

UNIVERZA NA PRIMORSKEM  
FAKULTETA ZA MATEMATIKO, NARAVOSLOVJE IN  
INFORMACIJSKE TEHNOLOGIJE

Magistrsko delo

**Od zapuščene tovarne smodnika do kulturnega prizorišča –  
potencial Kreativne četrti Barutana skozi akustično sanacijo  
za prilagodljivo namembnost prostora**

(From abandoned gunpowder factory to cultural venue – potential of Kreativna četrt  
Barutana through acoustic renovation for changeable scenery)

Ime in priimek: *Urban Kavka*

Študijski program: *Trajnostno grajeno okolje, 2. stopnja*

Mentor: *doc. dr. Rok Prislan, MSc Engineering Acoustics*

Koper, avgust 2022

## Ključna dokumentacijska informacija

Ime in PRIIMEK: Urban KAVKA

Naslov magistrskega dela: Od zapuščene tovarne smodnika do kulturnega prizorišča – potencial Kreativne četrti Barutana skozi akustično sanacijo za prilagodljivo namembnost prostora

Kraj: Koper

Leto: 2022

Število listov: 105

Število slik: 46

Število tabel: 37

Število referenc: 41

Mentor: doc. dr. Rok Prislan, MSc Engineering Acoustics

UDK: 719.62:534(043.2)

Ključne besede: akustična sanacija, spremenljiva akustika, prenova, industrijska dediščina, KČB

Math. Subj. Class. (2020):

Izvleček:

Pretekla stoletja so izkazovala težnjo k postavljanju industrijskih območij. Številna so bila pozneje zaradi deindustrializacije zapuščena. Sedaj bi lahko zrevitalizacijo teh vpeljali trajnostno v grajeno okolje. Nekdanja tovarna smodnika v Kamniku je ena izmed tistih, ki je za seboj pustila ogromno degradirano območje. Del tega je bila tudi stavba poimenovana ključavničarstvo Barutana, ki se od leta 2020 dalje počasi vzpostavlja kot Kreativna četrt Barutana (KČB). Prostor, kjer se srečujejo mladinski sektor, kultura in podjetništvo, potrebuje kakovostno prizorišče.

Ta študija se osredotoča na akustično sanacijo glavne industrijske hale z uporabo odpadnega tekstila in načrtovanja za razgradnjo z namenom doseganja prilagodljivih akustičnih pogojev za izvedbo pestrega nabora dogodkov. Glavni cilj študije je bila izdelava načrtov prilagodljivih akustičnih elementov in njihove umestitve v prostor za 3 različne tipe dogodkov: skupina 1 so koncerti sodobne glasbe, skupina 2 so prireditve, pri katerih je v ospredju govor, npr. predavanja in gledališke predstave, skupina 3 pa so akustično nezahtevni dogodki, npr. sejmi, tržnica, delavnice, razstave.

Akustična sanacija je sledila ustaljenim korakom: meritve na terenu, analiza meritev, razvoj ukrepov in rešitev ter računsko preverba ustreznosti rešitev. Rezultati predlaganih rešitev kažejo, da bo akustičnim zahtevam za vse tri skupine zadoščeno. Glavni obravnavani parametri prostorske akustike so bili  $T_{30}$ ,  $D_{50}$ ,  $BR$  in  $STI$ , čigar priporočene vrednosti so bile dosežene, z izjemo  $BR$ . Upoštevana je bila tudi potreba po izdelavi trajnostne in izvedljive sanacije, zato se lahko to študijo uporablja kot osnovo pri nadaljnjem razvoju KČB.

## Key document information

Name and SURNAME: Urban KAVKA

Title of the thesis: From abandoned gunpowder factory to cultural venue – potential of Kreativna četrt Barutana through acoustic renovation for changeable scenery

Place: Koper

Year: 2022

Number of pages: 105

Number of figures: 46

Number of tables: 37

Number of references: 41

Mentor: Assist. Prof. Rok Prislan, PhD

UDC: 719.62:534(043.2)

Keywords: acoustic renovation, variable acoustics, revitalization, industrial heritage

Math. Subj. Class. (2020):

Abstract:

In the previous century, there has been a trend of building industrial sites, which were abandoned with deindustrialization. By utilizing current building stock we can bring sustainability to the built environment. One of many industries that left an abandoned area is a gun powder factory in Kamnik, Slovenia. Part of this enormous site was a building named Barutana, which over the past two years is being established into the creative quarter Barutana (called KČB) as a place where youth work, culture and entrepreneurship meet. It lacks a quality venue, which could be located inside the main hall of KČB.

This study is focused on acoustic renovation of the main industrial hall using textile waste and design-for-disassembly to achieve modifiable scenery that allows the execution of a variety of events. The main objective of this study was the design of movable acoustic elements for three different groups of events: Group 1 is concerts of modern music, Group 2 is speech events, such as lectures and theatre, and lastly Group 3 is acoustically undemanding events, such as markets and workshops.

Acoustic renovation followed predefined steps: from on-site measurements to analysis of the acoustics, developing solutions and running simulations to verify planned solutions. The results of the proposed renovation were promising. The main acoustic parameters considered were  $T_{30}$ ,  $D_{50}$ ,  $BR$  in  $STI$ , whose recommended values were reached, with exception of  $BR$ . Fulfilling also the need for sustainable and feasible renovation, this study can be used as a base for any future development of Barutana.

# Kazalo vsebine

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVACIJA . . . . .	2
1.2	RAZISKOVALNI PRISTOP . . . . .	2
1.3	RAZISKOVALNI CILJI . . . . .	3
<b>2</b>	<b>TEORIJA</b>	<b>4</b>
2.1	POTENCIAL VNOVIČNE UPORABE . . . . .	4
2.1.1	Trajnostno grajeno okolje . . . . .	4
2.1.2	Industrijska in kulturna dediščina . . . . .	7
2.1.2.1	Kreativna Četrť Barutana . . . . .	9
2.2	AKUSTIKA . . . . .	12
2.2.1	Zvok . . . . .	13
2.2.2	Prostorska akustika . . . . .	16
2.2.2.1	Odmevni čas . . . . .	20
2.2.2.2	Impulzni odziv . . . . .	22
2.2.2.3	Ostali parametri prostorske akustike . . . . .	23
2.2.2.4	Utežitvene funkcije . . . . .	24
2.2.3	Akustične zahteve prireditvenih prostorov . . . . .	25
2.2.3.1	Prireditveni prostori sodobne glasbe . . . . .	26
2.2.3.2	Vpliv občinstva . . . . .	28
2.2.3.3	Zahteve spremenljive prostorske akustike . . . . .	29
2.2.3.4	Glasbene prireditve . . . . .	30
2.2.3.5	Govorne prireditve . . . . .	31
2.2.3.6	Akustično nezahtevne prireditve . . . . .	32
2.2.3.7	Dodatne zahteve prostorske akustike . . . . .	32
2.2.4	Programska orodja za analizo prostorske akustike . . . . .	33
2.2.5	Absorpcijski materiali . . . . .	34
2.2.5.1	Umestitev absorpcijskih materialov . . . . .	36
<b>3</b>	<b>METODOLOGIJA IN MERITVE</b>	<b>37</b>
3.1	PODPORNE MERITVE . . . . .	38
3.2	OPREMA . . . . .	39



3.2.1	Zvočnik, generator signala in frekvenčni razpon . . . . .	39
3.2.2	Mikrofon . . . . .	40
3.3	MERITVE Z METODO PREKINJENEGA HRUPA . . . . .	40
3.3.1	Lege meritev . . . . .	41
3.4	MERITVE IMPULZNEGA ODZIVA . . . . .	43
3.4.1	Lege meritev . . . . .	44
3.5	MERITVE ZVOČNE ABSORPCIJE . . . . .	45
<b>4</b>	<b>REZULTATI</b>	<b>50</b>
4.1	OBSTOJEČE STANJE PROSTORSKE AKUSTIKE . . . . .	50
4.1.1	Meritve hrupa ozadja . . . . .	50
4.1.2	Metoda prekinjenega hrupa . . . . .	52
4.1.3	Metoda impulznega odziva . . . . .	54
4.1.4	Primerjava različnih metod merjenja odmevnega časa . . . . .	57
4.2	AKUSTIČNE SIMULACIJE IN RAZVITE REŠITVE . . . . .	58
4.2.1	Reciklirani materiali . . . . .	59
4.2.2	Kalibracijski model . . . . .	61
4.2.3	Sistemske rešitve za različne namene uporabe . . . . .	64
4.2.4	Skupina 1 - koncerti sodobne glasbe . . . . .	65
4.2.5	Skupina 2 - govorne prireditve . . . . .	70
4.2.6	Skupina 3 - akustično nezahtevni dogodki . . . . .	74
4.2.7	Načrti uporabe spremenljivih akustičnih elementov . . . . .	75
4.2.7.1	Skupina 1 - koncerti sodobne glasbe . . . . .	75
4.2.7.2	Skupina 2 - gledališče . . . . .	76
4.2.7.3	Skupina 2 - večje predavanje . . . . .	76
4.2.7.4	Skupina 2 - manjše predavanje . . . . .	77
4.2.7.5	Modularni absorpcijski panel . . . . .	77
4.2.7.6	Zavese . . . . .	78
<b>5</b>	<b>DISKUSIJA</b>	<b>79</b>
5.1	KONCERTI SODOBNE GLASBE . . . . .	79
5.2	GLEDALIŠČE . . . . .	82
5.3	PREDAVANJA . . . . .	83
5.3.1	Mnenje uporabnikov . . . . .	84
5.4	AKUSTIČNO NEZAHTEVNI DOGODKI . . . . .	84
5.5	PRIMERJAVA Z DRUGIMI DVORANAMI . . . . .	85
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČEK</b>	<b>87</b>
<b>7</b>	<b>LITERATURA IN VIRI</b>	<b>90</b>

# Kazalo preglednic

1	Standardizirane vrednosti srednjih frekvenc terčnih (vse vrednosti) in oktavnih pasov (krepko zapisane vrednosti) v Hz, povzeto po Jacobsen et al. [12] . . . . .	14
2	Tipične vrednosti absorpcijskih površin za različna stanja oseb, v $m^2$ [12].	28
3	Priporočene vrednosti akustičnih parametrov za prireditveni prostor v KČB za različne tipe dogodkov . . . . .	29
4	Priporočene vrednosti $T_{30}$ v oktavnih pasovih od 63 do 4000 Hz za prireditveni prostor velikosti $1250 m^3$ za sodobno glasbo, povzeto po Adelman-Larsen [1] . . . . .	31
5	Ciljne vrednosti ostalih parametrov akustike prostora za glasbene prireditve . . . . .	31
6	Mejne vrednosti $STI$ za posamezne stopnje govorne razumljivosti, povzeto po standardu IEC 60268 [34] . . . . .	32
7	Mejne hrupne vrednosti v prostorih, $L_{A,eq}$ [41] . . . . .	33
8	Temperatura in relativna vlažnost zraka v času meritev . . . . .	39
9	Koordinate leg mikrofonov in izvora hrupa za meritve odmevnega časa z metodo prekinjenega hrupa . . . . .	42
10	Koordinate leg mikrofonov in izvora hrupa za meritve impulznega odziva	45
11	Nastavitve meritev koeficienta absorpcije in transmisije v impedančni cevi.	47
12	Seznam merjenega odpadnega tekstila in sestava meritev . . . . .	48
13	Rezultati meritev hrupa ozadja v terčnih pasovih . . . . .	51
14	Rezultati meritev odmevnega časa $T_{30}$ z metodo prekinjenega hrupa v terčnih pasovih . . . . .	53
15	Rezultati meritev odmevnega časa $T_{30}$ z metodo impulznega odziva v terčnih pasovih . . . . .	55
16	Rezultati izračuna razmerja basov $BR$ prek rezultatov meritev impulznega odziva . . . . .	56
17	Rezultati meritev definicije, $D_{50}$ z metodo impulznega odziva – $D_{50,cilj} = 0,7$ . . . . .	57
18	Vrednosti $T_{Ln}$ pri 1000 Hz za tekstil različnih sestav pri dvoslojni konfiguraciji . . . . .	61

