena iz večdelne zrakotesne cevi, izvora zvoka (zvočnika), sprejemnikov (mikrofonov) ter vzorca, kot je prikazano na sliki 14. Zaradi geometrije cevi se iz izvora zvoka širi ravni val, ki potuje po cevi in se odbije od vzorca na drugem koncu cevi. Mikrofone med meritvijo beležita zvočni tlak pred in po odboju v dveh točkah znotraj cevi. Ob poznavanju obeh zvočnih tlakov in karakteristik predvajanega zvoka, lahko določimo koeficient zvočne absorpcije vzorca. [24]

Določitev absorpcijskega koeficienta z impedančno cevjo je opisana s standardom ISO 10534-2 [24].

V primerjavi z meritvami zvočne absorpcije v odmevnici, kjer se vzpostavi difuzno zvočno polje, z meritvijo z impedančno cevjo določimo absorpcijski koeficient le pri pravokotnem vpadu zvoka. V primeru materialov z močno kotno odvisnostjo lahko pri meritvah z impedančno cevjo

dobimo nepopolne rezultate, čeprav pogosto velja, da je absorpcijski koeficient pri naključnem vpadnem kotu višji kot pri pravokotnem vpadnem kotu (Slika 15). Poleg tega je z velikostjo cevi omejeno frekvenčno območje testiranja in je za določitev absorpcijskega koeficienta celotnega govornega spektra potrebnih več impedančnih cevi različnih dimenzij. Omeniti je potrebno tudi, da za določanje zvočno absorpcijskih lastnosti elementov, katerih absorpcijska sposobnost je pogojena z delovanjem celotnega sistema (kot na primer resonančni absorberji), je bolj primerno testiranje v odmevnici, v katero je možen vnos večjih elementov. Vseeno velja, da je metoda z impedančno cevjo hitrejša in preprostejša, saj potrebujemo le manjše vzorce ter ne potrebujemo dodatne infrastrukture (odmevnice). [24]



Slika 15: Ocena razmerja med absorpcijskim koeficientom pri pravokotnem vpadnem kotu in absorpcijskim koeficientom pri naključnem vpadnem kotu [6]

4.2.2 Absorberji zvoka

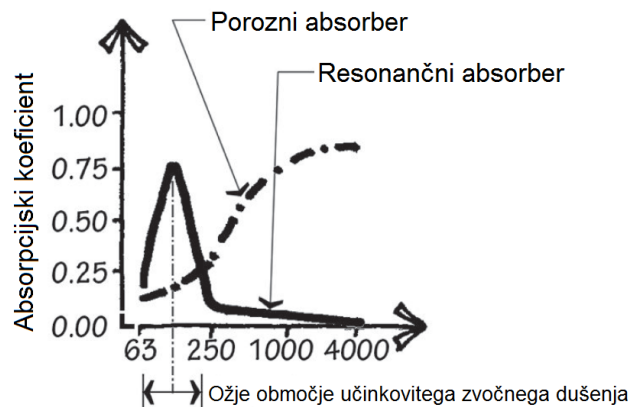
Absorberje zvoka razdelimo v dve glavni skupini, ki se razlikujeta glede na princip delovanja. Po takšni delitvi poznamo:

- porozne absorberje ter
- resonančne absorberje.

Fizikalni princip absorpcije zvoka v poroznih materialih temelji na pojavu številnih odbojev in viskoznih izgub ob širjenju zvoka skozi porozen material, ki ima zaradi svoje strukture zelo veliko notranjo površino [2].

Enostaven opis delovanja resonančnih absorberjev je princip vzmeti in uteži. Glede na to, kateri del elementa deluje kot utež (plošča, zrak) in kateri kot vzmet (zračni volumen, plošča) pogosto delimo resonančne absorberje na membranske in Helmholtzove resonatorje. [5]

Porozni absorberji zvoka so veliko bolj učinkoviti pri absorpciji višjih frekvenc in absorbirajo širše frekvenčno območje v primerjavi z resonančnimi absorberji zvoka, ki dušijo ožja frekvenčna območja v spodnjem delu frekvenčnega spektra (Slika 16).

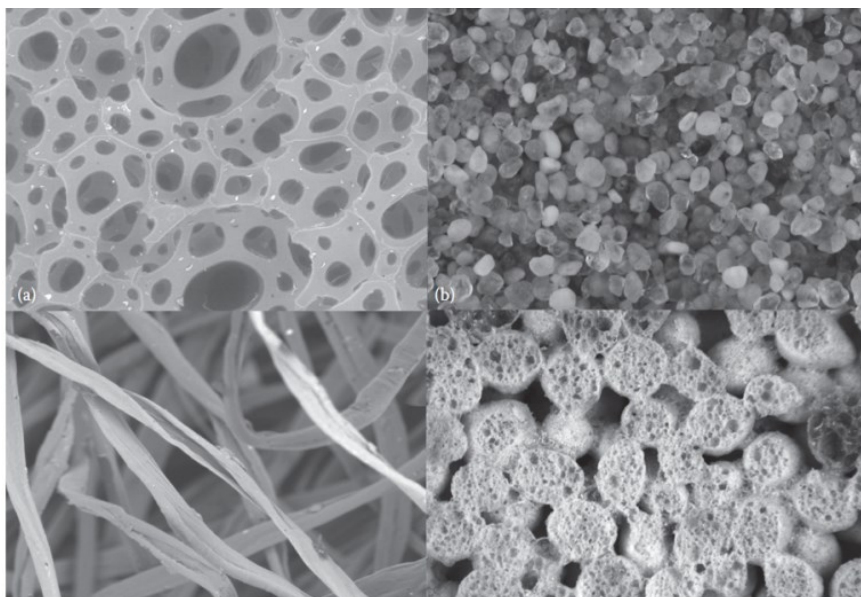


Slika 16: Primerjava absorpcijskih lastnosti poroznih in resonančnih absorberjev. [7]

V nadaljevanju so opisani trije tipi zvočnih absorberjev, ki se v sklopu akustičnih ureditev najpogosteje uporabljajo.

4.2.2.1 Porozni absorberji

Porozne absorberje definira material z odprto porasto strukturo, to pomeni, da je skozenj možen prost prehod zraka. (Slika 17). Tako se v primeru, da je površina takšnega materiala prekrita z nepropustnim slojem, absorpcijske lastnosti poroznega materiala v veliki meri izgubijo. Porozne absorberje zvoka v prostoru najdemo v obliki zaves, preprog, oblazinjenega pohištva ipd., med porozne materiale pa spadajo tudi gradbeni materiali kot so: volne (mineralne, kamene), porasti zidaki, nekatere pene, plute ipd. [5] [38]



Slika 17: Vrste materialov z odprto porasto strukturo: (a) Pena, (b) pesek, (c) bombažna vlakna, (d) material z dvojno porasto strukturo [38]

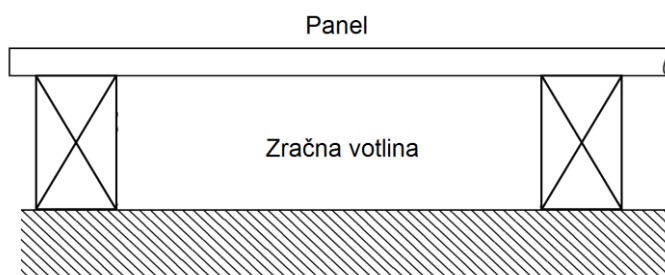
Da material tem bolj učinkovito absorbira zvok, je pomembno, da je hitrost delcev zvočnega valovanja čim hitrejša ob stiku s poroznim absorberjem. Iz robnih pogojev valovanja vemo, da je hitrost delcev ob stiku s togo podlago (t.j. steno) enaka nič in je tako hitrost delcev največja na oddaljenosti od stene $\lambda/4$. To pomeni, da mora biti debelina poroznega absorberja enaka $\lambda/4$, da najbolj učinkovito absorbira zvok. Posledično so porozni absorberji zvoka bolj primerni za absorbiranje visokih frekvenc, ki imajo krajšo valovno dolžino in je za njihovo učinkovito absorpcijo potrebno namestiti tanjšo plast poroznega materiala. Absorpcija nižjih frekvenc s poroznimi absorberji se doseže tako, da se material odmakne od toge podlage na razdaljo $\lambda/4$. [6] [38]

Absorpcijske lastnosti poroznega materiala so težko napovedljive in kljub obstoju raznih modelskih opisov akustičnih lastnosti poroznih materialov (npr. empirični model Delaneya in Bazleya), ki temeljijo na poznavanju specifičnih lastnosti poroznega materiala (upornost zračnemu toku, delež odprtosti por), se v praksi raje poslužujemo meritev absorpcijskega koeficienta. [38]

4.2.2.2 Membranski absorberji

Membranski absorberji sodijo med resonančne absorberje zvoka in so sestavljeni iz neporozne membrane ali plošče postavljene na določeno razdaljo od trde podlage tako, da se za membrano ustvari zaprt zračni volumen (Slika 18). To pomeni, da pri membranskih absorberjih kot vzmet deluje zračna votlina, katere globina je obratno sorazmerna togosti vzmeti, utež pa predstavlja panel oziroma membrana. Z zmanjševanjem togosti vzmeti in večanjem mase uteži se znižuje resonančna frekvenca [5].

V prostoru se membranski absorberji najpogosteje pojavljajo v obliki lesenega poda nad zračnim prostorom oziroma mavčno-kartonskih oblog na odmiku od stene.



Slika 18: Tipičen membranski absorber sestavljen iz plošče in zaprte zračne votline, katero je možno zapolniti s poroznim materialom. [5]

Membranski absorberji zvoka dušijo ozka območja frekvenc, zato je pomembna določitev efektivnega absorpcijskega območja, sicer njihov vnos v prostor nima efekta. Resonančno frekvenco membranskega absorberja, ki je odvisna od velikosti zračnega prostora ter gostote, togosti in načina vibriranja membrane, lahko ocenimo z enačbo (14) [2]:

$$f_r = \frac{60}{\sqrt{m L}} \quad (14)$$

f_r ... resonančna frekvenca [Hz]

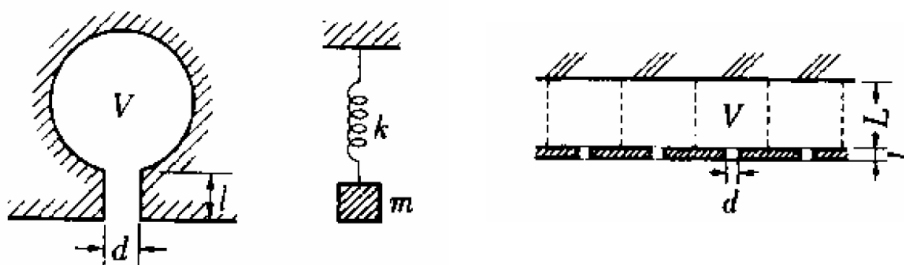
m ... površinska masa membrane [kg/m²]

L ... globina zračne votline [m]

Frekvenčna širina delovanja membranskega absorberja se poveča, če zračno votlino zapolnimo s poroznim materialom, ki prispeva k dušenju. Istočasno se absorpcija pri resonančni frekvenci zmanjša, resonančna frekvenca pa pade [2].

4.2.2.3 Perforirani absorberji

Perforirani absorberji zvoka sodijo med resonančne absorberje in prav tako delujejo po principu vzmeti in uteži, le da tokrat kot utež deluje masa zraka v odprtini med zračno votlino in zunanjim prostorom. Takšnemu absorberju zvoka pravimo Helmholtzov resonator in je prikazan na sliki 19 (levo). [2]



Slika 19: Helmholtzov resonator (levo), mehanska analogija Helmholtzovega resonatorja (sredina) in Helmholtzov resonator v obliki perforiranih oblog (desno). [2]

Helmholtzov resonator lahko izdelamo kot perforirano oblogo, ki je sestavljena iz perforirane plošče, postavljene pred zaprto zračno votlino. Takšen sistem obravnavamo kot skupek več Helmholtzovih resonatorjev, s katerimi dosežemo dušenje širšega frekvenčnega območja. [2]

Resonančno frekvenco perforiranih zvočnih absorberjev izračunamo po enačbi (15) [2]:

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{L(l + \delta)}} \quad (15)$$

f_r ... resonančna frekvenca [Hz]

c ... hitrost zvoka v zraku [m/s]

P ... delež perforacije plošče

L ... globina zračne votline [m]

l ... dolžina vratu odprtine [m]

δ ... popravek dolžine vratu odprtine, v primeru krožnih odprtin: $\delta \approx 0.8d$. [m]

d ... presek perforacije [m]

Perforirani absorberji imajo običajno višjo resonančno frekvenco in dušijo zvoke v širšem frekvenčnem območju kot membranski absorberji. Kljub temu je tudi pri perforiranih absorberjih priporočljivo del zračnega prostora zapolniti s poroznim absorberjem, ki še nadaljnjo poveča frekvenčno območje absorpcije. [2] [6]

4.2.2.4 Absorpcija ljudi

Ljudje smo izredno učinkoviti absorberji zvoka in pri polni zasedenosti prostora lahko predstavljamo več kot 75% absorpcijskega materiala v prostoru. Koeficient zvočne absorpcije ljudi je v prostorski akustiki podan za različne načine umestitve (sedenje, stanje) in ob poznavanju gostote ljudi (število ljudi na m^2), pri čemer je potrebno upoštevati delitev ljudi na odrasle in otroke (šolarje). Tako je v literaturi na voljo več eksperimentalno določenih vrednosti absorpcijskega koeficienta ljudi. [6]

4.2.3 Umestitev absorberjev v prostor

Pri umestitvi absorberjev v prostor ni dovolj, da se v prostor vnese računsko določeno količino zvočno absorpcijskih elementov, potrebno je, da so elementi pravilno razporejeni po prostoru, saj se le tako doseže željeno zvočno udobje.

Pozicioniranje absorberjev v prostor je predvsem odvisno od oblike in velikosti prostora ter od njegove namembnosti. Za obravnavane prostore je priporočljivo absorpcijske površine razporediti enakomerno po prostoru, saj tako delujejo najbolj učinkovito. V primeru uporabe različnih vrst zvočnih absorberjev je zaželena enakomerna razporeditev vseh tipov absorberjev po prostoru. Pogosto je enakomerna razporeditev težko izvedljiva, saj bi predstavljala prevelik poseg v prostor. Tako v praksi redno srečujemo umestitev absorpcijskih površin zgolj v področje stropa, kar je morda pri manjših prostorih zadovoljiva rešitev. V primeru večjih prostorov je primerna razporeditev absorberjev zvoka pomembnejša, saj se akustične lastnosti po prostoru bolj spreminjajo. [6]

V primeru prostorov neregularnih oblik pogosto nastanejo neželeni akustični pojavi, zaradi katerih se zvok ojača le v določenih točkah prostora (oboki, konkavne stene). Takrat je potrebno akustične absorberje namestiti na točno definirane problematične površine. Zaradi možnosti pojava stoječega valovanja je priporočljivo, da dve nasprotni steni nikoli ne ostaneta akustično neobdelani. Priporočljiva je tudi namestitev absorberjev v vogale prostorov, saj se tam zvok večkrat odbije in je tako absorpcijska površina bolje izkoriščena. [6] [7]

Pri obravnavi prostora namenjenega usmerjeni aktivnosti (predavanja, gledališče...) je potrebno absorbirati predvsem pozne zvočne odboje, ki povzročajo poslabšanje govorne razumljivosti. V tem primeru je smiselno elemente zvočne absorpcije namestiti na površine, ki so najbolj oddaljene od vira zvoka. Kadar je potrebno dušiti določen zvočni izvor v prostoru, je priporočljiva namestitev absorberjev v njegovo neposredno bližino. [20]

5 PSIHOFIZIČNI VPLIV AKUSTIČNEGA OKOLJA NA ČLOVEKA

Akustično okolje ima velik vpliv na človeka, čeprav se tega pogosto ne zavedamo. V sklopu petega poglavja so predstavljene značilnosti hrupa, njegove fiziološke ter psihološke posledice ter načini njegovega zmanjševanja. Opredeljena je relevantna zakonodaja, uporabljena pri načrtovanju akustičnega okolja vzgojno varstvenih ustanov. Poleg priporočil glede akustičnega projektiranja izobraževalnih prostorov in omejitev glede hrupa na delovnem mestu (podpoglavji 5.2.1 in 5.2.2) so obravnavane tudi druge zahteve, predvsem s stališča varnosti in higienskega režima (podpoglavje 5.3), ki morajo biti izpolnjene ob projektiranju akustične ureditve igralnic. Ob koncu poglavja so povzete relevantne predhodne raziskave s področja akustične ureditve prostorov vzgojno izobraževalnih ustanov.

5.1 Hrup in njegovi vplivi na človeka

Zvok se v človekovem okolju pojavlja v mnogo različnih oblikah kot so govor, glasba, zvoki narave in druge okolice. Zaznavanje in proizvajanje zvokov je za človeka pomembno, saj tako komuniciramo, poleg tega v tem tudi uživamo, kot na primer ob poslušanju glasbe. Vendar vsi zvoki niso človeku prijazni, nekateri (glasen promet, strojna oprema, poslušanje glasne glasbe, kričanje..) so moteči, nadležni in celo škodljivi. Takim zvokom pravimo hrup. [14] [15]

Kljub temu da je identifikacija zvoka kot hrup subjektivna, so učinki izpostavljenosti človeka hrupu povsem merljivi. Okvara sluha, psihološke motnje, motnje v delovanju notranjih organov, utrujenost in zmanjšana produktivnost so dokazane in merljive posledice izpostavljenosti prekomernemu hrupu. Zaradi subjektivnosti pri zaznavanju se človek velikokrat ne zaveda, da je izpostavljen hrupu in se visokim ravnam hrupa izpostavlja povsem prostovoljno kot na primer pri obisku glasnih koncertov ali motorističnih dirk. [8]

Glavna faktorja, ki vplivata na stopnjo škodljivosti hrupa, sta raven zvočnega tlaka in čas izpostavljenosti, vendar je negativen vpliv hrupa na zdravje odvisen tudi od frekvence zvoka, trajanja signala (impulzni ali enakomeren zvočni signal), vsebine zvoka in občutljivosti posameznika [14].

Hrup ni škodljiv le pri visoki ravni zvočnega tlaka. Negativne posledice se lahko začnejo pojavljati že pri ravni hrupa nad 35 dB(A), ko je možno opaziti motnje v spanju, od 45 dB(A) naprej, pa hrup ozadja otežuje tudi komunikacijo in najzahtevnejše mentalno delo. Naša sposobnost za koncentracijo se začne resno zmanjševati pri hrupu višjem od 55 dB(A), za nemoteno komunikacijo pa mora biti hrup ozadja vsaj 10 dB nižji od glasnosti govora. [4]

Hrup glasnosti do 65 dB(A) ima predvsem psihični vpliv na človeka. Ta vpliv se izraža v obliki utrujenosti, nelagodja, razdražljivosti, stresa, slabšega spanja in motenj pri delu, pri glasnosti nad 65 dB(A) se pojavijo ekstraauralni učinki hrupa kot je zvišan krvni tlak, povišana raven krvnega sladkorja, hormonske motnje, motnje ravnotežja in vida, težave s prebavo ipd. Ob izpostavljenosti hrupu nad 90 dB(A), se poleg ostalih škodljivih učinkov pojavijočasne ali trajne okvare sluha, naglušnost ali celo popolna gluhost. [14]

5.1.1 Ekvivalentna raven zvočnega tlaka

Izpostavljenost hrupu, ki je odvisna od ravni hrupa in časa izpostavljenosti, vrednotimo z ekvivalentno ravno zvočnega tlaka (L_{eq}), ki upošteva časovno spreminjanje ravni zvočnega tlaka [8].

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \frac{\sum \Delta t_i 10^{L_i/10}}{T} \quad (16)$$

L_{eq} ... ekvivalentna raven zvočnega tlaka [dB]

t_i ... časovni interval i [s]

L_i ... raven zvočnega tlaka v časovnem intervalu i [dB]

T ... celotno časovno obdobje merjenja (načeloma 8h)

L_{eq} predstavlja povprečno raven zvočnega tlaka znotraj časovnega območja merjenja. Vpliv različnega zaznavanja zvokov različnih frekvenc se pri meritvi ekvivalentne ravni zvočnega tlaka zajame z obtežitvijo A: $L_{eq}(A)$. [8]

Poleg tega velja, da je človeško uho bolj občutljivo na impulzne zvočne signale kot na enakomerno raven hrupa. Te lahko pri meritvi ekvivalentne ravni zvočnega tlaka upoštevamo tako, da se v primeru preseganja določene meje sprejemljive impulzivnosti vrednosti L_{eq} prišteje 10 dB. [8]

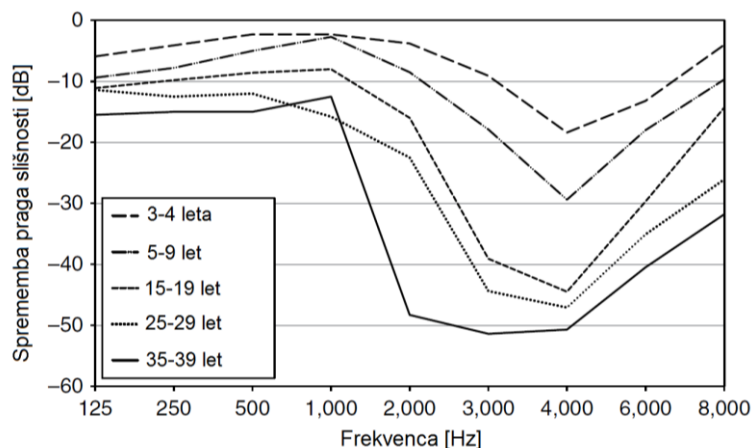
5.1.2 Posledice izpostavljenosti hrupu

Možne posledice izpostavljenosti hrupu so že navedene v uvodu tega poglavja, v podpoglavjih 5.1.2.1 – 5.1.2.3 so najpogostejše posledice, opisane bolj podrobno. Pri tem so fiziološke (okvara sluha in vpliv na druge notranje organe) in psihološke posledice obravnavane ločeno.

5.1.2.1 Okvara sluha

Najbolj poznan in raziskan vpliv hrupa na človeško telo je okvara sluha. Okvara sluha ima več negativnih posledic, ki so odvisne od vrste in stopnje okvare, zelo pomemben je predvsem vpliv zmanjšane slušne sposobnosti na orientacijo ter komunikacijo. Poleg oslabljenega govornega sporazumevanja in sprejemanja informacij se poslabša tudi zmožnost odziva na okolje, kar je lahko izjemno nevarno. [14] [15]

Poslabšanje sluha zaradi izpostavljenosti visoki ravni hrupa je lahko začasno ali trajno in se bo z veliko verjetnostjo (95%) pojavilo pri stalni izpostavljenosti ravni hrupa nad 85 dB(A), pri izpostavljenosti ravni hrupa nad 130 dB(A) pa se okvare sluha pojavijo v trenutku. Visoka raven zvočnega tlaka poškoduje čutne celice z dlačicami v ušesu in tako zmanjša slušno občutljivost. Zaradi oblike sluhovoda in človeške občutljivosti za določene frekvence se najprej pojavi zvišanje praga slišnosti pri približno 4000 Hz, s časom izpostavljenosti pa se razširi na območje nekje med 2000 Hz in 5000 Hz (slika 20). [14] [15]



Slika 20: Spreminjanje praga slišnosti zaradi osemurnega delavnika pri izpostavljenosti ravni hrupa 100dB(A) v odvisnosti od frekvence. [15]

Razen v primeru izpostavljenosti ekstremno visoki ravni zvočnega tlaka se poslabšanje sluha pojavi postopoma. Na začetku se pojavijo začasni pomiki praga slišnosti, kar pomeni, da se prag slišnosti po določenem času v manj hrupnem okolju vrne nazaj na prvotno raven. Pri daljši izpostavljenosti hrupu pa nastopi trajni pomik praga slišnosti. [15]

Poleg izgube slušne občutljivosti se zaradi izpostavljenosti hrupu pojavijo še druge posledice poškodb sluhovoda, kot so izguba ostrine sluha, zvenenje v ušesih in pri ravni zvočnega tlaka nad 120 dB(A) hipne bolečine v ušesih [14].

5.1.2.2 Druge fiziološke posledice

Hrup vpliva na delovanje srca in ožilja, delovanje prebavil, celotnega živčnega sistema, izločanje hormonov ter telesno temperaturo [14].

Zvočni dražljaji, katerih osnovna naloga je stimuliranje slušnega predela možganov, zaradi povezanosti centralnega živčevja delujejo tudi na limbični sistem, center za vid, centre drugih notranjih organov in jedra možganskih živcev ter tako vplivajo na aktivnost celotnega telesa. Pojavi se hipertenzija (povišanje krvnega tlaka), ishemične bolezni in pospešitve srčnega utripa, zmanjša se periferna oskrba s krvjo, povečano je tudi tveganje za koronarne bolezni zaradi povišanih vrednosti holesterola. [15] [17]

5.1.2.3 Psihološke posledice izpostavljenosti hrupu

Psihološke posledice izpostavljenosti hrupu se pojavijo že pri zvokih z nižjo ravno zvočnega tlaka (ko fiziološke poškodbe še ne nastanejo) in so zato tudi bolj pogoste. Hrup povzroča nelagodje in stres, ki vodi do motenj spanja, učenja, kognitivnega razvoja in spremenjenega čustvenega odziva, vpliva na produktivnost dela in medsebojne odnose s sodelavci, družino in prijatelji. [15] [51]

Nevšečnost določenih zvokov je popolnoma subjektiven pojem in je predvsem odvisen od posameznikove interpretacije. Načeloma med neprijetne zvoke uvrščamo tiste, ki motijo aktivnost, dajejo občutek, da jih ni mogoče kontrolirati oziroma se zaradi njih počutimo ogrožene. Redko je situacija takšna, da neželeni hrup povzročamo sami. Tovrstni zvoki so velikokrat povzročitelji agresije in razdraženosti, z višanjem ravni zvočnega tlaka pa se povečuje tudi nelagodje. [15]

Prav tako je tudi doživljanje stresa zaradi hrupa subjektivno, vendar stres v primerjavi z nelagodjem lahko merimo. Učinek hrupa na stres opazujemo preko povišane ravni stresnih hormonov (kortizol, noradrenalin in adrenalin), povezanih z občutkom nevarnosti in nemočnosti. Stres vpliva na fiziološko in psihološko zdravje posameznika, njegove posledice so čustvene, kognitivne, vedenjske ter fiziološke narave (Preglednica 1), ena izmed možnih posledic pa je tudi človekova povečana občutljivost na hrup. [15] [16] [51]

Preglednica 1: Posledice stresa so čustvene, kognitivne, vedenjske in fiziološke narave.

Posledice stresa [16]			
Čustvene	Kognitivne	Vedenjske	Fiziološke
Živčnost	Slabše zaznavanje	Agresija	Povišan krvni tlak
Razdraženost	Znižana pozornost	Kajenje	Povišan srčni utrip
Jeza	Pozabljivost	Pitje alkohola	Hiperventilacija
Depresija		Prehranske motnje	Glavobol
Anksioznost		Uživanje drog	Rana na želodcu

Tako kot nelagodje se tudi stres povečuje z višanjem ravni zvočnega tlaka, v primeru zvokov z nižjo ravno zvočnega tlaka pa je glavni faktor pri povzročanju stresa vsebina zvoka. Neugoden vpliv hrupa je bil večkrat dokazan, a dejstvo je, da so psihološke posledice izpostavljenosti hrupa v veliki meri odvisne od posameznika. [15]

5.1.3 Načini zmanjšanja hrupa

Načine zmanjševanja hrupa delimo na primarne, sekundarne in terciarne ukrepe. Primarno lahko zmanjševanje hrupa izvedemo pri izvoru, sekundarni ukrepi predstavljajo zmanjševanje hrupa na poti od izvora do poslušalca, zadnja – terciarna možnost pa je zmanjševanje hrupa pri poslušalcu.

Najlažje, pogosto tudi najbolj učinkovito in najceneje, je raven hrupa zmanjšati direktno na izvoru. Takšen pristop se uporabi predvsem v primeru obratovalnih naprav, ki povzročajo

moteč zvok. Hrup zmanjšamo z izbiro tišje naprave, rednim vzdrževanjem, premikom ali drugačnim oblikovanjem naprave. Pogosto primarni ukrepi niso izvedljivi, saj je na nekatere izvore hrupa nemogoče vplivati kot denimo na promet ali pogovor sosedov. Najpogostejši načini zmanjševanja hrupa so sekundarni ukrepi, torej na poti od izvora do poslušalca. To se doseže z zvočno izolacijo vira hrupa, postavitvijo zvočnih ovir, namestitvijo zvočnih absorberjev oziroma absorberjev zvočnih vibracij ter z drugimi vrstami obvladovanja hrupa (kot na primer zvočno maskiranje). Med takšne načine zmanjševanja hrupa spada zvočna izolacija med prostori, obcestne ograje in akustične ureditve prostorov. Zadnji način zmanjševanja hrupa je pri poslušalcu in sicer z zvočno zaščito v obliki ušesnih čepov ali slušalk, z zvočno izoliranostjo ali premestitvijo poslušalca. Zmanjševanje hrupa pri poslušalcu je najmanj zaželeno, saj je za poslušalca neprijetno in lahko otežuje njegovo aktivnost. [15]

5.2 Hrup v prostorih vzgojno varstvenih ustanov

Hrup prostorov vzgojno varstvenih ustanov lahko obravnavamo z dveh stališč: s stališča primerne akustične ureditve igralnic in s stališča zaščite delavcev pred izpostavljenostjo prekomerni ravni hrupa na delovnem mestu. Ti dve tematiki sta znotraj poglavja tudi obdelani in zanimivo je, da zaščita otrok pred prekomernim hrupom ni obravnavana v sklopu nobenega pravilnika ali smernice. Otroci so ranljiva skupina in bi bilo smiselno vzpostaviti zakonodajo z namenom celovite zaščite otrok in zaposlenih pred hrupom kot dejavnikom tveganja.

5.2.1 Hrup v igralnicah

Prostorska akustika igralnic in drugih prostorov vzgojno varstvenih ustanov ni obravnavana v slovenskih standardih ali zakonih, zato je za namen magistrskega dela kot vodilo izbrana tehnična smernica TSG-1-005:2012 : Zaščita pred hrupom v stavbah (povzeta po standardu DIN 18041), ki obravnava tematiko prostorske akustike in odmevnega časa učilnic in predavalnic [20]. Smernica prostorsko akustiko učilnic obravnava z vidika zahtev za dobro razumljivost govora, katero se doseže z zmanjšanjem odmevnega časa. V primeru prostorov vzgojno varstvenih ustanov je poleg dobre razumljivosti govora, zmanjšanje odmevnega časa pomembno tudi iz vidika znižanja ravni hrupa v prostoru. Upoštevati je potrebno, da je pri predšolski vzgoji prisotnih več neorganiziranih aktivnosti, otroci so glasnejši in skupine so manjše, zato je smiselno, da so optimalni odmevni časi igralnic še nekoliko krajši.

Razmerje med spremembo odmevnega časa in znižanjem ravni hrupa je v tehnični smernici definirano kot [20]:

$$\Delta L = 10 \log \frac{T_1}{T_2} \quad (17)$$

ΔL ... znižanje ravni hrupa [dB]

T_1 ...prvotni odmevni čas [s]

T_2 ... odmevni čas po dodani absorpciji [s]

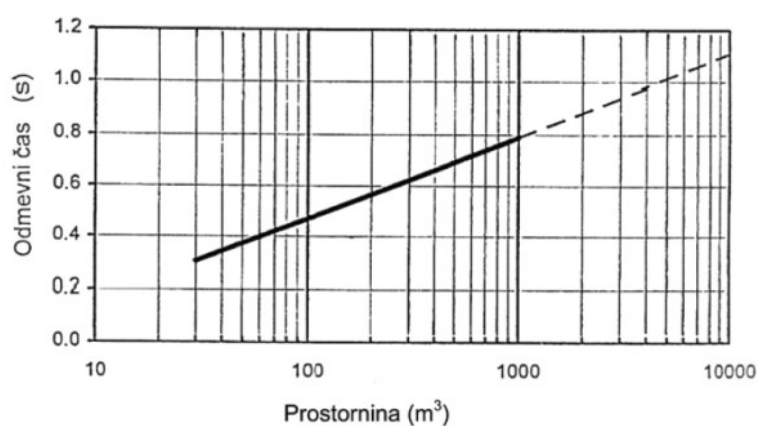
Iz enačbe (17) je razvidno, da se v kolikor odmevni čas razpolovimo, raven hrupa zmanjša za 3 dB, v primeru štirikratnega zmanjšanja odmevnega časa pa raven hrupa pade za 6 dB. Izkušnje kažejo, da je to približna meja, ki jo lahko z akustično ureditvijo dosežemo. [20]

Tehnična smernica poda optimalno vrednost odmevnega časa pri oktavnih pasovih 500 Hz in 1000 Hz glede na volumen prostora (Slika 21), določeno pa je tudi tolerančno območje odmevnega časa v odvisnosti od frekvence (slika 22). [20]

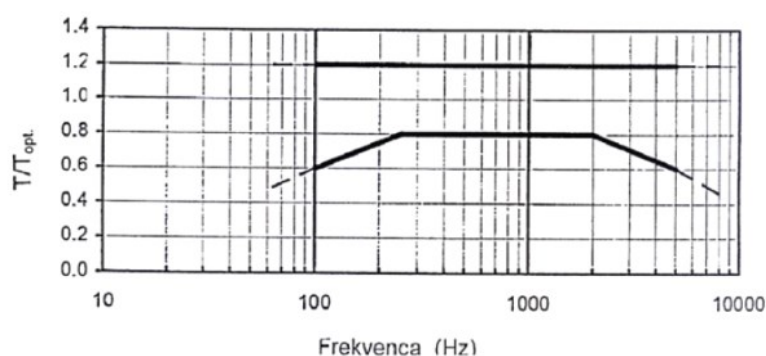
$$T_{opt} = 0,32 \log V - 0,17 \quad (18)$$

T_{opt} ... optimalna vrednost odmevnega časa v polno zasedenih učilnicah [s]

V ... volumen prostora [m^3]



Slika 21: Optimalni odmevni čas v učilnicah v odvisnosti od prostornine prostora. Običajna učilnica ima prostornino manjšo od 200 m^2 , torej bi moral biti odmevni čas prostora manjši od 0,6 s. [20]



Slika 22: Tolerančno polje odmevnega časa v učilnicah dovoljuje 20% odstopanje odmevnega časa v obe smeri. [20]

V obliki skic so v tehnični smernici podana priporočila glede pozicije zvočnih absorberjev v manjših prostorih, kot so na primer učilnice in sejne sobe. Priporočena je pozicija absorberjev po robovih stropa ter zgornjem robu sten [20].