19	Primerjava rezultatov odmevnega časa meritev in simulacij v istoležečih legah . . . . .	62
20	Absorpcijske lastnosti materialov, uporabljenih pri simulacijah akustične sanacije . . . . .	63
21	Seznam uporabljenih akustičnih elementov in pripadajočih absorpcijskih površin pri posamezni ponovitvi simulacije v prvi skupini . . . . .	66
22	Rezultati $T_{30}$ iz simulacij za prvo skupino predvidenih dogodkov; barva posamezne celice določa ustreznost: oranžna – neustrezna vrednost, rumena – zadovoljiva vrednost, zelena – ustrezna vrednost, modra – »presuh« prostor . . . . .	67
23	Rezultati $D_{50}$ iz simulacij prve skupine; barva posamezne celice določa ustreznost: oranžna – neustrezna vrednost, rumena – zadovoljiva vrednost, zelena – ustrezna vrednost . . . . .	68
24	Rezultati $BR$ iz simulacij prve skupine; barva posamezne celice določa ustreznost: oranžna – neustrezna vrednost, rumena – zadovoljiva vrednost, zelena – ustrezna vrednost . . . . .	68
25	Seznam uporabljenih akustičnih elementov in pripadajočih absorpcijskih površin pri posamezni iteraciji za gledališča v drugi skupini . . . . .	70
26	Rezultati $T_{30}$ iz simulacij za drugo skupino predvidenih dogodkov – 1. del, osredotočen na gledališče; barva posamezne celice določa ustreznost: oranžna – neustrezna vrednost, rumena – zadovoljiva vrednost, zelena – ustrezna vrednost, modra »presuh« prostor . . . . .	71
27	Rezultati $BR$ iz simulacij druge skupine za gledališke predstave; barva posamezne celice določa ustreznost: oranžna – neustrezna vrednost, rumena – zadovoljiva vrednost, zelena – ustrezna vrednost . . . . .	72
28	Rezultati $D_{50}$ iz simulacij drugo skupine za gledališke predstave; barva posamezne celice določa ustreznost: oranžna – neustrezna vrednost, rumena – zadovoljiva vrednost, zelena – ustrezna vrednost . . . . .	72
29	Seznam uporabljenih akustičnih elementov in pripadajočih absorpcijskih površin pri posamezni iteraciji za predavanja v drugi skupini . . . . .	73
30	Rezultati $T_{30}$ iz simulacij za drugo skupino predvidenih dogodkov – drugi del, osredotočen na predavanja; barva posamezne celice določa ustreznost: oranžna – neustrezna vrednost, rumena – zadovoljiva vrednost, zelena – ustrezna vrednost, modra »presuh« prostor . . . . .	73
31	Rezultati $STI$ iz simulacij za drugo skupino predvidenih dogodkov – drugi del, osredotočen na predavanja; barva posamezne celice določa ustreznost: rumena – zadovoljiva vrednost, zeleno-rumena – dobro stanje	74

32	Rezultati $T_{30}$ iz simulacij za tretjo skupino predvidenih dogodkov; barva posamezne celice določa ustreznost: zelena – ustrezna vrednosti, modra »presuh« prostor . . . . .	75
33	Vnesene absorpcijske površine za izvedbo predvidene postavitve akustičnih elementov prireditev iz skupine 1 . . . . .	81
34	Vnesene absorpcijske površine za izvedbo predvidene postavitve akustičnih elementov prireditev iz skupine 2 – gledališče . . . . .	82
35	Vnesene absorpcijske površine za izvedbo predvidene postavitve akustičnih elementov prireditev iz skupine 2 – večja predavanja . . . . .	83
36	Vnesene absorpcijske površine za izvedbo predvidene postavitve akustičnih elementov prireditev iz skupine 2 – manjša predavanja . . . . .	84
37	Primerjava rezultatov predvidenega stanja po sanaciji v KČB z drugimi primerljivo velikimi dvoranami za koncerte sodobne glasbe, povzeto po Adelman-Larsen [1] . . . . .	85

## Kazalo slik in grafikonov

1	Katastrski prikaz industrijskega območja KIK, obarvanega rumeno, in mesta Kamnik [38] . . . . .	9
2	Notranjost KČB, pogled proti odru . . . . .	10
3	Arhitekturno zanimivi elementi in barvna paleta KČB . . . . .	11
4	Tloris glavne hale KČB z označenim vhodom in predvidenimi dejavnostmi. Notranjost KČB: modra barva označuje položaj odra za koncerte, gledališke predstave in večja predavanja, oranžna barva pa označuje prostor za manjša predavanja. . . . .	12
5	Grafični prikaz akustike kot znanstvene vede - povzeto po Lindsayevem kolesu akustike [10] . . . . .	13
6	Grafični prikaz zvočnega valovanja čistega tona, povzeto po Adelman-Larsen [1] . . . . .	14
7	Razdelitev na frekvenčne pasove človekovega slušnega spektra [26] . . . . .	15
8	Krivulje zaznave enake glasnosti pri posameznih frekvencah, povzeto po Stalder [26]. . . . .	15
9	Prikaz odboja in loma zvočnega signala ob stiku z oviro [20] . . . . .	16
10	Tipi zvočnih absorberjev [18] . . . . .	18
11	Karakteristične krivulje zvočne absorptivnosti različnih tipov absorberjev, povzeto po Kunič et al. [14] . . . . .	19
12	Prikaz zaznave zvoka in pomen odmevnega časa prostora za slušno razumevanje, povzeto po Jacobsen et al. [12] . . . . .	20
13	Reflektogram (običajno $20 \log_{10} p(t)$ z enoto [dB]), graf časovnega razvoja ravni zvočnega tlaka – viden je zvočni signal (direkten zvok), prvi, zgodnji in kasnejši odboji, ki se združijo v odmev, povzeto po Adelman-Larsen [1] . . . . .	22
14	Standardizirane utežitvene funkcije zvočne jakosti v odvisnosti od frekvence, povzeto po Krug [13] . . . . .	25
15	Najpogostejša glasbila v sodobni glasbi in pripadajoči frekvenčni razponi, povzeto po Adelman-Larsen [1] . . . . .	27
16	Koeficient absorpcije občinstva v odvisnosti od gostote občinstva in njegovega položaja, povzeto po Adelman-Larsen [1] . . . . .	28

17	Faktorji odmevnega časa za koncertne dvorane sodobne glasbe v posameznem oktavnem pasu, povzeto po Adelman-Larsen [1] . . . . .	30
18	Industrijski notranji žerjav, element oranžne barve . . . . .	36
19	Manjkajoči elementi odprtih stavbnega ovoja, prekriti z lesenimi ploščami	37
20	Prikaz uporabe 3D skenerja med meritvijo . . . . .	38
21	Način računanja odmevnega časa $T_{20}$ iz rezultatov meritev pridobljenih z metodo prekinjenega hrupa [20] . . . . .	41
22	Lege meritev odmevnega časa z metodo prekinjenega hrupa – lega izvora 1	41
23	Lege meritev odmevnega časa z metodo prekinjenega hrupa – lega izvora 2	42
24	Prikaz korakov metode – od meritve impulznega odziva do odmevnega časa $T_{20}$ , povzeto po Prisljan [20] . . . . .	44
25	Lege meritev impulznega odziva . . . . .	45
26	Merilni sistem Bruel & Kjaer tip 4206-T pripravljen za meritev absorpcijskih koeficientov. . . . .	46
27	Prikaz namestitve vzorca v impedančno cev – na sliki je vzorec 100-% bombaža. . . . .	49
28	Legi meritev hrupa ozadja v objektu in zunaj njega. . . . .	50
29	Krivulje kriterija hrupa in meritvi hrupa ozadja v objektu KČB ( $H_n$ ) in zunaj njega ( $H_z$ ) . . . . .	51
30	Rezultati meritev odmevnega časa z metodo prekinjenega hrupa . . . . .	52
31	Povprečne vrednosti meritev odmevnega časa z metodo prekinjenega hrupa glede na lego izvora . . . . .	54
32	Rezultati meritev odmevnega časa z metodo impulznega odziva . . . . .	56
33	Primerjava rezultatov meritev odmevnega časa z različnima metodama z označeno standardno deviacijo med merilnimi legami in tolerančnim območjem ciljnega odmevnega časa, povzeto po Adelman-Larsen [1] . . . . .	58
34	Rezultati meritev absorpcijskega koeficienta v oktavnih pasovih odpadnega tekstila v sestavi 100-% bombaž pri različnih konfiguracijah	60
35	Rezultati meritev absorpcijskega koeficienta v oktavnih pasovih odpadnega tekstila v sestavi 60-% bombaž in 40-% poliester pri različnih konfiguracijah . . . . .	60
36	Rezultati meritev absorpcijskega koeficienta v oktavnih pasovih odpadnega tekstila v sestavi 70-% viskoza in 30-% najlon pri različnih konfiguracijah . . . . .	60
37	Koeficient razpršenosti v odvisnosti od globine piramid difuzorjev, povzeto po Odeon Manual [19] . . . . .	64
38	Pogled proti odru z različno obarvanimi akustičnimi elementi in sredinskim obokom. . . . .	65

39	Načrt postavitve akustičnih elementov za koncerte sodobne glasbe – barve so v skladu z opredelitvijo na sliki 38, prekinjena črta predstavlja stropne elemente, polna črta pa vertikalne elemente . . . . .	75
40	Načrt postavitve akustičnih elementov za gledališče – barve so v skladu z opredelitvijo na sliki 38, prekinjena črta predstavlja stropne elemente, polna črta pa vertikalne elemente . . . . .	76
41	Načrt postavitve akustičnih elementov za večja predavanja – barve so v skladu z opredelitvijo na sliki 38, prekinjena črta predstavlja stropne elemente, polna črta pa vertikalne elemente . . . . .	76
42	Načrt postavitve akustičnih elementov za manjša predavanja – barve so v skladu z opredelitvijo na sliki 38, prekinjena črta predstavlja stropne elemente, polna črta pa vertikalne elemente . . . . .	77
43	Detajl spoja lesenih elementov in tekstila v vogalu absorpcijskega panela	78
44	Objemka za pritrditev lesenega okvirja na kovinski I-nosilec . . . . .	78
45	Primerjava vrednosti odmevnega časa pred in po sanaciji ter označeno ciljno območje . . . . .	80
46	Pogled s položaja predavatelja v primeru večjih predavanj z akustičnimi elementi v karirastem vzorcu. . . . .	84

## Zahvala

Vsem, ki so bili vključeni v postopek pisanja tega magistrskega dela, bi se v prvi vrsti rad zahvalil za potrpežljivost.

Posebna zahvala gre mentorju doc. dr. Roku Prislanu, ki me je med izdelavo dela vodil skozi proces znanstvenega ustvarjanja in mi pri tem puščal veliko svobode izražanja, bil je potrpežljiv, ko se je delo zamaknilo, vnašal je kritični pogled, ko je bilo to potrebno.

Poleg tega bi se rad zahvalil domačim in partnerki Tei za podporo pri iskanju svojega prostora in ustvarjanja pogojev, v katerih lahko delujem.

V času študija so me spremljali odlični profesorji, ki so mi prinesli veliko navdiha. S pomočjo vseh omenjenih sem lahko verjel vase in v svojo pot.

*"Do things better, do better things, think differently."*



# 1 UVOD

V preteklih stoletjih, ob koncu 19. in na začetku 20., je bilo v navadi postavljati večja industrijska območja, saj je napredek v izdelavi jekla in betona napravil tovrstno gradnjo enostavno in hitro. Vzporedno s spremembami gradbenih praks je raslo tudi povpraševanje, saj je industrija potrebovala velike industrijske hale. Pozneje proti koncu 20. stoletja, se je število podjetij zmanjšalo zaradi avtomatizacije proizvodnje in hkratne spremembe v ekonomski politiki, sistem pa je predvsem na območju Slovenije in Evrope prešel v kapitalistično ureditev, a temu tempu in spremembam številne industrije niso bile sposobne slediti. Prestrukturiranje gospodarstva in deindustrializacija sta privedla do večjega števila zapuščenih industrijskih območij, ki tvorijo degradirane mestne in ob-mestne četrti. Degradirana območja niso težavna le zaradi neizkoriščenosti stavbnega fonda temveč predstavljajo tudi vir onesnaženja tal in podtalnice. Z vnovično uporabo tovrstnih stavb, v katere so bile že vložene primarne surovine in energija, dosežemo vpetje krožnega gospodarstva v gradbeniški sektor in posledično revitalizacijo večjih območij. Izkoristiti potencial obstoječega stavbnega fonda za sedanje in prihodnje potrebe je temeljna ideja doseganja trajnostnega razvoja v grajenem okolju.

V postopku revitalizacije industrijskih območij naletimo na več ovir. Med bolj perečimi je, kako javnost, torej nove uporabnike, prepričati k vnovični uporabi degradiranih območij. Pri tem je zagata najti primerno novo rabo objekta ali območja glede na potrebe in navade javnosti. Ko k celotni sliki dodamo še vprašljivost tehničnih rešitev prenov in zadoščanja morebitnim okoljskim in energetskim zahtevam ter programom kulturne dediščine, je izvedljivost tovrstnih prenov že tako otežena, da večina akterjev obupa. A kljub temu je potencial industrijskih objektov vabljiv, saj tovrstni prostori delujejo kot povezovalni element časa in ljudi.

Med številnimi industrijami, ki so propadle po osamosvojitvi Slovenije in za seboj pustile večje zapuščeno območje, je tudi nekdanja tovarna smodnika Kemijska industrija Kamnik (v nadaljevanju KIK). Del večje celostne industrijske četrti, ki se začne na severnem robu starega mestnega jedra, je tudi stavba ključavničarstva, poimenovana Barutana. Ta je v času obratovanja služila za proizvodnjo in popravilo kovinarskih izdelkov za preostali del industrijskega kompleksa. Danes objekt tvori Kreativno četrt Barutana skupaj z Zavodom Mladinski center Kotlovnica, Domom kulture Kamnik in Kreativno industrijo Kamnik - KIKštarter. Omenjene organizacije nastanjene v sosednjih objektih skrbijo za organizacijo kulturnih dogodkov, okroglih

miz in pripomorejo k splošnemu razvoju kulturnih in gospodarskih dejavnosti v Kamniku. Prav zaradi aktivnosti, ki jih izvaja okolica, je prehod iz zapuščene tovarne smodnika v Kreativno četrt Barutana od leta 2020 potekal nemoteno in naravno.