Akustika učilnic je obravnavana v Ameriškem nacionalnem standardu o akustični ureditvi šolskih prostorov ANSI/ASA S12.60-2010/Part 1, ki podaja maksimalne odmevne čase v prostorih namenjenih učnemu procesu v odvisnosti od velikosti prostora, kot je prikazano v preglednici 2. V primeru učilnic z volumnom manjšim ali enakim 283 m^3 standard navaja, da

mora biti v takih prostorih možno odmevni čas zmanjšati na 0,3 s z enostavnim dodajanjem absorpcijskih materialov. [21]

Preglednica 2: Maksimalni odmevni čas v prostorih namenjenih učnemu procesu. [21]

Volumen učnega prostora, V	$T_{60}^{a)}$
$V \leq 283 \text{ m}^3$	0,6 s ^{b)}
$238 \text{ m}^3 < V \leq 566 \text{ m}^3$	0,7 s
$V > 566 \text{ m}^3$	brez omejitve

a) maksimalen dovoljen odmevni čas v praznem prostoru za oktavne pasove 500 Hz, 1000 Hz in 2000 Hz.

b) Prostor naj bo enostavno prilagodljiv na odmevni čas 0,3 s.

V dodatku C ameriškega standarda je navedeno, da v primeru učnih prostorov z višino stropov več kot 3 m ni primerna namestitev akustičnih absorberjev le po stropu, temveč je zvočno absorpcijski material potrebno namestiti tudi na stene [21].

Ameriški nacionalni standard določa povprečno ekvivalentno absorpcijsko površino odraslega človeka v prostoru ($0,55 \text{ m}^2$) ter predvidi ekvivalentno absorpcijsko površino osnovnošolca za 40% manjšo od odraslega [21].

Za prostore vzgojno varstvenih ustanov nekatera literatura priporoča še krajše odmevne čase, $T_{ciljni} = 0,40 \text{ s} - 0,50 \text{ s}$ pri zasedenem prostoru, saj naj bi hrup bolj vplival na nemirnost predšolskih otrok kot šoloobveznih [4].

5.2.2 Hrup na delovnem mestu

Kljub temu da je zaznavanje zvokov in občutljivost na hrup delno subjektivno, so zakonsko določene vrednosti, pri katerih je možnost za nastanek poškodb sluha zelo verjetna.

Izpostavljenost hrupu na delovnem mestu obravnava Pravilnik o varovanju delavcev pred tveganji zaradi izpostavljenosti hrupu pri delu, ki je izdelan na podlagi Evropske direktive 2003/10/EC. V sklopu pravilnika so določene mejne vrednosti izpostavljenosti hrupu na delovnem mestu in sicer v obliki ravni dnevne izpostavljenosti ($L_{ex,8h}$ [dB(A)]), ravni tedenske izpostavljenosti ($T_{ex,8h}$ [dB(A)]) ter konične ravni zvočnega tlaka (p_{peak} [Pa]) in ukrepi v primeru preseganja teh vrednosti. [12]

Preglednica 3: Meje vrednosti izpostavljenosti hrupu na delovnem mestu. [12]

	$L_{ex,8h}$ [dB(A)]	p_{peak} [Pa]	p_{peak} [dB (C) glede na referenčni tlak 20 μPa]
Mejni vrednosti izpostavljenosti	87	200	140
Zgornji opozorilni vrednosti izpostavljenosti	85	140	137
Spodnji opozorilni vrednosti izpostavljenosti	80	112	135

Že v primeru preseganja ene ali obeh spodnjih opozorilnih vrednosti izpostavljenosti je delavcem potrebno omogočiti dostop do opreme za varovanje sluha, jih obvestiti in usposobiti za varno delo v hrupnem okolju in jim omogočiti dostop do preventivnega avdiometričnega pregleda. [13]

Mejne vrednosti, zapisane v preglednici 3, obravnavajo le vpliv hrupnega delovnega mesta na okvaro sluha, vendar ima delo v hrupnem okolju še druge posledice, ki se začnejo pojavljati že pri nižjih ravneh zvočnega tlaka. Hrup povzroča razdražljivost in nelagodje delavcev, zniža pozornost in poslabša sposobnost zaznavanja. Na hrupnem delovnem mestu je otežena koncentracija in komunikacija med delavci, med drugim pa hrup vpliva tudi na orientacijo in ravnotežje, kar lahko privede do nesreč. [17]

Glede na vrsto delovnih opravil so v prilogi 1 pravilnika določene tudi največje dopustne ekvivalentne ravni hrupa (Preglednica 4). V kolikor so te ravni presežene, je potrebno raziskati možnosti za zmanjšanje hrupa na delovnem mestu. [12]

Preglednica 4: Največje dopustne ekvivalentne ravni hrupa. [12]

Vrsta delovnih opravil		Dopustna ekvivalentna raven hrupa na delovnem mestu v dB(A)	
		a	b
1	Najzahtevnejše mentalno delo	45	40
2	Pretežno mentalno delo, pri katerem je potrebna velika koncentracija in/ali ustvarjalno mišljenje ali so potrebne daljnosežne odločitve, sejne dvorane, pouk v šolah, zdravniški pregledi in posegi, znanstveno delo, raziskave, razvoj programov, zahtevnejša pisarniška dela, telefonske centrale	55	45
3	Enostavna pisarniška in njim primerljiva dela, prodaja, zahtevna montaža in njej primerljiva pretežno fizična dela, zahtevno krmiljenje sistemov	65	55
4	Manj zahtevno krmiljenje sistemov, manj zahtevna fizična dela, ki zahtevajo zbranost in pazljivost in njim podobna dela	70	60
5	Pretežno rutinska fizična dela, ki zahtevajo slušno spremljanje okolja	80	75
6	Noseče ženske	80	55

a – velja za splošni hrup na delovnem mestu zaradi drugih proizvodnih virov v okolici delovnega mesta

b – velja za hrup na delovnem mestu zaradi neproizvodnih virov (ventilacija, klimatizacija, sosednji obrati, hrup prometa ipd.)

Delo vzgojitelja v vrtcu ni omenjeno v preglednici 4, predpostavimo, da spada v 3. sklop delovnih opravil z mejno vrednostjo 65 dB(A).

5.2.3 Zmanjševanje hrupa v vzgojno varstvenih ustanovah

Načine zmanjševanja hrupa v splošnem delimo na primarne, sekundarne in terciarne pristope (poglavje 5.1.3), vendar niso vsi ustrezni za izvajanje v vzgojno varstvenih ustanovah. Terciarni ukrepi, t.j. zmanjševanje hrupa pri sprejemniku (npr. osebna varovalna oprema) je v obravnavanih prostorih neprimerno, saj je za nemoten pedagoški proces pomembno, da vzgojitelji in otroci slišijo drug drugega in dogajanje okoli sebe, zaradi razgibanih aktivnosti pa poslabšana slušna zmogljivost lahko predstavlja tudi nevarnost. Zato se je v specifičnem okolju vrtcev potrebno poslužiti primarnih in sekundarnih ukrepov.

V vzgojno varstvenih ustanovah so glavni izvor hrupa predvsem otroci in je posledično primarni način zmanjševanja hrupa njihova miritev in poziv k tišjemu opravljanju aktivnosti. Za umirjanje otrok v času, ki ga preživijo v vzgojno varstveni ustanovi so zadolženi zaposleni, katerih pristopi se lahko močno razlikujejo, seveda pa na hrupnost vsakega posameznika vplivajo tudi njegove osebnostne karakteristike ter domače okolje in vzgoja. Raven hrupa v igralnicah je poleg tega odvisna tudi od starosti otrok, velikosti skupine in vrste aktivnosti, saj je doseganje tišine izrazito težje v sklopu neorganiziranih aktivnosti (igra, odmor, priprave na dejavnosti...). Za učinkovito zmanjševanje hrupa bi bilo potrebno vzgojitelje, starše in otroke izobraziti o problematiki hrupa, njegovih negativnih posledicah in obvladovanju le-tega ter v pedagoški proces vključiti manj hrupne dejavnosti ter igralne pripomočke. Tovrstni ukrepi so bili v slovenske vrtce uvedeni v sklopu projekta »Hrup v vrtcu – osveščanje otrok, vzgojiteljev in staršev«, katerega so Kacjan Žgajnar s sodelavci leta 2013 izvajali na območju Mestne občine Ljubljana. [51] [57]

Poleg primarnih ukrepov, bi bilo za celostno reševanje problema hrupnosti v prostorih vzgojno varstvenih ustanov potrebno izvajati tudi sekundarne ukrepe, ki se nanašajo na obvladovanje hrupa na prenosu med izvorom in sprejemnikom. Sekundarni ukrep je v tem primeru akustična ureditev igralnic, ki jo izvedemo z vnosom zvočno absorpcijskega materiala v prostor. Z akustičnimi elementi izboljšamo zvočno udobje v prostoru – zmanjšamo odmevni čas in posledično zmanjšamo raven hrupa znotraj prostora. Dokazano je tudi, da tišje okolje vpliva na tišji odziv uporabnika, saj govorec neprostovoljno prilagodi glasnost govora glede na hrup ozadja. Ta človeški refleks je poznan kot Lombardov učinek, ki pravi, da človek v bolj hrupnem okolju refleksno privzdigne glas v želji po ohranjanju enake jasnosti govora [50]. Z izboljšanjem akustične klime prostora, je tako poleg osnovnega znižanja ravni zvočnega tlaka zaradi akustične ureditve, možno še dodatno znižanje kot posledica Lombardovega učinka, kar je L'Espérance s sodelavci opazil tudi med raziskavo, v sklopu katere se je izvajala akustična ureditev prostorov vzgojno varstvene ustanove v Kanadi [36].

Tako primarni kot sekundarni ukrepi imajo svoje omejitve, zato je smiselno k reševanju problematike pristopiti z obeh vidikov.

5.3 Oprema, higienski režim in varnost otrok v vzgojno varstvenih ustanovah

Higienske razmere in opremljenost prostorov namenjenih predšolski vzgoji so opredeljene v Pravilniku o normativih in minimalnih tehničnih pogojih za prostor in opremo vrtca [18]. Ena glavnih higienskih omejitev glede materialov v prostorih namenjenim otrokom je pralnost – vsa oprema, igrače, tla in stene morajo biti pralni. Med drugim je zahtevano, da je vsa težja oprema trdno pritrjena, stene pa morajo biti do višine 1,20 m obložene z materialom, ki daje občutek toplote in je mehansko odporen (npr. les). Poleg omenjenega pravilnika ima vsaka vzgojno varstvena ustanova sestavljen lasten zdravstveno-higienski režim [19], ki obravnava vzdrževanje higiene prostorov, kot tudi otrok in zaposlenih, določeni so režimi pranja igrač, posteljnine in drugih tekstilnih izdelkov in ravnanja v primeru bolezni.

V omenjenem pravilniku [18] so določene še minimalne zahteve glede zvočne zaščite vrtcev in sicer, da morajo biti vse vrhnje obloge sten, stropov in tal iz materialov, ki absorbirajo hrup. To je v prostorih vzgojno varstvenih ustanov težko dosegljivo, saj je potrebno upoštevati vse predhodno omenjene higienske omejitve, ki dokaj omejijo izbiro akustičnih oblog.

Vsaka vzgojno varstvena ustanova sprejme tudi Pravilnik o varnosti otrok [25], kjer so opisane zahteve glede organizacije dela z otroki, ob upoštevanju njihove varnosti. Zagotavljati je potrebno varno uporabo opreme v igralnici skladno z njeno namembnostjo, potreben je stalen pregled vzgojiteljev med uporabo nevarnih orodij in pripomočkov ter informiranje otrok o pravilnem ravnanju z le-timi. Uživanje ali drugo nepravilno uporabo materialov namenjenih pedagoškemu delu je prav tako potrebno preprečiti, določene so zahteve o varnosti pri igri na igrišču, varnost pri interakciji med otroki itd. Za varnost otrok v prostorih vrtca so odgovorni vzgojitelji, pomočniki vzgojiteljev in drugi strokovni delavci, ki morajo svoje naloge opravljati na način, ki ne ogroža otrokovega zdravja in življenja. [25]

Poleg zdravstveno-higienskih ter varnostnih omejitev je potrebno upoštevati veljavni Zakon o graditvi objektov in vse gradbene predpise in tehnične smernice glede materialov v prostoru. Uredba (EU) št. 305/2011 o določitvi usklajenih pogojev za trženje gradbenih proizvodov navaja, da morajo biti vsi gradbeni objekti načrtovani in zgrajeni tako, da ne ogrožajo varnosti ljudi, živali ali imetja ter ne škodujejo okolju. Tekom celotnega življenjskega cikla morajo gradbeni proizvodi izpolnjevati osnovne zahteve, ki se nanašajo na mehansko odpornost in stabilnost, varnost pri požaru, higieno, zdravje in okolje, varnost in dostopnost pri uporabi, zaščito pred hrupom, varčevanje z energijo in ohranjanje toplote ter trajnostno rabo naravnih virov. Vsak gradbeni proizvod mora tako imeti izdelano izjavo o lastnostih vključno s poročilom o kemijski varnosti v skladu z Uredbo Evropskega parlamenta in sveta o registraciji, evalvaciji, avtorizaciji in omejevanju kemikalij (REACH). [46] [47]

5.4 Obstoječe raziskave s področja prostorske akustike prostorov vzgojno varstvenih ustanov

Hrupu, kot dejavniku tveganja na delovnem mestu se posveča vedno več pozornosti, med drugim tudi hrupu v izobraževalnih in vzgojno varstvenih ustanovah. Izvedeno je bilo več meritev ekvivalentne ravni hrupa v prostorih predšolske vzgoje, raziskani so vplivi hrupnega okolja na govorne organe vzgojiteljev ter psihološke posledice izpostavljenosti hrupu otrok in vzgojiteljev. V sklopu meritev L_{eq} je identificirano govorno območje predšolskih otrok, ki obsega oktavne pasove od 500 Hz do 4000 Hz [30].

V preglednici 5 so prikazane vrednosti ekvivalentne ravni hrupa v vrtcih, dobljene v sklopu osmih različnih raziskav:

Preglednica 5: Ekvivalentne ravni hrupa v vzgojno varstvenih ustanovah – predhodne raziskave.

Ekvivalentne ravni hrupa [dB(A)]			
L_{eq} (A)	$L_{eq,8h}$ (A)	$L_{eq,max}$ (A)	Raziskava
78,8	/	91,1	Ekvivalentne ravni hrupa so merjene v prostoru, opazuje se vpliv hrupa v vrtcu na stres pri vzgojnem osebju, v raziskavi sodeluje 130 vzgojiteljic (Slovenija) [16]
82,6	/	83,6	Ekvivalentne ravni hrupa so izmerjene pri ušesih otrok, opazuje se vpliv hrupa na glas in govor otrok, sodelovalo je deset otrok iz treh različnih vrtcev (Švedska) [26]
80,5	79,4	86,1	Ekvivalentne ravni hrupa so izmerjene pri ušesih vzgojiteljev, sodelovalo je 24 vzgojiteljev iz 14 različnih vrtcev (Avstralija) [27]
75,92	/	/	Ekvivalentne ravni hrupa so merjene v prostoru enega vrtca, opazuje se vpliv hrupa na pred bralne sposobnosti otrok, v raziskavi sodeluje 90 otrok. (ZDA) [28]
76,1	/	78,2	Ekvivalentne ravni hrupa so izmerjene pri ušesih vzgojiteljev, opazuje se vpliv hrupa na glas in govor, sodelovalo je 10 vzgojiteljic (Švedska) [29]
/	80,2	84,1	Ekvivalentne ravni hrupa so merjene v prostorih desetih vrtcev, v raziskavi sodeluje 671 otrok. (Italija) [30]
/	79,9	/	Ekvivalentne ravni hrupa in odmevni časi so merjene v prostorih 176 vrtcev (Danska) [31]
77,3	/	94	Ekvivalentne ravni hrupa in odmevni časi so merjene v prostorih 24 vrtcev (Kanada) [32]
80,4	78,8	/	Ekvivalentne ravni hrupa so izmerjeni pri 40 vzgojiteljih in učiteljih, vprašalnik o psihofizičnih vplivih hrupa je izpolnilo 231 vzgojiteljev in učiteljev. (Makedonija) [33]

Na podlagi zbranih podatkov je očitno, da ekvivalentne ravni hrupa v vzgojno varstvenih ustanovah vedno presegajo dopustno ekvivalentno raven hrupa na delovnem mestu, določeno pri 65 dB(A), pogosto pa raven hrupa presega 80 dB(A) oziroma celo 85 dB(A). V primeru presega ravni hrupa 80 dB(A) bi bilo potrebno, da delodajalci izvedejo ukrepe določene z zakonodajo [13].

V sklopu raziskave, v kateri je sodelovalo 176 ustanov vzgojno varstvene dejavnosti na Danskem, so na podlagi rezultatov meritev izpostavljenosti hrupu ocenili, da je v več kot 95% vrtcih raven hrupa višja od 75 dB(A) in v več kot 50% vrtcev raven hrupa nad 80 dB(A) [31].

Hrupno delovno okolje vpliva na zdravje in počutje otrok in zaposlenih v vrtcu. Hrup ozadja v vzgojno varstvenih ustanovah presega maksimalno priporočeno vrednost za nemoteno komunikacijo, ki znaša 55 dB [29]. Vpliv hrupnega okolja na način govora in glas vzgojiteljev so Södersten s sodelavci analizirali v sklopu švedske raziskave obremenjenosti glasu vzgojiteljev (2002), prav tako so se s tematiko ukvarjali Hadzi-Nikolova s sodelavci (2013) ter Kalužnaja in Lakiša (2016). Izkaže se, da se pri učiteljih pogosto pojavi hripavost, začasna izguba glasu, suho grlo, kašljanje in simptomi povezani s pogostim povzdigovanjem glasu, kar lahko privede do kroničnega obolenja glasilk. Poleg večje obremenitve glasilk in govornega organa se pri vzgojiteljih, ki delujejo v hrupnem okolju pojavi višja raven izčrpanosti, občutljivosti, nervoze in želje po osamitvi v primerjavi s kontrolno skupino. [29] [33] [34]

Hrupno okolje ima nezanemljiv vpliv tudi na otroke. Maxwell in Evans (2000) v sklopu raziskave izvedene na 90 predšolskih otrocih pokažeta, da predšolski otroci v hrupnem okolju slabše prepoznavajo številke, črke in enostavne besede ter so počasnejši pri reševanju ugank [28]. Vpliv hrupa ozadja na sposobnosti učenja osnovnošolcev eksperimentalno raziskuje Hygge (2003), ki zaključi, da hrup neugodno vpliva na otrokov spomin, zaznavanje govora in slušno razumevanje [22]. Med Nemško raziskavo, ki jo izvede Klatte s sodelavci (2010), je opaženo, da je negativen vpliv hrupa večji pri otrocih kot pri odraslih, saj so otroci še v procesu učenja, mnogih besed še ne poznajo in je njihova zmožnost sklepanja v hrupnem okolju manjša [35].

Na splošno se izkaže, da hrup ozadja negativno vpliva na kognitiven razvoj otrok, pri učencih se pogostejše pojavljajo motnje učenja, saj previsoka raven hrupa onemogoča kvalitetno podajanje snovi. Za efektiven učni proces mora biti zvok ozadja vsaj 15-20 dB(A) nižji od govora, velik vpliv pa ima tudi odmevni čas prostora in z njim povezana razumljivost in jakost govora. [15]

Dvig ravni zvočnega tlaka v prostorih predšolske vzgoje je odvisen tako od odmevnega časa kot tudi od števila otrok v prostoru, hkrati pa daljši odmevni čas vpliva na dvig ravni zvočnega tlaka govora posameznega otroka. L'Espérances s sodelavci (2006) v sklopu aplikativne raziskave izvede akustične ureditve več igralnic in s tem ekvivalentno raven hrupa zmanjša tudi za 6 dB do 7 dB, vzgojitelji pa po ureditvi opazijo spremembe v obnašanju otrok, ki so posledično začeli govoriti tišje. [36]

V vseh raziskavah, ki so preučevale povezanost med odmevnim časom prostora in ravno hrupa v igralnici so prav tako opazili pozitiven vpliv krajšega odmevnega časa na raven zvočnega tlaka, pri čemer pa je percepcija hrupnosti še vedno v določeni meri odvisna od uporabnikov prostora. [28] [31] [37]

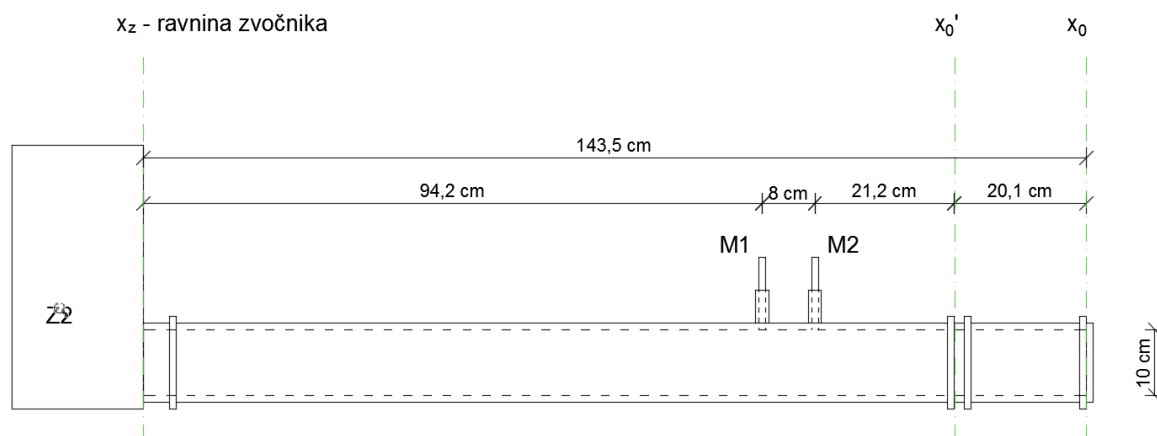
6 MERILNE IN RAČUNSKE METODE

V sklopu poglavja so predstavljene uporabljene merilne metode za določanje absorpcijskih lastnosti materialov, analizo odmevnega časa in ravni hrupa v prostoru, poleg merilnih metod pa je opisan proces izdelave računskega modela za napovedovanje odmevnega časa prostora.

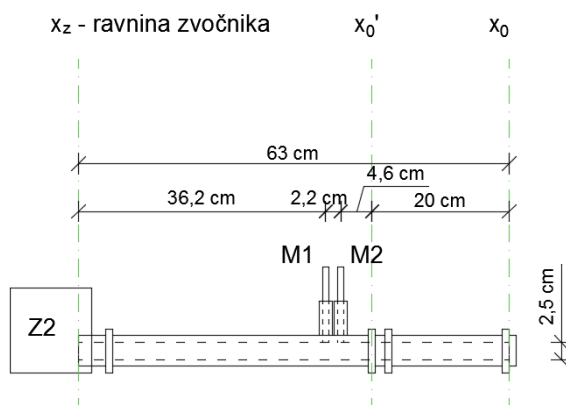
6.1 Meritve zvočno absorpcijskih lastnosti z impedančno cevjo

Absorpcijske koeficiente obravnavanih materialov smo določali s preizkusi v impedančni cevi, v skladu s standardom ISO 10534-2:1998 [24] ob uporabi dveh mikrofонов s fiksnima lokacijama merjenja zvočnega tlaka (metoda z dvema mikrofonomoma). Princip delovanja meritev je opisan v sklopu poglavja 4.2.1.2.

Uporabljeni sta bili dve impedančni cevi izdelani po priporočilih standarda, katerih skupno frekvenčno območje znaša od 250 Hz do 4000 Hz merjeno v oktavnih pasovih. Cevi sta okroglega preseka z notranjima premeroma 10 cm in 2,5 cm. Vzorec je možno odmakniti od trde podlage za maksimalno 20 cm. Dimenzije cevi so prikazane na slikah 23 in 24.



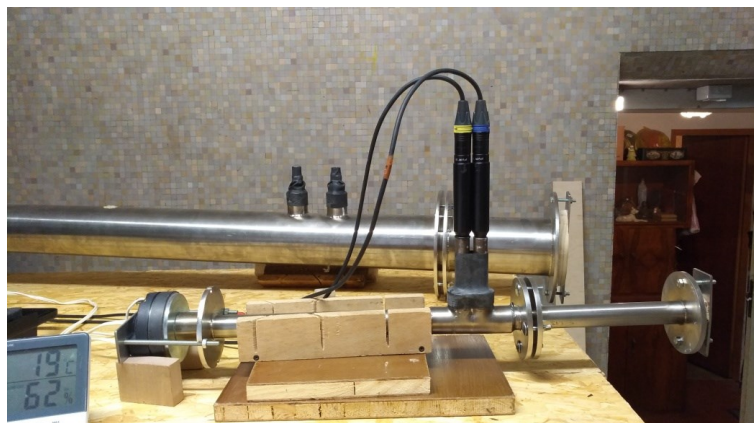
Slika 23: Impedančna cev 1, $d_1=10$ cm.



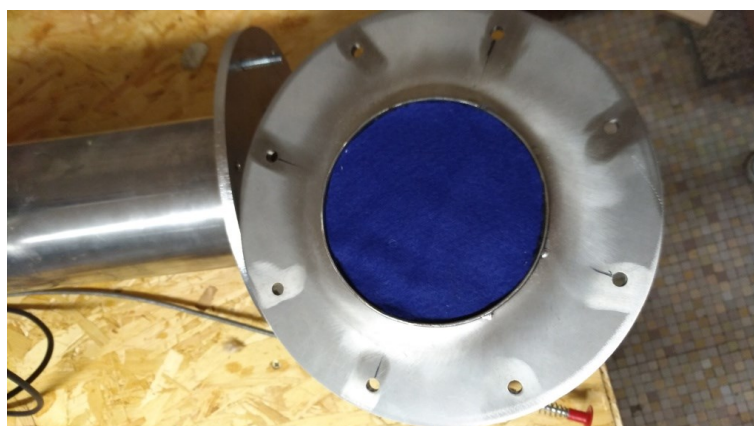
Slika 24: Impedančna cev 2, $d_2=2,5$ cm.

Mikrofona sta bila pred meritvijo kalibrirana, med izvajanjem meritev se je beležila temperatura okolja in zračni tlak, pred merjenjem absorpcijskega koeficienta obravnavanih materialov pa je bil testno izmerjen vzorec z znanim absorpcijskim koeficientom.

Na slikah 25, 26 in 27 je prikazan potek meritev v impedančni cevi, namestitve vzorca in dokumentiranje vzorcev obeh velikosti.



Slika 25: Potek meritev absorpcijskega koeficienta z manjšo od obeh impedančnih cevi.



Slika 26: Postavitev vzorca v impedančno cev na odmiku 20 cm od toge podlage.



Slika 27: Izrezana vzorca dveh velikosti, za preizkus absorpcijskega koeficienta v obeh impedančnih ceveh.

Vsak testiran vzorec je bil poimenovan in opisan glede na vrsto materiala, proizvajalca, barvo, debelino, velikost vzorca, število izdelanih vzorcev, sestavo, gostoto in druge specifikacije materiala. Vzorce smo testirali v enem ali več slojih v več možnih kombinacijah materialov in v dveh različnih ravninah: tik ob togi podlagi ter na oddaljenosti 20 cm od toge podlage, tako da je za vzorcem nastal zračni prostor. Zaradi različnih debelin vzorcev in odmikov od toge podlage je bilo za računsko analizo potrebno pri vsaki meritvi določiti razdaljo od mikrofona do ravnine vzorca. Rezultati meritev so bili obdelani z računalniškim programom, ki je absorpcijske koeficiente v odvisnosti od frekvence zvoka izvozil v Excel datoteko. Na podlagi dobljenih podatkov smo določili absorpcijske koeficiente obravnavanih oktavnih pasov, kateri so bili nato uporabljeni pri računski analizi odmevnega časa.

Rezultati meritev so predstavljeni v sklopu poglavja 7.2.1.1.

6.2 Meritve odmevnega časa

Meritve akustičnih parametrov prostora potekajo v skladu s standardom ISO 3382-2 (Akustika - Merjenje parametrov prostorske akustike - 2. del: Odmevni čas v običajnih prostorih) [23]. Meritev odmevnega časa se izvaja z uporabo neusmerjenega zvočnega vira, neusmerjenega mikrofona, zvočnega signala in naprave, ki obdeluje podatke zvoka v prostoru. Za določitev odmevnega časa se izmeri upad ravni zvočnega tlaka za 20 dB (T_{20}) oziroma 30 dB (T_{30}).

Glede na zahtevano natančnost rezultatov standard določa tri različne načine izvajanja meritev: raziskovalno, inženirsko in natančno metodo. Vsaka metoda je določena z minimalnim številom različnih pozicij izvora in sprejemnikov zvoka in minimalnim skupnim številom meritev odmevnega časa prostora, določeno je tudi maksimalno odstopanje rezultatov. Bolj kot je metoda meritve natančna, več meritev je potrebno izvesti. [23]

S standardom sta določena dva postopka merjenja odmevnega časa, ki se razlikujeta glede na način generiranja zvoka - metoda prekinjenega hrupa in metoda integriranega impulznega odziva. Pri prvi metodi se generira impulz ali šum, katerega se nato hipno prekine, pri drugi pa se generira poznan signal (šum, impulz, sinusni prelet). V obeh primerih mora zvok zajemati širok spekter frekvenc (vsaj od 88 Hz - 5657 Hz) in mora dosegati raven zvočnega tlaka vsaj 35 dB(A) nad hrupom ozadja. Potek meritev je pri obeh metodah zelo podoben, merilno opremo se po priporočilih standarda namesti v prostor, v katerem se v času meritev lahko zadržujeta največ dve osebi. V primeru izvajanja več meritev odmevnega časa v enem prostoru je vrednosti na koncu potrebno povprečiti. [23]

Standard priporoča, da so mikrofoni vsaj 1 m oddaljeni od površin prostora in vsaj 2 m med seboj. Oddaljenost izvora do mikrofona je določna z enačbo (19) [23]:

$$d_{min} = 2 \sqrt{\frac{V}{c \hat{T}}} \quad (19)$$

d_{min} ... minimalna razdalja med izvorom in sprejemnikom [m]

V ... volumen prostora [m^3]

c ... hitrost zvoka [m/s]

$\hat{T}$... ocena odmevnega časa prostora [s]

Meritve odmevnega časa izvedene med eksperimentalnim delom magistrskega dela so potekale v dveh sklopih in po dveh različnih metodah:

1. Raziskovalna metoda z generiranjem zvoka po metodi prekinjenega hrupa in
2. Natančna metoda z generiranjem zvoka po metodi prekinjenega hrupa.

Uporabljena je bila sledeča certificirana merilna oprema:

- Analizator zvoka: NTI Audio, XL2, TA (class 1, SN: A20-07626-E0),
- Merilni mikrofoni: NTI Audio, M2230 (class 1, SN: 3140),
- Generator zvoka: NTI Audio, Minirator MR-PRO (SN: G2P-RAAHI-F2),
- Neusmerjen zvočni izvor: Phon-X Four (dodekaedron),
- Ojačevalec: Apart audio CHAMP-2.

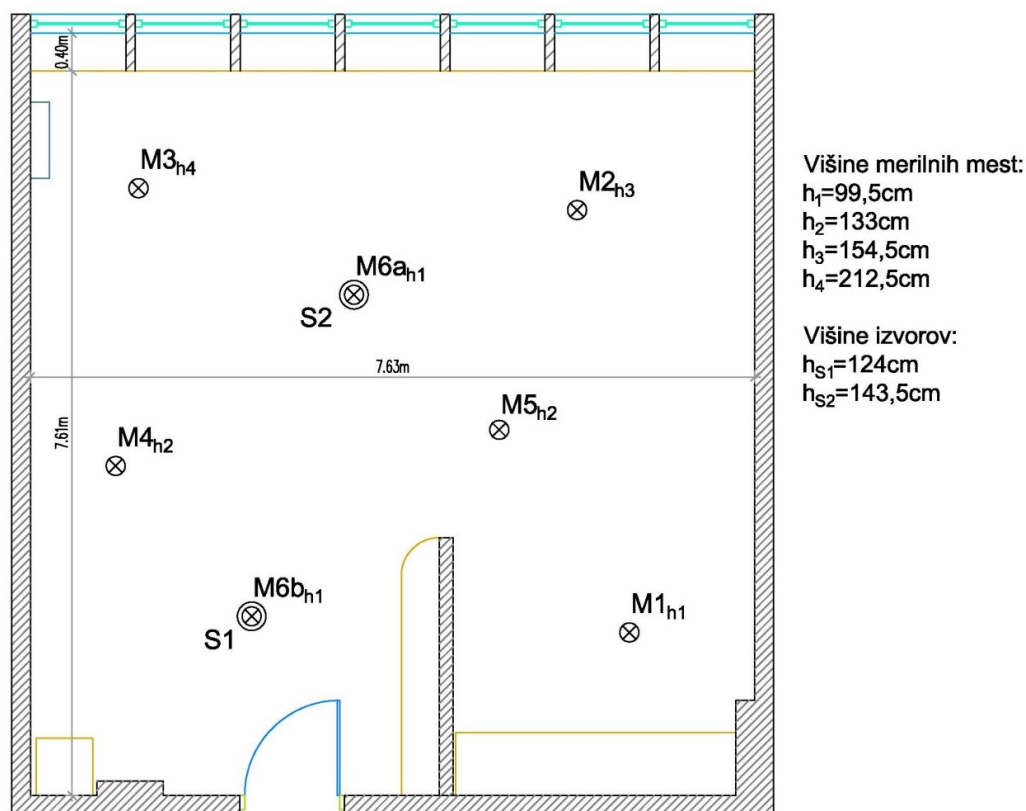
1. sklop meritev je zajemal meritve treh različnih prostorov vrtca (igralnic) in je bil izveden v skladu z raziskovalno metodo z generiranjem zvoka po metodi prekinjenega hrupa. Za izvor zvoka se je uporabilo ploskalnik. Metoda zahteva vsaj dve različni poziciji mikrofona in vsaj eno pozicijo izvora. Natančnost meritve po raziskovalni metodi naj bi bila boljše od 10%. Meritve so bile izvedene z XL2 akustičnim analizatorjem s pripadajočim vsesmernim mikrofonom in ploskalnikom pri dveh različnih pozicijah mikrofona in vsaj štirih različnih pozicijah izvora. Odmevni čas je bil merjen po metodi merjenja T_{20} v oktavni pasovih od 250 Hz do 8000 Hz. Med meritvami je bila v prostoru ena oseba. Meritve prvega sklopa so predstavljale informativno oceno odmevnega časa prostorov potrebno za kalibracijo računskega modela in izbiro prostora za akustično ureditev.

V 2. sklopu so bile izvedene meritve odmevnega časa pred in po akustični ureditvi izbrane igralnice z natančnostjo določeno po natančni metodi in generiranjem zvoka po metodi prekinitve hrupa. Natančna metoda zahteva izvedbo vsaj 36 meritev odmevnega časa, potrebni sta vsaj dve različni poziciji izvora, vsaj tri različne pozicije sprejemnika, vsaj 12 različnih pozicijskih kombinacij izvor-sprejemnik in vsaj tri ponovitve pri vsaki kombinaciji. Meritve morajo obsegati frekvenčne pasove od 125 Hz do 4000 Hz (oktavni pasovi) oziroma od 100 Hz do 5000 Hz (terčni pasovi). Natančnost rezultatov je predvidena na vsaj 2,5% v primeru izvajanja meritev v oktavni pasovih in vsaj 5% v primeru izvajanja meritev v terčnih pasovih.

Merilna oprema je obsegala XL2 akustični analizator s pripadajočim neusmerjenim mikrofonom, generator zvoka, neusmerjeni zvočnik in ojačevalec.

Meritve odmevnega časa so bile izvedene v terčnih pasovih po metodi merjenja časa T_{20} . Pred pričetkom meritev se na napravi za generiranje zvoka določi vrsta šuma, glasnost in trajanje intervala. Generiralo se je roza šum v intervalih 5 s signala – 5 s tišine. Raven zvočnega tlaka signala je za več kot 35 dB presegala raven hrupa ozadja v obravnavanih terčnih pasovih (od 100 Hz do 10000 Hz). Zvočni signal je ostal nespremenjen čez celoten potek meritev.

Ob upoštevanju priporočil iz standarda sta bili določeni dve različni poziciji izvora in 6 različnih pozicij mikrofona (Slika 28). Meritve odmevnega časa se je izvajalo v dvanajstih različnih merilnih kombinacijah. Pri vsaki merilni kombinaciji izvora in sprejemnika so bile izvedene vsaj tri meritve odmevnega časa. Poziciji izvora zvoka sta hkrati služili kot šesta pozicija mikrofona, kot je razvidno iz slike 28. Pozicije so ostale nespremenjene čez celoten potek izvajanja meritev, prav tako se ni spreminjala pozicija opreme prostora. Meritve so se izvajale ob prisotnosti dveh ljudi v prostoru, v času merjenja se je beležila temperatura ter relativna vlaga v prostoru (24 °C, 45% RH).



Slika 28: Pozicije merilnih točk v igralnici 8.

Merilna negotovost rezultatov je izračunana po enačbi 20, ki jo določa standard ISO 3382 [23]:

$$\sigma(T_{20}) = 0,88 T_{20} \sqrt{\frac{1 + (1,90/n)}{N B T_{20}}} \quad (20)$$

B ... frekvenčno območje (terčni pas) [Hz]

n ... število meritev v vsaki poziciji

N ... število različnih merilnih položajev (merilnih kombinacij izvora in sprejemnika)

T_{20} ... odmevni čas, določen na podlagi 20 dB upada zvočnega signala [s]

Rezultati meritev so predstavljeni v poglavjih 7.1 in 7.6.

6.3 Meritve ekvivalentne ravni hrupa

V sklopu izvajanja akustičnih meritev prostora so bile z akustičnim analizatorjem izvedene meritve ekvivalentne ravni zvočnega tlaka L_{eq} in sicer meritve hrupa ozadja ter meritve ekvivalentne ravni zvočnega tlaka v prostoru pred in po akustični ureditvi.

Za določanje ekvivalentne ravni zvočnega tlaka v prostoru je bilo potrebno hrup generirati z generatorjem zvoka. Zabeležene so bile vrednosti ekvivalentnega zvočnega tlaka z različnimi časovnimi in frekvenčnimi obtežbami. Neobtežena ekvivalentna raven zvočnega tlaka L_{Zeq} je bila beležena v odvisnosti od frekvence. Vrsta obtežbe je za namen primerjave rezultatov nepomembna, saj se razlika v ravni zvočnega tlaka ohranja, pomembno je le, da se primerjajo enako obteženi rezultati.

Za meritve ekvivalentne ravni zvočnega tlaka je bila uporabljena ista oprema kot za meritve odmevnega časa (slika 29). Meritve hrupa ozadja so se izvajale v najbolj hrupnem obdobju v času izvajanja meritev (čas prometne konice). Akustični analizator je hrup ozadja meril 30 s. Meritve ekvivalentne ravni zvočnega tlaka so bile izvedene pred in po akustični ureditvi. Generator zvoka je v obeh primerih 20 s generiral roza šum. Zvočna moč izvora je bila pri obeh meritvah enaka.

Za izvajanje vseh treh meritev je bilo izbrano merilno mesto M2, pri katerem je bil izvor zvoka v primeru meritev ravni hrupa prostora postavljen na pozicijo S1.



Slika 29: Merilna oprema za izvajanje meritev odmevnega časa in ekvivalentne ravni hrupa: generator zvoka (levo) in akustični analizator (desno).

Tako v primeru meritev ekvivalentne ravni hrupa kot v primeru meritev odmevnega časa so prisotne osebe nosile zaščitno opremo.

Rezultati meritev so predstavljeni v sklopu poglavja 7.6.

V primerjavi z merjenjem hrupnosti v realnem okolju je meritev generiranega hrupa bolj zanesljiva, saj je zvočna moč izvora vedno enaka. V primeru meritve v realnem okolju je potrebno upoštevati dejavnike, ki vplivajo na hrupnost, kot je del dneva, dan v tednu, število otrok v igralnici, vreme ipd. Za verodostojne rezultate bi bilo potrebno meritve izvajati daljše časovno obdobje.

6.4 Računska analiza

Predhodna računska analiza odmevnega časa prostora je izvedena v skladu s tehnično smernico TSG-1-005-2013: Zaščita pred hrupom v stavbah [20].

V priročnem in široko dostopnem programskem okolju Microsoft Office Excel je bil izdelan preprost program za Račun Odmevnega Časa (ROC). Program je bil zasnovan z namenom napovedovanja odmevnega časa pred in po akustični ureditvi ter določanje potrebne količine zvočno absorpcijskih površin v prostoru. V računu je upoštevana velikost prostora, materiali v prostoru, absorpcija zraka, relativna vlaga in temperatura, odmevni čas se izračuna po dveh enačbah: Sabinovi enačbi in Eyring-Norrisovi enačbi (enačbi (9) in (10)).

Izračun je znotraj programa ROC razdeljen na tri zavihke. Prvi opravlja funkcijo programskega vmesnika, v katerega se vnese dimenzije prostora, relativno vlago ter podatke o površinah v prostoru. Za določanje relativne vlažnosti zraka ter vrste materialov so izdelani izvlečni sezname z bazo podatkov v drugem zavihku, dimenzije prostora ter kvadratura posameznega materiala v prostoru se vpiše ročno. Pri izračunu volumna prostora se upošteva 10% redukcija zaradi zasedenosti prostora s pohištvom. Po izvedenem računu se v prvi zavihek izpišejo rezultati računa odmevnega časa v tabelarični in grafični obliki in se primerjajo z optimalnim odmevnim časom določenim za učilnice (enačba (19)).

V drugem zavihku so tabelarično zapisane knjižnice podatkov potrebnih za izračun:

- vrednosti konstante zvočne atenuacije v zraku m , pridobljene iz literature in podane v odvisnosti od relativne vlage in oktavnega pasu, pri konstantnem atmosferskem tlaku 10^{-3} m^{-1} in temperaturi 20°C [38],
- knjižnica 127 materialov s pripadajočimi absorpcijskimi koeficienti za oktavne pasove od 125 Hz do 4000 Hz, pridobljenimi iz literature in dodanimi izmerjenimi vrednostmi lastnega preizkusa [38],
- vrednosti relativne vlažnosti zraka v razponu 20% do 70%.

Tretji zavihek je namenjen izračunu odmevnega časa. Ker se vrednosti absorpcijskih koeficientov dobljene iz literature nanašajo na oktavne pasove od 125 Hz do 4000 Hz, poteka račun odmevnega časa v enakem frekvenčnem območju.

Iz prvega zavihka so pridobljeni podatki o volumnu prostora in površinah v prostoru, glede na izbrano vrsto materiala so iz knjižnice materialov v drugem zavihku pridobljene vrednosti koeficientov absorpcije po oktavnih pasovih. Ob upoštevanju izbrane relativne vlažnosti zraka so izbrane vrednosti konstante zvočne atenuacije zraka.

Za izračun odmevnega časa po Sabinovi enačbi (enačba (9)) je predhodno izračunana ekvivalentna absorpcijska površina prostora (enačba (12)) za vsak oktavni pas posebej in člen, ki upošteva zvočno absorpcijo zraka v prostoru: ($4mV$).

Za izračun odmevnega časa po Eyring-Norrisovi enačbi (enačba (10)) je potreben predhoden izračun srednjega koeficienta absorpcije vseh površin v prostoru (enačba (13)) za vsak oktavni pas. Člen, ki upošteva zvočno absorpcijo zraka v prostoru, je enak kot pri računu po Sabinovi enačbi.

Optimalen odmevni čas polno zasedene učilnice je izračunan po enačbi (19), glede na priporočila smernice TSG-1-005-2013.

Vrednost optimalnega odmevnega časa, srednji koeficient absorpcije ter končne vrednosti odmevnega časa v odvisnosti od oktavnega pasu ter postopka izračuna se izpišejo v prvem zavihku. Odmevni časi, izračunani po obeh formulah so prikazani s stolpičnimi grafi v odvisnosti od oktavnega pasu, optimalen odmevni čas se izriše linijsko in je konstanten čez vse oktavne pasove. Izpisana srednja vrednost koeficienta absorpcije vseh materialov v prostoru služi kot pomoč, saj pri visoki absorpciji materialov natančnost izračuna po Sabinovi enačbi pade. Primer izračuna odmevnega časa je prikazan v Prilogi A, knjižnica materialov z vrednostmi absorpcijskega koeficienta je v Prilogi B.

Čeprav program ROC deluje skladno z določili smernice [20], je med računsko analizo kmalu postalo očitno, da je kljub natančnim izmeram prostora in fotodokumentaciji materialov v prostoru pravilna napoved odmevnega časa relativno zahtevna. Za točen izračun odmevnega časa prostora je pomembno dobro poznavanje karakteristik prostora in materialov v njem. Pregled nabora materialov v bazi podatkov pokaže, da z manjšo spremembo (druga vrsta ometa, večslojna zasteklitev, vrsta poda ...) pri izbiri materiala močno vplivamo na akustične lastnosti prostora. Pri akustični analizi prostora so bile bistvenega pomena preliminarne meritve odmevnega časa prostora, saj smo ob upoštevanju izmerjenih vrednosti pravilno umerili računski model na stanje pred akustično ureditvijo. Na podlagi umerjenega računskega modela smo nato določili potrebno količino absorpcijskega materiala v prostoru. Napoved odmevnega časa le z uporabo računskega modela je sicer mogoča, vendar je za to potrebnih nekaj več specifičnih izkušenj in znanja.

Rezultati računske akustične analize s programom ROC so predstavljeni v poglavju 7.3.

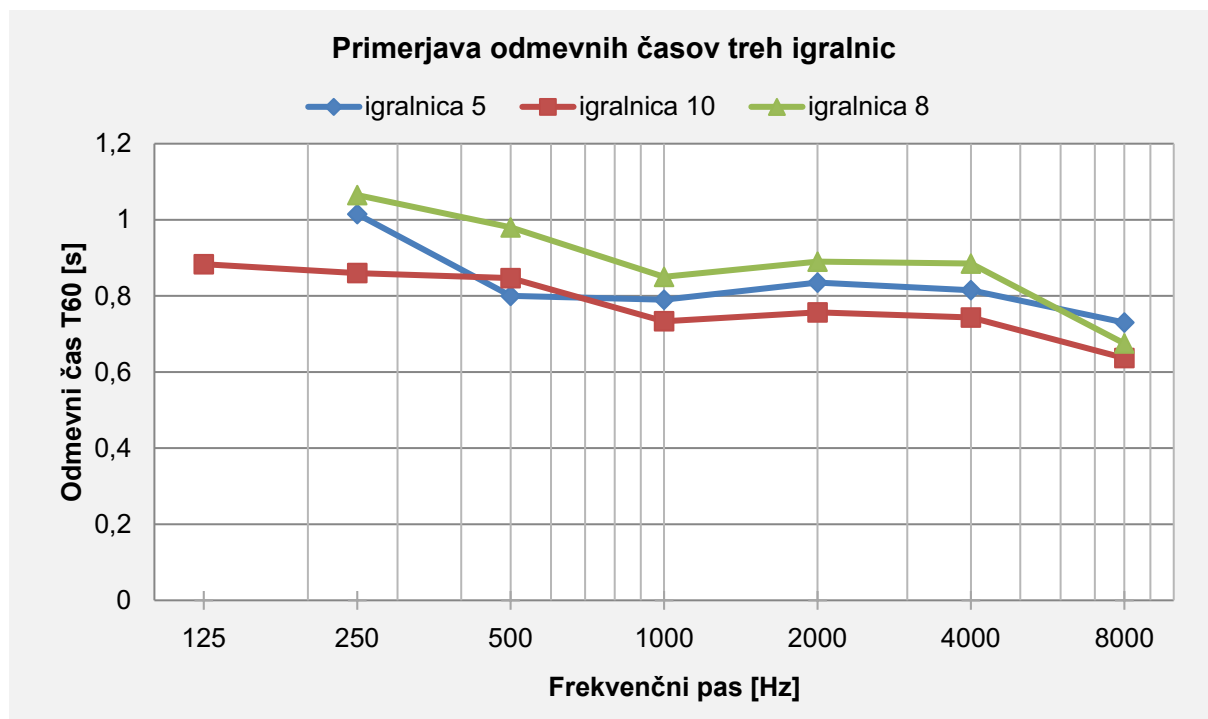
7 AKUSTIČNE MERITVE, IZRAČUNI IN UREDITEV

V poglavju sedem je v kronološkem zaporedju predstavljen potek praktičnega dela izvedenega v sklopu magistrskega dela. Najprej je bilo potrebno določiti prostor, v katerem bo izvedena akustična ureditev ter na podlagi preizkusa z impedančno cevjo določiti materiale za izdelavo zvočno absorpcijskih elementov (podpoglavji 7.1 in 7.2). Ob poznavanju karakteristik prostora in absorpcijskih lastnosti testiranih materialov smo določili potrebno količino absorpcijske površine v prostoru (podpoglavje 7.3) in izbrali najprimernejše sestave akustičnih elementov. Pet prototipnih tipov poroznih absorpcijskih elementov je predstavljenih v podpoglavju 7.4. Glavni del akustičnih meritev (meritve odmevnega časa in ekvivalentne ravni zvočnega tlaka) je bil izveden v enem popoldnevu v izbrani igralnici pred in po vnosu zvočno absorpcijskih elementov v prostor. Potek meritev in analiza rezultatov sta predstavljeni v podpoglavjih 7.5 in 7.6.

7.1 Izbira prostora za akustično ureditev

Izbira primerne prostora za akustično ureditev je potekala na podlagi preliminarne meritve odmevnega časa izvedene v skladu z raziskovalno metodo merilne natančnosti po standardu ISO 33882 ob generiranju zvoka po metodi prekinjenega hrupa. Poleg rezultatov meritve je na izbiro igralnice vplivalo mnenje uporabnic prostorov.

Izmerjeni so bili odmevni časi treh prostorov v Vrtcu Pod Gradom, enota Praprotnikova 2. Obravnavani prostori so bili izbrani na podlagi mnenja uporabnikov prostorov [40], da so le-ti akustično problematični. Rezultati meritev so grafično predstavljeni na grafikonu 1, vrednosti odmevnih časov so zapisane v preglednici 6.



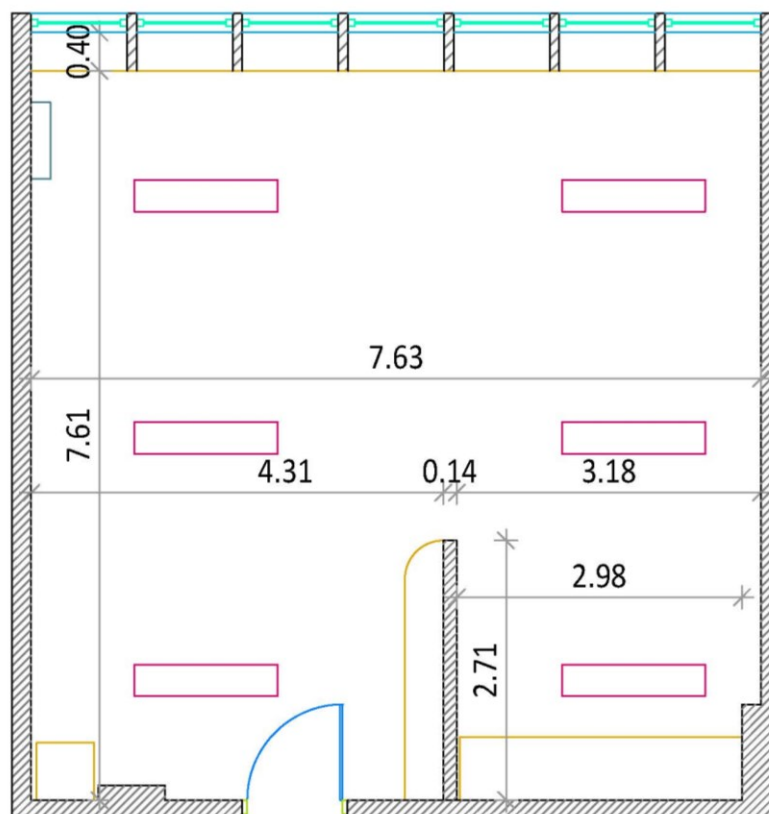
Grafikon 1: Primerjava odmevnih časov treh igralnic pred akustično ureditvijo (6.6.2017).

Preglednica 6: Vrednosti odmevnega časa v treh igralnicah Vrtca Pod Gradom pred akustično ureditvijo (6.6.2017).

Odmevni čas [s]	Frekvenčni pas [Hz]						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
igralnica 5	/	1,02	0,80	0,79	0,84	0,82	0,73
igralnica 8	/	1,07	0,98	0,85	0,89	0,89	0,68
igralnica 10	0,88	0,86	0,85	0,73	0,76	0,74	0,64

Uporabnice prostorov vrtca so za igralnico z najslabšo akustično klimo izbrale igralnico 8, kar potrjujejo rezultati meritev odmevnega časa, ki je v njej najdaljši. Igralnica 8 je tudi najmanj primerne oblike v akustičnem smislu, saj ima zelo visok strop in veliko praznih površin. Izvedena je bila meritev dimenzij prostora in fotografsko dokumentiranje materialov v prostoru za nadaljnjo akustično analizo.

Na sliki 30 je prikazan tloris igralnice, ki je skoraj kvadratne oblike, z 2,7 m dolgo predelno steno, katera delno razpolavlja prostor. Prostornina prostora znaša 216 m³, oziroma 194,4 m³ ob upoštevanju 10% zasedenosti prostora s pohištvom in opremo. Ena od sten je zastekljena s tankimi rolo zavesami. Strop je v naklonu od 3,88 m pri steni z vrati do 3,55 m pri steni z okni. Stene so do 1,35 m obložene z leseno oblogo, v prostoru je več miz, stolov in manjših omaric. Zelo malo je mehkih materialov, ki bi lahko delovali kot zvočni absorberji. Stene nad leseno oblogo in strop so prazni. Na stropu je nameščenih šest linijskih luči. V skico prostora so vrisani nepremični elementi in sicer luči, nekatere omare in klima.



Slika 30: Skica tlorisa igralnice 8 z vrisano stalno opremo in lučmi. Dimenzije so v metrih.

7.2 Določitev materialov

Materiali, uporabljeni za izdelavo absorberjev zvoka so bili izbrani z upoštevanjem naslednjih parametrov:

- absorpcijskega koeficienta α ,
- zdravstveno higienskih zahtev vrtca,
- zahtev s področja gradbenih proizvodov,
- zanimivosti za uporabnika,
- možnosti uporabe materiala v kreativne namene,
- dostopnosti in
- cene.

Zgornji parametri služijo kot vodilo za izdelavo prototipnih akustičnih elementov in so bili v največji možni meri upoštevani glede na specifične te faze in omejitve magistrskega dela. Na podlagi navedenih parametrov smo se odločili za izdelavo poroznih zvočnih absorberjev iz filca ter kamene volne ob vzporedni uporabi drugih materialov za namen zaščite in nosilnosti. Uporabljena materiala sta uveljavljena absorberja zvoka, katera se primarno uporabljata v druge namene oziroma se kot akustična elementa pojavljata v drugačni obliki.

Tekom magistrskega dela smo analizirali predvsem akustične lastnosti materialov ob upoštevanju tudi ostalih parametrov. Končna rešitev, ki upošteva vse zastavljene kriterije, je predlagana v zaključkih naloge (poglavje 9.4).

7.2.1 Filc

Pri izbiri materialov je bila osnovna ideja na cenovno ugoden in kreativen način umestiti v prostor zadovoljivo količino absorpcijskih materialov. Ob upoštevanju omenjenih parametrov je bil kot testni material izbran filc, saj je cenovno ugoden, mehek in prijeten na otip, enostavno se reže, oblikuje in barva, zaradi njegove porozne strukture se tudi pričakuje, da je učinkovit absorber zvoka.

Filc spada med tekstilne materiale. Izdelan je z mehanično ali termično obdelavo naravnih ali umetnih vlaken in ima širok spekter uporabe. Med drugim je zastopan v gradbeni, avtomobilski, pohištveni in modni industriji, uporablja pa se tudi kot akustična obloga.

Glede na zastavljene kriterije smo uporabili filce slovenskega proizvajalca Filc d.d., ki so izdelani iz termično obdelanih sintetičnih vlaken ter so namenjeni uporabi v avtomobilski industriji. Zaradi lokalne industrije so enostavno dostopni, dobavljivi v različnih debelinah, sestavah in barvah. Cena primernih izdelkov je predvidoma manjša od 2,00 €/m². Njihova kemična sestava se lahko spreminja, zato je potrebno kemične lastnosti vsakega materiala preveriti.

7.2.1.1 Absorpcijske lastnosti

Ker filc še ni uveljavljen material na področju prostorske akustike in so podatki o njegovih absorpcijskih lastnostih težko dosegljivi ter za naše potrebe pomanjkljivi, smo se odločili za izvedbo preizkusa z impedančno cevjo, da pridobimo osnovne podatke o vplivu sestave, debeline in drugih karakteristik na absorpcijske lastnosti materiala.

Preizkus absorpcijskih lastnosti je potekal v impedančni cevi v skladu s standardom ISO 10534-2. Testirani so bili filci različnih debelin, od 1,2 mm do 25 mm, z različnimi sestavami in gostotami ter nekateri drugi materiali, kot je prikazano v preglednici 7.

Preglednica 7: Testirani materiali v sklopu preizkusa z impedančno cevjo.

Oznaka materiala	Vrsta materiala	Naziv materiala	Debelina	Sestava	Površinska gostota
F1	filc	FILSOL C3570 600 20	20 mm	PES*	600 g/m ²
F2	filc	FILSOL C5070 700 15	15 mm	PES/OPAN*	700 g/m ²
F3	filc	FILSOL C16570 500 20	20 mm	PES*	500 g/m ²
F4	filc	FILSOL S15278 450 15	15 mm	PES/PO*	450 g/m ²
F5	filc	SOUNDCONTROL C5481 200	2 mm	PES/PE/sintetična guma*	200 g/m ²
F6	filc	POLITLAK C1211 1200	8 mm	/	/
FB1	barvni filc	Filc d.d. - moder	1.2 mm	/	/
B	brisača	Svilanit 154505-1 ORKUS 32E	3 mm cca.	100% bombaž	500 gr
P	papir	Plastificiran, naslovnica revije	<1 mm	/	/
PE	pena	pena - Moos gumi A4 pola	2 mm	/	/

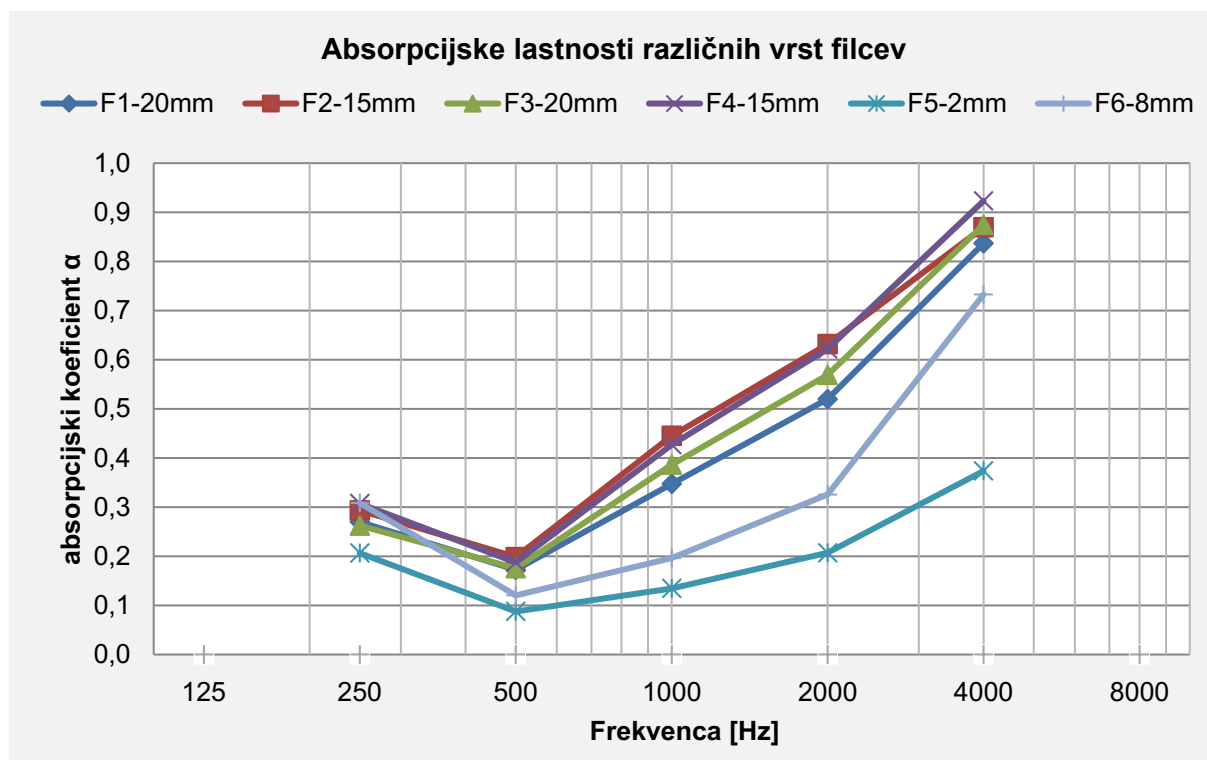
*poliester (PES), poliolefini (PO), polietilen (PE), oksidiran poliakrilonitril (OPAN)

Materiali so bili testirani posamično ter v več plasteh in v kombinaciji z drugimi materiali. Izvedenih je bilo 17 meritev absorpcijskega koeficienta na vzorcih iz preglednice 8.

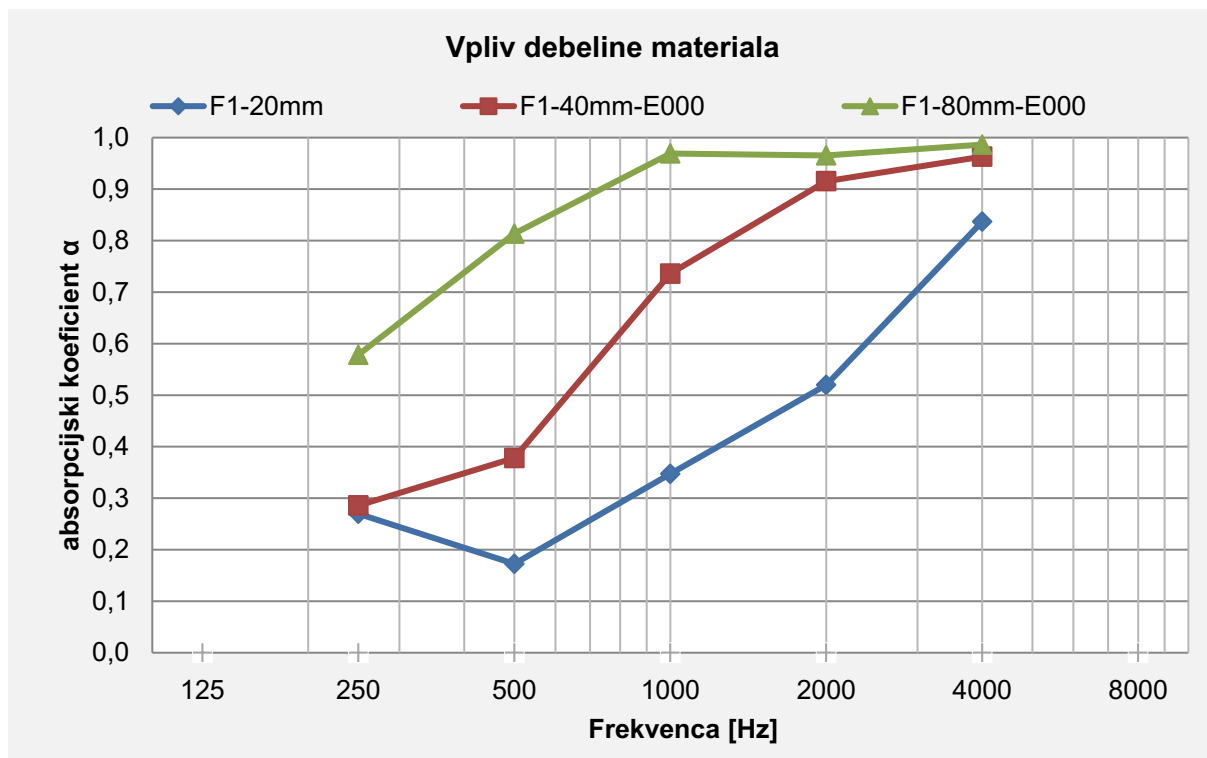
Preglednica 8: Testirani vzorci, njihova končna sestava, debelina in odmik od toge podlage.