## 1.1 MOTIVACIJA

Kreativna četrt Barutana (v nadaljevanju KČB) je v svojem jedru prostor skupnega ustvarjanja, kjer lahko kdorkoli iz širše javnosti organizira različne javne dogodke. Stavba ponuja manjše nekdanje pisarne in večjo industrijsko halo, ki bi se ob ustrezni prenovi lahko uporabljale kot pisarne in ateljeji oziroma prireditveni prostor. Ta ima za lokalne organizatorje dogodkov ogromen potencial, saj bi lahko v industrijski hali izvedli predavanja, razstave, sejme in nastope z različnih področij kulturnega ustvarjanja – gledališča, kabareta, poezije in glasbe (predvsem za koncerte sodobne glasbe). Vendar uspešna prenova stavbe v funkcionalen kreativni prostor zahteva več manjših, a obveznih korakov. Za uspešno uresničitev vnovične uporabe obstoječega stavbnega fonda ni dovolj, da se v prostor namesti organizacija in začne izvajati svoje dejavnosti. Ključno je, da je prostor ovrednoten, da so prepoznane njegove prednosti in slabosti, stanje prostora pa nato izboljšano glede na predvidene dejavnosti.

## 1.2 RAZISKOVALNI PRISTOP

V nalogi sem analiziral trenutne akustične lastnosti in projektno obdelal akustično sanacijo glavne industrijske hale. Pri tem sem uvedel elemente spremenljive prostorske akustike, ki omogočajo izvedbo različnih zvrsti dogodkov. Akustična sanacija trenutnega stanja je potekala po osnovnem pristopu - v štirih sklopih:

- meritve obstoječega stanja,
- analiza rezultatov meritev,
- načrtovanje ukrepov in razvoj,
- računska preverba ustreznosti rešitev.

Metoda dela je vključevala tudi moderne pristope s poudarkom na nedestruktivnem testiranju z uporabo 3D laserskega skeniranja in meritve prostorske akustike, kot tudi uporabo simulacijskih orodij za analizo potencialnih rešitev izboljšanja prostorske akustike. Ti so bili uporabljeni z namenom pospešitve in pocenitve postopka sanacije, saj *in-situ* preverjanje različnih tehničnih rešitev zahteva veliko časa in finančnega vložka, zaradi česar končna sanacija v sklopu naloge ni bila izvedena.

## 1.3 RAZISKOVALNI CILJI

V času gradnje industrijskih objektov je bila prostorska akustika le redko obravnavana, v najboljšem primeru je bila projektirana akustična zaščita okolice in preprečeno širjenje hrupa zunaj industrijskega območja. Zato sem z akustično sanacijo industrijske hale želel odgovoriti na primarno vprašanje: ali je mogoče izkoristiti potencial zapuščenega industrijskega kompleksa za ureditev visokokakovostnega prireditvenega prostora. Odgovor sem iskal na primeru KČB. Poleg omenjenega sem v magistrskem delu želel razviti sistem akustičnih elementov, ki bi omogočal prilagajanje potrebam raznolikih dogodkov, za katere je treba ustvariti prostor z različnimi akustičnimi lastnostmi. Med obravnavanimi primeri uporabe so bile tri skupine dogodkov: koncerti sodobne glasbe (1. skupina), dogodki, pri katerih je v ospredju govor, npr. predavanja, gledališče in večeri poezije (2. skupina), in akustično nezahtevne prireditve, kot so sejmi, razstave, tržnica (3. skupina). Naloga vključuje tudi izdelavo načrtov akustičnih elementov.

Osnovni princip akustične sanacije prostora sem nadgradil z uporabo naprednejših tehnologij in metod dela, zato sem želel odgovoriti tudi na vprašanja:

- ali lahko odpadni tekstil uporabimo v sestavi akustičnih absorberjev,
- kako v projektiranje akustičnih elementov vključiti pristope trajnostnega razvoja kot je »načrtovanje-za-razgradnjo«,
- ali je 3D skeniranje uporabno orodje pri akustični analizi prostora.

## 2 TEORIJA

Za ustrezno umeščanje predvidene dejavnosti v prostor in iskanje rešitev za urejanje prostorske akustike je nujno poznavanje zgodovine industrijskega območja in njegovih arhitekturno-družbenih posebnosti, ki jih je v prenovi smiselno izkoristiti, ter obstoječih akustičnih lastnosti prostora. Pomembno je, da ob prepoznavanju omejitev, ki jih prostor ima, zastavimo dosegljive cilje akustične ureditve. V nadaljevanju poglavja sem predstavil potencial kulturne in industrijske dediščine, ki ga nosi obstoječi stavbni fond za doseganje trajnostnih ciljev in ohranjanja stika s kulturo prednikov, akustiko kot vedo o zvoku, posebnosti prostorske akustike in ključne akustične zahteve prireditvenih prostorov.

### 2.1 POTENCIAL VNOVIČNE UPORABE

#### 2.1.1 Trajnostno grajeno okolje

Zaradi vse večje pozornosti na podnebne spremembe in posledično želje po prehodu v trajnostno družbo tudi gradbeništvo teži k spremembam svojih praks. Pri tem gre predvsem za racionalizacijo porabe energije, surovin in izpustov toplogrednih plinov. Podatki statistične službe Evropske unije Eurostat za leto 2020 kažejo, da skoraj 30 odstotkov energije v Evropi porabijo gospodinjstva, približno 15 odstotkov komercialne stavbe in malo več kot 1 odstotek gradbeništvo, vendar je iz tega izvzeta energija, potrebna za pridobivanje, predelavo in transport materialov in surovin [9]. Po nekaterih ocenah je v stavbnem fondu trenutno shranjene oziroma utelešene od 15 do 20 odstotkov celotne svetovne porabe energije, pri čemer pri uporabljanju stavb porabimo od 30 do 40 odstotkov celotne svetovne porabe energije in pri tem posledično proizvedemo od 40 do 50 odstotkov vseh toplogrednih plinov [21]. Z vnovično rabo materialov iz zapuščenih stavb oziroma - še boljše - z vnovično uporabo zapuščenih stavb bi lahko to utelešeno energijo (ang. *embodied energy*) ohranili v obtoku in s tem izboljšali splošno energetsko učinkovitost. Ker utelešena energija lahko predstavlja od 40 do 60 odstotkov celotne energije [7, 23, 40], ki je potrebna v življenjskem ciklu stavbe, je toliko bolj pomembno, da energijo, shranjeno v končnih proizvodih, kot so gradbeni materiali, čim dlje ohranimo v fazi uporabe. Pri tem stopi v ospredje izkoriščanje obstoječega stavbnega fonda.

V preteklih letih se je pojavilo urbano rudarjenje surovin (ang. *urban mining*),

predvsem iz zapuščenih in porušenih stavb [11]. Tako lahko pridobimo nove materiale iz že obstoječih in v preteklosti pridobljenih surovin, s čimer zmanjšamo pretirano izkoriščanje neobnovljivih virov, kot tudi nespametno uporabo obnovljivih virov. Vendar obstaja še ustrežnejša alternativa urbanemu rudarjenju. Izkoriščanju virov namreč lahko kljubujemo tudi s čim daljšim ohranjanjem obstoječega stavbnega fonda v uporabi in umestitvi v javni prostor. Tu ne posegamo le v ekonomsko in ekološko vrednost obstoječega, temveč dodajamo k družbeni in kulturni danosti prostora. Dodatno pa se obstoječi stavbni fond predstavi kot vir cenovno dostopnih stanovanj [11].

Za ocenjevanje vplivov posameznega materiala, postopka ali stavbe se je razvil pristop vrednotenja življenjskega cikla LCA (ang. *Life Cycle Assessment*) [30, 31]. Pristop določa vstopne in izhodne surovine v življenjskem ciklu posameznega materiala, s čimer opredeli njegov končni vpliv na okolje prek različnih kazalcev vpliva, kot so  $CO_{2,eq}$ , potencial globalnega segrevanja, toksičnost, rast ozonske luknje, zakisovanje, izraba neobnovljivih virov, idr. LCA določa tudi različne obsege ovrednotenja, saj je treba določiti začetek in konec življenjskega cikla obravnavanega materiala ali postopka. Ločimo 4 pristope:

- »od vrat do vrat« (ang. *from-gate-to-gate*),
- »od zibelke do vrat« (ang. *from-cradle-to-gate*),
- »od zibelke do groba« (ang. *from-cradle-to-grave*) in
- »od zibelke do zibelke« (ang. *from-cradle-to-cradle*).

Bistveno je, da jasno razumemo pojme »vrata«, »grob« in »zibelka«. »Vrata« so mejnik med eno in drugo fazo posameznega cikla primarne uporabe proizvoda (npr. ločnica med fazo proizvodnje CLT-plošče in vgradnjo v stavbo). »Grob« označuje mejnik med koncem primarne uporabe in odlaganjem proizvoda kot odpadka. »Zibelka« je mejnik med pridobitvijo surovine in nastankom proizvoda oziroma v krožnem gospodarstvu mejnik med sedanjo in naslednjo uporabo. Tako nam prav zadnji pristop »od zibelke do zibelke« omogoča pravi prehod v krožno gospodarstvo in nastavljanje miselnih procesov, ki so potrebni za vpeljavo krožnega gospodarstva v prakso.

Gradbeništvo je velik porabnik surovin, zato bi lahko deloval kot ponor odpadkov, a tudi kot glavno gibalno krožnega gospodarstva, saj je nabor uporabnih materialov širok, kar lahko podpre nastanek trajnostnih stavb.

Berardi [5] je v svoji študiji raziskoval pojem trajnostne stavbe. Definiral jo je kot objekt, ki je zasnovan in zgrajen skozi perspektivo »od zibelke do groba« z učinkovito rabo virov, uporabo ekoloških tehnologij, z obzirom na družbeno enakost in kakovost

življenjskega cikla stavbe, ki spodbuja zdravo življenje in pripadnost trajnostni skupnosti.

Tak objekt med drugim:

- povečuje varnost, prilagodljivost, tržno vrednost stavbe, dobrobit in udobje uporabnika, pravice deležnikov in družbene enakosti,
- estetsko izboljša prostor, v katerega je umeščen,
- ohranja kulturne vrednote,
- izniči okoljske vplive z vključevanjem stavbe v kontekst okolice in njeno regeneracijo [5].

V svoji definiciji je Berardi uporabil pristop »od zibelke do groba«. Z izbiro se ne strinjam, saj menim, da ni najustreznejši pristop. Miselnost »od zibelke do groba« še vedno pušča odprta vrata za linearno gospodarstvo. To se kaže pri dojetanju, da se postopek ali življenjski cikel materiala konča z »grobom«, tj. ko se material opredeli kot odpadek in se ga zavrže. Menim, da ta pristop ne spodbuja prehoda h krožnemu gospodarstvu, zato bi bil bistveno bolj ustrezen pristop ocenjevanja življenjskega cikla »od zibelke do zibelke«. Čeprav je ta metoda težavna, saj odpira več vprašanj, predvsem ko se pojavi prisotnost škodljivih snovi, vendarle spreminja pogled na dojetanje materialov ne glede na njihovo stanje kot potencialno surovino za nadaljnjo uporabo ali reciklažo. Pogled se ne bi smel spreminjati, naj bo govor o kartonu, v katerega je bil zavrt gradbeni material, ali o zapuščeni industrijski stavbi.

Poleg analize LCA je pri vpeljavi krožnega gospodarstva v zadnjih letih postal priljubljen tudi novejši pristop k projektiranju, t.i. »načrtovanje za razgradnjo« (ang. *Design for Disassembly*), pri katerem je glavna filozofija načrtovanja: bodisi materialov, konstrukcijskih sklopov ali celotnih stavb z namenom hitre, lahke in učinkovite demontaže oziroma razgradnje. To ne olajša le gradnje, temveč spodbudi projektante k vnovični uporabi bodisi surovin bodisi stavb in olajša vzdrževanje. Zato je ta pristop ustrezen tako pri novogradnjah, kot tudi pri starejših objektih. Morda pri obnovi in prenovi slednjih še toliko bolj, saj je med načrtovalci vedno bolj prisotno zavedanje, da objekt ni več in da bodo v prihodnosti nujne prilagoditve prostora na nove potrebe.

Reševanje raziskovalnega vprašanja, kako trajnostno izboljšati prostorsko akustiko v zapuščeni industrijski hali, je vključevalo tudi omenjeni načrtovalski pristop »načrtovanje za razgradnjo« saj obravnavana hala ne bo le gostila različne tipe javnih prireditvev, ki zahtevajo raznolike akustične pogoje, temveč je prihodnost celotne stavbe in predvidenih dejavnosti še vedno v fazi diskusije. Zato menim, da morajo biti posegi v prostor takšni, da izboljšajo stanje na čim manj invaziven način in

omogočijo poznejše prilagoditve za potreba prihodnosti. To sem upošteval pri iskanju konstrukcijskih rešitev – sestavi akustičnih elementov, načinu njihove vgradnje in pri obravnavanih simulacijah mogočih rešitev.

## 2.1.2 Industrijska in kulturna dediščina

Pogosto se grajeno okolje opredeljuje kot nekaj zunaj nas, prostor, kjer živimo, delamo in ustvarjamo, ali kot nekaj, kar se je zgradilo. A v resnici je enakovredno sestavljeno oziroma grajeno tudi skozi vsakodnevne dejavnosti v času uporabe stavbe. Tako se naše grajeno okolje v življenjskem ciklu zgradb in posameznikov družbe ves čas spreminja glede na spreminjajoče potrebe nas samih – uporabnikov [22]. Zato se pojavlja vprašanje, kolikšna je vrednost ohranjanja zgradb z namenom vračanja v začetno podobo.