Naziv vzorca	Št. plasti	Sestavni materiali	Skupna debelina vzorca [mm]	Postavitev (ravnina x_0/x_0')	Zračni prostor za vzorcem [mm]
F1-20mm	1	F1	20	x_0	0
F2-15mm	1	F2	15	x_0	0
F3-20mm	1	F3	20	x_0	0
F4-15mm	1	F4	15	x_0	0
F5-2mm	1	F5	2	x_0	0
F6-8mm	1	F6	8	x_0	0
F1-40mm-E000	2	F1	40	x_0	0
F1-80mm-E000	4	F1	80	x_0	0
F1-20mm-E200	1	F1	20	x_0'	180
F1-40mm-E200	2	F1	40	x_0'	160
F1-80mm-E200	4	F1	80	x_0'	120
F1-80mm-E200 + FB1	4+1	F1, FB1	81	x_0'	119
F1-80mm-E200+B	4+1	F1, B	83	x_0'	117
F1-80mm-E200+PE	4+1	F1, PE	82	x_0'	118
F1-80mm-E200 + P	4+1	F1, P	80	x_0'	120
F2-60mm-E000	4	F2	60	x_0	0
F2-60mm-E000 + P	4+1	F2, P	60	x_0	0

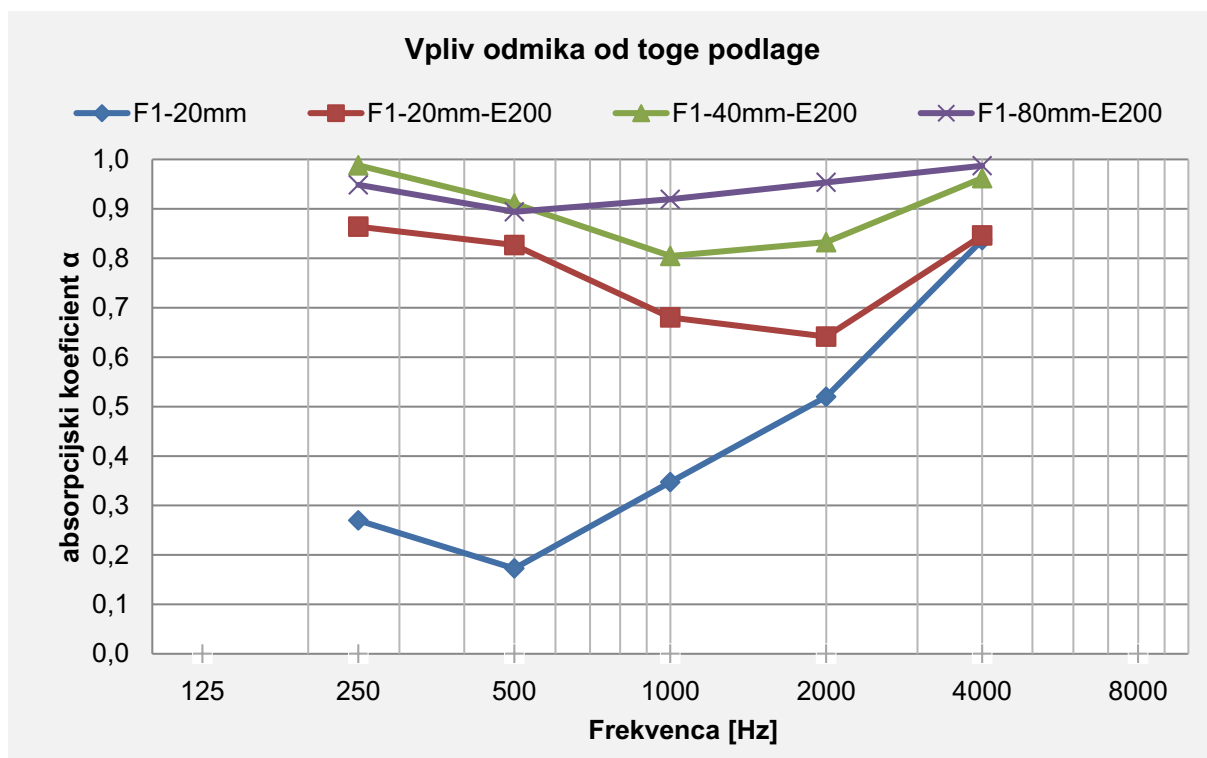
Rezultati meritev absorpcijskega koeficienta so povprečeni znotraj oktavnih pasov in grafično prikazani na grafikonih 2, 3, 4 in 5.



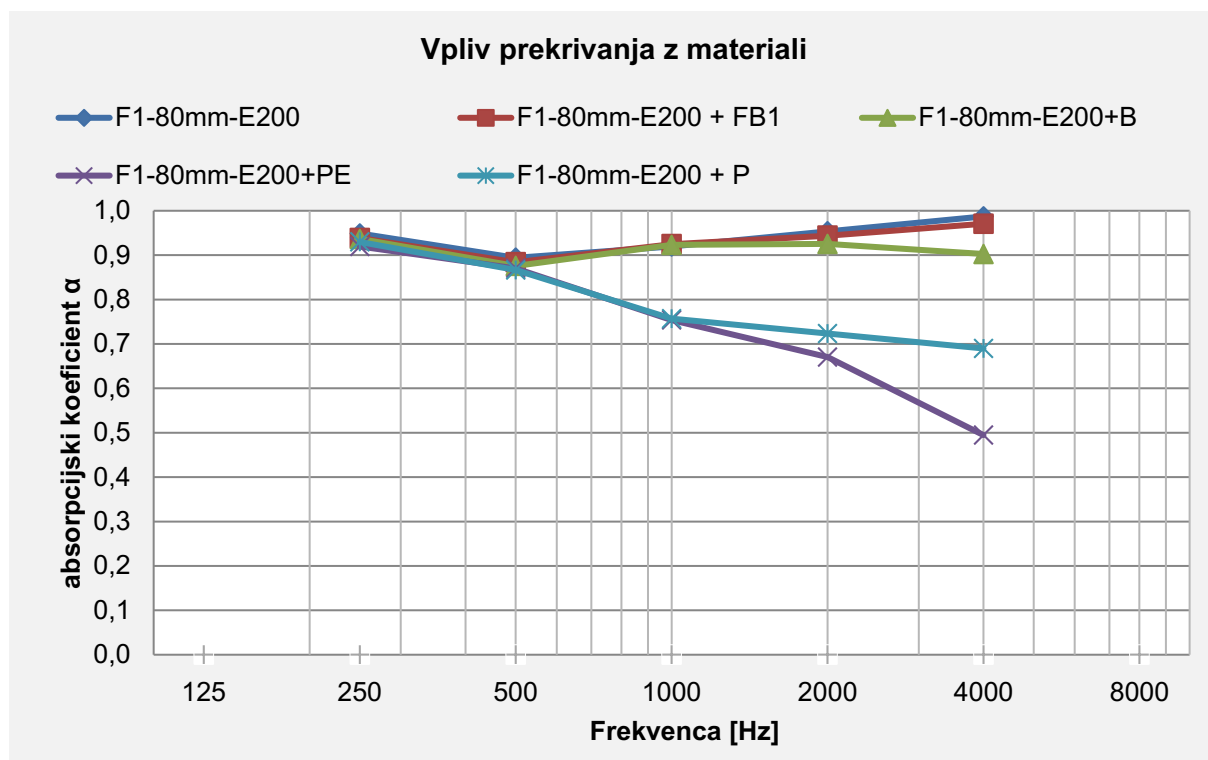
Grafikon 2: Primerjava absorpcijskih koeficientov različnih vrst filca pokaže, da je edini relevanten faktor pri izboljšanju absorpcijskih lastnosti debelina materiala.



Grafikon 3: Vpliv debeline filca na absorpcijski koeficient: S povečevanjem debeline vzorca iz 20 mm na 80 mm se izrazito poveča zvočna absorpcija materiala tudi pri nižjih frekvencah.



Grafikon 4: Vpliv odmika filca od toge podlage na absorpcijski koeficient pokaže, da se z odkikom poveča učinkovito absorpcijsko območje tudi na nižje frekvence.



Grafikon 5: Prekrivanje filca z drugimi materiali: V primeru, da se filc prekrije z neporoznim materialom kot je papir, se zvočna absorpcija visokih frekvenc zmanjša.

Ugotovitve analize rezultatov meritev absorpcijskega koeficienta:

- V splošnem filc dosega visoke koeficiente zvočne absorpcije,
- Plast 20 mm filca dosega dobro zvočno absorpcijo le pri visokih frekvencah,
- Filci primerljive debeline imajo zelo podobne absorpcijske lastnosti,
- Z večjo debelino se izboljša absorpcijska sposobnost filca ter poveča učinkovito frekvenčno območje,
- Z 20 cm odmikom od stene se učinkovito frekvenčno območje razširi na vse oktavne pasove (od 250 Hz do 4000 Hz),
- Pri prekrivanju filca s poroznim materiali se absorpcija filca ne poslabša,
- Pri prekrivanju filca z neporoznimi materiali se absorpcijski koeficient višjih oktavnih pasov zmanjša, absorpcijski koeficient nižjih oktavnih pasov (250 Hz in 500 Hz) ostane nespremenjen.

Glede absorpcijskih lastnosti je izbira vrste filca praktično nepomembna, kar je osrednja ugotovitev meritve. Pri tem pa je potrebno zagotoviti dovolj veliko debelino (postavitev v več slojih) ali ustrezen odmik od toge podlage. Izbira filca za namen magistrskega dela je bila tako pogojena predvsem z razpoložljivostjo, zanimivostjo za uporabnika ter varnostjo.

Izbran material (FINSOL H3270 500-25) ni bil v naboru testiranih vzorcev, vendar lahko na podlagi opravljenih preizkusov sklepamo, da je akustično ustrezen. Osnovne lastnosti materiala so opisane v Preglednici 9, tehnični list pa je priložen v Prilogi D.

Preglednica 9: Izbran material – filc.

Naziv materiala	Debelina	Sestava	Površinska gostota	Barva	Toplotna odpornost
FILSOL H3270 500 25	25 mm	PES	500 g/m ²	bela	toplotno odporen

7.2.1.2 Drugi kriteriji

Sestava izbranega filca je 100% poliester, kot je navedeno v tehničnem listu materiala (Priloga D). Ob normalni uporabi se ne razsloji, pri pranju na visoki temperaturi se nekoliko skrči (približno 5%), vendar ohrani obliko. Izbran filc je bele barve in ga je možno pobarvati, toda potrebno je upoštevati, da lahko barvni nanos zmanjša absorpcijski koeficient, zato je smiselno barve razredčiti. Je mehek in lahek material, enostavno se reže, zvija in oblikuje. Kljub temu da je material predvidoma pralen, je v primeru pogostega pranja možna deformacija oblike, zato je iz higienskega vidika material smiselno prekriti z drugim poroznim materialom (kot je na primer blago), katerega se pere pogosteje.

Zaradi osnovnega namena uporabe je material testiran v skladu s standardi avtomobilske industrije. V kolikor se material stalno namesti v prostor v obliki stenske ali stropne obloge, je potrebno njegove lastnosti testirati v skladu z Zakonom o gradbenih proizvodih [45] in Uredbo 305/2011 [46]. Material je v tem primeru potrebno testirati glede na njegovo mehansko odpornost, požarno varnost, higieno in vpliv na okolje, varnost pri uporabi in ostale zakonsko določene zahteve [46].

7.2.2 Kamena volna

Kamena volna je razširjen gradbeni material, ki se prvovrstno uporablja v gradbeni industriji kot toplotna in zvočna izolacija. Uvrščamo jo med vlaknene materiale, saj nastane s taljenjem kamnin in oblikovanjem tankih vlaken.

Zvočno absorpcijske sposobnosti kamene volne so dobro poznane, zato preizkus v impedančni cevi ni bil potreben. Tehnični list (Priloga E) izbrane kamene volne navaja zvočno absorpcijski koeficient $\alpha_w = 1,0$. Vrsta kamene volne je bila tako izbrana na podlagi drugih lastnosti, kot je debelina, dimenzijska obstojnost, požarna varnost in cena.

Kamena volna ima možen vpliv na zdravje, ki je odvisen od doze, časa izpostavljenosti, načina uporabe, vrste, individualnih značilnosti itd. V varnostnem listu materiala [53] je navedeno, da je priporočena uporaba zaščitne opreme pri rokovanju z materialom. Ob stiku s kameno volno se lahko pojavi začasno srbenje, pri prenašanju, rezanju ali drobljenju materiala pa se pojavijo emisije prahu, ki dražijo dihalo. V primeru ustrezne zaščite in predpisane uporabe je tveganje zmanjšano in se material redno uporablja v gradbeništvu v več oblikah. [53]

Kamena volna tako ni primerna za stik z otroci, zato smo za potrebe magistrskega material ovili v primerno zaščitno plast, ki preprečuje direkten kontakt in prašenje. Pri tem smo upoštevali, da zaščitna plast vpliva na absorpcijske lastnosti materiala in na podlagi rezultatov

meritev prikazanih v grafikonu 5 ocenili, da se bo absorpcijski koeficient pri visokih frekvencah zmanjšal ob prekritju z lahkim in tankim slojem materiala.

Izbrana vrsta kamene volne je Knauf insulation DP-5, ki se uporablja za zunanje ali notranje toplotnoizolacijske obloge sten, streh in stropov. Je visoko požarno odporna (razred A1), odporna na mikroorganizme in vodoodbojna. Izdelana je v obliki plošč dimenzije 625 x 1000 mm debeline 50 mm. Testirana je v skladu s potrebnimi standardi ob upoštevanju Zakona o gradbenih proizvodih in ima CE certifikat. Osnovne lastnosti materiala so opisane v preglednici 10.

Preglednica 10: Izbran material – kamena volna.

Naziv materiala	Debelina	Sestava	Gostota	Barva	Požarni razred	Upornost zračnemu toku
Knauf insulation DP-5	50 mm	kamena volna	70 kg/m ³	rjava	A1	>10 kNs/m ⁴

Cene kamene volne nihajo glede na dimenzijske in mehanske lastnosti, ob upoštevanju akustičnih lastnosti je cena primernega izdelka od 3,00 €/m² dalje.

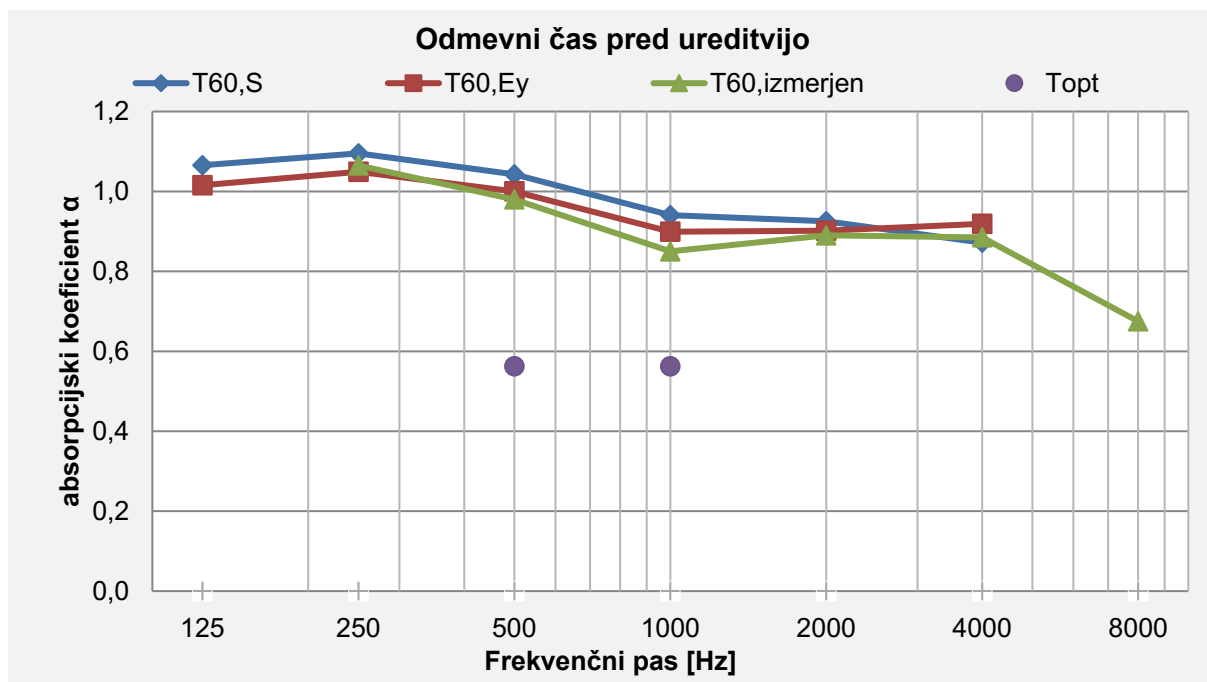
V primerjavi s filcem je kamena volna manj zanimiva s kreativno-izobraževalnega vidika, saj ni primerna za stik z otroci, vendar je nekoliko bolj primerna s gradbenega vidika, saj se v različnih oblikah pojavlja na trgu kot gradbeni proizvod.

7.3 Določitev potrebne količine absorpcijskega materiala

Količino potrebnega absorpcijskega materiala smo določili s pomočjo računskega modela izdelanega v lastnem programu ROC. Računski model je bil v prvem koraku kalibriran na podlagi preliminarne meritve odmevnega časa tako, da so bili poiskani čim bolj akustično primerljivi materiali iz baze podatkov. Primerjava računsko določenih in izmerjenih vrednosti odmevnega časa akustično neobdelane igralnice je predstavljena na grafikonu 6, vrednosti odmevnih časov po oktavni pasovih pa so zapisane v preglednici 11.

Preglednica 11: Računsko določene vrednosti in vrednosti preliminarne meritve odmevnega časa.

Odmevni čas [s]	Frekvenčni pasovi [Hz]						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T _{60,S}	1.07	1.10	1.04	0.94	0.93	0.87	/
T _{60,Ey}	1.02	1.05	1.00	0.90	0.90	0.92	/
T _{60,izmerjen}	/	1.07	0.98	0.85	0.89	0.89	0.68

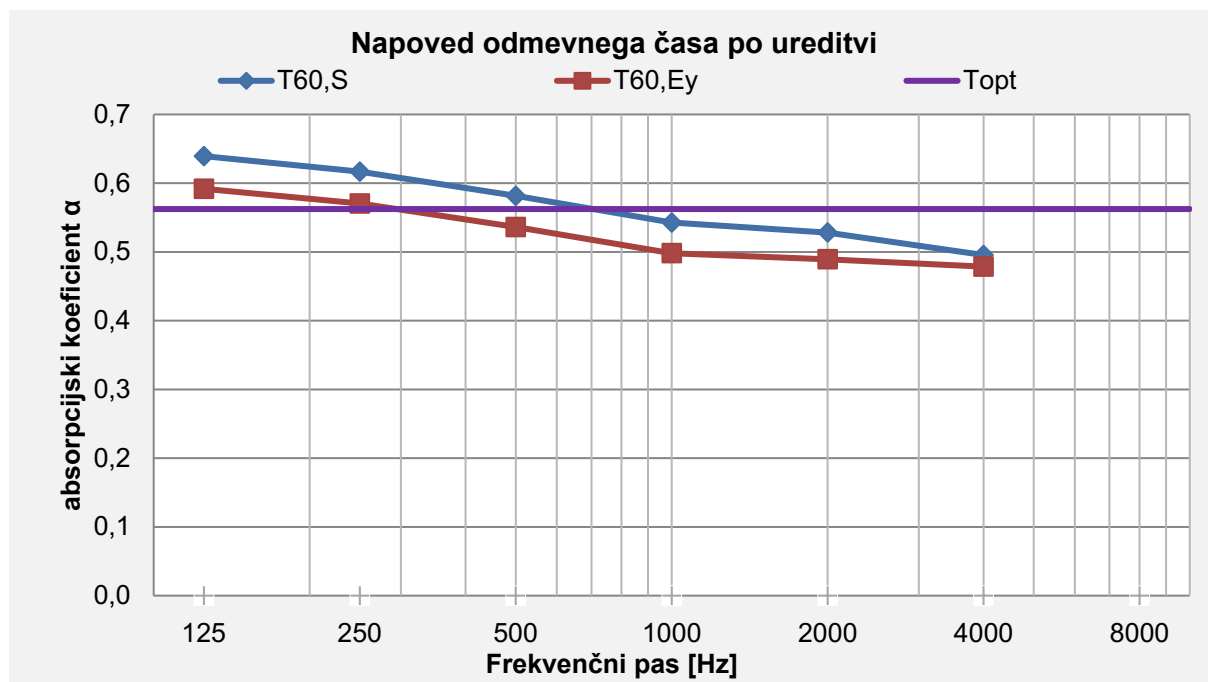


Grafikon 6: Primerjava informativno izmerjenega odmevnega časa z računsko določenimi vrednostmi po kalibraciji modela.

Na podlagi umerjenega računskega modela je bila izvedena napoved potrebne absorpcijske površine v prostoru.

Za ciljno vrednost odmevnega časa je bil izbran optimalni odmevni čas priporočen za učilnice po tehnični smernici TSG-1-005:2012. V knjižnico materialov so vključeni tudi testirani vzorci filca s pripadajočimi absorpcijskimi koeficienti, na podlagi katerih je bila določena potrebna absorpcijska površina. Predpostavljen je bil različen razpored absorberjev po prostoru z različnimi debelinami absorpcijskega materiala in različnimi odmiki od podlage.

Zaradi poroznega tipa absorpcijskega materiala je doseganje visoke absorpcije pri nizkih frekvencah zelo zahtevno, saj bi potrebovali filc večjih debelin oziroma vnos večje količine absorpcijskega materiala v prostor, kar je nepraktično in moteče v prostoru. Zato smo se v sklopu analize odločili, da prvotno zmanjšujemo odmevni čas v frekvenčnem območju otroškega govora, ki je med 500 Hz in 4000 Hz. Računska napoved odmevnega časa po akustični ureditvi, pri kateri je potrebno v prostor vnesti 24,75 m² absorberjev, je prikazana na grafikonu 7. Upoštewane debeline in odmiki materiala so zapisani v preglednici 12.



Grafikon 7: Računska napoved odmevnega časa po akustični ureditvi. Z izjemo najnižjih dveh obravnavanih oktavnih pasov je razvidno, da bo ciljna vrednost odmevnega časa dosežena.

Preglednica 12: Upoštewane vrste absorpcijskih elementov in pripadajoča površina.

Vrsta materiala	Površina	Pozicija absorberja
Filc- 4cm na 20cm odmika	5.00 m ²	stenski elementi
Kamena volna	6.25 m ²	stropni elementi
Filc- 8cm na 0cm odmika	2.00 m ²	talni elementi
Filc- 4cm na 20cm odmika	7.50 m ²	začasni elementi
Filc- 4cm na 0cm odmika	4.00 m ²	začasni elementi
skupaj:	24.75 m ²	

Debelina in odmik od stene sta določeni ob upoštevanju predvidene pozicije elementov.

7.4 Sestava zvočno absorpcijskih elementov

Za doseganje zadovoljive absorpcijske površine in razporeditve absorberjev po prostoru se akustični elementi delijo v 5 skupin, ki se razlikujejo glede na pozicijo in sestavo. Večina elementov je izvedena v beli barvi in jih uporabniki lahko prilagodijo, pobarvajo ali okrasijo po lastnih željah.

Vsi elementi izdelani v sklopu magistrskega dela so prototipni in jih je pred stalno namestitvijo v prostor potrebno preveriti v skladu z vsemi zakonsko določenimi standardi na podlagi gradbenih proizvodov in ostalo zakonodajo, ki obravnava prostore vzgojno varstvenih ustanov.

7.4.1 Stropni elementi

Stropni »V« elementi so izdelani iz 5 cm debelih plošč kamene volne zaviti v papir. Izdelanih je 5 elementov, vsak je sestavljen iz dveh plošč in obešen na strop ob uporabi vijakov, lesenih letev in fasadne mrežice. Vsak element ima absorpcijsko površino $1,25 \text{ m}^2$, povprečen odmik absorberjev od stropa je 19 cm.

Pomembna je zaščita kamene volne, zato je pri namestitvi potrebno paziti, da ne pride do poškodbe papirja. Elementi so snemljivi, možno jih je očistiti in zamenjati papir. Papir se pred namestitvijo okoli kamene volne lahko pobarva ali poriše. Slika 31 prikazuje stropni »V« element ob namestitvi.



Slika 31: Stropni »V« absorpcijski element.

7.4.2 Stenski elementi

Za izvedbo akustičnih meritev so izdelani trije stenski elementi: dva dimenzij $1,5 \text{ m} \times 1,0 \text{ m}$ in eden dimenzij $2,0 \text{ m} \times 1,0 \text{ m}$. Vsi trije elementi so izdelani iz dveh plasti filca, ki sta pritrjeni na leseno letev ter z vijaki pritrjeni v strop ob steni. Elementi so pritrjeni na odmiku 20 cm od stene. Stenski element je prikazan na sliki 32.



Slika 32: Stenski absorpcijski element.

Stenski element je predvidoma snemljiv, mogoče ga je pobarvati ali obleči v propusten material in tako preprečiti prašenje osnovnega materiala - filca.

7.4.3 Talni elementi

Talna elementa sta izdelana iz štirih plasti filca dimenzij 1,0 m × 1,0 m in sta v celoti oblečena v blago. Elementa sta mehka in gibljiva. Predvidevamo, da sta primerna za kontakt z otroci ter pralna. V času izvajanja meritev sta bila položena na obstoječe talne blazine vendar nista pritrjena, zato je možno njihovo pozicijo spreminjati. Slika 33 prikazuje postavitev talnih elementov v prostoru.



Slika 33: Talni absorpcijski element (dva pisano zelena kvadrata ob steni).

7.4.4 Začasni stenski element

Začasni stenski element je izdelan iz 12 m dolgega in 0,5 m širokega pasu filca. Razrezan je na tri dele, spleten v kito in pobarvan z razredčenimi akrilnimi barvami. Namenjen je obešanju ob steni, njegova debelina pa se zaradi prepletanja spreminja. Ker ni trdno pritrjen na steno se spreminja tudi odmik od stene. Povprečen odmik je ocenjen na 20 cm. Dolžina izdelane kite je približno 9 m.

7.4.5 Začasni prostorski elementi izdelani v vrtcu

Del začasnih absorberjev so izdelali v vrtcu. Iz 7,5 m² filca so izdelali enoslojne oblake, ki so bili med meritvijo obešeni ob stenah ter po prostoru. Pozicije začasnih absorberjev so vidne na sliki 34.



Slika 34: Začasni absorpcijski elementi umeščeni v prostor.

7.5 Potek meritev odmevnega časa in ekvivalentne ravni zvočnega tlaka

Meritve so bile izvedene 17.6.2017 v popoldanskem času, ko je bila igralnica prazna. Izvajale so se meritve ravni hrupa ozadja in ravni generiranega hrupa na eni poziciji (S1-M2) ter meritve odmevnega časa na več pozicijah. Predhodno se je določilo in označilo merilna mesta in preverilo delovanje merilne opreme.

Meritve so potekale v štirih fazah:

Pred ureditvijo: Meritve pred akustično ureditvijo

1. faza ureditve: Meritve po montaži stropnih absorpcijskih elementov (6,25 m²)

2. faza ureditve: Meritve po montaži stropnih in stenskih absorpcijskih elementov (6,25 m² + 3,50 m²)

3. faza ureditve: Meritve po vnosu vseh absorpcijskih elementov (19,85 m²)

V 1. In 2. fazi ureditve so bile izvedene le informativne meritve odmevnega časa in sicer pri eni merilni kombinaciji (S1-M2).

Končno površino zvočno absorpcijskih elementov v prostoru smo ocenili na 19,85 m² (Preglednica 13), kar je približno 20% manj od predvidene vrednosti (Preglednica 12). V prostor sta bila vnesena le dva stenska elementa (3,5 m²), površina začasnih absorpcijskih elementov pa je bila nekoliko manjša od predvidene. Zaradi nekonvencionalnih oblik elementov (oblaki, kita) je njihova površina ocenjena na 4,5 m² in 3,6 m². Površine stropnih in talnih absorberjev zvoka so ostale nespremenjene. Izgled igralnice 8 po akustični ureditvi je prikazan na sliki 35.

Preglednica 13: Vrste in površine zvočno absorpcijskih elementov v realnem okolju.

Vrsta materiala	Površina
stenski elementi	3.50 m ²
stropni elementi	6.25 m ²
talni elementi	2.00 m ²
začasni elementi	4.50 m ²
začasni elementi	3.60 m ²
skupaj:	19.85 m ²



Slika 35: Igralnica 8 po namestitvi zvočno absorpcijskih elementov.

7.6 Analiza rezultatov

Rezultati meritev odmevnega časa pred in po akustični ureditvi so povprečeni v skladu s standardom ISO 3382-2. Za vsak terčni pas je nato izračunana merilna negotovost po enačbi (20). Za namen primerjave rezultatov je izračunan povprečni odmevni čas nizkih (100 Hz – 315 Hz), srednjih (400 Hz – 2500 Hz) in visokih (3150 Hz – 10000 Hz) frekvenčnih pasov. Rezultati vmesnih meritev, ki so bile izvedene le pri eni merilni kombinaciji (S1-M2) so primerjani z izmerjenimi vrednostmi pred in po akustični ureditvi pri isti kombinaciji. Analizirane so tudi vrednosti ekvivalentne ravni hrupa ozadja in generiranega hrupa. Izmerjene vrednosti so primerjane z računsko določenimi ter s priporočili tehnične smernice [20].

7.6.1 Odmevni čas pred in po akustični ureditvi

Iz primerjave odmevnih časov pred in po akustični ureditvi (Grafikon 8) je razvidno, da je odmevni čas po akustični ureditvi bistveno krajši. Najbolj izrazito se zmanjšajo vrednosti terčnih pasov od 200 Hz do 5000 Hz, kjer je upad odmevnega časa večji od 35%, pri treh najnižjih in najvišjih terčnih pasovih pa je upad manjši (Preglednica 14). Največja izboljšava odmevnega časa je v terčnem pasu 650 Hz in sicer za 48,2%, najmanjše izboljšanje pa zasledimo pri terčnem pasu 160 Hz – 14,5%. V povprečju ocenimo, da odmevni čas pade za več kot tretjino. Iz primerjave povprečnih odmevnih časov nizkih, srednjih in visokih frekvenc (Preglednica 15) je očiten največji upad pri srednjem frekvenčnem območju in sicer za skoraj

44%. Razlika med odmevnima časoma pred in po akustični ureditvi je predstavljena na grafikonu 9.

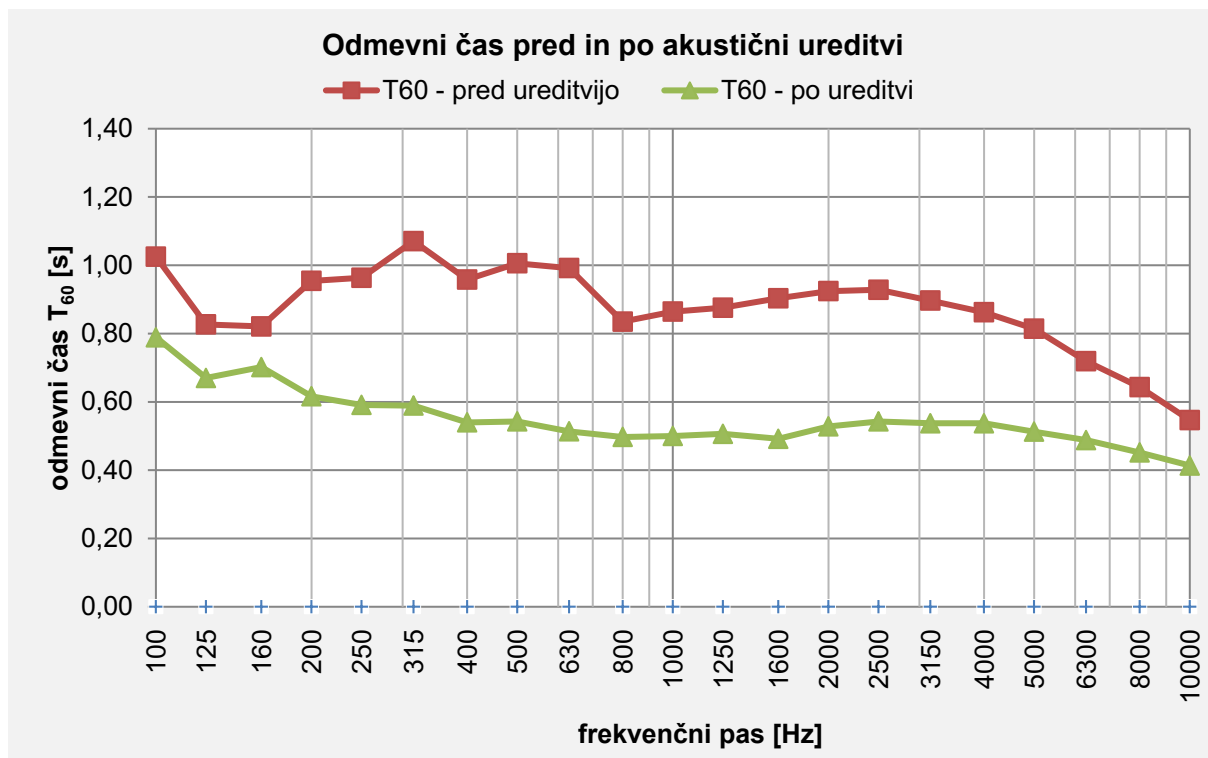
Odmevni časi so po akustični ureditvi igralnice bolj enakomerni po terčnih pasovih v primerjavi z rezultati pred ureditvijo, ko so bile vrednosti odmevnega časa bolj razgibane.

Preglednica 14: Vrednosti odmevnega časa pred in po akustični ureditvi in medsebojna primerjava (17.6.2017).

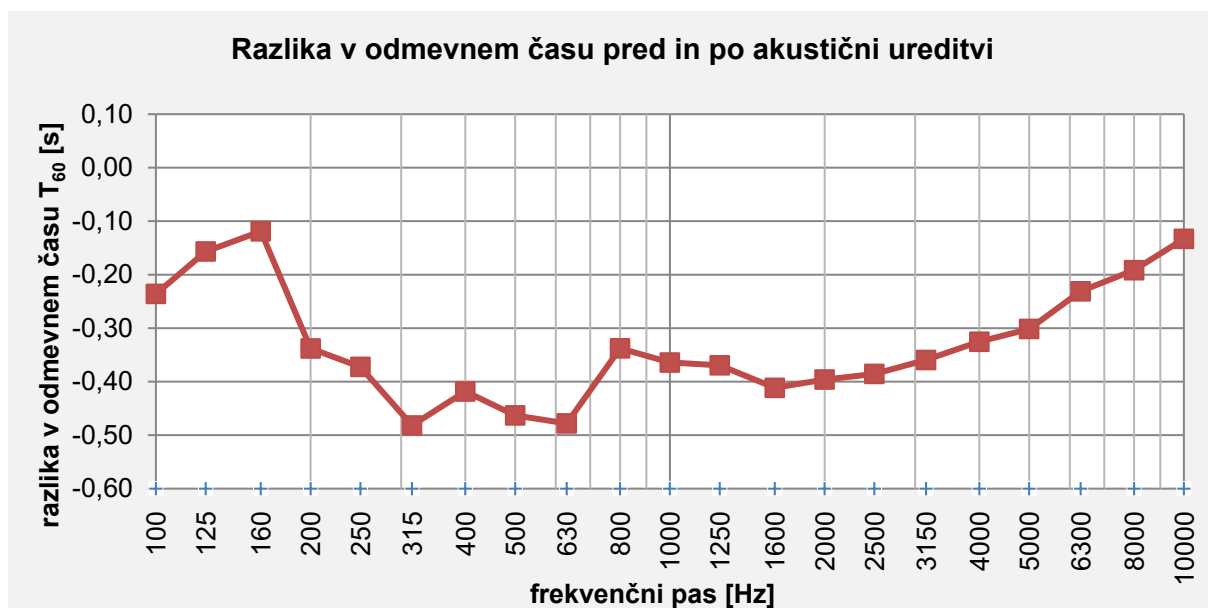
Terčni pas [Hz]	Pred akustično ureditvijo		Po akustični ureditvi		Padec odmevnega časa		
	Odmevni čas [s]	Merilna negotovost	Odmevni čas [s]	Merilna negotovost	[s]	%	
100	1.03	4.42 %	0.79	3.88 %	0.24	23.0	%
125	0.83	3.55 %	0.67	3.19 %	0.16	19.0	%
160	0.82	3.13 %	0.70	2.89 %	0.12	14.5	%
200	0.95	3.01 %	0.62	2.42 %	0.34	35.4	%
250	0.96	2.71 %	0.59	2.12 %	0.37	38.7	%
315	1.07	2.54 %	0.59	1.89 %	0.48	45.0	%
400	0.96	2.14 %	0.54	1.60 %	0.42	43.7	%
500	1.01	1.96 %	0.54	1.44 %	0.46	46.0	%
630	0.99	1.73 %	0.51	1.25 %	0.48	48.2	%
800	0.84	1.41 %	0.50	1.09 %	0.34	40.4	%
1000	0.86	1.28 %	0.50	0.98 %	0.36	42.1	%
1250	0.88	1.15 %	0.51	0.88 %	0.37	42.2	%
1600	0.90	1.04 %	0.49	0.76 %	0.41	45.6	%
2000	0.92	0.94 %	0.53	0.71 %	0.40	42.8	%
2500	0.93	0.84 %	0.54	0.64 %	0.39	41.5	%
3150	0.90	0.74 %	0.54	0.57 %	0.36	40.1	%
4000	0.86	0.64 %	0.54	0.51 %	0.33	37.7	%
5000	0.81	0.56 %	0.51	0.44 %	0.30	37.0	%
6300	0.72	0.47 %	0.49	0.38 %	0.23	32.1	%
8000	0.64	0.39 %	0.45	0.33 %	0.19	29.8	%
10000	0.55	0.32 %	0.41	0.28 %	0.13	24.3	%

Preglednica 15: Primerjava povprečnih odmevnih časov različnih frekvenčnih pasov pokaže najbolj izrazit padec na območju srednjih frekvenc.

Frekvenčno območje	Terčni pasovi [Hz]	Povprečen odmevni čas [s]		Padec odmevnega časa		
		Pred ureditvijo	Po ureditvi	[s]	%	
nizko	100 - 315	0.94	0.66	0.28	30.09	%
srednje	400 - 2500	0.92	0.52	0.40	43.73	%
visoko	3150 - 10000	0.75	0.49	0.26	34.39	%



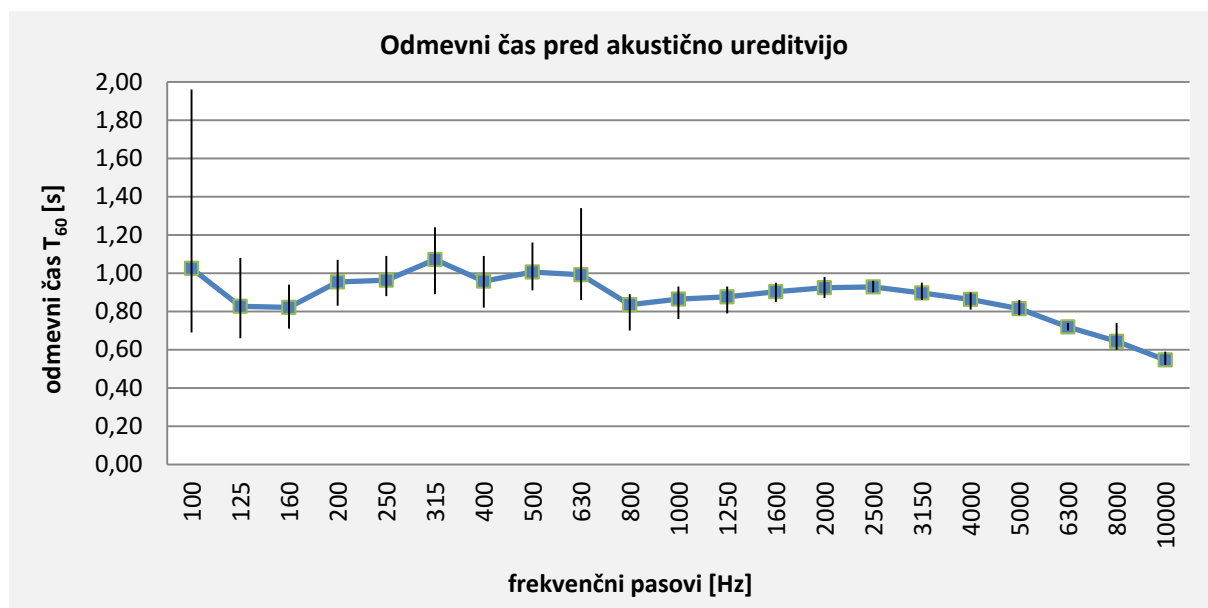
Grafikon 8: Primerjava odmevnih časov pred in po akustični ureditvi pokaže izrazito skrajšanje vrednosti odmevnega časa, kot tudi bolj enakomeren potek preko terčnih pasov po akustični ureditvi.



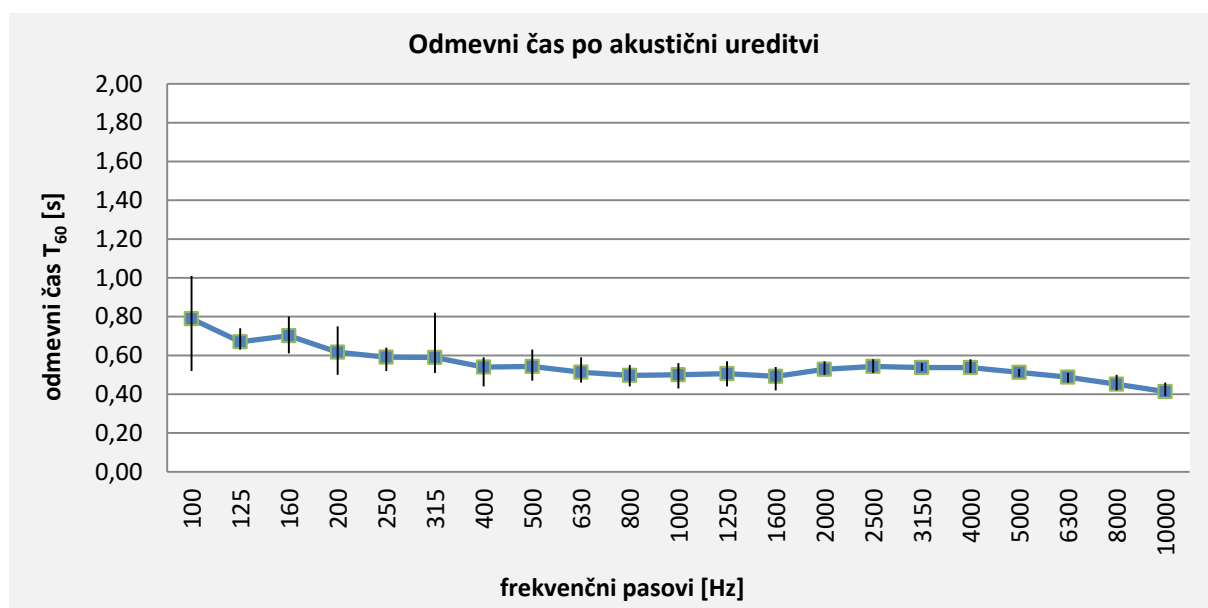
Grafikon 9: Padec odmevnega časa po akustični ureditvi v odvisnosti od terčnega pasu: Najbolj izrazit padec odmevnega časa je izmerjen med terčnimi pasovi 200 Hz in 5000 Hz.

7.6.2 Odstopanje rezultatov in merilna natančnost

Grafikona 10 in 11 prikazujeta odmevni čas pred in po akustični ureditvi v odvisnosti od terčnega pasu s pripadajočim odstopanjem rezultatov meritev. Odstopanje rezultatov je večje pri meritvah pred akustično ureditvijo, predvsem na območju nižjih frekvenc, kjer je tudi stopnja merilne negotovosti višja (Preglednica 14). Na podlagi rezultatov meritve ekvivalentne ravni hrupa ozadja (Grafikon 13) sklepamo, da je razlog za večje odstopanje v slabšem razmerju med generiranim signalom za merjenje odmevnega časa in hrupom ozadja.



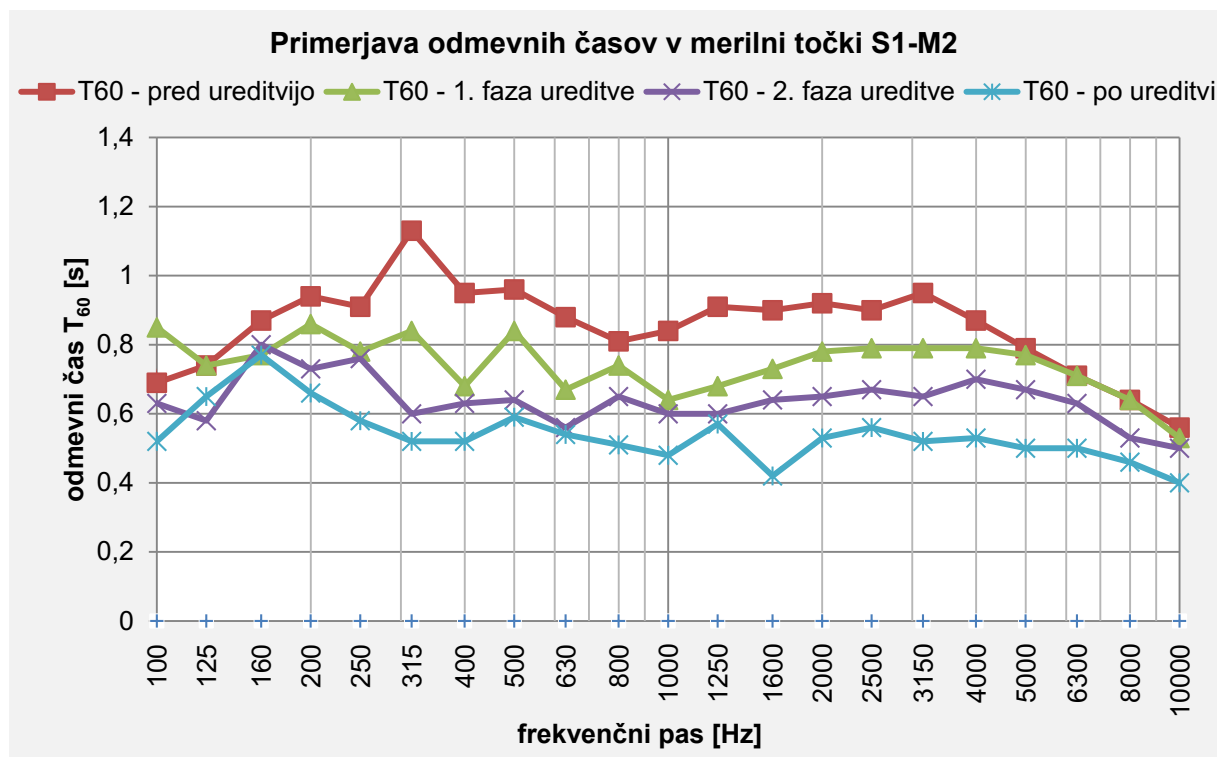
Grafikon 10: Odmerni čas pred akustično ureditvijo v odvisnosti od terčnih pasov s pripadajočim odstopanjem rezultatov.



Grafikon 11: Odmerni čas po akustični ureditvi v odvisnosti od terčnih pasov s pripadajočim odstopanjem rezultatov.

7.6.3 Primerjava meritev v točki S1-M2

Med akustično ureditvijo prostora sta bili izvedeni dve dodatni meritvi odmevnega časa pri merilni kombinaciji S1-M2 (Preglednica 17). Rezultati meritev odmevnega časa pri merilni kombinaciji S1-M2 v vseh štirih fazah merjenja so prikazani na grafikonu 12.



Grafikon 12: Primerjava odmevnih časov v vseh štirih fazah v merilni točki S1-M2 kaže na relativno veliko zmanjšanje odmevnega časa že po 2. fazi ureditve.

V fazi 1 so bili nameščeni stropni absorpcijski elementi, ki predstavljajo slabo tretjino novo vnesene absorpcijske površine. Vpliv na odmevni čas prikazuje grafikon 12, iz katerega je razvidno, da pri frekvencah nad 5000 Hz absorberji praktično niso imeli vpliva. To pripišemo dejstvu, da je absorpcijski material zavrt v papir in tako neučinkovit pri absorbiranju visokih frekvenc. Pri nižjih frekvencah je grafikon zelo razgiban, saj so elementi nameščeni le na strop, kar ne sledi smernici enakomerne razporeditve absorpcijskega materiala po prostoru. Pri tem so predvsem problematična stoječa valovanja v horizontalni ravnini, na katera absorpcija v področju stropa nima vpliva.

Z dodajanjem absorpcijske površine postaja odmevni čas vedno bolj enakomeren preko frekvenčnih pasov, toda vpliv dodatnih zvočnih absorberjev je vedno manjši. Pri vsakem posegu se je odmevni čas zmanjšal približno za tretjino, vendar se je absorpcijska površina iz 2. faze v 3. fazo podvojila (Preglednica 16). Izrazit vpliv na zmanjšanje odmevnega časa je bil dosežen že pri 2. fazi akustične ureditve, ko je bila v prostor vnesena približno polovica absorpcijskega materiala.

Preglednica 16: Razmerje med odstotkom vnesenih absorberjev v prostor in padcem odmevnega časa.

		1. faza	2. faza	3. faza
Odstotek absorberjev v prostoru [%]		31.5	49.1	100.0
Zmanjšanje povprečnega odmevnega časa	[s]	0.11	0.21	0.31
	%	34.4	68.0	100

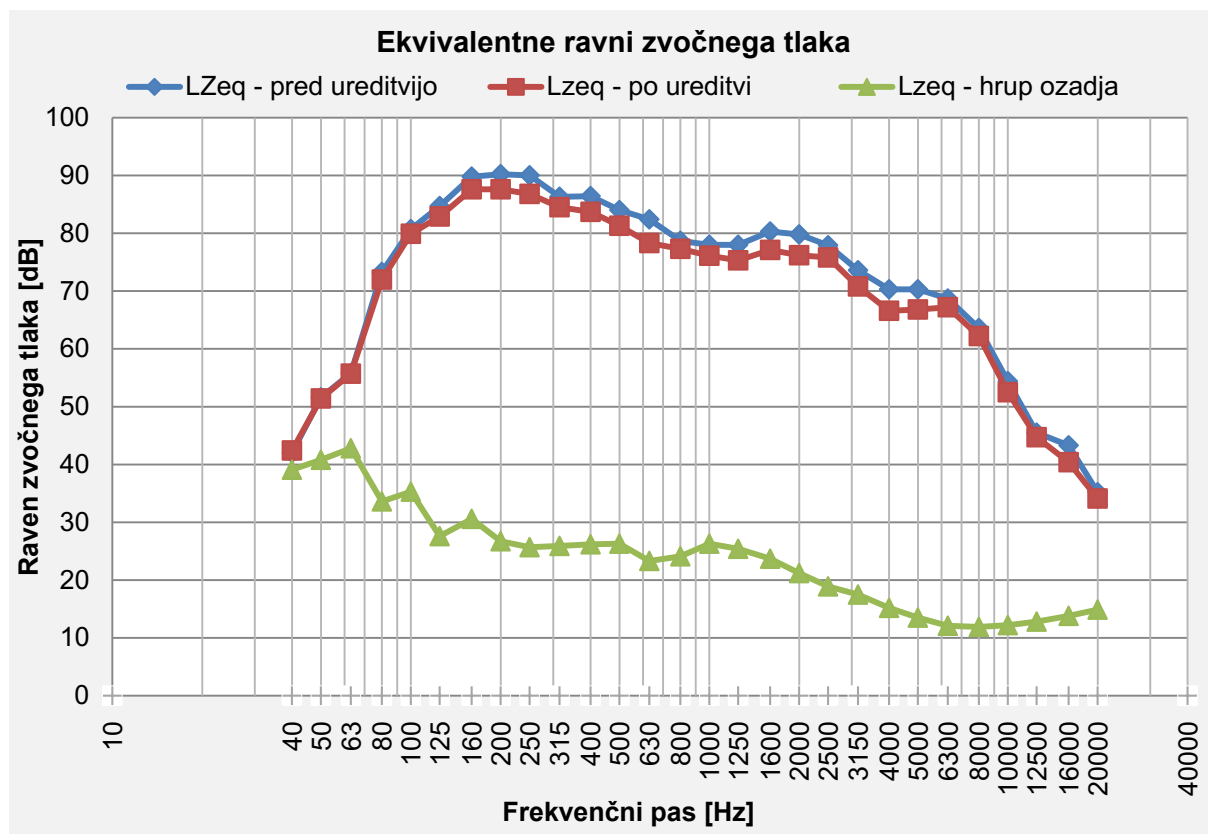
Preglednica 17: Vrednosti odmevnega časa v fazah 2 in 3.

Terčni pas [Hz]	1. faza ureditve		2. faza ureditve	
	Odmevni čas [s]	Merilna negotovost	Odmevni čas [s]	Merilna negotovost
100	0.85	10.37 %	0.63	8.93 %
125	0.74	8.65 %	0.58	7.66 %
160	0.77	7.80 %	0.80	7.95 %
200	0.86	7.37 %	0.73	6.79 %
250	0.78	6.28 %	0.76	6.20 %
315	0.84	5.81 %	0.60	4.91 %
400	0.68	4.64 %	0.63	4.46 %
500	0.84	4.61 %	0.64	4.02 %
630	0.67	3.67 %	0.56	3.35 %
800	0.74	3.42 %	0.65	3.21 %
1000	0.64	2.85 %	0.60	2.75 %
1250	0.68	2.62 %	0.60	2.46 %
1600	0.73	2.40 %	0.64	2.25 %
2000	0.78	2.22 %	0.65	2.03 %
2500	0.79	2.00 %	0.67	1.84 %
3150	0.79	1.78 %	0.65	1.62 %
4000	0.79	1.58 %	0.70	1.49 %
5000	0.77	1.40 %	0.67	1.30 %
6300	0.71	1.19 %	0.63	1.12 %
8000	0.64	1.01 %	0.53	0.92 %
10000	0.53	0.82 %	0.50	0.80 %

Merilna negotovost vmesnih meritev je izrazito višja v primerjavi z meritvami izvedenimi po natančni metodi. Kljub temu je ponovno razvidno, da se negotovost z višanjem terčnega pasu niža.

7.6.4 Rezultati meritev ekvivalentne ravni zvočnega tlaka

Meritve ekvivalentne ravni zvočnega tlaka ob generiranju roza šuma so potekale pred in po namestitvi zvočnih absorberjev v merilni točki S1-M2. Meritev ravni hrupa ozadja je bila izvedena v sklopu meritev pred namestitvijo absorberjev v prostor, ko je bila okolica najglasnejša. Vrednosti vseh treh meritev v odvisnosti od frekvenčnega pasu so prikazane na grafikonu 13, vrednosti skupne ekvivalentne ravni zvočnega tlaka pa so zapisane v preglednici 18.



Grafikon 13: Ekvivalentne ravni zvočnega tlaka pred in po ureditvi ter hrup ozadja.

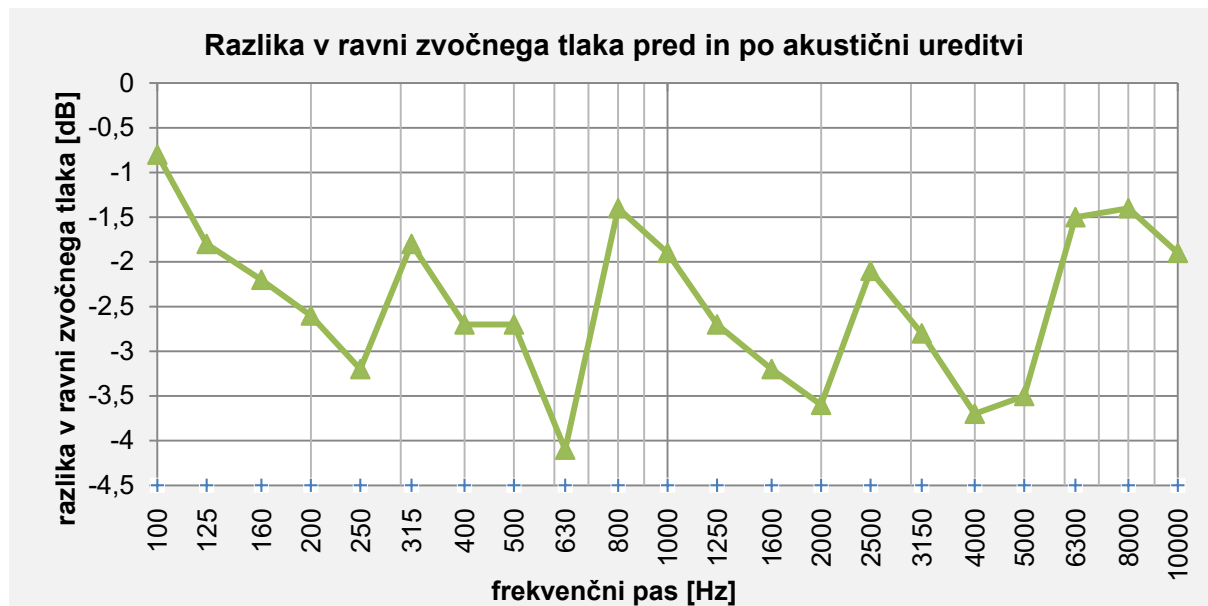
Na frekvenčnem območju 100 Hz do 10000 Hz, kjer so se izvajale akustične meritve, je raven hrupa ozadja vsaj 35 dB nižja od generiranega zvočnega signala. Moč zvočnega signala uporabljenega za analizo L_{eq} je enaka kot pri meritvah odmevnega časa. Pri frekvencah nižjih od 80 Hz je razlika med signalom in hrupom ozadja vidno manjša, kar je tudi razlog, zakaj odmevni časi nižjih frekvenc v sklopu meritev niso bili izmerjeni.

Preglednica 18: Ekvivalentna raven zvočnega tlaka pred in po akustični ureditvi ter hrup ozadja.

	L_{Zeq} [dB]
Pred ureditvijo	97.2
Po ureditvi	94.7
Hrup ozadja	55.3

Merjenje ekvivalentne ravni zvočnega tlaka pred in po akustični ureditvi je pokazalo znižanje ravni zvočnega tlaka za 2,5 dB. Padec ravni zvočnega tlaka sicer ni velik, vendar je v skladu s pričakovanji ob upoštevanju enačbe (17) in dejstva, da je odmevni čas padel za približno 40%.

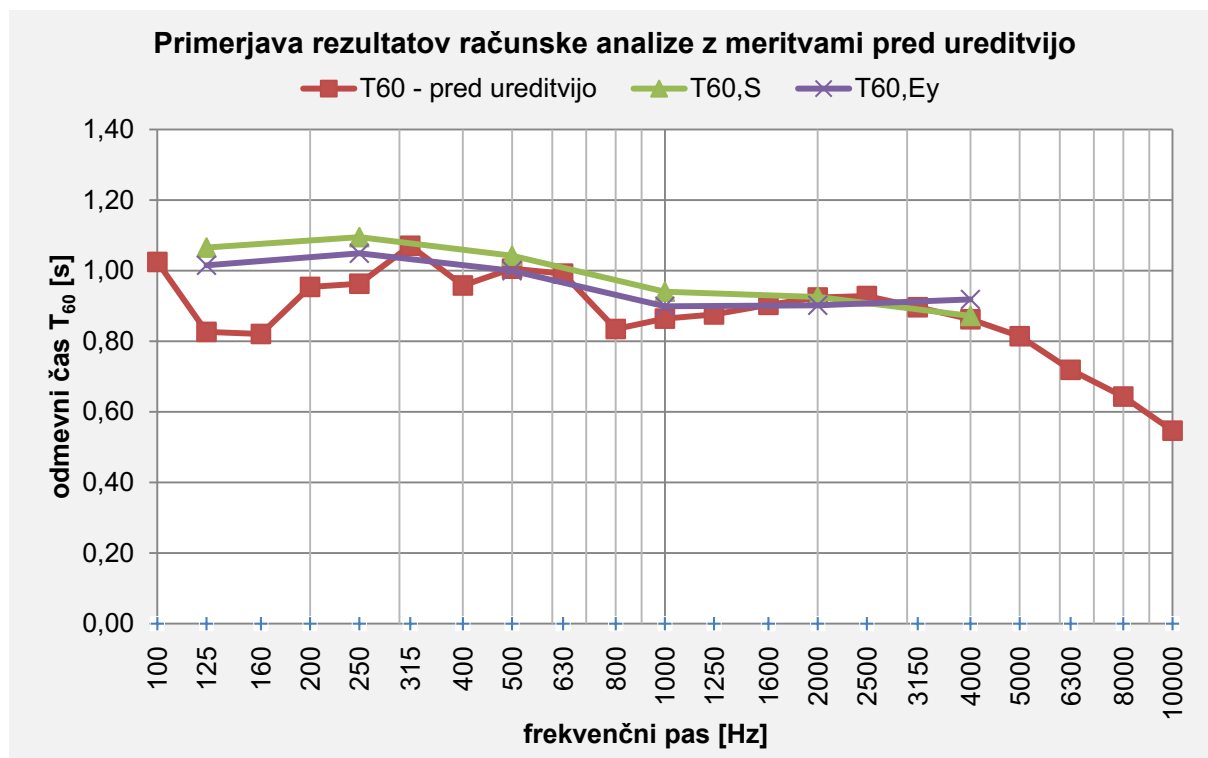
Razlika v L_{eq} je za vsak terčni pas je prikazana na grafikonu 14.



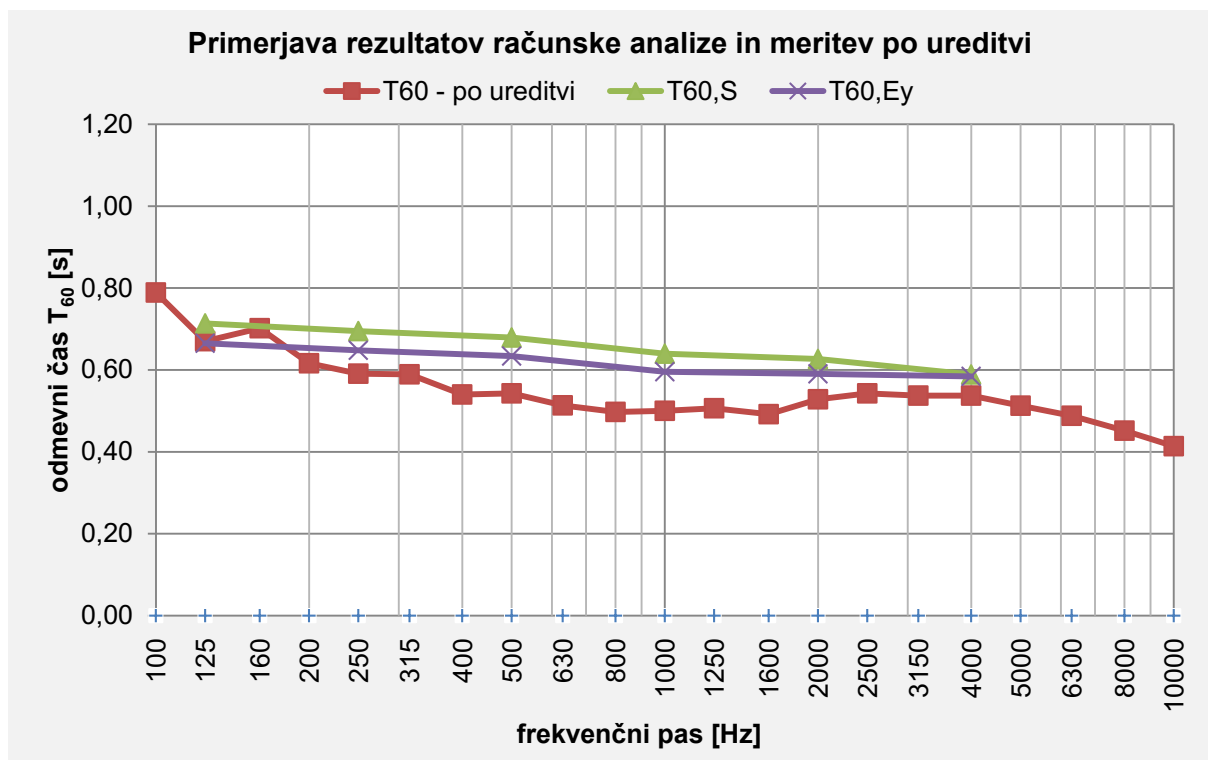
Grafikon 14: Izmerjene razlike v ekvivalentni ravni hrupa po terčnih pasovih.

7.6.5 Ujemanje rezultatov meritev z računskim modelom

Računska ocena odmevnega časa prostora se dobro ujema z rezultati meritev. Večje odstopanje je opaziti le pri nižjih terčnih pasovih (Grafikon 15). Do odstopanja je prišlo zaradi nepoznavanja odmevnega časa oktavnega pasu 125 Hz, saj so predhodne meritve zajele odmevne čase od oktavnega pasu 250 Hz naprej.



Grafikon 15: Primerjava rezultatov meritev in računske analize odmevnega časa pred akustično ureditvijo: Računski model je bil predhodno dobro umerjen.



Grafikon 16: Primerjava rezultatov meritev in računske analize odmevnega časa po akustični ureditvi: Opazno je rahlo odstopanje rezultatov, izmerjene vrednosti so bolj ugodne od napovedanih.