Da bi kulturno dediščino predali zanamcem v ustreznem stanju, lahko uporabimo različne načine obravnave, pri čemer je tradicionalno restavratorstvo. A temeljita zaščita kulturne dediščine ni le ohranjanje arhitekturnih lastnosti prostora, zaželeno je tudi obnavljanje družbenih in ekoloških sistemov v prostoru, kjer se ti lahko prepletajo, razvijajo in obnavljajo [6]. Vzpostavlja se nov, prav tako pomemben teoretični pristop - revitalizacija. V Urbanističnem terminološkem slovarju [17] je avtorica B. Mihelič urbano revitalizacijo definirala kot »oživljanje, spreminjanje gospodarsko in socialno zaostalih mestnih območij v privlačne mestne predele z izboljšanjem pogojev za izvajanje in uvajanje novih dejavnosti, socialne strukture, z modernizacijo mestnega okolja.« Z ohranjanjem glavnih vidikov kulturne dediščine lahko vključimo nove namembnosti in dejavnosti, s čimer prostoru damo nove razsežnosti – dimenzijo javne sfere in življenja. Pri povezovanju trajnosti in kulturne dediščine je vsem pristopom skupna ponovna uporaba. Dodana vrednost revitalizacije in regenerativnih dejavnosti, je spoštovanje zgodovinske povezave znotraj objekta z vključevanjem življenja v stavbe kulturne dediščine. Takšne stavbe lahko služijo kot spodbujevalci okolja, prostora, zgodovine, kulture, zgodb in niso le porabnice energije in surovin. Tako zgradba ni le blago, ki ga uporabljamo, ampak je prostor, ki ga soustvarjamo [6].

Tako pri restavratorstvu, kot tudi pri revitalizacijah prostora, je pomembno, da ne pozabimo na primaren »občutek prostora«. Tega s svojim doživljanjem prostora določa posameznik oz. uporabnik. Ta občutek je pogosto vezan na dejavnosti, ki se tam izvajajo, in skupine ljudi, ki prostor uporabljajo, so od njega odvisni, ga spreminjajo in prilagajajo, tj. ga identificirajo. Določevanje občutka prostora je v primeru kulturne dediščine dodatno oteženo, saj je ta najpogosteje vezan na ljudi in dejavnosti iz preteklosti. Poleg skupka vseh dejavnosti je estetski vidik arhitekture tisto, kar ustvarja občutek prostora [6]. Kako definirati občutek prostora in njegove posebnosti – bodisi arhitekturne ali družbene, je zagonetno vprašanje, ki zahteva daljši

razmislek in vpogled v zgodovino prostora in družbe.

Spomin in občutek prostora na stavbo namreč nista vezana le na njeno prvotno stanje, saj se vsak posameznik z določeno zgradbo v grajenem okolju sreča v različnih časovnih obdobjih. Mikro okolje, ki ga je predstavljala »naša« stavba, tako ni ostajalo nespremenjeno skozi leta uporabe, zato tudi nadaljnja uporaba, pri kateri bi se trudili preprečiti prilagajanje stavbe na potrebe uporabnikov, ne bi bila smiselna. In prav spomin, na katerega so navezani lokalni prebivalci, lahko ustvarja težave, saj je ta lahko vezan tudi na prostor brez posebnih arhitekturnih ali zgodovinskih vrednosti, a vseeno dovolj močno razširjen, da preprečuje nadaljnje preoblikovanje prostora. Pogosta napaka restavratorskih pristopov je pretvorba zapuščene industrijske dediščine v muzej, ki ji pravimo tudi muzealizacija. Ta ima vrednost pri obravnavanju turističnega potenciala, a se pri tem tudi ustavi, saj je potencial omejen na turistično sezono. Dodatno se pri muzealizaciji industrijske dediščine pogosto pojavi razlikovanje med konceptoma »stavba v službi uporabnikov« in »uporabniki v službi stavbe«. Uspešna revitalizacija prostora zahteva premišljeno dodajanje novih namembnosti in dejavnosti, ki lahko poudarijo značaj prostora in živahnost mesta skozi celotno leto za čim širšo javnost [6].

Industrijska dediščina je posebna veja kulturne dediščine, pri kateri gre za zaščitene zgradbe navadno zapuščenih industrijskih območij. Ta so najpogosteje na zaprtih in omejenih območjih stran od mestnih središč in so slabše dostopna. Tako so tovrstni kompleksi v fazi, ko so bili prepuščeni zobu časa, navzven vidno propadali, kar ljudi navadno odvrta. Dodatno se tovrstna območja povezuje s kriminalom in zmanjšanim občutkom varnosti. Poleg vidne degradacije lahko propadanje teh stavb povzroči tudi onesnaženje zraka, zemlje in bližnjih voda. Vse skupaj zahteva celostno revitalizacijo širših območij, kar je za lastnika zemljišča lahko zajeten projekt tako finančno kot časovno in ekološko.

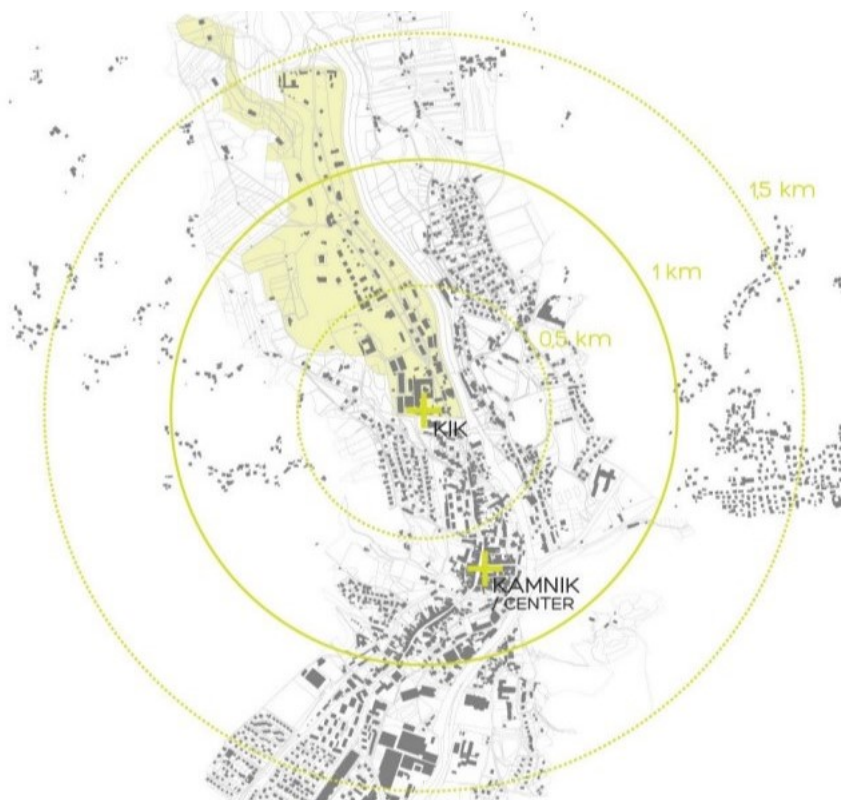
V težnji k novim trajnostnim praksam načrtovanja stavbnega fonda, ki vse bolj prehajajo v poudarjanje regeneriranja okolja, saj le njegovo ohranjanje ni dovolj, vprašanje reševanja obstoječega stavbnega fonda ne ocenjuje zgolj skozi prizmo ekonomske računice, temveč tudi skozi družbeni in kulturni vidik. Ohranjanje zgradb iz preteklosti doda vrednost grajenemu okolju, saj obstoječe stavbe ne vsebujejo le utelešene energije v materialih, temveč tudi energijo ljudi, ki so prostor vzpostavili in uporabljali. Pri tem pa je pomembno, da ne postanemo »uslužbenci« prostorov zgodovine, temveč jih enakovredno prejšnjim časom uporabljamo, prilagajamo in skupaj z njimi živimo. Arhitektura je med drugim tudi komunikacijska pot s preteklostjo in hranilnik spominov. Treba se je zavedati, da je prav zgodovinski in tradicionalni vidik arhitekture tisto, kar je vezano na spomin in identiteto ljudi v okolju zgradbe. Skozi program kulturne dediščine lahko zgradba obnovi okolje prek krepitev zavedanja o pomenu različnih vidikov, od fizičnega in družbenega do ekonomskega



v povezavi z razvojem okolja. Nepremična kulturna dediščina skozi arhitekturo in zgradbe predstavlja zgodovino in tradicijo širšega prostora. Zato je pomembno, da se to dediščino preda prihodnjim generacijam v dobrem stanju. V knjižici *Restore – Sustainability, Restorative to Regenerative*, sta avtorja M. Brown in E. Haselsteiner o vprašanju načrtnega spreminjanja stavbnega fonda zapisala: »Potrebujemo zdrave stavbe – stavbni fond, ki vsebuje družbeno in kulturno bogate, ekonomsko vitalne in ekološko pozitivne zgradbe. Ključno vprašanje ni več zakaj in če, ampak kako in kako [6].«

### 2.1.2.1 Kreativna Četrt Barutana

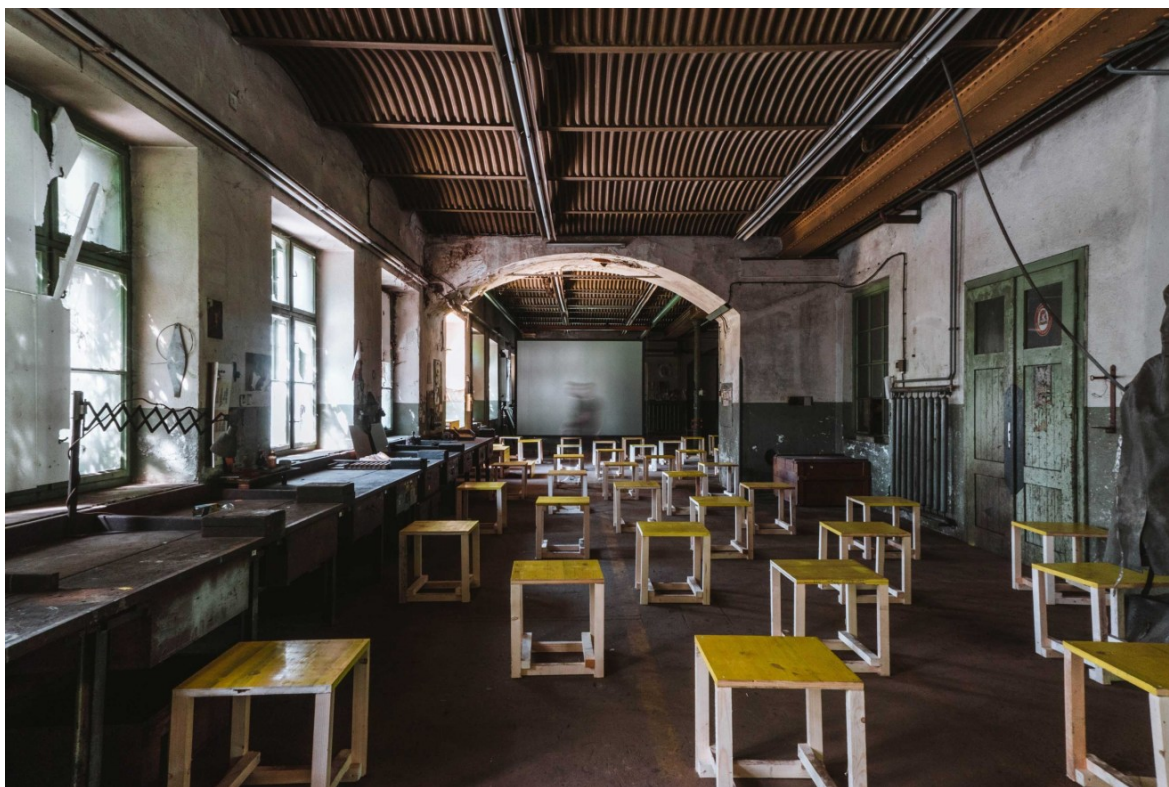
V Sloveniji imamo 1082 funkcionalno degradiranih območij [35]. Smodnišnica v Kamniku je le ena od številnih industrij, ki je vse do začetka degradacije močno oblikovala mesto. A tudi po koncu uporabe leta 2009 je območje vplivalo na mestni razvoj. Sledila je delna okoljska sanacija leta 2014, saj je takratna odločevalska javnost v prej zaprtem območju prepoznala potencial. Priložnosti za razvoj območja so velike, najprej zaradi njegovih razsežnosti. Na sliki 1 je katastrska slika nekdanjega industrijskega območja, obarvanega rumeno, in mesta Kamnik. Industrijski kompleks



Slika 1: Katastrski prikaz industrijskega območja KIK, obarvanega rumeno, in mesta Kamnik [38]

se začne približno 500 metrov severno od mestnega jedra in se razprostira čez približno 60 hektarjev.