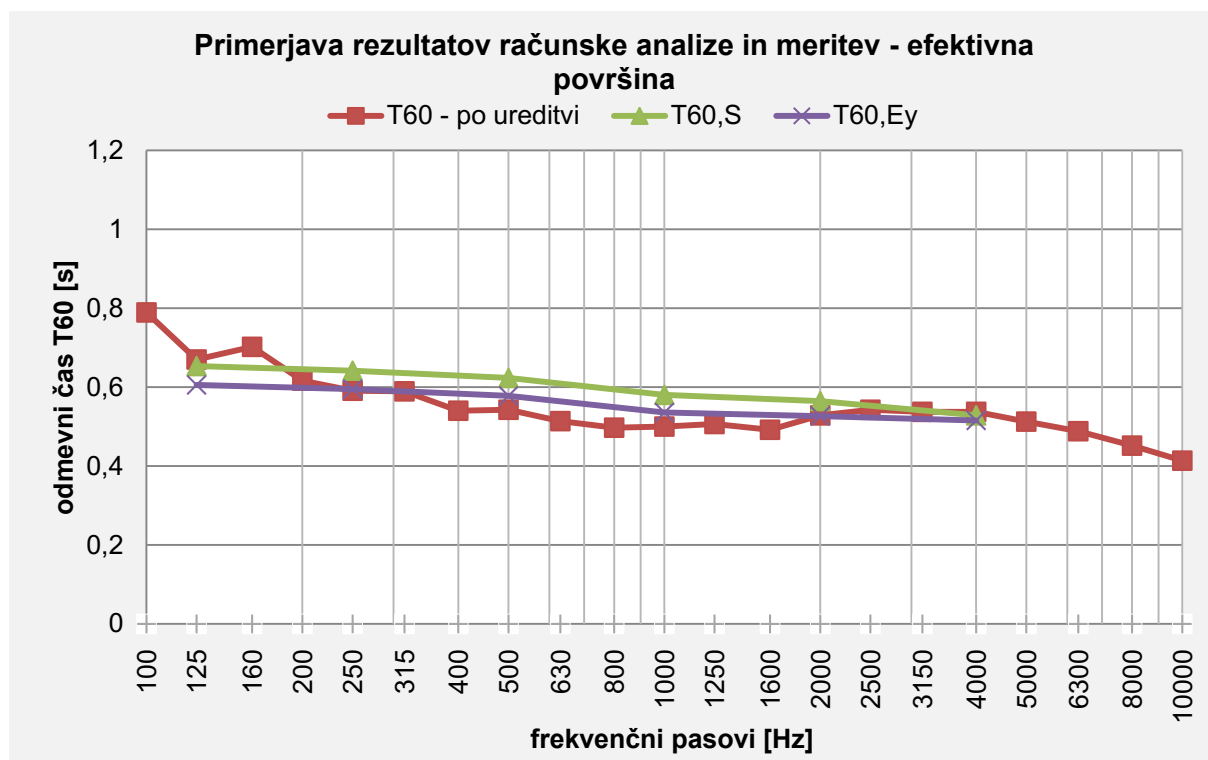
Primerjava računsko določenih odmevnih časov z izmerjenimi po akustični ureditvi (Grafikon 16) kaže, da je računsko ocena nekoliko bolj konservativna in ocenjuje daljše odmevne čase od izmerjenih. Odstopanje po ureditvi je manjše ob uporabi Eyring-Norrisove enačbe, kar ni presenetljivo, saj se v primeru večje absorpcijske površine v prostoru priporoča uporaba le-te.

Pri primerjavi računskih rezultatov z izmerjenimi je potrebno upoštevati, da je vnesena absorpcijska površina v prostor le ocenjena in je pravzaprav efektivna absorpcijska površina večja od računske, saj elementi niso le enostransko izpostavljeni zvočnemu valovanju. Nekateri izmed nameščenih absorberjev absorbirajo zvočno energijo na več stranicah, kar je težko zajeti v izračun in logično vodi k rezultatom izračuna, ki nudijo manj optimistično zmanjšanje odmevnega časa. Poleg tega so bile vrednosti absorpcijskih koeficientov uporabljenih absorberjev določene z impedančno cevjo, ki ne upošteva različnih vpadnih kotov zvoka. Zaradi omenjenih opažanj so dejanske površine absorberjev pomnožene s tremi različnimi faktorji. Faktorji so ocenjeni ob upoštevanju pozicije vsakega elementa in izpostavljenosti stranic elementa. Uporabljeni faktorji ter nove vrednosti efektivne absorpcijske površine zvočno absorpcijskih elementov so zapisane v preglednici 19.

Preglednica 19: Določitev efektivne absorpcijske površine z uporabo eksperimentalno določenih faktorjev.

Vrsta absorpcijskega elementa	Dejanska površina [m ²]	Faktor	Upoštevana površina [m ²]
stropni elementi	6.25	1.10	6.88
stenski elementi	3.50	1.25	4.38
talni elementi	2.00	1.10	2.20
kita - ob steni	3.60	1.25	4.50
oblaki - ob steni	2.00	1.25	2.50
oblaki - po prostoru	2.50	1.50	3.75
Skupna površina:	19.85		24.20

Ob upoštevanju novih površin se izmerjene vrednosti odmevnega časa bolje ujemajo z računsko določenimi (Grafikon 17).



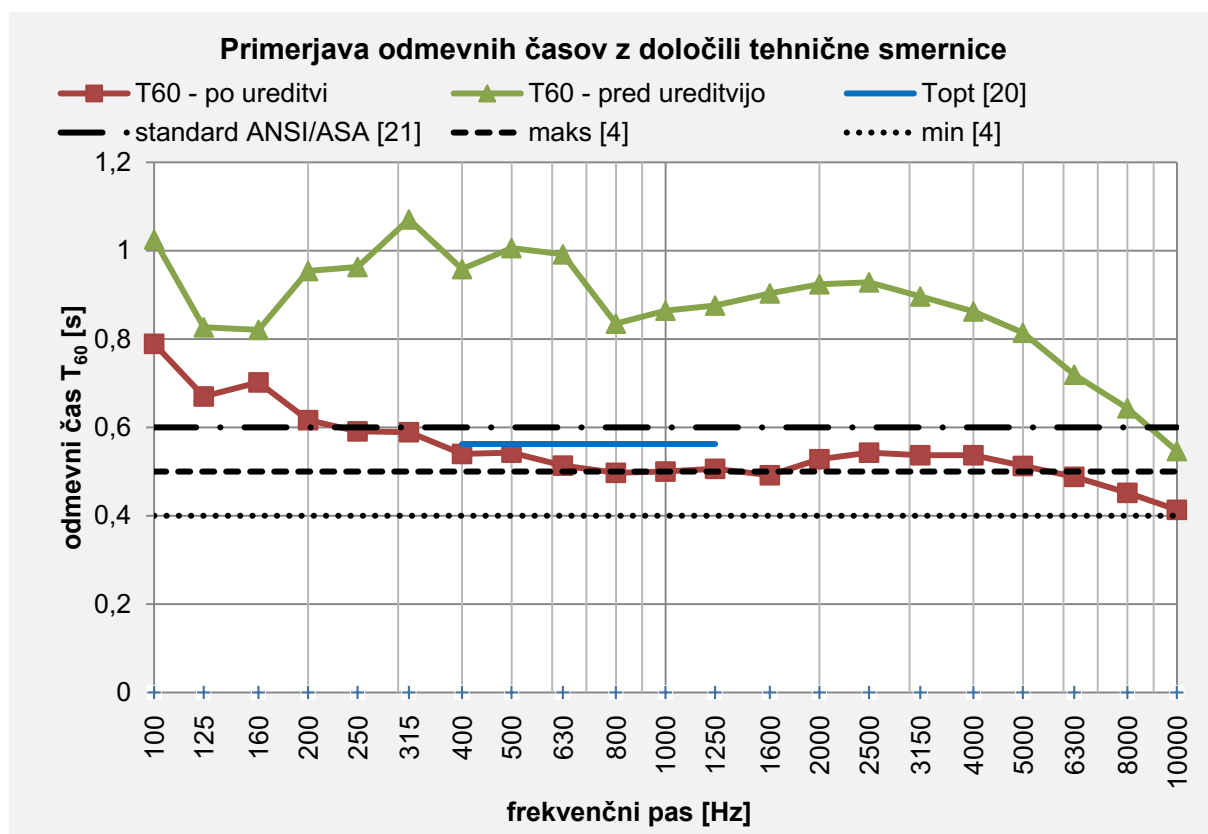
Grafikon 17: Primerjava rezultatov meritev in računske analize odmevnega časa po akustični ureditvi ob upoštevanju efektivne absorpcijske površine.

7.6.6 Upoštevanje tehnične smernice in drugih priporočil

Tehnična smernica TSG-1-005:2012 [20] za učilnico obravnavane prostornine (194,4 m³) priporoča optimalni odmevni čas $T_{opt} = 0,56$ s v oktavnih pasovih 500 Hz in 1000 Hz, ki je na grafikonu 18 prikazan s polno modro črto. Grafikon 18 poleg priporočil smernice prikazuje

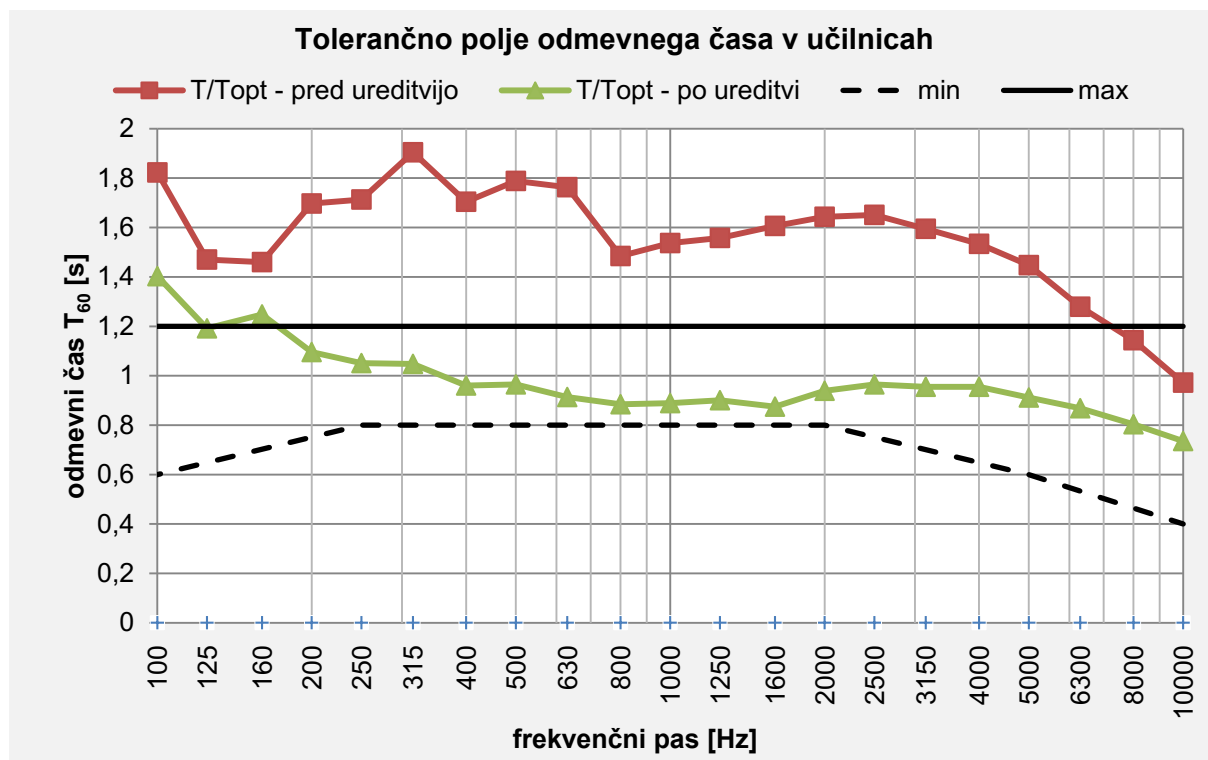
mejno vrednost odmevnega časa določenega v ameriškem standardu [20] (0,6 s) in minimalne ter maksimalne vrednosti odmevnega časa prostorov za predšolsko vzgojo priporočene v literaturi [4] ($T_{\min} = 0,4$ s in $T_{\max} = 0,5$ s).

Čeprav se navedene vrednosti nanašajo na odmevne čase polno zasedenih prostorov, so za primerjavo uporabljeni rezultati meritev odmevnega časa ob prisotnosti le dveh oseb. Računsko dodajanje absorpcije ljudi nima pravega pomena zaradi relativno nizke zasedenosti prostorov vzgojno varstvenih ustanov (skupine otrok so majhne, otroci pa predstavljajo vsaj 50 % manjšo absorpcijsko površino od odrasle osebe) in ugodnega vpliva prisotnosti ljudi na odmevni čas.



Grafikon 18: Primerjava odmevnega časa z določili tehnične smernice in drugimi priporočili.

Vrednosti odmevnega časa se po izvedeni akustični ureditvi skoraj popolnoma približajo priporočenemu optimalnemu odmevnemu času za učilnice. Vrednosti nižjega frekvenčnega območja so nekoliko višje (imajo daljši odmevni čas), nekatere tudi malenkostno presegajo zgornjo mejo tolerančnega območja, medtem ko so odmevni časi terčnih pasov nad 400 Hz nižji od priporočene vrednosti in ležijo znotraj tolerančnega območja (Grafikon 19). Za prostore vzgojno varstvenih ustanov je priporočen še nekoliko krajši odmevni čas kot za učilnice, zato sklepamo, da krajši odmevni čas na govornem območju otrok (400 Hz – 5000 Hz) ugodno vpliva na akustično klimo igralnice.



Grafikon 19: Tolerančno območje odmevnega časa v skladu s tehnično smernico v primerjavi z razmerjem T_{60}/T_{opt} pred in po akustični ureditvi.

Na grafikonu 19 je prikazano tolerančno območje definirano v skladu s tehnično smernico [20] in vrednosti odmevnega časa obravnavane igralnice pred in po akustični ureditvi. Razvidno je, da je odmevni čas pred ureditvijo krepko presegal dovoljene vrednosti, po akustični ureditvi prostora pa so vrednosti odmevnega časa pri praktično vseh terčnih pasovih znotraj tolerančnega območja. Edino odstopanje se pojavi na območju nižjih frekvenc.

8 SUBJEKTIVNA OCENA ZAPOSLENIH IN DRUGI SOCIOLOŠKI TER TEHNIČNI VIDIKI

Meritve odmevnega časa in ekvivalentne ravni zvočnega tlaka pred in po akustični ureditvi kažejo, da je akustični poseg ugodno vplival na zvočno klimo v prostoru, ker pa je zaznavanje glasnosti v veliki meri tudi subjektivno, je za celostno analizo pomembno upoštevati tudi mnenje uporabnikov prostora. Poleg tega je v primeru vzgojno varstvenih ustanov pri vsakem posegu v prostor pomembno preučiti še druge vplive na uporabnika, predvsem z vidika zdravja, higiene in varnosti ter ekonomičnosti in možnosti vključevanja akustičnih elementov v pedagoško-kreativni proces.

8.1 Subjektivna ocena zaposlenih v vzgojno varstveni ustanovi

Škodljivi učinki hrupa in vpliv akustične ureditve prostora na človeka so opredeljeni v literaturi (poglavje 5.1) in dokazani v okviru raznih raziskav (poglavje 5.4), zato jih v sklopu študije primera ne želimo ponovno dokazovati. Cilj študije je preučiti dejansko okolje in pridobiti konkretne informacije o željah in potrebah uporabnikov obravnavanih prostorov. Subjektivna ocena zaposlenih je bila pridobljena iz anonimnega vprašalnika (Priloga C) o odzivu uporabnikov na hrupno okolje in na podlagi pogovorov s pedagogi [40] ter organizatorjem prehrane in zdravstveno-higienskega režima [39] v Vrtcu Pod Gradom. Pridobljene informacije in njihova analiza so predstavljene v podpoglavjih 8.1.1 – 8.1.3, skupni zaključki pa so opisani v podpoglavju 8.1.4.

8.1.1 Analiza vprašalnika

Vprašalnik je sestavljen iz dveh sklopov. V prvem sklopu anketiranec navede nekaj osnovnih osebnih podatkov (spol, starost, delovna doba) in karakteristik predšolske skupine v kateri deluje (starostna skupina, število otrok v skupini), drugi sklop pa se nanaša na dožemanje hrupa in odziv anketiranca na hrupno okolje ter obsega 22 trditev, katere anketiranec ovrednoti s pomočjo 4 stopenske lestvice (4 – se strinjam, 3 – večinoma se strinjam, 2 – večinoma se ne strinjam, 1 – se ne strinjam). Vprašalnik je služil kot informativna ocena, ali je v obravnavanem vrtcu pretirana hrupnost prostorov zaznana kot problematična in kakšen odnos do hrupa imajo posameznice.

Vprašalnik je izpolnilo 10 vzgojiteljic iz obravnavane enote Vrtca Pod Gradom. Anketiranke so bile ženskega spola, starosti od 25 do 56 let, z delovno dobo v vrtcu od 3 do 32 let. Delovni čas vzgojiteljic je približno 7,5 ur dnevno, vse poučujejo nižjo starostno skupino (1-3 let), nekatere od njih pa obe (30%). Dve vzgojiteljici imata v svoji skupini le po šest otrok, ostale imajo skupine velikosti od 12 do 17 otrok.

Analiza rezultatov vprašalnika pokaže večinsko mnenje (90%) anketirank, da je njihovo delovno okolje hrupno ter da hrup negativno vpliva na otroke. Vse anketiranke so mnenja, da so bolj občutljive za zvoke visokih frekvenc kot za zvoke nizkih frekvenc, 80% anketirank pa meni, da so občutljive na hrup. Hrupa okolja in hrupa iz sosednjih prostorov ne zaznavajo kot

pretirano motečega, največ jih za moteč hrup izbere hrup znotraj prostora (60%). Pojavljanje posledic hrupa kot so glavobol, izguba glasu, težave s koncentracijo in podobno med anketirankami ni pogosto, vendar sta dve izmed anketirank z daljšo delovno dobo v času opravljanja dela v vrtcu opazili tako začasno kot tudi trajno poslabšanje sluha.

Iz navedenih osebnih podatkov je opazno, da ima polovica delavk izrazito nižjo delovno dobo (tri do sedem let) od preostalih, katerih delovna doba je daljša od 14 let. Ko anketiranke razdelimo v dve skupini glede na delovno dobo, razberemo, da skupina z daljšo delovno dobo obravnava svoje delovno okolje kot bolj hrupno. Vse anketiranke opazijo občasno željo po tišini in jih hrup moti pri komunikaciji. Skupina z daljšo delovno dobo pogosteje opazi psihofizične vplive hrupa (poslabšanje sluha, bolečine v grlu, izgubo glasu, težave s koncentracijo), medtem ko vzgojiteljice s krajšo delovno dobo teh vplivov praktično ne zaznajo. Pri rezultatih skupine s krajšo delovno dobo je opaziti večjo raznolikost odgovorov kar kaže na subjektivno zaznavanje hrupa in z njim povezanih pojmov.

Na podlagi analize vprašalnika ugotovimo, da obravnavana skupina vzgojiteljic svoje delovno mesto zaznava kot hrupno in da jih najbolj moti hrup znotraj prostora. Po daljšem obdobju delovanja v hrupnem okolju se občutljivost poveča, pogosteje se začnejo pojavljati psihofizične posledice izpostavljenosti hrupu, vključno s poslabšanjem sluha. Vzgojiteljice izražajo visoko občutljivost na hrup, predvsem na zvoke visokih frekvenc, predvidoma zaradi specifik delovnega okolja. Razliko v doživljanju hrupa in njegovih posledic skupine s krajšo in skupine z daljšo delovno dobo lahko pripišemo tudi osebnostnim lastnostim posameznic ter karakteristikam starostne skupine. Starejše osebe so načeloma bolj zaskrbljene za zdravje in na tem področju bolje osveščene, zato je možno, da negativne posledice hrupa hitreje opazijo. Zaradi današnjega načina življenja v urbanem okolju lahko tudi predvidevamo, da so mlajši manj občutljivi na hrup okolja, saj so različni zvoki ozadja postali stalnica v človekovem življenju (promet, televizija, radio, glasba itd). [51]

8.1.2 Pogovori z zaposlenimi pred akustično ureditvijo prostorov

Pogovori z zaposlenimi v vrtcu pred akustično ureditvijo so se nanašali predvsem na zaznavanje hrupnosti različnih prostorov, higienski režim v vrtcu, možne lokacije postavitve zvočnih absorberjev, izdelavo zvočnih absorberjev ter izbiro in varnost materialov, namenjenih za izdelavo akustičnih elementov. Vse sogovornice so se zavedale problematike neustrezne akustične ureditve prostorov, v katerih preživljajo velik del dneva in so izrazile željo po izboljšanju trenutnega stanja. Pri izbiri igralnice za akustično ureditev in izdelavi zvočno absorpcijskih elementov so bili posamezni komentarji zaposlenih upoštevani (Poglavje 7).

Organizatorica prehrane in zdravstveno-higienskega režima je opozorila na zahteve glede pralnosti elementov v prostorih vrtca in druge higienske usmeritve, nam predstavila aktualno zakonodajo s področja ureditve vzgojno varstvenih ustanov in predlagala najprimernejše igralnice za akustično ureditev [39]. Sledili so pogovori z vzgojiteljicami, ki so za izrazito najslabše akustično urejeno igralnico izbrale igralnico 8, kar so kasneje potrdile tudi akustične meritve. V trditvi o akustični neprimernosti igralnice 8 so bile vzgojiteljice enotne in so poudarjale, da je bivanje v omenjenem prostoru neprijetno, kar kaže na to, da ima akustično udobje velik učinek na delovanje človeka, saj ga zazna celo neizurjeno uho. Pri izbiri prostora

za akustično ureditev smo se oprli na mnenja vzgojiteljic, prav tako smo upoštevali njihove predloge glede potrebnih lastnosti materialov, ki bodo v stiku z otroci in tudi glede možnih pozicij zvočnih absorberjev. Vzgojiteljice so tudi izdelale del začasnih absorberjev v obliki oblakov. [40]

8.1.3 Pogovori z zaposlenimi po akustični ureditvi prostorov

Izboljšanje akustične klime prostora je bilo opaziti že ob delni ureditvi prostora in pri izvedbi vmesnih meritev. Po končani akustični ureditvi je bila razlika zelo očitna. Igralnica 8 je bila po akustični ureditvi izrazito tišja v primerjavi z ostalimi akustično neurejenimi prostori vrtca, kar so zaznale tudi vzgojiteljice. Izboljšana akustična klima igralnice 8 je navdušila zaposlene v vrtcu. Vzgojiteljice, ki v igralnici 8 preživijo največ časa, so opazile izrazito spremembo v razumljivosti govora, prostor je bil manj odmeven in niso več čutile potrebe po privzdigovanju glasu. Poleg tega so zaznale, da so otroci postali nekoliko tišji, kar je najverjetneje posledica Lombardovega refleksa. Vsi tipi akustičnih elementov so bili pozitivno sprejeti, saj ne motijo dnevnih aktivnosti, so nevsiljivi, vzgojiteljicam pa je odgovarjala tudi bela barva - elemente lahko prilagodijo in okrasijo po lastnih željah. [39] [40]

Naj omenimo, da se človek pogosto ne zaveda vpliva slabe akustične klime prostora na počutje, dokler se le-ta ne izboljša. Ob pričetku meritev, pred vnosom absorberjev zvoka v prostor, pravzaprav nismo občutili, da je akustična klima igralnice 8 tako slaba in smo šele ob zaključku ureditve prostora zaznali, kako velik vpliv na bivalno udobje ima boljše zvočno okolje. Vzgojiteljice, ki v igralnici z otroci preživljajo svoj delovni dan, so sicer opažale vsakodnevno neugodje zaradi hrupa, vendar so bile vseeno zelo presenečene obsegom izboljšave [40].

Na podlagi lastnih opažanj in opažanj drugih, ki so bili prisotni v igralnici 8 pred in po akustični ureditvi, lahko sklenemo, da je vpliv zmanjšanja odmevnega časa na zaznано hrupnost prostora še nekoliko večji kot kažejo meritve ekvivalentne ravni hrupa v prostoru.

8.1.4 Zaključki pridobljeni iz subjektivne ocene zaposlenih

Pred izvedbo vprašalnika in pogovorov z zaposlenimi smo (na podlagi predznanja o dotični tematiki) sklepali, da je akustično okolje v obravnavanem vrtcu neprimerno in predpostavili, da lahko z akustično ureditvijo pozitivno vplivamo na slušno ugodje zaposlenih. Vprašalnik in pogovori z zaposlenimi so naša predvidevanja potrdili. Zaposleni so zaskrbljeni za svoje zdravje ter za zdravje otrok in iz pogovorov je razvidno, da so pripravljeni sodelovati pri kakršnihkoli ukrepih, ki bi pripomogli k izboljšanju trenutnega stanja. Primarne ukrepe zmanjševanja hrupa že poznajo in jih tudi izvajajo, vendar v določenih prostorih ti ukrepi ne zadoščajo. S predlaganimi sekundarnimi ukrepi so zadovoljni, akustično ureditev prostorov bi želeli izvesti v vseh igralnicah vrtca. Subjektivna ocena uporabnikov nam je pomagala pri boljšem razumevanju obravnavane problematike in potreb zaposlenih v vrtcu. Na podlagi njihovih komentarjev smo lahko prilagodili karakteristike akustične ureditve na način, da je ustrezen specifični okolja.

8.2 Primernost zvočno absorpcijskih elementov za vnos v prostore vzgojno varstvenih ustanov

Kot je bilo predhodno omenjeno v poglavju 5, je zaradi specifičnosti obravnavanih prostorov potrebno poleg akustičnih lastnosti absorpcijskih elementov upoštevati še druge relevantne parametre. V sklopu tega poglavja je obravnavana ustreznost akustičnih elementov glede njihove sestave in postavitve z zdravstveno-higienskega, gradbeno-tehničnega, ekonomskega in pedagoško-kreativnega stališča.

8.2.1 Zdravstveno-higienske zahteve

Z vidika zahtev higienskega režima obravnavanega vrtca [19], Pravilnika o normativih in minimalnih tehničnih pogojih za prostor in opremo vrtca [18] in na osnovi naših testiranj lahko predvidevamo, da so prototipni absorpcijski elementi (ob pravilni uporabi) ustrezni za vnos v igralnice.

Stropni »V« elementi so trdno pritrjeni v strop in tako niso v stiku z otroci in so snemljivi, zato je njihovo vzdrževanje enostavno. Papirni ovoj po naši predpostavki preprečuje prašenje kamene volne, papir je mogoče obrisati in tako odstraniti potencialno umazanijo ali prah. Akustični elementi iz filca se delijo načasne in stalne. Zčasni elementi so načeloma pobarvani in nezaščiteni, zato se jih po določenem času predvidoma zavrže in zamenja za nove. Stalne elemente je možno oprati ali posesati, najprimerneje pa je, da se akustične elemente narejene iz filca zaščiti, saj je tako možno preprečiti nabiranje prahu v samem materialu. Talni akustični elementi so že v osnovi zaščiteni s pralnim blagom, zaščiti pa se jih lahko tudi z drugimi materiali, pri čemer je potrebno upoštevati, da mora biti material dovolj prehoden, sicer se absorpcijske lastnosti absorberja poslabšajo. Vsi elementi so snemljivi in trdno pritrjeni v strop, kot zahteva omenjen pravilnik [18].

Kljub našemu predvidevanju, da so prototipni akustični elementi primerni z zdravstveno-higienskega stališča, bi bilo vse uporabljene materiale potrebno testirati glede na vsebnost kemijskih snovi in pripraviti poročilo o kemijski varnosti v skladu z Uredbo Evropskega parlamenta in sveta o registraciji, evalvaciji, avtorizaciji in omejevanju kemikalij (REACH) [47].

8.2.2 Gradbeno-tehnične zahteve

Akustični elementi, namenjeni stalni namestitvi v prostor, se smatrajo kot gradbeni proizvodi in morajo dosegati zahteve navedene v Zakonu o gradbenih proizvodih (ZGPro) [45] ter Uredbi 305/2011 [46]. Vsak gradbeni proizvod na trgu mora imeti izjavo o lastnostih v zvezi z bistvenimi značilnostmi gradbenega proizvoda, izdelano v skladu z ustreznimi harmoniziranimi tehničnimi specifikacijami [46].

Bistvene značilnosti gradbenega proizvoda so določene na podlagi sledečih osnovnih zahtev za gradbene objekte:

- mehanska odpornost in stabilnost,
- varnost pred požarom,
- higienska in zdravstvena zaščita in varovanje okolja,
- varnost pri uporabi,
- zaščita pred hrupom,
- varčevanje z energijo in ohranjanje toplote in
- trajnostna raba naravnih virov [46].

Pri tem je potrebno upoštevati predvidene namene uporabe gradbenega proizvoda. Na podlagi izjave o lastnostih se na gradben proizvod namesti oznaka CE, ki je osnova za prodajo izdelka na območju Evropskega gospodarskega prostora. [46]

Določeni sestavni materiali zvočnih absorberjev (kamena volna, pritrdilna sredstva, les, fasadna mrežica) so CE certificirani gradbeni proizvodi, vendar je v primeru kamene volne in fasadne mrežice predviden namen uporabe drugačen. Poleg tega bi bilo za klasifikacijo prototipnih zvočnih absorberjev med gradbene proizvode potrebno preveriti nekatere lastnosti celotnih sistemov in ne le sestavnih materialov.

Poleg preverbe nosilnosti sistemov in vsebnosti kemijskih snovi (REACH) bi bila predvsem smiselna analiza požarne odpornosti akustičnih elementov in požarna klasifikacija v skladu s tehnično smernico SZPV 412: Uporaba gorljivih/negorljivih gradbenih materialov [48]. Čeprav je kamena volna klasificirana kot negorljiv material (razred gorljivosti A1), bi bilo potrebno preveriti odziv na požar celotnega sistema stropnih »V« elementov in analizirati požarne lastnosti ostalih materialov. Uporabljen filc sicer dosega zakonske zahteve glede varnosti pred požarom na področju avtomobilske industrije (Priloga D), vendar sta klasifikacija in način preizkušanja v primeru gradbenih proizvodov drugačna, zato bi morali opraviti preizkus gorljivosti v skladu s standardi iz področja gradbene industrije [49].

Zaradi časovnih in finančnih omejitev smo se v magistrskem delu omejili le na raziskave s področja akustike ter analizo odziva uporabnikov, gradbeno in drugo zakonodajo pa smo preučili in jo v največji možni meri upoštevali pri izdelavi in namestitvi zvočno absorpcijskih elementov. Za nadaljnje delo je nujno izvesti vse ostale kontrole potrebne za pridobitev izjave o lastnostih gradbenega proizvoda in s tem oznake CE.

8.2.3 Ekonomičnost

Cena celotne akustične ureditve igralnice je znašala 109,50 € oziroma 5,50 €/m². V tej ceni je všteta cena filca, kamene volne, pritrdilnih elementov (vijakov), lesa, fasadne mrežice in papirja, ni pa upoštevana cena blaga, sponk in vrvi, na katero so obešeni nekateri elementi. V ceni ravno tako ni upoštevana cena izdelave in montaže elementov, česar v primeru, da akustične elemente izdelujejo zaposleni ali otroci sami, pravzaprav ni potrebno upoštevati.

Najdražji prototipni akustični elementi so stropni »V« elementi. Kamena volna je nekoliko dražja od filca, konstrukcija elementov je kompleksnejša, pri izdelavi pa je uporabljenih več različnih materialov. Cena stropnega »V« elementa je ocenjena na nekaj manj kot 9,00 €/m².

Najcenejša je izdelava začasnih prototipnih elementov iz filca (v primeru akustične ureditve igralnice 8 so to oblaki in kita), pri kateri ni potrebna izdelava dodatne konstrukcije in je zato njihova cena kar enaka ceni filca, ki v našem primeru znaša 1,60 €/m².

Glede na cene primerljivih akustičnih elementov na tržišču, ki so vključno z montažo praviloma vse višje od 20,00 €/m², predstavljajo prototipni akustični elementi izrazito manjši finančni vložek. Poleg tega je večina komercialnih produktov namenjena le za akustično obdelavo stropov (npr. akustični spuščeni strop), kar na podlagi rezultatov vmesnih meritev odmevnega časa v naši raziskavi (Grafikon 12) ni celovita rešitev.

8.2.4 Vključevanje v kreativno-pedagoški proces

Zvočno absorpcijski elementi so bili izdelani ob upoštevanju uporabnosti in udobja v prostoru. Razporeditev elementov po prostoru hkrati upošteva akustične zahteve po čim bolj enakomerno razporejeni absorpcijski površini in zahteve, ki izhajajo iz namembnosti prostora, torej na novo umeščeni elementi ne smejo ovirati dnevnih aktivnosti v prostoru. Pri namestitvi absorberjev je upoštevano, da elementi ne zastirajo zunanje svetlobe ali osvetlitve luči. Poleg tega so akustični elementi narejeni tako, da lahko uporabniki do neke mere sami izbirajo pozicije elementov v prostoru.

Prav vse akustične elemente je možno vsaj delno vključiti v pedagoško-kreativni proces, v kolikor se pridobi Poročilo o kemijski varnosti uporabljenih materialov [47]. Začasni zvočni absorberji lahko služijo kot okras prostora in s tem pridobijo dodatno dimenzijo. Pod nadzorom vzgojiteljev lahko otroci iz filca izrezujejo razne oblike ali material uporabljajo namesto papirja, ga pobarvajo, možna pa je tudi izdelava večslojnih ali prostorskih (3D) okraskov. V pedagoški proces lahko absorberje vključimo tudi brez sodelovanja otrok - njihova oblika, vsebina in barva se lahko nanaša na trenutno učno snov (na primer geometrične oblike, barve, vrste živali ali letni časi) in se jih v prostor obesi namesto plakatov ali drugih vrst učnih pripomočkov.

Stalni zvočni absorberji morajo biti zaradi higienskega režima vzgojno varstvenih ustanov primerno zaščiteni, zato je možno v kreativni proces vključiti le zaščitne plasti zvočno absorpcijskih elementov. Stropni »V« elementi so oviti v papir, katerega otroci ali vzgojitelji pobarvajo in okrasijo, poleg tega pa lahko okrasijo fasadno mrežico (mogoče jo je prebarvati ali jo uporabiti za namen obešanja drugih izdelkov). Pri delu s stropnimi elementi iz kamene volne je seveda potrebno upoštevati varnostna priporočila o ravnanju z materialom [53]. Stenske elemente iz filca se prav tako lahko zaščiti z zvočno prehodnim zaščitnim materialom (blago, vrtna folija), ki se ga okraši po željah uporabnikov.