Celotni KIK je obsegal 108 različnih zgradb, ki so služile za proizvodnjo, obdelavo in skladiščenje smodnika, pa tudi stavbe za upravo in delavce ter navsezadnje Dom kulture Kamnik (v nadaljevanju DKK). Tega so delavci s pomočjo tovarne zgradili za mesto Kamnik in leži na južni strani zunaj obzidja, ki omejuje industrijsko območje. DKK danes predstavlja glavno kulturno izhodišče Kamnika. Območje KIK-a je bilo v času delovanja tovarne skoraj v celoti prekrito z gozdnatimi površinami, ki so ga varovale pred odkritjem in letalskimi napadi, a je bila na žalost večina dreves v zadnjih letih posekana zaradi nenadzorovane vnovične uporabe prostora. Območje smodnišnice je vpisano v register kulturne dediščine, pri čemer so zavarovani parki in vrtovi na območju. Poleg tega velja tudi splošni pravni režim varstva, saj je bil sprejet prostorski akt občine Kamnik, ki določa trajno ohranjanje dediščine na trenutni lokaciji.



Slika 2: Notranjost KČB, pogled proti odru

S študijo revitalizacije območja so se poglobljeno ukvarjali že M. Vodlan v diplomskem delu *Urbanistično - krajinska ureditev degradiranega območja nekdanje Kemijske industrije Kamnik – smodnišnice* [38], A. Urankar v magistrskem delu z naslovom *Idejni načrt revitalizacije območja nekdanje smodnišnice v Kamniku* [37] in M. Kuret v magistrskem delu z naslovom *Kamnik Sever (Idejna zasnova revitalizacije*

južnega območja nekdanje Smodnišnice v Kamniku s projektom novega vstopnega objekta) [15]. Vsi prispevki so prepoznali objekt nekdanjega ključavničarstva, zgrajenega leta 1860, kot pomembnejše zgradbe na območju, ki jo je zaradi zgodovinskih in arhitekturnih vidikov treba zaščititi pred nadaljnjo degradacijo in porušitvijo. Kljub uradno nezaščiteni arhitekturi stavbe sem v nalogi iskal rešitev prostorske akustike, ki bistveno ne posega v videz in arhitekturo prostora, celo nasprotno – stremel sem k ohranitvi arhitekturnih in zgodovinskih posebnosti Barutane ter k poudarjanju njenih pozitivnih lastnosti ter značilnosti.

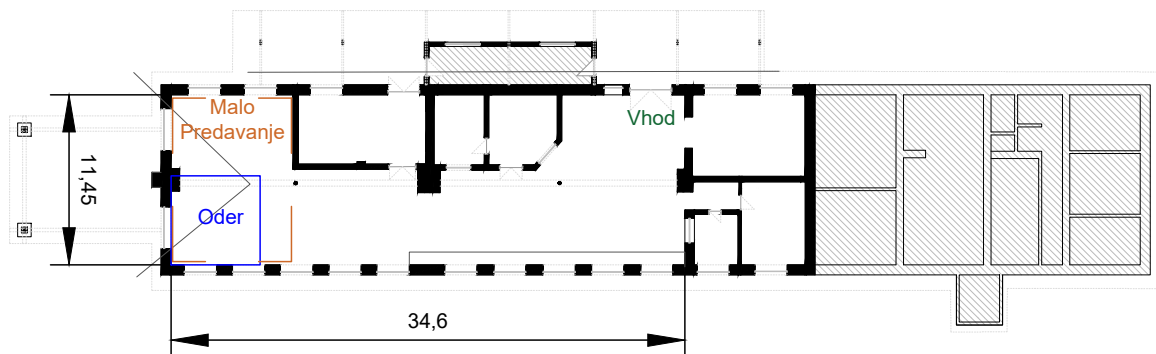


Slika 3: Arhitekturno zanimivi elementi in barvna paleta KČB

V zadnjih letih se v Barutani in v njeni okolici vzpostavlja okolje za spodbujanje kreativnosti. Poleg DKK, ki je nastal v času smodnišnice in skrbi za umetniški del, se sodelovanje z Mladinskim centrom Kotlovnica in podjetniškim spodbujevalnikom KIKštarter premika tudi v smer mladinske in industrijske ustvarjalnosti. Znotraj KČB se je od leta 2020 dalje vzpostavilo tudi arhitekturno-eksperimentalno igrišče, kjer lahko mladi študentje arhitekture, gradbeništva in povezanih študijev odkrivajo različne



projektantske pristope in materiale ter se povežejo skozi eksperimentalno učenje. V sklopu vzpostavljanja KČB sem želel raziskati potencial glavne industrijske hale za izvajanje pestrega prireditvenega programa s poudarkom na koncertih sodobne glasbe. Tloris glavne hale s predvidenimi legami odrov za različne dogodke je predstavljen na sliki 4.



Slika 4: Tloris glavne hale KČB z označenim vhodom in predvidenimi dejavnostmi. Notranjost KČB: modra barva označuje položaj odra za koncerte, gledališke predstave in večja predavanja, oranžna barva pa označuje prostor za manjša predavanja.

## 2.2 AKUSTIKA

Akustika je fizikalna veda o zvoku. Ime izhaja iz stare grščine, iz besede »akouo«, ki pomeni 'slišim' [10]. Od začetkov obravnave zvoka do 19. stoletja se je veda razvijala počasi, saj se je znanstveno zanimanje za zvok osredotočalo na glasbila, glasbo in glasbena prizorišča. Moderna akustika se je vzpostavljala z dognanji fizikov kot so bili Helmholtz, Rayleigh, Ohm, Wheatstone in Henry. Takrat se je razumevanje zvoka razširilo do te mere, da se je akustiko povezovalo tudi z drugimi vedami oziroma se je ta razpredla v različne veje znanosti. Znano je Lindsayevo kolo akustike iz leta 1964, ki prikazuje akustiko kot moderno znanstveno vedo.

O akustiki v arhitekturi in gradbeništvu največkrat govorimo, ko je tema obravnave zaščita prostora pred nezaželenim hrupom iz okolja. Takrat se pogovarjamo o zvočno zaščitnem sloju, ki ga predstavljajo stene, stropi, tla in stavbno pohištvo. Poleg zagotavljanja ustrezne zvočne izoliranosti prostora pa na dobro počutje in lagodje uporabnikov vplivajo tudi prostorsko akustični vidiki. Parametri prostorske akustike so pomembni za doseganje kakovostnega bivanja, ko obravnavamo stanovanjske zgradbe, učinkovitega delovnega procesa, ko govorimo o prostorih, namenjenih delu, in za organizacijo kakovostnih dogodkov v primeru prireditvenih prostorov. Preden se poglobimo v prostorsko akustiko, je treba razumeti, kaj je zvok in kako se obnaša.



Slika 5: Grafični prikaz akustike kot znanstvene vede - povzeto po Lindsayevem kolesu akustike [10]

### 2.2.1 Zvok

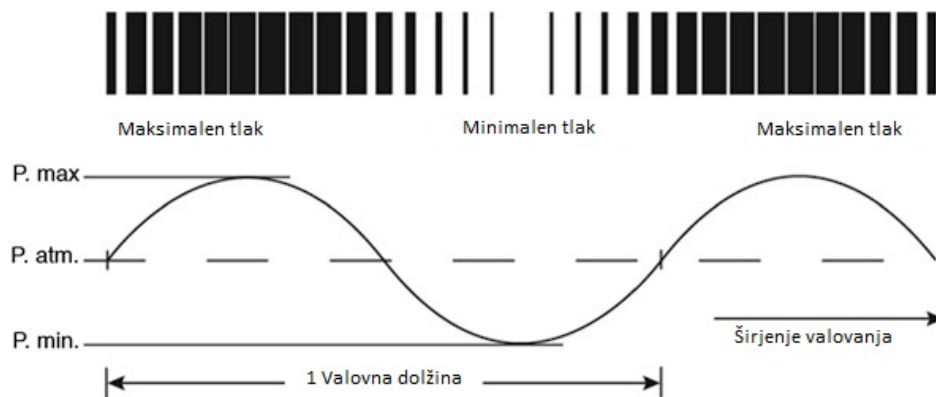
Zvok je mehansko valovanje delcev v mediju, pri čemer je ta lahko trdnina, kapljevina ali plin. Valovanje nastane pri izvoru s premikom prvih molekul, ki nato povzročijo nastanek zgoščenin in razredčin, ki kot motnja potujejo skozi medij in se širijo. Akustična energija se po mediju širi stran od izvora. Najpogosteje se obravnava zvok, ki se širi po zraku, a je za gradbeno akustiko pomembno tudi širjenje po trdninah,

tj. po konstrukcijah zgradb [26]. Hitrost zvoka v zraku je odvisna od temperature in vlažnosti zraka in pri 20 stopinjah Celzija znaša približno 343 [m/s] ter jo označujemo s  $c$ . Hitrost zvoka povezuje tudi enačba 2.1 s frekvenco  $f$  in valovno dolžino zvočnega valovanja  $\lambda$  [1],

$$c = f \times \lambda. \tag{2.1}$$

Zvok pogosto opazujemo pri posamezni frekvenci, kar pomeni, da zvočno valovanje obravnavamo kot sinusno. Tako frekvenca  $f$  pove število nihajev v sekundi z enoto [Hz], obratno sorazmerna s frekvenco zvoka pa je valovna dolžina z enoto [m] ter oznako  $\lambda$ . Valovna dolžina je razdalja, ki je prepotuje zvočni signal v eni periodi [1].

Frekvenca je tisto, kar pri poslušanju povezujemo z višino zvoka. Visoki zvoki imajo visoke frekvence, torej je zvočno valovanje s kratko valovno dolžino. Na drugi strani so nizki toni ali nizke frekvence, ki nihajo »počasi«, zato imajo velike valovne dolžine. Človeško uho v zdravem stanju sliši od 20 do 20.000 Hz. Razdelitev frekvenčnega spektra slušnega razpona zdravega človeka je predstavljena tudi na sliki 7.

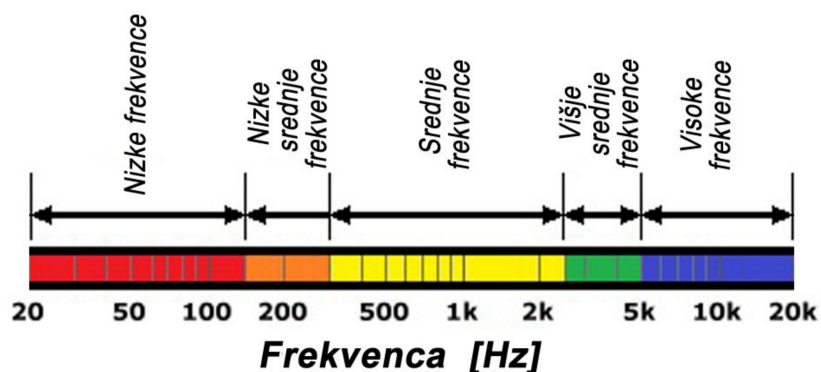


Slika 6: Grafični prikaz zvočnega valovanja čistega tona, povzeto po Adelman-Larsen [1]

V akustiki frekvenčni spekter delimo na oktavne in nadalje na terčne pasove. Kot prikazuje tabela 1, je naš slušni spekter mogoče razdeliti na 10 oktavnih (odebeljeno so označene srednje vrednosti oktavnih pasov) ali na 30 terčnih pasov [1, 12]. Frekvence sosednjih oktavnih pasov so vedno v razmerju 2 : 1.

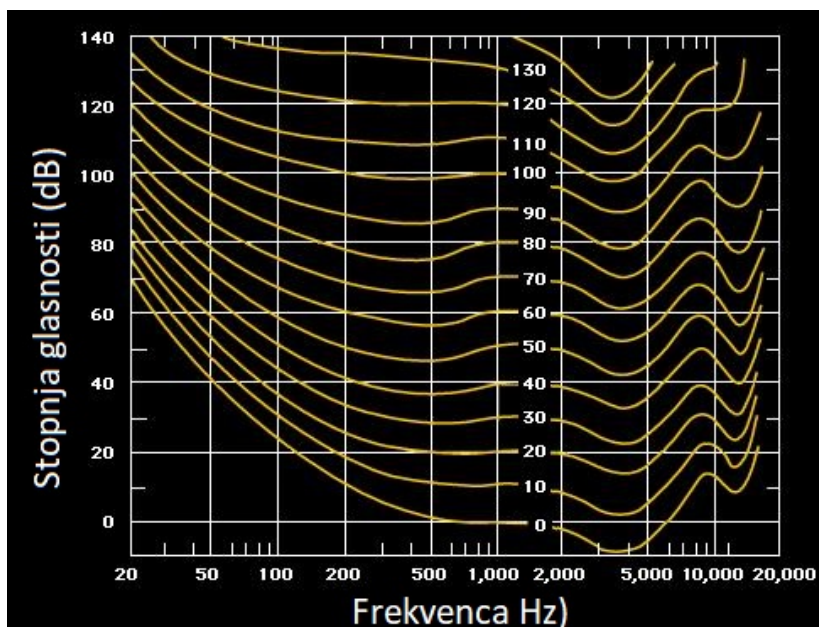
Tabela 1: Standardizirane vrednosti srednjih frekvenc terčnih (vse vrednosti) in oktavnih pasov (krepko zapisane vrednosti) v Hz, povzeto po Jacobsen et al. [12]

20	25	<b>31,5</b>	40	50	<b>63</b>	80	100	<b>125</b>	160	200	<b>250</b>	315	400	<b>500</b>	630	800	<b>1000</b>
1250	1600	<b>2000</b>	2500	3150	<b>4000</b>	5000	6300	<b>8000</b>	10.000	12.500	<b>16.000</b>	20.000					



Slika 7: Razdelitev na frekvenčne pasove človekovega slušnega spektra [26]

Eden izmed pomembnejših parametrov zaznave zvoka je glasnost zvoka, ki je povezana z zvočnim tlakom, ki ga zazna človeško uho. Ta zaznava spremembe že pri  $20 \mu\text{Pa}$ , ki je tudi mejna vrednost, pri kateri človeško uho še sliši. Zgornja meja, imenovana prag bolečine, je 100 Pa. Razmerje med spodnjo in zgornjo mejo je 1 : 1.000.000, kar je zelo veliko dinamično območje. Posledično je dobro vpeljati logaritemsko skalo. Tako je A. G. Bell vpeljal raven zvočnega tlaka kot dvajsetkratnik logaritemskega razmerja med izmerjenim zvočnim tlakom in njegovo referenčno vrednostjo. Raven zvočnega tlaka ima enoto [dB (decibel)], vrednosti pa zavzema v razponu med 0 dB (pri  $20 \mu\text{Pa}$  zvočnega tlaka) in do 133 dB (pri 100 Pa).



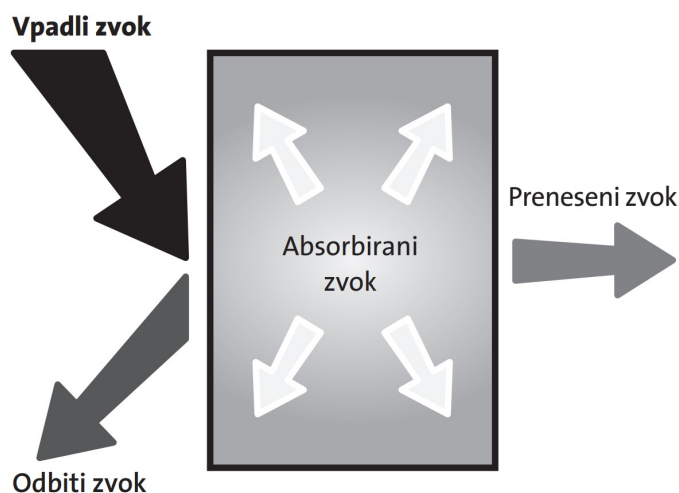
Slika 8: Krivulje zaznave enake glasnosti pri posameznih frekvencah, povzeto po Stalder [26].

V grobem velja, da povečanje za 10 dB v ravni zvočnega tlaka naše uho zazna kot podvojitev glasnosti. Vendar je občutljivost človeškega ušesa odvisna tudi od frekvence, kar je predstavljeno na sliki 8. V frekvenčnem območju od 2 do 5 kHz pride do resonance v človeškem sluhovodu, zato smo v tem območju bolj občutljivi in posledično sposobni zaznati tudi zelo nizke ravni zvočnega tlaka. Zvoke v tem območju dojemamo tudi kot glasnejše v primerjavi z ostalimi frekvencami. Na podlagi rumenih krivulj določimo, kakšna raven zvočnega tlaka je potrebna pri različnih frekvencah, da jih naše uho dojame kot enako glasne [26].

## 2.2.2 Prostorska akustika

Prostorska akustika je kot veja arhitekturne akustike preporod doživela z delom W. C. Sabina, ki je povezal čas padanja ravni zvočnega tlaka v prostoru po prenehanju oddajanja zvočnega signala z velikostjo prostora in lastnostmi materialov na površinah v njem. Količino je poimenoval odmevni čas in še danes velja za osnovni parameter prostorske akustike [20].

Ko zvočni signal zadane ob oviro, se odbije, absorbira in/ali lomi (pojavi so predstavljeni na sliki 9) [20,26].



Slika 9: Prikaz odboja in loma zvočnega signala ob stiku z oviro [20]

Če je ovira iz togega materiala, se večina zvočne energije odbije. To se navadno zgodi pri materialih, kot so beton, opečni zid, kovina, itd. Odboj z vidika akustike v splošnem ni nezaželen, lahko pa se zgodijo nezaželeni odboji. Mednje štejemo naslednjih pet pojavov:

- **Trepetajoči jek** (ang. *flutter echo*) se najpogosteje pojavi med vzporednimi stenami in se sliši kot »ping-pong« odmev. Trepetajoči jek je težaven, saj



se posamezni odboj sliši kot samostojen zvočni signal in njegova ponavljajoča prisotnost vse dokler ne izzveni [26, 41].

- **Modalno zvenenje** (ang. *modal ringing*) je pojav, pri katerem se vzpostavijo stoječi valovi modalnih frekvenc. V prostorih kvadraste oblike se pojav zgodi, ko je četrtnina, polovica ali celotna valovna dolžina posamezne frekvence enaka razmerju stranic prostora in se pojavijo ojačitve in oslabitve zvočnega signala [26].
- **Zakasneli odboj** se pojavi, ko je h glavnemu prostoru, v katerem je zvočni vir, priključen dodatni prostor, ki deluje kot samostojni akustični volumen z manj zvočne absorpcije [41].
- **Odblesk** (ang. *glare*) je akustični pojav podoben trepetajočemu jeku, pri katerem je odboj zvočnega vala zaznan kot slišna ponovitev zvoka [25].
- **Povečana odmevnost** je dolg in močan akustični odziv prostora, ki nastane kot posledica pomanjkanja absorpcijskih površin v prostoru. Kaže se v visokih vrednostih odmevnega časa [20].

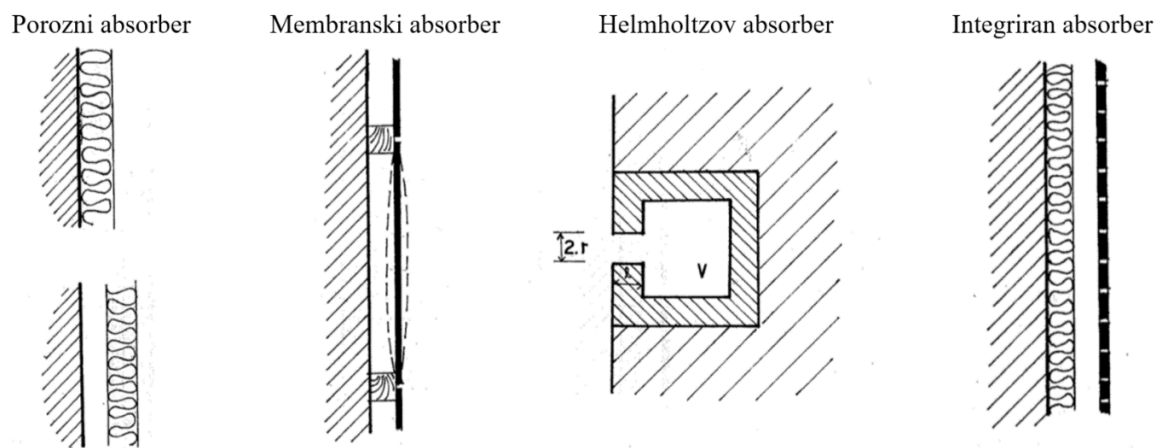
Nezaželeni zvočni pojavi so v največji meri posledica velikosti, položaja in lastnosti sten prostora, zato se njihovega reševanja lotimo bodisi s spremembo geometrije obodnih površin prostora bodisi z vnosom absorpcije in sipanja zvočne energije. Rešitev je odvisna predvsem od želenih akustičnih pogojev in od drugih arhitekturno-ekonomskih zmožnosti, omejitev zaščite kulturne dediščine, požarne varnosti in velikosti prostora.

V splošnem je absorpcija fizikalni pojav, pri katerem se energija pretvori iz ene v drugo obliko. Pri tem se najpogosteje zvočna energija s pomočjo absorpcijskega materiala pretvori v toploto. Kako absorpcijsko učinkovit je določen material pri pretvorbi določimo s koeficientom absorpcije izbranega materiala. Absorpcijski koeficient označujemo z  $\alpha$  in ima vrednost od 0 do 1, pri čemer 1 pomeni popolno absorpcijo zvočne energije in 0 popolni odboj [12, 20, 26]. Pri tem je pomembno poudariti, da je absorptivnost, količina odvisna od frekvence zvoka, zato vrednosti absorptivnosti vedno nanašamo na pripadajočo frekvenco, npr. koeficient zvočne absorptivnosti lesnih vlaken vrste *Pinus radiata* debeline 50 mm pri 500 Hz je  $\alpha_{500\text{Hz}} = 0,70$  [39]. Meritve zvočne absorpcije izvedemo skladno s standardom ISO 354 [29]. Na podlagi tega je koeficient zvočne absorpcije podan za oktavne pasove 125, 250, 500, 1000, 2000 in 4000 Hz [29].

Meritve se izvajajo v impedančni cevi (metoda opisana v razdelku 3.5) ali v odmevnici. Pri tem je pomembno dodati, da se meritve koeficienta absorpcije v impedančni cevi vedno izvajajo z zvočnim valovanjem, ki vpada pravokotno na površino absorberja. V primeru merjenja koeficienta absorpcije v odmevnici vpade zvočno valovanje zaradi

različnih odbojev v prostoru pod različnimi vpadnimi koti na površino absorberja, zato niso povsem primerljivi z vrednostmi pridobljenimi v impedančni cevi.

Na sliki 10 so prikazani različni tipi absorberjev. Najpogosteje so uporabljeni porozni absorberji. Poleg njih poznamo tudi resonatorske absorberje, med katere štejemo membranske oziroma panelne absorberje in Helmholtzove absorberje [12]. Posamezni absorberji se razlikujejo po principu delovanja in posledično tudi po frekvenčnem poteku absorpcije [14].



Slika 10: Tipi zvočnih absorberjev [18]

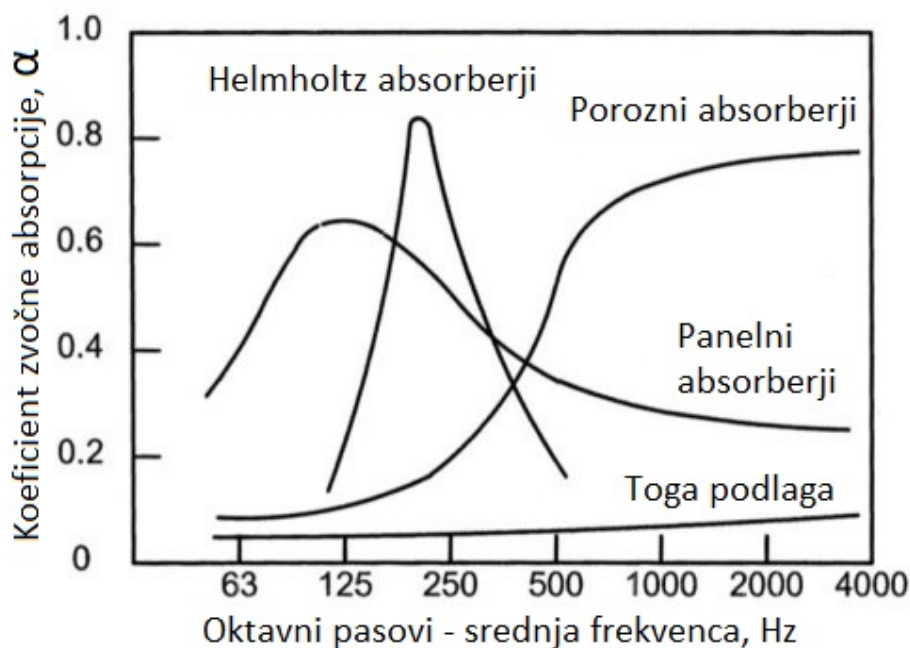
Karakterističen frekvenčni razpon posameznih tipov absorberjev je prikazan na sliki 11. Kot je razvidno so resonatorski absorberji učinkoviti v ožjem pasu nižjih oktavnih pasov, porozni absorberji pa značilno zelo učinkovito absorbirajo višje frekvence. Pri teh je ključna debelina materiala  $d$ , saj ta določa najnižjo valovno dolžino, pri kateri se pojavi trenje na točki primarne kinetične energije. Ker je na četrtini valovne dolžine amplituda zvočnega valovanja najvišja, je smiselno vgraditi porozne absorberje debeline:

$$d = \frac{\lambda}{4}, \quad (2.2)$$

pri čemer  $\lambda$  določimo prek ciljne absorbirane frekvence.

Da prihranimo pri količini uporabljenega materiala in prostoru, lahko debel porozni material zamenjamo s tanjšo plastjo materiala, ki pa je nameščen na večji razdalji od togega zidu. Tak primer je lahko tudi zavesa [12]. Pogosto se uporablja tudi kombinirane oziroma integrirane absorberje, pri čemer npr. v Helmholtzov absorber namestimo še porozni material ali pa ga dodamo za panelni absorber. Ta je lahko dodatno naluknjan, zato deluje kot Helmholtzov resonator. Tako lahko dosežemo zaželen frekvenčni potek absorpcije. Toda pri predvidevanju obnašanja

tovrstnih kompleksnih absorberjev je težavno napovedati dejanske absorpcijske lastnosti, saj modeliranje takšnega sestavljenega absorberja kot fizikalni sistem postane izredno zahtevno. Če bi že uspeli pri modeliranju, bi v dejanskem stanju nekoliko drugačna lega zvočnih virov ali pa manjše odstopanje pri montaži bistveno spremenila absorpcijske lastnosti sistema in posledično njegovo učinkovitost. Zato je pri sestavljanju kompleksnejših absorberjev bolj smiselno izdelati vzorec in ga pomeriti v odmevnici [12, 14].