9 INTERPRETACIJA REZULTATOV

Poglavje devet je namenjeno interpretaciji rezultatov praktičnega dela, potrditvi ali ne potrditvi zastavljenih hipotez ter postavitvi zaključkov pridobljenih tekom magistrskega dela. Ugotovitve so razčlenjene v tri podpoglavja, ki se nanašajo na opravljene akustične meritve in izračune, prototipne akustične elemente in psihofizični odziv uporabnikov. V četrtem podpoglavju so predstavljeni predlogi za nadaljnje raziskave in končne rešitve.

9.1 Akustične meritve in izračuni

Akustične meritve in izračuni so za namen interpretacije rezultatov razdeljene na preliminarne metode, med katere sodijo preliminarne meritve odmevnega časa, meritve absorpcijskega koeficienta z impedančno cevjo in izračuni odmevnega časa v programu ROC ter končne meritve, ki zajemajo meritve odmevnega časa in ekvivalentne ravni zvočnega tlaka pred in po akustični ureditvi igralnice 8.

9.1.1 Preliminarne metode

- Za osnovno oceno odmevnega časa prostora je zelo primerno izvajanje meritev odmevnega časa v skladu z raziskovalno metodo po standardu ISO 3382-2 [23].
- Preliminarne meritve odmevnega časa v treh igralnicah Vrtca Pod Gradom nakazujejo na to, da je akustična ureditev prostorov vzgojno varstvenih ustanov nezadovoljliva. Hipotezo 2 (»Sklepamo, da so akustične ureditve prostorov vzgojno varstvenih ustanov nezadovoljlive.«) tako v obravnavanem primeru potrdimo, ob upoštevanju navedb iz literature in raziskav (poglavje 5.4) pa lahko hipotezo smatramo kot v celoti potrjeno.
- Meritve absorpcijskega koeficienta z impedančno cevjo služijo kot dobra ocena, pri tem pa je potrebno upoštevati, da imajo materiali celo boljše absorpcijske lastnosti v realnem okolju, saj njihova sposobnost absorbiranja ni omejena na eno ravnino in en sam vpadni kot.
- Z računskim modelom je možno dovolj natančno napovedati odmevni čas po akustični ureditvi ob upoštevanju pogoja, da je model umerjen. Koristna je izvedba preliminarne meritve odmevnega časa, sicer lahko potrebno količino absorpcijskega materiala bistveno precenimo/podcenimo. Hipotezo 4 (»Predvidevamo da, je z računskim programom možna napoved odmevnega časa prostora zadovoljlive natančnosti.«) lahko tako delno potrdimo, saj je napoved odmevnega časa prostora možna le z uporabo računskega modela, vendar je za to potrebno nekaj več znanja in izkušenj s področja prostorske akustike.
- Pred umerjanjem računskega modela so bili računsko določeni odmevni časi v vseh oktavnih pasovih daljši od izmerjenih. V primeru, da preliminarne meritve odmevnega časa ne bi bila izvedena, bi ocenili skoraj dvakrat večjo potrebo po absorpcijski površini. Predvidevamo, da bi z izkušnjami lahko računsko oceno bolj približali realnemu stanju tudi brez izvedenih meritev odmevnega časa.
- Pri uporabi računskega modela je potrebno upoštevati, da je del volumna prostora zaseden s pohištvo, da so določeni elementi v prostoru izpostavljeni zvočnemu

valovanju z več strani in zato pravilno definirati površine znotraj prostora, saj lahko na videz majhna sprememba v identifikaciji materiala izdatno vpliva na rezultate računa.

- Površine, ki jih ne obravnavamo kot akustično relevantne (omet, lesene mize, stoli ...), so lahko ključnega pomena in jim je potrebno pravilno definirati kvadrature in vrsto materiala.
- Pri določanju absorpcijske površine je smiselno upoštevati, da bo dejanska absorpcijska površina nekoliko manjša od napovedane predvsem v primeru, da so bili absorpcijski koeficienti materialov določeni z impedančno cevjo.
- Pri predhodni analizi se lahko upošteva, da je za napoved odmevnega časa po vnosu velike količine absorpcijskega materiala v prostor primernejša Eyring-Norrisova enačba.

9.1.2 Izvajanje končnih meritev

- Odstopanje vrednosti meritev je manjše v primeru analize prostora s krajšim odmevnim časom (po namestitvi absorberjev). Enako velja za oceno merilne negotovosti.
- Odstopanje vrednosti meritev je večje pri nižjih terčnih pasovih. Enako velja za oceno merilne negotovosti.
- Za merjenje odmevnega časa nižjih frekvenc bi bilo potrebno moč izvora še dodatno povečati, da bi hrup ozadja preglasili za 35 dB(A).
- Pri manjših prostorih z veliko pohištva je postavitve mikrofona in izvora zvoka ob upoštevanju priporočil standarda ISO 3382-2 o minimalnih odmikih od sten in drugih ovir relativno zahtevna.
- Pomembna je dobra organizacija in sistematičnost izvajanja meritev, sicer je postopek lahko pretirano zamuden.
- Med izvajanjem akustične ureditve je smiselno opravljanje vmesnih meritev, ki nas informirajo o pravilnosti izvedbe in napredku.

9.1.3 Rezultati končnih meritev

- S končnimi rezultati meritev odmevnega časa in ekvivalentne ravni hrupa v prostoru je v celoti potrjena hipoteza 5. (»Predpostavimo, da bo vnos zvočno absorpcijskih elementov v prostor občutno skrajšal odmevni čas in ekvivalentno raven hrupa v prostoru, v smeri doseganja zahtevanih optimalnih vrednosti določenih s tehnično smernico [20].«) Odmevni čas se je izrazito zmanjšal ob vnosu zvočno absorpcijskih elementov in dosegel vrednosti priporočene v tehnični smernici [20]. Prav tako se je ekvivalentna raven hrupa v prostoru po akustični ureditvi znižala za 2,5 dB, kar je v skladu s pričakovanji.
- Najbolj uspešno je bilo skrajšanje odmevnega časa na območju srednjih frekvenc in sicer za skoraj 44% (iz 0,92 s na 0,52 s)
- Vrednosti odmevnih časov so po ureditvi bolj enakomerne preko terčnih pasov. To lahko pripišemo enakomerni razporeditvi poroznih zvočnih absorberjev po prostoru in učinkovitem absorbiranju ravno najbolj problematičnega frekvenčnega območja (200 Hz – 5000 Hz).

- Vrednosti odmevnega časa so znotraj tolerančnega območja glede na optimalen odmevni čas za učilnice.
- Na frekvenčnem območju govora otrok so vrednosti odmevnega časa celo krajše od priporočene optimalne vrednosti za učilnice, kar je glede na vrsto aktivnosti v vrtcu (igra in druge neorganizirane dejavnosti) bolje.
- Iz vmesnih meritev (Grafikon 12) razberemo, da je s povečevanjem dodane absorpcijske površine v prostor vpliv na odmevni čas vedno manjši.

9.2 Prototipni akustični elementi

Pri pregledu lastnosti petih vrst prototipnih zvočno absorpcijskih elementov so preliminarно analizirane akustične lastnosti zvočno absorpcijskih elementov in njihova postavitve v prostoru (podpoglavje 9.2.1), poleg tega pa so obravnavane še druge tehnične in sociološke zahteve, relevantne pri vnosu zvočnih absorberjev v prostore vzgojno varstvenih ustanov (podpoglavje 9.2.2).

9.2.1 Akustične lastnosti zvočno absorpcijskih elementov

- Izbrani absorpcijski materiali učinkovito absorbirajo visoke in srednje frekvence, absorpcija zvoka nižjih frekvenc pa je nekoliko manjša, kar je pričakovano glede na porozen tip absorberjev.
- Prekrivanje absorpcijskega materiala (filca) z blagom ne kaže poslabšanja njegovega absorpcijskega koeficienta.
- Prekrivanje absorpcijskega materiala (kamene volne) s papirjem ne kaže večjega poslabšanja absorpcijskega koeficienta od predvidenega, kar je razvidno iz vmesnih meritev 1. faze po ureditvi (Grafikon 12). Vpliv je zaznan le pri visokih frekvencah (5000 Hz in več).
- Upoštevajoč zgornje trditve in specifiko okolja vzgojno varstvenih ustanov ter njenih uporabnikov lahko v celoti potrdimo hipotezo 3 (»Predpostavimo, da je filc primeren material za izdelavo zvočnih absorberjev z akustičnega vidika.«), saj se je tekom magistrskega dela filc izkazal kot akustično ustrezen material za izdelavo absorberjev.
- Pomembno je, da so absorpcijski elementi enakomerno razporejeni po prostoru. Umestitev elementov na le eno površino - strop se izkaže za premalo efektivno (Grafikon 12).
- Pri izdelavi absorpcijskih elementov je potrebno upoštevati, da je efektivna absorpcijska površina večja od dejanske površine elementov.
- Faktorji uporabljeni za določanje efektivne absorpcijske površine so eksperimentalno določeni na podlagi enega samega primera. Za dejansko uvedbo takih faktorjev bi bilo potrebno analizirati več prostorov pred in po vnosu absorpcijskih elementov.
- Za natančnejšo oceno absorpcijske zmožnosti vsakega posameznega elementa bi bilo potrebno izdelane akustične elemente testirati v odmevnici (standardiziranem izrazito odmevnem namenskem prostoru za določevanje koeficienta absorpcije). V tem primeru bi se napovedana in dejanska potrebna absorpcijska površina bolje ujemali, saj bi bilo upoštevano 3D absorbiranje zvoka.

9.2.2 Druge tehnične in sociološke lastnosti zvočno absorpcijskih elementov

- Elementi so načeloma higiensko ustrezni, so pralni oziroma je možno njihovo čiščenje, razen v primeru začasnih absorberjev, ki so namenjeni kratkotrajni uporabi.
- Ocenjujemo, da so vsi prototipni elementi primerni za vključevanje v pedagoško-kreativen proces ob upoštevanju omejitev iz poglavja 8.3.
- Cena akustične ureditve (5,50 €/m²) predstavlja približno četrtno finančnega vložka potrebnega za izvedbo ureditve s primerljivimi tržno dostopnimi akustičnimi elementi.
- Vsi zvočno absorpcijski elementi so snemljivi, zato je akustično klimo prostora možno po potrebi regulirati.
- Pred stalno namestitvijo zvočnih absorberjev v prostore vzgojno varstvenih ustanov je potrebna celovita presoja ustreznosti absorberjev s gradbeno-tehničnega in zdravstveno-higienskega stališča.

9.3 Psihofizičen odziv uporabnikov

- Analiza vprašalnika pokaže, da so vzgojiteljice obravnavanega vrtca mnenja, da je njihovo delovno mesto hrupno ter da hrup negativno vpliva na otroke.
- Zaposleni v vzgojno varstveni ustanovi se zavedajo problematike hrupnosti in jo želijo rešiti. Akustična ureditev prostorov igralnic je nujna rešitev, kar potrjuje tudi pravilnik [18], ki določa minimalne akustične zahteve v vrtcih, ki večinoma niso upoštevane.
- Razlika v izmerjeni spremembi ravni hrupa ne opiše zaznane spremembe v hrupnosti prostora, ki je izrazito večja. To pripišemo dejstvu, da je zaznavanje zvoka še vedno do neke mere subjektivno in dodatnemu vplivu Lombardovega refleksa.
- Primerjava akustično urejenega prostora z drugimi prostori vrtca pokaže očitno razliko v odmevnosti in splošnem zvočnem udobju znotraj prostora. Po akustični ureditvi enega prostora se šele izkaže, kako neprimerni so vsi ostali prostori, katere se je pred tem štelo za bolj ugodne iz akustičnega stališča.
- Vzgojiteljice, ki so se predhodno pritoževale nad hrupnostjo prostora, so po akustični ureditvi presenečene in zadovoljne. Iz analize psihofizičnega vpliva akustične ureditve na uporabnike razberemo pozitiven vpliv na njihovo razpoloženje, s čimer tudi delno potrdimo hipotezo 1 (»Predvidevamo da, dobra akustična ureditev prostorov pozitivno vpliva na razpoloženje in zdravje uporabnikov.«). Za celotno potrditev hipoteze bi bilo potrebno izvesti dolgotrajno raziskavo, saj se večina merljivih posledic akustičnega okolja na zdravje kaže šele po daljši izpostavljenosti visoki ravni hrupa.
- Zaposleni so zadovoljni tudi s pozicijo elementov in nevsiljivim izgledom absorberjev, katere lahko sami prilagodijo in okrasijo.
- Glede na priporočila za prostore vzgojno varstvenih ustanov [4] bi bilo morda smiselno preveriti, ali bi dodatno skrajšanje odmevnega časa za približno 0,1 s bistveno izboljšalo zvočno udobje.
- Iz zgornjih ugotovitev ter rezultatov končnih meritev (poglavje 9.1.3) je razvidno, da je akustično udobje prostorov vzgojno varstvenih ustanov možno izrazito izboljšati in lahko tako v celoti potrdimo tudi hipotezo 6 (»Domnevamo, da bodo rezultati meritev in rezultati subjektivne ocene zaposlenih pokazali, da je možno akustično udobje prostorov vzgojno varstvenih ustanov izrazito izboljšati.«).

9.4 Predlogi za nadaljnje delo in končne rešitve

Zaradi specifičnosti obravnavanih prostorov je pri akustični ureditvi igralnic potrebno upoštevati relevantne tehnične, zdravstvene in sociološke zahteve različnih področji (Preglednica 20). V okviru magistrskega dela smo se osredotočili predvsem na primarno področje, to je podrobnejšo analizo akustičnih lastnosti prototipnih absorberjev zvoka, pri čemer smo se vendarle zavedali in v največji možni meri upoštevali kriterije iz drugih področij.

Preglednica 20: Tehnične, zdravstvene in sociološke zahteve za akustično ureditev igralnic.

Zahteve, nanašajoče se na:		
Gradbene proizvode	Specifičnost prostorov vzgojno varstvenih ustanov	
	Pravna podlaga:	Drugi kriteriji:
Zakon o gradbenih proizvodih [45]	Pravilnik o normativih in minimalnih tehničnih pogojih za prostor in opremo vrtca [18]	cenovna ugodnost
		uporaba materiala v kreativne namene
Uredba 305/2011 [46]		
Tehnična smernica TSG-1-005:2012 [20]	Pravilnik o varnosti otrok [25]	uporaba materiala v pedagoške namene
	Zdravstveno-higienski režim v vrtcu [19]	
Smernica SZPV 412 [48]		estetičen izgled
Uredba REACH [47]		dostopnost materialov

Vsi potrebni materiali za izdelavo akustičnih elementov so enostavno dostopni na slovenskem trgu. Pri njihovi izbiri smo stremeli k čim manjši finančni investiciji. Iskali smo materiale, ki niso škodljivi za uporabnika, kljub temu da so podatki o kemijskih lastnostih materialov zelo skopi tudi v primeru že uveljavljenih gradbenih produktov na trgu. Ob izdelavi absorberjev smo se zavedali, da je zvočno absorpcijska materiala (filc in kameno volno) potrebno primerno zaščititi z vidika higiene in zdravja, poleg tega pa nismo želeli pretirano poslabšati njunih zvočno absorpcijskih lastnosti, zato smo za obloge izbrali vsaj delno za zvok prepustne materiale. Pri namestitvi zvočnih absorberjev smo v največji možni meri upoštevali pravilnike, ki obravnavajo prostore vzgojno varstvenih ustanov ter zakone s področja gradbeništva. Kljub temu da prototipni akustični elementi niso bili uradno testirani kot gradbeni produkt, predstavljajo zelo dobro izhodišče za končno rešitev problematike akustične ureditve prostorov vzgojno varstvenih ustanov.

Kot pomoč pri iskanju optimalne rešitve smo absorpcijske lastnosti prototipnih absorberjev zvoka primerjali s komercialnimi izdelki za absorpcijo zvoka, ki so trenutno razpoložljivi na tržišču (Preglednica 21). Za primerjavo smo izbrali kvalitetnejše izdelke na trgu in njihove lastnosti postavili ob bok lastnostim prototipnih absorberjev razvitih v sklopu magistrskega dela. Tržni produkti imajo zelo podobne akustične lastnosti kot naši prototipni absorberji, zato bi ob uporabi kateregakoli od izdelkov iz preglednice 21 za akustično ureditev določenega prostora morali namestiti elemente s primerljivo skupno površino.

Preglednica 21: Primerjava lastnosti prototipnih akustičnih elementov z akustičnimi proizvodi na trgu.

	prototipni absorpcijski elementi				absorpcijski elementi na tržišču		
vrsta absorberja	stropni "V" absorber	stenski absorberji	talni absorberji	začasni absorberji	Akustični strop - Perla OP 0.95 (Armstrong) [54]	Akustična jadra (Decibel) [55]	Plamafon - piramide 70 mm (Plamapur) [56]
absorpcija zvoka	α > 0,90 (na območju 500 Hz - 2000 Hz)						
sestava	kamena volna	filc	filc, tekstil	filc	mineralna volna	pena, tekstil	Poliuretan-ska pena
postavitev	strop	stena	tla	stena / strop	strop	stena /strop	stena /strop
požarna varnost	A1	/			A2-s1, d0	C-s2, d0	Samo-ugasljive
vsebnost kemikalij	/				razred E1-sproščanje formaldehida	/	kemijsko nevtralne
higiena	možno čiščenje in menjava ovoja	možno čiščenje/ pranje in menjava ovoja	možno čiščenje/ pranje in menjava ovoja	ob higienski neprimernosti se absorber zavrže	možno čiščenje	pralna tekstilna preobleka	/
kreativnost	možna okrasitev ovoja	možna okrasitev ovoja	možna okrasitev ovoja	barvanje, izrezovanje oblik, okrasitev..	/	/	/
cena	9,00 €/m ² cca.	5,50 €/m ² cca.	6,40 €/m ² cca.	1,60 €/m ² cca.	16,10 €/m ² + DDV + Montaža	90,00 €/m ² +DDV +Montaža*	12,02 €/m ² + Montaža

* Cena akustičnih jader je ocenjena na podlagi starejše ponudbe in se je lahko v vmesnem času spremenila.

V preglednici 21 so za primerjavo izbrane lastnosti akustičnih elementov, katere so po našem mnenju relevantne glede na specifično okolje vzgojno varstvenih ustanov. Razvidno je, da tudi proizvodi, ki so že uveljavljeni na tržišču, nimajo javno objavljenih podatkov o nekaterih pomembnih karakteristikah materialov, predvsem pa so pomanjkljivo navedene kemijske lastnosti.

S kreativnega in ekonomičnega vidika so prototipni absorberji bistveno primernejši. V primeru uporabe vseh petih tipov prototipnih absorberjev bi finančni vložek za akustično ureditev prostora brez cene montaže znašal približno 5,50 €/m², kar je manj kot polovica cene najcenejših produktov na trgu, poleg tega pa s prototipnimi absorberji zagotovimo bolj enakomerno razporeditev absorpcijske površine po prostoru.

Glede na zgornje ugotovitve in delo opravljeno v sklopu magistrskega dela je gotova potrditev ali ne potrditev hipoteze 7 (»Predvidevamo, da bodo končni predlagani akustični elementi ob upoštevanju vseh kriterijev s gradbeno-tehničnega, zdravstveno-higienskega, ekonomičnega in kreativnega vidika ustrezni za vnos v relevantno okolje.«) nemogoča, saj konkretna končna rešitev akustične ureditve prostorov vzgojno varstvenih ustanov še ni realizirana. V prihodnji fazi raziskav, ki pa presegajo obseg tega magistrskega dela, bi bilo potrebno testirati prototipne akustične elemente v skladu s standardi, ki jih določa Zakon o gradbenih proizvodih ter izdelati Poročilo o kemijski varnosti in po potrebi izdelke optimizirati. Končna rešitev mora izpolnjevati vse gradbeno-tehnične, zdravstveno-higienske, ekonomske ter pedagoško-kreativne zahteve.

10 ZAKLJUČEK

Pristop, uveden v magistrskem delu, predstavlja novost v celovitem obvladovanju problematike akustične ureditve prostorov vzgojno varstvenih ustanov in se lahko implicira v ostalih podobnih okoljih. Med izvajanjem izračunov, meritev ter akustične ureditve so bile upoštevane specifične namembnosti stavbe in njenih uporabnikov, zato je bila v ta namen tudi raziskana literatura in relevantne zakonske določbe ter pridobljeno subjektivno mnenje zaposlenih v ustanovi.

V sklopu magistrskega dela smo razvili nov sistem prototipnih zvočno absorpcijskih elementov, prilagojenih za uporabo v vzgojno varstvenih ustanovah. Pred pričetkom dela smo si zastavili cilje in postavili hipoteze (Poglavje 2), ki so bile tekom magistrskega dela v večini potrjene (Poglavje 9).

Analiza obstoječega stanja, ki je obsegala preliminarne meritve odmevnega časa in pogovore z zaposlenimi je potrdila, da je akustična ureditev prostorov vzgojno varstvenih ustanov nezadovoljiva. Izmerjeni odmevni časi so bili tudi daljši od 1,0 s, kar je izrazito preveč, saj je za prostore takih dimenzij in pri tej namembnosti priporočen odmevni čas pod 0,6 s. Poleg tega so nezadovoljstvo nad zvočnim udobjem prostorov izrazili tudi zaposleni vrtca.

Za napovedi akustičnih lastnosti prostora (pred in po ureditvi) je bil v sklopu tega magistrskega dela izdelan računalniški program ROC, namenjen izračunu odmevnega časa. Program je bil uporabljen za napoved potrebne absorpcijske površine v prostoru za doseg optimalnega odmevnega časa, določenega s tehnično smernico [20], ki obravnava akustično ureditev učilnic. (Pri tem naj omenimo, da so bile tehnične smernice za učilnice uporabljene kot najboljši približek zaradi slabo urejene zakonodaje na področju vzgojno varstvenih ustanov, za katere tovrstne smernice ne obstojijo. Ugotavljamo, da bi bilo smiselno vzgojno varstvene ustanove obravnavati ločeno znotraj tehnične smernice, saj se v igralnicah za razliko od učilnic izvaja drugačen program, predvsem manj usmerjenih aktivnosti, hkrati pa je pedagoški načrt mnogo bolj razgiban. Predvidevamo, da bi bili optimalni odmevni časi takih prostorov lahko nekoliko krajši.)

Akustična ureditev izbrane igralnice je bila izvedena z umestitvijo petih tipov prototipnih zvočno absorpcijskih elementov skupne površine 19,85 m². Akustični elementi so bili izdelani tako, da so bile v največji možni meri upoštevane omejitve in zahteve vzgojno varstvenih ustanov. Pri izbiri materialov za izdelavo akustičnih elementov smo stremeli k temu, da naj bodo končni izdelki finančno dostopni, varni za otroke in nemoteči v prostoru, po možnosti pa tudi vključeni v pedagoški proces. Filc se je pri izbiri primernega materiala izkazal za zelo dobro rešitev, saj je cenovno ugoden in enostaven za oblikovanje (rezanje, barvanje...), njegove odlične zvočno absorpcijske lastnosti pa so potrdile tako meritve absorpcijskega koeficienta v impedančni cevi kot tudi meritve odmevnega časa obravnavanega prostora po akustični ureditvi. Za dokončno potrditev ustreznosti izbranega materiala bi bila pred stalnim vnosom prototipnih zvočnih absorberjev v prostor potrebna celostna analiza elementov z gradbeno-tehničnega vidika (kar presega obseg tega magistrskega dela).

Po umestitvi akustičnih absorberjev se je skladno z računsko napovedjo akustična klima prostora bistveno izboljšala, kar potrjujejo rezultati meritev. Ekvivalentna raven hrupa v prostoru se je znižala za 2,5 dB, izmerjen pa je bil tudi izrazit padec odmevnega časa, ki je

pomemben kazalec akustičnih lastnosti prostora. Na območju srednjih frekvenc se je odmevni čas po akustični ureditvi skrajšal kar za 44% in sicer iz 0,92 s na samo 0,52 s. V primerjavi s stanjem pred ureditvijo so vrednosti odmevnih časov po akustični ureditvi znotraj tolerančnega območja, določenega s tehnično smernico [20] in bistveno bolj enakomerno razporejene preko terčnih frekvenčnih pasov. Poleg rezultatov akustičnih meritev je ključnega pomena pozitiven odziv uporabnikov prostora po namestitvi zvočnih absorberjev. Zaposleni so opazili izrazito izboljšavo v zaznani hrupnosti prostora, ki je bila predvsem očitna v primerjavi z ostalimi, akustično neobdelanimi igralnicami.

V sklopu magistrskega dela smo na podlagi primera igralnice 8 pokazali, da je akustično klimo vzgojno varstvenih ustanov mogoče enostavno in z majhnimi stroški izboljšati in s tem pozitivno vplivati na počutje uporabnikov prostora. Zaključimo lahko, da je opravljeno delo uspešno in rezultati pozitivni, za implementacijo naših ugotovitev v relevantno okolje pa bi bila potrebna nadaljnja analiza ter certificiranje uporabljenih materialov in izdelanih akustičnih elementov.

VIRI

- [1] Rossing, T.D. 2007. Springer handbook of acoustics. New York, Springer Science+Business Media: str. 1, 305-309, 387.
- [2] Jacobsen, F., Poulsen, T., Rindel, J.H., Gade, A.C., Ohlrich, M. 2009. Fundamentals of acoustics and noise control. Denmark, Technical University of Denmark: str. 1, 4, 15-19, 103-112.
- [3] Prislán, R. 2013. Modalni statistični pristop pri opisu zvočnega polja. Elektrotehniški vestnik 80 (4): str. 184-188.
- [4] Mommertz, E. 2008. Acoustics and Sound Insulation. Munich, Institut für Internationale Architektur-Dokumentation: str. 7-15, 68, 71.
- [5] Howard, D., Angus, J. 2009. Acoustics and Psychoacoustics. Forth Edition. Oxford, Elsevier Ltd.: str. 2-3, 5-8, 14-18, 339-344.
- [6] Everest, F.A., Pohlmann, K.C. 2009. Master Handbook of Acoustics. Fifth Edition. The McGraw-Hill Companies, Inc.: str. 1-12, 21-22, 33, 46, 55-56, 95-101, 151-170, 179-218.
- [7] Ermann, M. 2015. Architectural acoustics illustrated. New Jersey. John Wiley & Sons, Inc.: str. 5-6, 14, 17, 19-20, 26, 31, 34, 36, 60-65.
- [8] Pulkki, V., Karjalainen, M. 2015. Communication acoustics: an introduction to speech, audio and psychoacoustics. West Sussex, John Wiley & Sons Ltd. : str. 23-24, 34, 401-404.
- [9] Meyer, J. 2009. Acoustics and the Performance of Music, Manual for Acousticians, Audio Engineers, Musicians, Architects and Musical Instruments Makers. Fifth Edition. New York, Springer Science+Business Media, LLC: str. 6-7.
- [10] Meritve v prostorski akustiki. <http://www.mk3.si/blog/meritve-v-prostorski-akustiki> (Pridobljeno 24. 6. 2017.)
- [11] Sound & Hearing. 2007. Widex A/S: str. 18-21.
- [12] Pravilnik o varovanju delavcev pred tveganji zaradi izpostavljenosti hrupu pri delu (Uradni list RS, št. 17/06, 18/06 – popr. in 43/11 – ZVZD-1).
- [13] Direktiva Evropskega parlamenta in Sveta 2003/10/ES o minimalnih zahtevah za varnost in zdravje v zvezi z izpostavljenostjo delavcev fizikalnim dejavnikom (hrup).
- [14] Bilban, M. 1999. Medicina dela. Ljubljana, Zavod za varstvo pri delu: str. 381-400.
- [15] Cowan, J.P. 2016. The effects of sound on people. West Sussex, United Kingdom. John Wiley & Sons, Inc.: str. 25, 57-72, 82-97, 140-156.
- [16] Kacjan Žgajnar K. 2016. Vpliv hrupa v vrtcu na stres pri vzgojnem osebjem v predšolskih oddelkih. Doktorsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Medicinska fakulteta. (samozaložba K. Kacjan Žgajnar): 108 str.
- [17] Bilban, M. 2016. Škodljivi učinki hrupa na zdravje. 3. Seminar Hrup in vibracije. Ljubljana, Slovensko društvo za akustiko: str. 1-18.
- [18] Pravilnik o normativih in minimalnih tehničnih pogojih za prostor in opremo vrtca (Uradni list RS, št. 73/00, 75/05, 33/08, 126/08, 47/10, 47/13, 74/16 in 20/17).

- [19] Strah, B. 2005. Zdravstveno-higienski režim v vrtcu. Ljubljana. <http://vrtec-podgradom.org/zdravstveno-higienski-rezim-v-vrtcu/> (Pridobljeno 25. 5. 2017.)
- [20] Tehnična smernica TSG-1-005:2012 : Zaščita pred hrupom v stavbah: str. 25-29.
- [21] ANSI/ASA S12.60-2010/Part 1 American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools. 2010. Acoustical Society of America.
- [22] Klatte, M., Lachmann, T., Meis, M. 2010. Effects of noise and reverberation on speech perception and listening comprehension of children and adults in a classroom-like setting. Noise Health, 12: 270-82. <http://www.noiseandhealth.org/text.asp?2010/12/49/270/70506> (Pridobljeno 18. 6. 2017.)
- [23] ISO 3382-2:2008: Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 2: Reverberation time in ordinary rooms.
- [24] ISO 10534-2: Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Transfer-function method.
- [25] Pravilnik o varnosti otrok. Ljubljana. <http://vrtec-podgradom.org/pravilnik-o-varnosti-otrok/> (Pridobljeno 16. 6. 2017.)
- [26] McAllister, A., Granqvist, S., Sjölander, P., Sundberg, J. 2007. Child Voice and Noise: A Pilot Study of Noise in Day Cares and the Effects on 10 Children's Voice Quality According to Perceptual Evaluation. Journal of Voice 23, 5: 587–593.
- [27] Grebennikov, L. 2006. Preschool teachers' exposure to classroom noise. International Journal of Early Years Education 14: 1, 35-44.
- [28] Maxwell, L. E., Ewans, G.W. 2000. The effects of noise in pre-school children's pre-reading skills. Journal of Environmental Psychology 20: str. 91-97.
- [29] Södersten, M., Granqvist, S., Kammarberg, B., Szabo, A. 2002. Vocal Behavior and Vocal Loading Factors for Preschool Teachers at Work Studied with Binaural DAT Recordings. Journal of Voice 16, 3: 356-371.
- [30] Perego, L., Bertoni, G., Goglio, F., Giovannelli, G. 1996. Children and noise. European Journal of Epidemiology 12: 549-550.
- [31] Voss, P. 2005. Noise in children's daycare centres. European Agency for Safety and Health at Work: 23-25.
- [32] Picard, M. 2004. Characteristics of the Noise, Reverberation Time and Speech-to-Noise Ratio Found in Day-Care Centers. Canadian Acoustics 32, 3: 30-31.
- [33] Hadzi-Nikolova, M., Mirakovski, D., Zdravkovska, M., Angelovska, B., Doneva, N., 2013. Noise Exposure of School Teachers – Exposure Levels and Health Effects. Archives of Acoustics 38, 2: 259-264.
- [34] Kalužnaja, D., Lakiša, S. 2016. Preschool personnel exposure to occupational noise. Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B 70, 5: 300-307.
- [35] Hygge, S. 2003. Classroom Experiments on the Effects of Different Noise Sources and Sound Levels on Long-term Recall And Recognition in Children. Applied Cognitive Psychology 17: 895-914.

- [36] L'Espérance, A., Boudreau, A., Gariépy, F., Bacon, P. 2006. Noise Redution in day-care centres by reducing reverberation time, Analyses and case studies. Montreal. IRSST. Str. 17-21, 54.
- [37] Gerhardsson, L. 2013. Noise Disturbances in Daycare Centers Before and After Acoustical Treatment. *Journal of Environmental Health* 75, 7: 36-40.
- [38] Cox, T. J., D'Antonio, P. 2009. Acoustic absorbers and diffusers: theory, design, and application. 2nd edition. Oxon. Taylor & Francis: str. 85, 156-174, 440-444.
- [39] Repše, A. 2017. Zdravstveno-higienski režim v vrtcu, Akustična ureditev prostorov, vrtca. Osebna komunikacija (junij 2017).
- [40] Vzgojiteljice v vrtcu: Fekonja Bertoncej, B., Slatinek, A., Preskar, B., Modic, N. 2017. Akustična ureditev prostorov vrtca. Osebna komunikacija (junij 2017).
- [41] Kunič, R. 1986. Akustika stavbe, prostora in akustična izolacija. Diplomsko delo. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba R. Kunič): 103 str.
- [42] Pajek, L. 2015. Integrirana ocena udobja igralnic v vrtcih. Magistrsko delo. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba L. Pajek): 80 str.
- [43] Kacjan Žgajnar, K., Kučec, A., Fink, R., Oder, M., Bilban, M. 2009. Hrup kot dejavnik tveganja na delovnem mestu vzgojiteljev. Raziskovalni dan Zdravstvene fakultete: str. 103-110.
- [44] Kacjan Žgajnar, K., Fink, R., Oder, M., Kučec, A., Bilban, M. 2009. Hrup kot dejavnik tveganja na delovnem mestu vzgojiteljev. Raziskovalni dan Zdravstvene fakultete: str. 111-118.
- [45] Zakon o gradbenih proizvodih (ZGPro-1) (Uradni list RS, št. 82/13).
- [46] Uredba (EU) št. 305/2011 Evropskega parlamenta in sveta o določitvi usklajenih pogojev za trženje gradbenih proizvodov.
- [47] Uredba (ES) št. 1907/2006 Evropskega parlamenta in sveta o registraciji, evalvaciji, avtorizaciji in omejevanju kemikalij (REACH).
- [48] Smernica SZPV 412: Uporaba gorljivih/negorljivih gradbenih materialov. Slovensko združenje za požarno varstvo, izdaja 01/12: str. 18-19.
- [49] Hajduković, M., Bajde, M., Knez, N. 2000. Preizkušanje požarnih lastnosti gradbenih materialov. Razvojno raziskovalna naloga. Ljubljana, RS Ministrstvo za obrambo: str. 23.
- [50] Lombardov refleks. https://en.wikipedia.org/wiki/Lombard_effect (Pridobljeno 27. 6. 2017.)
- [51] Kunič, Z. 2017. Komentar na analizo vprašalnikov in psihofizični odziv uporabnikov. Osebna komunikacija (2. 8. 2017.)
- [52] ISO 354: Acoustics – Measurements of sound absorption in a reverberation room.
- [53] KnaufInsulation – Kamena volna Tehnični list.
<http://www.knaufinsulation.si/sites/si.knaufinsulation.net/files/kamenaPDF12.pdf>
(Pridobljeno 20. 7. 2017.)