Slika 11: Karakteristične krivulje zvočne absorptivnosti različnih tipov absorberjev, povzeto po Kunič et al. [14]

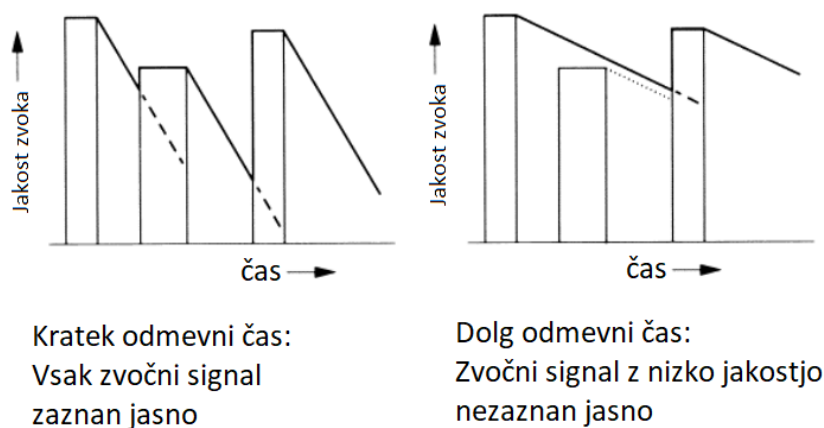
Poleg absorberjev v prostor vnašamo tudi difuzorje, na katerih se zvočni val ne odbije v eno smer, ampak se razprši po prostoru. S tem preprečimo ustvarjanje ojačitvenih in oslabitvenih polj. Poznamo različne tipe difuzorjev, ki jih ločimo glede na obliko na piramidaste, cilindrične, QRD (ang. *Quadratic-Residue Diffusor*) in RPG Skyline difuzorje. Dodatno jih lahko kombiniramo z uporabo absorpcijskih materialov. Takšni sistemi ustvarjajo difuzni odboj s kombiniranjem absorpcije in odboja [26].

Absorpcijske elemente in difuzorje dodajamo v prostor z namenom obvladanja odmeva, ki ga lahko skrajšamo ali podaljšamo. Odmevnost, ki jo zaznavamo subjektivno, lahko tudi merimo in ovrednotimo kot odmevni čas prostora. Enako kot koeficient zvočne absorpcije je tudi odmevni čas količina, odvisna od frekvence zvočnega vala. Pogosto se pri merjenju odmevnega časa rezultate prostorsko povpreči in navaja kot enoštevilčno vrednost za celotni slušni spekter, a je v primeru projektiranja

priredivitvenih prostorov zelo pomembno, da je analiziran za posamezne frekvenčne pasove.

### 2.2.2.1 Odmevni čas

Odmevni čas RT (ang. *reverberation time*) velja za glavni parameter prostorske akustike. Kot je prikazano na sliki 12, po koncu zvočnega signala jakost upada. Hitrost upadanja je odvisna od absorpcijskih lastnosti obodnih površin prostora, ki lahko zaradi počasnega upadanja jakosti prvega zvočnega signala maskira naslednje zvoke. Padanje jakosti v času imenujemo tudi krivulja upada jakosti zvočnega tlaka (ang. *decay curve*), kar je glavni objektivni parameter prostorske akustike. Na levem grafikonu na sliki 12 opazimo, da jakost zvoka upada hitreje kot na desnem grafikonu. Tako je ob novem zvočnem valu jakost prejšnjega vala dovolj nizka za jasno zaznavo naslednjega vala. Tako vsak val zaznamo posebej. V desnem primeru, ko je odmevni čas daljši, je



Slika 12: Prikaz zaznave zvoka in pomen odmevnega časa prostora za slušno razumevanje, povzeto po Jacobsen et al. [12]

jakost prvega zvočnega vala ob pojavu drugega vala še vedno visoka, kar povzroči akustični pojav, ki ga imenujemo maskiranje. Pri njem prvi zvočni val z določeno jakostjo ne pojenja dovolj hitro in prekrije naslednji zvočni val z nižjo jakostjo. Poleg jakosti zvočnih valov je maskiranje odvisno tudi od frekvence zvoka. V splošnem je pravilo, da toni z nižjo frekvenco maskirajo tone z višjo frekvenco [1]. Maskiranje je v primeru prostorske akustike prireditvenih prizorišč navadno nezaželen pojav, ki ga želimo preprečiti tako, da vnesemo zadostno količino absorpcije v prostor. Vendar se maskiranje izkorišča, kadar želimo prekriti določen zvok, navadno motečih frekvenc, npr. vuvuzele na nogometni tekmi. Poleg jasnosti zvoka krajšanje odmevnega časa zmanjšuje tudi raven odmevnega hrupa, kar pozitivno vpliva na udobje uporabnikov v

prostoru in ugodno akustično razpoloženje v prostoru [41].

Pionir sodobne akustike Wallace C. Sabine je odmevni čas definiral leta 1896 in tako začel novo vejo arhitekturne akustike. Določil ga je kot čas, v katerem raven zvočnega tlaka pade za 60 dB po koncu zvočnega signala in ga označil s  $T_{60}$  [12]. Če nam raven hrupa ozadja ne omogoča 60 dB razlike v jakosti zvočnega tlaka, se lahko odmevni čas določi tudi v manjšem razponu. Poleg  $T_{60}$  tako poznamo še  $T_{30}$ ,  $T_{20}$  in  $T_{10}$ , pri čemer se  $T_{10}$  imenuje tudi čas zgodnjega upada jakosti EDT (*ang. early-decay time*). Vsi omenjeni parametri se računajo prek krivulje upada jakosti zvočnega tlaka in sicer kot razlika v času, v katerem jakost upade za 5 dB in ko jakost upade za 65, 35, 25 oziroma 15 dB [20, 32]. Navedene oznake sicer določajo dinamično območje merjenja odmevnega časa, a so merjene vrednosti vedno ekstrapolirane na dinamični razpon 60 dB. Tako v primeru ožjega dinamičnega razpona, npr. za  $T_{20}$ , meritev opravimo pri dinamičnem razponu 20 dB, vendar izračunamo ekstrapolirano vrednost, ki predstavlja dejanski čas, ki je potreben, da raven zvočne jakosti upade za 60 dB. Četudi EDT velja za parameter, ki najbolje opisuje subjektivno zaznavo odmevnosti prostora, je odmevni čas poenoten na dinamični razpon 60 dB, saj je merjenje EDT težavno in lahko privede do prevelikih odstopanj.

Odmevni čas lahko tudi računsko določimo s Sabinovo enačbo

$$T = 0,16 \frac{V}{A} \quad (2.3)$$

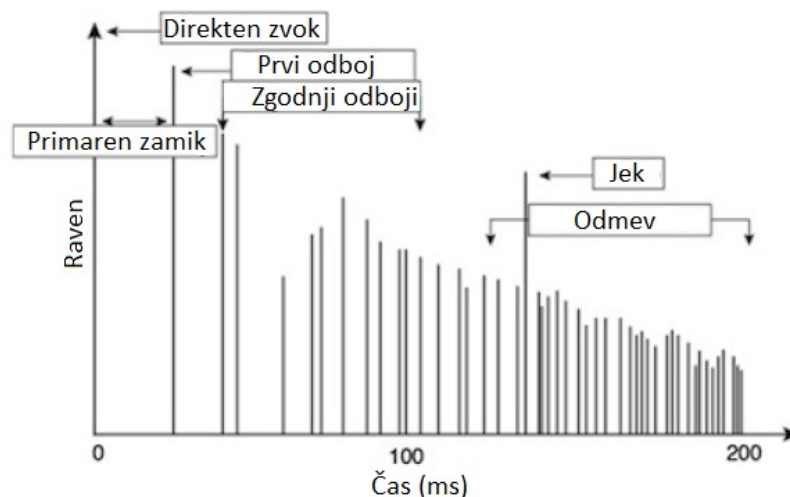
pri čemer je  $V$  volumen obravnavanega prostora,  $A$  pa absorpcijska površina v prostoru, ki jo izračunamo kot vsoto produktov koeficienta absorpcije in pripadajoče kvadrature posamezne površine [20, 32]. Sabinova enačba (2.3) torej povezuje volumen prostora, površine prostora in njihovo absorptivnost ter odmevni čas. Tako lahko prek izmerjenega odmevnega časa in poznanega volumna določimo absorpcijske lastnosti obstoječih vgrajenih materialov, oziroma pridemo do potrebnih absorpcijskih površin prek ciljnega odmevnega časa. Kot je razvidno iz enačbe (2.3), se pri večanju volumna in ohranjanju enake količine absorpcijskih površin daljša odmevni čas. Zato večji prostori pogosto delujejo kot prostori daljšega odmeva [20]. Odmevni čas se navadno obravnava za specifično frekvenčno območje, npr. odmevni čas v coni občinstva v baskovskem oktavnem pasu 63 in 125 Hz, z oznako  $T_{30,B}$  [2].

Čeprav je bila prostorska akustika v primerjavi z ostalimi znanostmi še pred leti v povojih, so zgradbe namenjene prireditvam gradili že pred tisočletji. Amfiteatri v antiki in operne dvorane v srednjem veku so bili glavni objekti, pri katerih so ob načrtovanju upoštevali tudi akustiko, vendar je proces temeljil pretežno na izkušnjah. Glavni princip projektiranja je bila uporaba preizkušenih metod, pri čemer so si le drznejši arhitekti upali vnesti večje spremembe v zaznavo prostora. Tako je akustika vse do Sabinove vpeljave odmevnega časa napredovala počasi. Razumevanje odmevnega časa je pripeljalo prostorsko akustiko do stopnje, da imamo sedaj tako teoretično in

praktično znanje, kako meriti parametre prostorske akustike in kako izboljšati stanje. V zadnjih desetletjih se je napredek s pomočjo uporabe računalnikov in simulacijskih orodji še pospešil [20]. Odmevni čas ostaja glavni parameter prostorske akustike, a je za celostno analizo akustike prostora nujno tudi poznavanje drugih količin. Prednost meritev odmevnega časa je uporabnost, saj velja za hitro in enostavno metodo ocene trenutnega stanja akustike izbranega prostora, ki jo lahko opravimo na terenu [1].

### 2.2.2.2 Impulzni odziv

Impulzni odziv (ang. *impulse response*) je razvoj zvočnega tlaka  $p(t)$ , merjenega v določeni točki v prostoru kot posledica oddajanja Diracovega impulza v drugi točki v prostoru. Ker je oddajanje Diracovega impulza neizvedljivo, ga nadomestimo s krajšimi prehodnimi zvoki, kot je strel s puško, pok ipd. Alternativno lahko uporabimo signale s širokim spektrom, kot sta sinusni prelet ali roza šum, pri čemer se lahko z ustrežno obdelavo signalov pridobi impulzni odziv [20, 32]. Na podlagi impulznega odziva lahko določimo direkten zvok, prve in kasnejše odboje [1]. Z različnimi sklopi integracijskih operacij pa lahko pridobimo različne objektivne parametre akustike prostora [20]. Impulzni odziv lahko generiramo tudi s simulacijskimi orodji, kar je uporabno, saj ob njegovem poznavanju lahko predvidimo odzivanje obravnavanega sistema na poljubno obliko motnje, tj. pripravimo slišne vzorce.



Slika 13: Reflektogram (običajno  $20 \log_{10} p(t)$  z enoto [dB]), graf časovnega razvoja ravnine zvočnega tlaka – viden je zvočni signal (direkten zvok), prvi, zgodnji in kasnejši odboji, ki se združijo v odmev, povzeto po Adelman-Larsen [1]

### 2.2.2.3 Ostali parametri prostorske akustike

Poleg odmevnega časa poznamo še druge akustične parametre, ki jih v osnovi ločimo na subjektivne in objektivne. Prvi so zaradi svoje subjektivne narave manj oprijemljivi in pogosto različno interpretirani. Na drugi strani lahko objektivne parametre merimo in tudi količinsko predstavimo. V času razvoja akustike kot znanstvene vede so bile opravljene študije korelacije med subjektivnimi in objektivnimi parametri, s čimer so se razvile količinske priporočilne vrednosti akustičnih parametrov. Osrednja avtorja, ki sta se ukvarjala s korelacijo sta Beranek v koncertnih dvoranh klasične glasbe [3,4] in Adelman-Larsen in sodelavcev v koncertnih dvoranh sodobne glasbe [1,2]. Te korelacije in povezave so se razvile skupaj z razvojem merilnih oprem in tehnik [3].

Za razumevanje akustičnih parametrov je pomembno ločevanje med direktnim, zgodnjim in odmevnim zvokom. Direktnen zvok je tisti, ki ga poslušalec sliši prihajati neposredno iz inštrumenta. Zgodnji zvok poleg direktnega zvoka vključuje še odboje zvoka v prvih 80 ms. Odmevni zvok pa je zvok, ki pride do poslušalca po prvih 80 ms. V definicijah akustičnih parametrov prevladujejo razmerja energij med zgodnjim in odmevnim zvokom [3].

Za potrebe magistrskega dela sem uporabil naslednje parametre.