- [54] Armstrong – Akustični strop Perla OP 0.95.
http://www.armstrong.si/commclgeu/eu1/sl/si/ceiling_item_detail.asp?itemId=3308
(Pridobljeno 24. 7. 2017.)
- [55] Decibel – Akustična jadra.
<http://www.decibel.si/prostorska-akustika/produkti/absorberji-zvoka/absorberji-iz-penastih-materialov#Akusti%C4%8Dna%20jadra> (Pridobljeno 24. 7. 2017.)
- [56] Plama-pur – Plamafon. <http://www.plama-pur.si/uploads/documents/plamafon.pdf>
(Pridobljeno 24. 7. 2017.)
- [57] Kacjan Žgajnar, K., Galičič, A., Zoran, U., Pajek, L., Dovjak, M. 2013. Analysis of sanitary-technical and hygienic conditions of Slovenian kindergartens and proposed measures. International Journal of Sanitary Engineering Research, Vol. 7, No. 1: str. 4-20.

SEZNAM PRILOG

PRILOGA A: PRIMER IZRAČUNA ODMEVNEGA ČASA S PROGRAMOM EXEL

PRILOGA B: KNJIŽNICA MATERIALOV S PRIPADAJOČIMI ABSSORPCIJSKIMI MATERIALI

PRILOGA C: VPRAŠALNIK

PRILOGA D: TEHNIČNI LIST: FINSOL H3270 500-25

PRILOGA E: TEHNIČNI LIST: KNAUF INSULATION DP-5

RAČUN ODMEVNEGA ČASA V UČILNICI

stran 1/2

PRILOGA A: PRIMER IZRAČUNA ODMEVNEGA ČASA S PROGRAMOM EXEL

Vhodni podatki:			
Dimenzije prostora			
širina (m)	7.63		
dolžina (m)	7.61	volumen prostora (m³)	216.0
višina (m)	3.72	volumen prostora (m³)*	194.4
relativna vlažnost zraka		*predpostavi se 10% zasedenost volumna z opremo (omare, mize, stoli...)	
RH (%)	50		
temperatura prostora			
T (°C)	20		
površine v prostoru			
število različnih materialov	20		
vrsta materiala:			
1. material:	površina (m²)	124	omet - apneno mavčni omet
2.material:	površina (m²)	37.6	les - obloga iz vezanih plošč, 1cm
3. material:	površina (m²)	58	tla - pluta, linolet ali gumjaste plošče na trdni podlagi
4. material:	površina (m²)	17.1	omet - apneno mavčni omet
5. material:	površina (m²)	15	zasteklitve - običajno steklo za okna
6. material:	površina (m²)	7.5	zaves - ravno obešanje
7. material:	površina (m²)	2	tla - pluta, linolet ali gumjaste plošče na trdni podlagi
8. material:	površina (m²)	4.6	les - lesena obloga - 9.5-12.7mm, 5-10cm zračnega prostora
9. material:	površina (m²)	10	les - vezane plošče/masiven les, zračni prostor
10. material:	površina (m²)	5	volne in pene - poliuretanska pena 2.5cm
11. material:	površina (m²)	11	zaves - težek velur (0.61 kg/m²) ravno obešen
12. material:	površina (m²)	12	sedišča, prazna - leseni ali kovinski stoli
13. material:	površina (m²)	1.5	bombažne zaves nabrane na 3/4 površine
14. material:	površina (m²)	3	razno -kartonske škatle za jajca
15. material:	površina (m²)	3.5	ljudje (2,7 oseb/m2)
16. material:	površina (m²)	4	filc 4cm na 0cm odnika
17. material:	površina (m²)	7.5	filc 4cm na 20cm odnika
18. material:	površina (m²)	6.25	kamena volna
19. material:	površina (m²)	2	filc 8cm na 0cm odnika
20. material:	površina (m²)	5	filc 4cm na 20cm odnika
dodatni opis:			
		strop, stene nad leseno oblogo	
		lesena obloga po stenah	
		tla	
		stene med okni	
		okna	
		zaves nad okni	
		stenska obloga iz plute	
		obloga pred radiatorji - pod okni	
		razne omare..	
		blazine na tleh, igrače	
		ležalniki	
		stoli, mize, odlagalne površine	
		preproga, obešena čez omaro	
		škatle za igrače, material	
		ljudje	
		začasni absorberji	
		začasni absorberji	
		stropni absorberji	
		talne blazine	
		stenski absorberji	

RAČUN ODMEVNEGA ČASA V UČILNICI

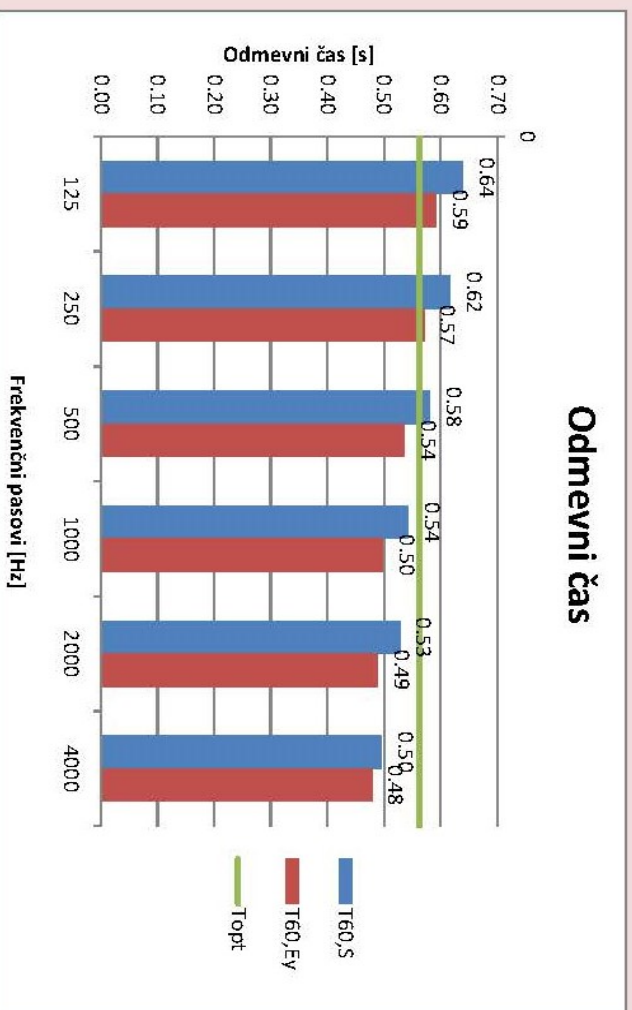
stran 2/2

Rezultati:

odmevni čas [s]	frekvenčni pasovi [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
$T_{60,S}$	0,64	0,62	0,58	0,54	0,53	0,50
$T_{60,Ey}$	0,59	0,57	0,54	0,50	0,49	0,48

T_{opt}	0,56 s
$\bar{\alpha}_{skupaj}$	0,16

Odmevni čas



Sabinaova enačba:

$$T_{60,S} = \frac{0,163 \cdot V}{A + (4mV)}$$

Eyring-Norrisova enačba:

$$T_{60,Ey} = \frac{0,163 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}) + (4mV)}$$

 $T_{60,S}$... odmevni čas izračunan po Sabiniovi enačbi [s] $T_{60,Ey}$... odmevni čas izračunan po Eyring-Norrisovi enačbi [s] V ... volumen prostora [m^3] A ... ekvivalentna absorpcijska površina prostora [m^2] S ... vse površine v prostoru [m^2] $\bar{\alpha}$... srednji koeficient absorpcije vseh površin v prostoru m ... konstanta zvočne absorpcije zraka [m^{-1}]

- (2) Sabinaova enačba je ustrežnejša pri manjši absorpciji zvoka v prostoru (ko je srednji koeficient absorpcije zvoka manjši od 0,2), Eyringova pa pri večji.

Učilnice in predavalnice

- (1) Optimalna vrednost odmevnega časa T_{opt} v polno zasedenih učilnicah in predavalnicah je glede na njihovo prostornino V določena z naslednjo enačbo:

$$T_{opt} = 0,32 \cdot \log V - 0,17$$

Vrednost odmevnega časa, določena po tej enačbi, se nanaša na srednjo vrednost odmevnega časa v oktavnih frekvenčnih pasovih 500 Hz in 1000 Hz.

PRILOGA B: KNJIŽNICA MATERIALOV S PRIPADAJOČIMI ABSSORPCIJSKIMI MATERIALI

absorpcijski koeficient α različnih materialov [38]						
material	frekvenčni pasovi [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
zavese						
zavese - lahek velur (0,338 kg/m ²) ravno ob steni	0.04	0.05	0.11	0.18	0.30	0.35
zavese -srednje težek velur (0,475 kg/m ²) ravno obešen	0.05	0.07	0.13	0.22	0.32	0.35
zavese -srednje težek velur (0,475 kg/m ²) nabran na polovico površine	0.07	0.31	0.49	0.75	0.70	0.60
zavese -težek velur (0,61 kg/m ²) ravno obešen	0.05	0.12	0.35	0.48	0.38	0.36
zavese -težek velur (0,61 kg/m ²) nabran na polovico površine	0.14	0.35	0.55	0.77	0.70	0.60
variacije obešanja						
zavese -ravno obešanje	0.04	0.16	0.19	0.17	0.20	0.25
zavese -nabrano na polovico površine	0.15	0.25	0.30	0.28	0.35	0.40
zavese -nabrano na 40% površine	0.19	0.31	0.35	0.34	0.44	0.50
zavese nagubane ob steni	0.05	0.15	0.35	0.40	0.50	0.50
bombažne zavese 0,475 kg/m²						
bombažne zavese nabrane na 7/8 površine	0.03	0.12	0.15	0.27	0.37	0.42
bombažne zavese nabrane na 3/4 površine	0.40	0.23	0.40	0.57	0.53	0.40
bombažne zavese nabrane na 1/2 površine	0.70	0.37	0.49	0.81	0.65	0.54
preproga						
preproge - težka preproga, na betonu	0.02	0.06	0.14	0.37	0.60	0.65
preproge - težka preproga, na penati gumi	0.08	0.24	0.57	0.69	0.71	0.73
preproge - nitna preproga na debeli podlagi filca	0.07	0.25	0.50	0.50	0.60	0.65
preproge - tkana volnena preproga, z 2.4mm visokimi nitmi (1.2kg/m ²), brez podloge	0.10	0.16	0.11	0.30	0.50	0.47
preproge - tkana volnena preproga, z 6.4mm visokimi nitmi (1.4kg/m ²), brez podloge	0.15	0.17	0.12	0.32	0.52	0.57
preproge - tkana volnena preproga, z 9.5mm visokimi nitmi (2.3kg/m ²), brez podloge	0.17	0.17	0.21	0.50	0.63	0.83
preproge - čopasta preproga (1.4kg/m ²), brez podloge	0.04	0.08	0.17	0.33	0.59	0.79
preproge - čopasta preproga (1.4kg/m ²), s podlogo (3.0kg/m ²)	0.10	0.40	0.62	0.70	0.63	0.88
preproge - volnena preproga s podlogo 16mm	0.20	0.25	0.35	0.40	0.50	0.75
preproge - volnena preproga brez podloge na betonu	0.09	0.08	0.21	0.26	0.27	0.37
preproge - žična preproga	0.05	0.05	0.10	0.20	0.45	0.65
preproge - tanka preproga na betonu	0.02	0.04	0.08	0.20	0.35	0.40

tla						
tla - lesena/linolej/gumjasta tla	0.02	0.04	0.05	0.05	0.10	0.05
tla - parket na betonski podlagi	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07
tla - les na trdni podlagi	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02
tla - lesena tla	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
tla - lesena tla nad večjim zračnim prostorom	0.40	0.30	0.20	0.17	0.15	0.10
tla - beton	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
tla - linolej, asfaltne plošče, plošče iz plute na betonu	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
tla - pluta, linolej ali gumjaste plošče na trdni podlagi	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02
tla - 2.5 mm plute na trdni podlagi	0.05	0.10	0.20	0.55	0.60	0.55
tla - skrilavec	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
gledališka sedišča, prazna						
gledališka sedišča, prazna - Beranekove vrednosti	0.19	0.37	0.56	0.67	0.61	0.59
gledališka sedišča, prazna - moderna sedišča 0.9m med vrstami	0.34	0.46	0.64	0.71	0.77	0.85
gledališka sedišča, prazna - en tip sedišča, 0,8m med vrstami	0.29	0.39	0.61	0.74	0.83	0.88
gledališka sedišča, prazna - en tip sedišča, 0,9m med vrstami	0.25	0.35	0.58	0.70	0.78	0.84
gledališka sedišča, prazna - en tip sedišča, 1,0m med vrstami	0.23	0.34	0.52	0.65	0.73	0.75
gledališka sedišča, prazna - oblazinjeno sedišče	0.45	0.60	0.73	0.80	0.75	0.64
gledališka sedišča, prazna - močno oblazinjeno sedišče	0.44	0.60	0.77	0.89	0.82	0.70
gledališka sedišča, prazna - oblazinjeno sedišče, usnjeno	0.40	0.50	0.58	0.61	0.58	0.50
sedišča, zasedena						
sedišča, zasedena - poslušalci na lesenem sedišču (1/m ²)	0.16	0.24	0.56	0.69	0.81	0.78
sedišča, zasedena -poslušalci na lesenem sedišču (2/m ²)	0.24	0.40	0.78	0.98	0.96	0.87
sedišča, zasedena -orkester z inštrumenti (1.5m ² /osebo)	0.27	0.53	0.67	0.93	0.87	0.80
sedišča, zasedena -lesena klop (cerkvena) - 100% zasedenost	0.57	0.61	0.75	0.86	0.91	0.86
sedišča, zasedena -lesen stol - 100% zasedenost	0.60	0.74	0.88	0.96	0.93	0.85
sedišča, zasedena -lesena klop (cerkvena) - 75% zasedenost	0.46	0.56	0.65	0.75	0.72	0.62
sedišča, prazna - leseni ali kovinski stoli	0.15	0.19	0.22	0.39	0.38	0.30
ljudje (2,7 oseb/m ²)	0.23	0.44	0.95	1.00	1.00	1.00
razno						
razno - površina vode v bazenu	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
razno -marmorne ali steklene ploščice	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
razno -masivna lesena vrata	0.14	0.10	0.06	0.08	0.10	0.10
razno -maska ventilacijskega jaška	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
razno -kartonske škatle za jajca	0.01	0.07	0.43	0.62	0.51	0.70

les						
les - obloga iz vezanih plošč, 1cm	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11
les - iverne plošče - 22mm, 50mm votlina z mineralno volno	0.12	0.04	0.06	0.05	0.05	0.05
les - vezane plošče/masiven les, zračni prostor	0.32	0.43	0.12	0.07	0.07	0.11
les - vlaknena plošča na trdi podlagi	0.05	0.10	0.15	0.25	0.30	0.30
les - vlaknena plošča, 25mm zračnega prostora	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
les - lesena obloga - 9.5-12.7mm, 5-10cm zračnega prostora	0.30	0.25	0.20	0.17	0.15	0.10
les - les, 50mm	0.01	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04
beton						
beton - grob beton	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.07
beton - gladek, nebarvan beton	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05
beton - gladek, barvan beton	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
beton - betonski blok/zidak, grob	0.36	0.44	0.31	0.29	0.39	0.25
beton - betonski blok/zidak, barvan	0.10	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
beton - porast betonski zidak, brez površinske obdelave (400-800kg/m)	0.05	0.05	0.05	0.08	0.14	0.20
beton - beton-klinker brez obdelave (800kg/m)	0.10	0.20	0.40	0.60	0.50	0.60
zidaki						
zidaki - neglazirana opeka	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
zidaki - opečni zid, barvan	0.05	0.04	0.02	0.04	0.05	0.05
zidaki - gladek(izravnani?) opečni zid, barvan	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
zidaki - neglazirana opeka, barvana	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
zidaki - gladek opečni zid, nebarvan	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
zidaki - gladek opečni zid z poglobljenimi fugami 10mm	0.08	0.09	0.12	0.16	0.22	0.24
zidaki - betonski blok (cement+žlindra)	0.20	0.30	0.60	0.60	0.50	0.50
omet						
omet - apneno mavčni omet	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
omet - barvan omet	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
omet - omet s tapeto	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.08
omet - omet (gips/apno) na letvah, gladek	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03
omet - omet na letvah/čepih, zračni prostor	0.30	0.10	0.10	0.05	0.04	0.05
omet - omet (gips/apno) na zidakih ali ploščicah, gladek	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05
omet - omet (gips/apno) na trdi podlagi, gladek	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.05
omet - akustični omet	0.30	0.35	0.50	0.70	0.70	0.70
omet - akustični omet 40mm	0.31	0.55	0.84	0.78	0.71	0.54
omet - akustični omet 68mm	0.47	0.74	0.76	0.65	0.62	0.49
mavčne plošče						
mavčne plošče - gips plošče pritrjene s čepi, 12,7mm	0.29	0.10	0.05	0.04	0.07	0.09
mavčne plošče - mavčne plošče na okvirju, 9.5mm, 10cm zračnega prostora	0.11	0.13	0.05	0.03	0.02	0.03

mavčne plošče - mavčne plošče na okvirju, 9.5mm, 10cm zračnega prostora z mineralno volno	0.28	0.14	0.09	0.06	0.05	0.05
mavčne plošče - mavčne plošče na okvirju, 13mm, 10cm zračnega prostora	0.08	0.11	0.05	0.03	0.02	0.03
mavčne plošče - mavčne plošče na okvirju, 13mm, 10cm zračnega prostora z mineralno volno	0.30	0.12	0.08	0.06	0.06	0.05
mavčne plošče - mavčne plošče na okvirju, 2x13mm, 5cm zrač. prostora z min. volno, barvana površ.	0.15	0.10	0.06	0.04	0.04	0.05
zasteklitve						
zasteklitve - običajno steklo za okna	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
zasteklitve - enojna zasteklitev 3-4mm	0.20	0.15	0.10	0.07	0.05	0.05
zasteklitve - enojna zasteklitev >4mm	0.10	0.07	0.04	0.03	0.02	0.02
zasteklitve - enojna zasteklitev 3mm	0.08	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02
zasteklitve - dvojna zasteklitev 2-3mm, 1cm zračnega prostora	0.10	0.07	0.05	0.03	0.02	0.02
zasteklitve - dvojna zasteklitev 2-3mm, >3cm zračnega prostora	0.15	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02
zasteklitve - velika zasteklitev, težko steklo	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
volne in pene						
volne in pene - steklena vlakna 2.5mm, trda podlaga	0.08	0.25	0.45	0.75	0.75	0.65
volne in pene - steklena vlakna 2.54cm 24-48kg/m	0.08	0.25	0.65	0.85	0.80	0.75
volne in pene - steklena vlakna 2.5cm, zračni prostor 2.5cm	0.15	0.55	0.80	0.90	0.85	0.80
volne in pene - steklena vlakna 5cm, trdna podlaga	0.21	0.50	0.75	0.90	0.85	0.80
volne in pene - steklena vlakna 7.5cm, trdna podlaga	0.35	0.65	0.80	0.90	0.85	0.80
volne in pene - steklena vlakna 10cm, trdna podlaga	0.45	0.90	0.95	1.00	0.95	0.85
volne in pene - mineralna volna 5cm (40kg/m ³), lepljena na podlago, neobdelana	0.15	0.70	0.60	0.60	0.85	0.90
volne in pene - mineralna volna 5cm (40kg/m ³), lepljena na podlago, s tankoslojnim ometom	0.15	0.70	0.60	0.60	0.75	0.75
volne in pene - mineralna volna 5cm (70kg/m ³), 30cm odmaknjena od stene	0.70	0.45	0.65	0.60	0.75	0.65
volne in pene - lesena volna 5cm v malti	0.08	0.17	0.35	0.45	0.65	0.65
volne in pene - paneli iz steklenih vlaken 5.1cm, v plastičnem ovoju, prekriti s perforirano kovino	0.33	0.79	0.99	0.91	0.76	0.64
volne in pene - steklena vlakna 5.1cm 24-48kg/m ³	0.17	0.55	0.80	0.90	0.85	0.80
volne in pene - akustične plošče 12,7mm	0.07	0.21	0.66	0.75	0.62	0.49
volne in pene - akustične plošče 19mm	0.09	0.28	0.78	0.84	0.73	0.64
volne in pene - poliuretanska pena 2.5cm	0.16	0.25	0.45	0.84	0.97	0.87
volne in pene - flis, 10cm ovčje volne	0.47	0.86	1.00	0.94	0.96	1.02

balast						
balast - drobljenec 3.18cm, 15.2cm visoko nasutje	0.19	0.23	0.43	0.37	0.58	0.62
balast -drobljenec 3.18cm, 30.5cm visoko nasutje	0.27	0.58	0.48	0.54	0.73	0.63
balast -drobljenec 3.18cm, 45.7cm visoko nasutje	0.41	0.53	0.64	0.84	0.91	0.63
balast -drobljenec 0.64cm, 15.2cm visoko nasutje	0.22	0.64	0.70	0.79	0.88	0.72
mikroperforirani absorberji						
mikroperforirani absorberji - 4cm votline	0.08	0.27	0.70	0.35	0.11	0.04
mikroperforirani absorberji - 40cm votline	0.64	0.56	0.41	0.28	0.13	0.06
testirani materiali						
filc 8cm na 20cm odmika	0.73	0.95	0.89	0.92	0.95	0.99
filc 4cm na 20cm odmika	0.78	0.99	0.91	0.80	0.83	0.96
filc 8cm na 0cm odmika	0.55	0.58	0.81	0.97	0.97	0.99
filc 4cm na 0cm odmika	0.48	0.29	0.38	0.74	0.92	0.96
filc 8cm na 20cm odmika + papir	0.84	0.93	0.87	0.76	0.72	0.69
drugo						
kamena volna	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

PRILOGA C: VPRAŠALNIK

Vprašalnik: Akustično okolje v vzgojno varstveni ustanovi				
I. OSEBNI PODATKI				
za začetek vas prosim za nekaj osebnih podatkov, katere izpolnete v prosta polja.				
spol				
starost				
delovni čas				
delovna doba v vrtcu				
starostna skupina učencev				
število učencev v skupini				
II. VPRAŠALNIK O HRUPU				
Spodaj je navedenih 22. trditev na temo hrupa v delovnem okolju in njegovih učinkov na zdravje. Vprašalnik izpolnite s pomočjo 4 stopenske lestvice (se strinjam, večinoma se strinjam, večinoma se ne strinjam, se ne strinjam) tako, da označite kvadratega, ki najbolj ustreza vašemu občutku ali mnenju.				
	se strinjam	večinoma se strinjam	večinoma se ne strinjam	se ne strinjam
1. moje delovno okolje je hrupno	☐	☐	☐	☐
2. hrup me med delom moti	☐	☐	☐	☐
3. hrup mi otežuje moje delo	☐	☐	☐	☐
4. zaradi hrupa imam težave s komunikacijo (potrebno je privzdigniti glas)	☐	☐	☐	☐
5. bolje slišim ko nisem na delovnem mestu	☐	☐	☐	☐
6. sem občutljiv/a na hrup	☐	☐	☐	☐
7. bolj sem občutljiv/a za piskajoče zvoke (visoke frekvence) kot za brnenje (nizke frekvence)	☐	☐	☐	☐
8. hrup na delovnem mestu mi povzroča stres	☐	☐	☐	☐
9. čutim občasno željo po tišini	☐	☐	☐	☐
10. hrup negativno vpliva na otroke	☐	☐	☐	☐

Na delovnem mestu me moti hrup:	se strinjam	večinom a se strinjam	večinom a se ne strinjam	se ne strinjam
11. okolice, prometa..	☐	☐	☐	☐
12. slišen iz sosednih prostorov, hodnikov, stopnišč..	☐	☐	☐	☐
13. udarni hrup (hrup hoje in vibracije iz prostorov nad vami ali iz sosednjih prostorov)	☐	☐	☐	☐
14. hrup obratovalne opreme (računalnik, klimatska naprava..)	☐	☐	☐	☐
15. znotraj delovnega prostora	☐	☐	☐	☐
16. na delovnem mestu imam pogosto glavobole	☐	☐	☐	☐
17. opazim občasno izgubo glasu	☐	☐	☐	☐
18. večkrat imam bolečine v grlu	☐	☐	☐	☐
19. na delovnem mestu imam težave s koncentracijo	☐	☐	☐	☐
20. srečujem se z nespečnostjo	☐	☐	☐	☐
21. v času delovne dobe sem že kdaj opazil/a začasno (nekaj minut, ur) poslabšanje sluha	☐	☐	☐	☐
22. v času delovne dobe sem opazil/a trajno poslabšanje sluha	☐	☐	☐	☐
Dodatni komentarji II. sklopa vprašanj:				

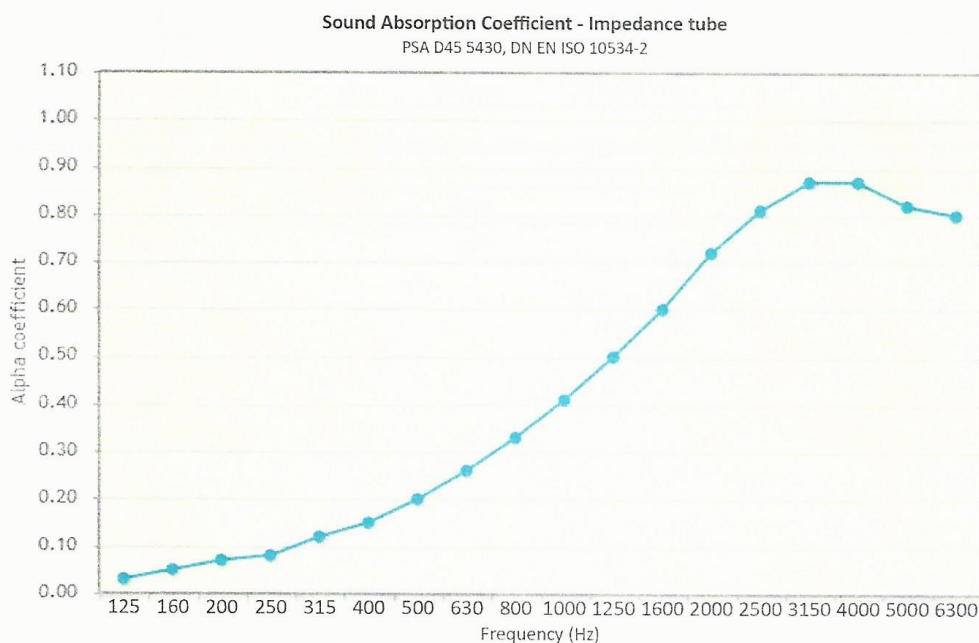
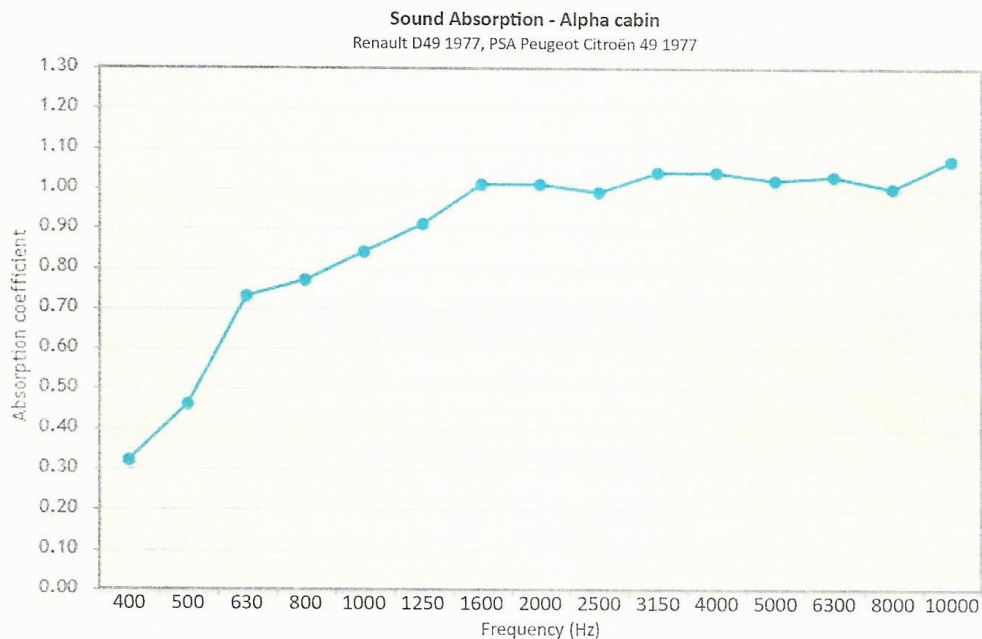
PRILOGA D: TEHNIČNI LIST: FINSOL H3270 500-25

ZAČASNI TEHNIČNI LIST



FINSOL H3270 500-25

LASTNOST	TESTNA METODA	ENOTA		VREDNOST
Sestava				PES
Obdelava				termično povezan
Posebna lastnost				absorpcija zvoka
Gramatura	EN 29073-1	g/m ²	±10%	500
Debelina	EN ISO 9073-2	mm		22-28
Fogging B	DIN 75201/B	mg	max	1,0
Fogging	PV 3015	mg	max	1,0
Vonj C2	VDA 270/C2		max	3
Vonj C2	PV 3900/C2		max	3
Vonj	GME 60276/A		max	3
Gorljivost	FMVSS 302	mm/min	max	100
Gorljivost	VW TL 1010	mm/min	max	100
Temperaturna obstojnost		°C		Temp. obst.
Barva				bela
Širina		mm	max	3100
Ø Cevke		mm		76, 100



Podane vrednosti so povprečne vrednosti in temeljijo na obstoječem tehničnem znanju in izkušnjah. Uporabnik je dolžan sam testirati in preveriti primernost izdelka za končno uporabo. Preverjanje patentnih pravic in obstoječi pravni predpisi so v odgovornosti kupca. V skladu s stalnim izboljševanjem izdelka lahko pride do sprememb tehničnih karakteristik brez predhodnega obvestila. Tehnični list ne nadomešča tehnične specifikacije izdelka. Za definiranje zahtevanih tehničnih parametrov prosimo kontaktirajte Filc.

PRILOGA E: TEHNIČNI LIST: KNAUF INSULATION DP-5



Tehnični list KNAUF INSULATION DP-5 Večnamenska plošča

MW-EN 13162 - T5-DS(TH)-WS-AF10

Knauf Insulation DP-5 so plošče iz kamene volne, ki se zaradi svojih tehničnih lastnosti uporabljajo kot toplotna, zvočna in požarna izolacija v poševnih strehah, stenah in stropovih. Plošče imajo zaradi srednje volumske mase izboljšano zvočno in toplotno zaščito.

UPORABA :

- poševne strehe
- stropovi proti neogrevanim podstrešjem
- predelene stene
- zunanje stene (skeleti ali notranje izolacijske obloge)

PREDNOSTI :

- visoka požarna odpornost
- visoka toplotna izolativnost
- visoka zvočna izolativnost
- paropropustnost
- vodoodbojnost
- odpornost na mikroorganizme

TEHNIČNA TABELA :

	Oznaka	Vrednost	Enota	Standard
Deklarirana toplotna prevodnost	λ_D	0,035	W/mK	SIST EN 12667
Odziv na ogenj	-	A1	-	SIST EN 13501-1
Tališče	-	> 1000	°C	DIN 4102/ T17
Difuzijska upornost vodni pari	μ	1	-	SIST EN 13162
Upornost zračnemu toku	-	> 10	kNs/m ⁴	SIST EN 29053
Ovrednoteni koeficient absorpcije zvoka	α_w	1,00		SIST EN 11654
Specifična toplota	c_p	1030	J/ kgK	SIST EN ISO 10456



KNAUF INSULATION, d.o.o., Škofja Loka
Trata 32, 4220 Škofja Loka, Slovenija
Telefon +386 (0)4 5114 105
Faks +386 (0)4 5114 108
E-mail prodaja.slovenia@knaufinsulation.com