- **Odmevni čas RT** (ang. *reverberation time*) je akustični parameter, ki podaja čas po izklopu zvočnega vira, v katerem raven zvočnega tlaka pade za 60 dB. Povezujemo ga s subjektivnim parametrom, odmevnostjo. Ta v osnovi ni niti zaželen niti nezaželen, temveč je zgolj lastnost prostora, ki glasbeniku omogoča ustvarjanje polne glasbene izkušnje. Zato se odmevnost povezuje tudi z drugimi subjektivnimi parametri, kot so *polnost tona*, *živahnost* ali »*suhost*« določenega prostora. Kratek odmevni čas pomeni, da je prostor »suh«, torej zvok hitro pojenja in ima prostor posledično manj odziva. Odmevnost in živahnost sicer lahko vrednotimo tudi kot *EDT* (ang. *early-decay-time*, včasih tudi ang. izraz *running EDT*). Čeprav je za ovrednotenje prireditvenih prostorov zelo razširjen  $T_{30}$ , je *EDT* tisti parameter, ki najbolje opiše poslušalčevo dožemanje odmevnosti v prostoru. To je še toliko bolj izrazito v prireditvenih prostorih za koncerte sodobne glasbe. Zato je lahko nek prireditveni prostor s predolgim  $T_{30}$  še vedno primeren, če ima krajši *EDT*. Odtod izhaja tudi razmerje  $EDT : T_{30}$ , ki se vedno bolj uveljavlja kot relevanten parameter akustike prostora. Razmerje naj bi bilo povezano s stopnjo difuznosti zvočnega polja, bližje je razmerje vrednosti 1, bolj je prostor difuzen [1,3].
- **Definicija D<sub>50</sub>**, (ang. *definition*) je parameter, s katerim vrednotimo čistost zvoka prek merjenja razmerja začetnih in poznejših energij, ki prispejo do poslušalca v razkoraku 50 ms [1,20]. Povezujemo ga s subjektivnimi parametri,

kot so *sestava*, *blišč*, *ravnovesje*, *enovitost*, *barva zvoka* idr. Podoben parameter je tudi jasnost  $C_{80}$ , (ang. *clarity*), ki označuje razmerje zgodnjih in poznih zvočnih energij, ki prispejo do poslušalca, izražen v dB. Razlika je le v časovnem razkoraku, saj za merjenje jasnosti privzamemo razkorak med začetnimi in poznimi energijami v vrednosti 80 ms. V popularni glasbi je že 50 ms veliko, če upoštevamo hitrost zvoka v zraku – namreč v 50 ms zvok prepotuje 17 m. Zato v sklopu obravnavanja akustike za prireditve sodobne glasbe iščemo tudi rešitve s krajšim časovnim razkorakom, npr.  $C_7$  [1].

- **Razmerje basov BR** (ang. *bass ratio*) je akustični parameter, ki ga merimo kot razmerje odmevnih časov v nizkih in srednjih frekvencah. Povezujemo ga s *toplino* (ang. *warmth*), ki je subjektiven parameter in je opredeljen kot bogatost zvoka v območju basovskih tonov [3]. Beranek za izračun razmerja basov predlaga enačbo  $BR_B = (T_{125} + T_{250}) / (T_{500} + T_{1000})$ , ki je osnovana na klasični glasbi. Pri sodobni glasbi je več srednjih frekvenc, zato so Adelman-Larsen in sodelavci razmerje basov definirali kot  $BR_{A-L} = (T_{125} + T_{250}) / (T_{500} + T_{2000})$  [1, 2, 4].
- **Akustična jakost G** (ang. *sound strength*) je parameter, ki vrednoti raven zvočnega tlaka, ki ga uspe ustvariti zvočni vir v prostoru. Jakost je povezana z zaznavo glasnosti, ki je subjektiven parameter. Meritve jakosti se navadno opravijo na karakterističnih legah v prostoru, npr. da je zvočni vir na odru in meritve glasnosti na več položajih v občinstvu [20]. Čeprav je akustična jakost pomemben parameter pri obravnavanju prostorske akustike koncertnih dvoran klasične glasbe, pri sodobni glasbi nima večjega pomena ob uporabi sistema zvočnikov (v nadaljevanju PA-sistem), saj lahko želeno raven zvočnega tlaka dosežemo z nastavitvami PA-sistema. Kljub vsemu zadostna jakost v oktavnem pasu 63 Hz predstavlja prednost prireditvenega prostora sodobne glasbe [1].
- **Indeks prenosa govora STI** (ang. *speech-transmission-index*) je parameter, ki opredeljuje kakovost prenosa govora s poudarkom na razumljivosti [34]. Merimo ga tako, da določimo funkcijo prenosa modulacije MTF (ang. *modulation transfer function*) od izvora zvoka do sprejemnika. MTF je določen za vsak oktavni pas hrupa (od 125 do 8000 Hz) s številom modulacijskih frekvenc (od 0,63 do 12,5 Hz). Zmanjšanje v modulaciji pretvorimo v ekvivalentno razmerje med signalom in hrupom, ki ga nato normiramo, da pridobimo indeks z vrednostjo od 0 do 1. Tega lahko nato opredelimo v razrede govorne razumljivosti [12].

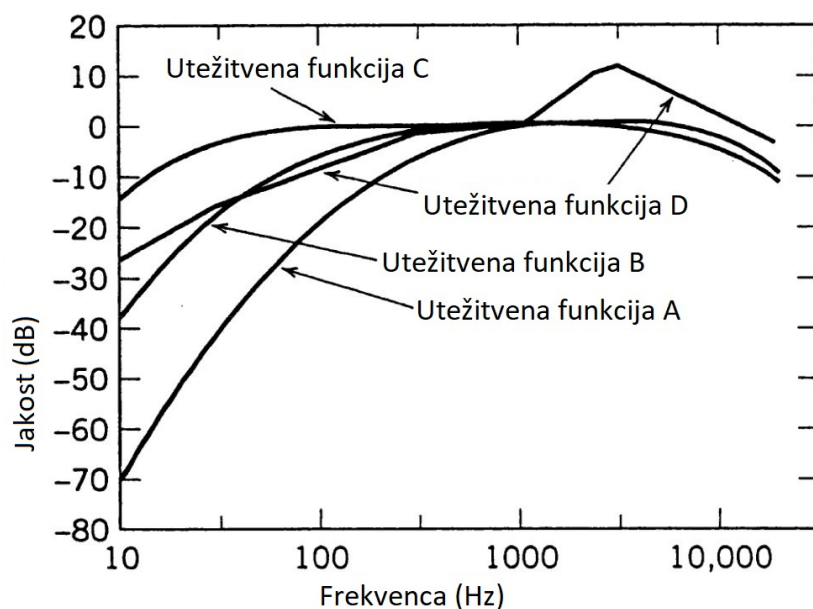
#### 2.2.2.4 Utežitvene funkcije

Ker je dojemanje glasnosti frekvenčno odvisno (prikazano na sliki 8), se je razvilo več utežitvenih krivulj, ki so prikazane na sliki 14. S temi ob merjenju ravni zvoka



frekvenčno obtežimo signale in tako upoštevamo pomen posamezne frekvence za človekovo dejansko zaznavo zvoka. Pozneje je bilo sicer dokazano, da je kompleksnost našega slušnega sistema bistveno večja, kot so jo sprva prikazovale utežitvene krivulje. V teoriji so se razvile standardizirane funkcije A, B, C in D, pri čemer se funkciji B in D praktično ne uporabljata več. Najpogosteje je uporabljena utežitvena funkcija A, ki sledi človeški občutljivosti pri nizkih ravneh zvoka. Razlika med krivuljama A in C sledi različni frekvenčni občutljivosti ušesa pri različnih frekvencah in se kaže predvsem v vsebnosti nizkih frekvenc [12].

V splošnem se utežitvene funkcije uporabljajo za vrednotenje ravni hrupa. Meritve zvočne jakosti, pri katerih je bila uporabljena utežitvena funkcija A so označene z  $L_A$  in tiste z utežitveno funkcijo C pa z  $L_C$ . Če utežitveni filter ni bil uporabljen, se meritev označi z  $L_Z$  [12, 13]. Občasno se uporablja tudi kombinacija teh dveh funkcij, pri čemer se izbiro utežitvene funkcije prilagaja okoliščinam merjenja oziroma zahtevam predpisanih merilnih postopkov.



Slika 14: Standardizirane utežitvene funkcije zvočne jakosti v odvisnosti od frekvence, povzeto po Krug [13]

### 2.2.3 Akustične zahteve prireditvenih prostorov

V splošnem je ocenjevanje prostorske akustike še vedno zelo subjektivno, kar je pri prireditvenih prostorih, kot so koncertne dvorane in gledališča, še toliko bolj izrazito. S problematiko subjektivnosti pri vrednotenju dobrih akustičnih pogojev so se ukvarjali že Lokki [16], Beranek [3, 4] in Adelman-Larsen et al. [1, 2]. V

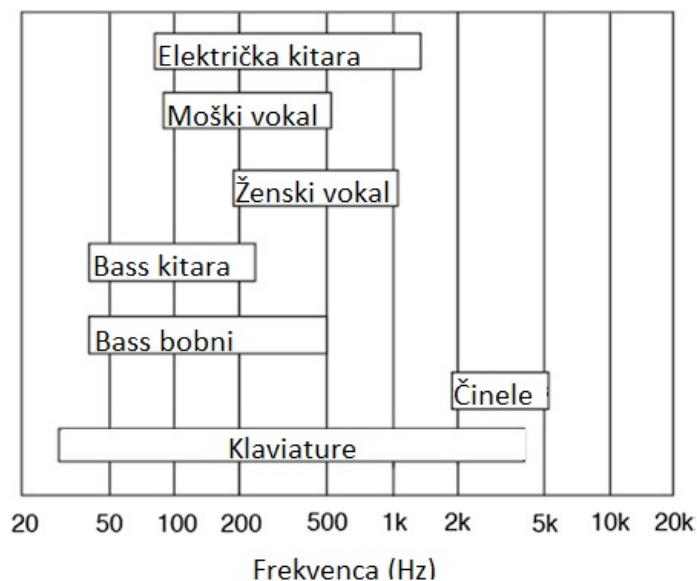
zadnjih letih so se razvili različni parametri prostorske akustike, a je kljub vsemu težko količinsko predstaviti kakovosten prireditveni prostor, saj merljive količine ne zaobjamejo celotnega uporabnikovega doživljanja v času koncerta. V magistrskem delu sem se osredotočil le na količinsko merljive količine.

Zgodovinsko gledano se je prostorska akustika razvijala skupaj z glasbo, zato je bilo projektiranje prireditvenih prostorov večinoma osnovano na klasični glasbi in operi (glasbene prireditve) ter na klasični dramski igri (gledališča). Vzporedno s pojavom moderne akustike se je razvijala tudi sodobna glasba, ki je v zadnjih 100 letih dosegla vrh raznolikosti. Poznamo zvrsti, kot so blues, elektronska glasba, hip-hop, jazz, metal, punk, rap, rock, idr. Pestrost različnih glasbenih zvrsti prinaša tudi različne zahteve po prostorski akustiki prireditvenih prostorov, saj se prej omenjene zvrsti med seboj razlikujejo po želeni podpori prostora, tj. odmevnem času in frekvenčnem ravnovesju, glasnosti, stopnji instrumentalnosti, itd. Popularno glasbo so prvi sistematično obravnavali Adelman-Larsen in sodelavci leta 2010, ko so z meritvami v več kot 20 prireditvenih prostorih za rock koncerte ter anketiranjem glasbenikov in tonskih mojstrov zasnovali prve priporočene vrednosti odmevnega časa in z njim smernice prostorske akustike za koncertne dvorane, namenjenih rock in pop glasbi [2].

### 2.2.3.1 Prireditveni prostori sodobne glasbe

Glavni razliki v prostorski akustiki prireditvenih prostorov koncertov popularne glasbe v primerjavi s koncerti klasične glasbe sta uporaba zvočniškega sistema in različnih glasbil. Na sliki 15 so prikazana tipična glasbila v sodobni glasbi in pripadajoči frekvenčni razponi, ki jih pokrivajo [1]. Večina teh glasbil zahteva uporabo PA-sistema, zato je ta le redko neuporabljen. Na drugi strani je pri klasični glasbi PA-sistem redko uporabljen. Uporaba PA-sistema omogoča tudi obdelavo zvoka z dodajanjem različnih filtrov in uporabo umetnih zamikov določenih frekvenčnih območij, kar vpliva na poslušalčevo občutenje prostorske akustike. S tem se lahko manipulira tudi odmevni čas, tako da se signalu, predvajanemu prek zvočnikov, dodaja učinek odmeva. Tega je na ta način mogoče le podaljševati, saj akustičnega odziva prostora ne moremo krajšati. Pri prireditvenih prostorih sodobne glasbe občinstvo občuti skupek zvoka, ki prihaja iz zvočnega polja danega prostora in zvoka, ki prihaja iz PA-sistema. Na drugi strani pri klasični glasbi občinstvo zazna le neobdelan zvok, ki prihaja iz zvočnega polja koncertne dvorane [2]. Klasični koncert ima večino zvočne energije v srednje- do visokofrekvenčnih pasovih, kjer je raven zvočnega tlaka v srednje frekvenčnem območju do 10 dB nad ravnjo zvočnega tlaka pri basovskih frekvencah. Medtem je pri koncertih rock glasbe situacija bistveno drugačna, saj je raven zvočnega tlaka pri basovskih frekvencah v primerjavi s srednje frekvenčnimi pasovi od 20 do 30 dB višja. Poleg tega je razlika tudi v jakosti zvoka in razporejenosti zvočnega polja po frekvenčnih pasovih. To je

najbolj očitno pri sodobni glasbi, ki je bolj skoncentrirana na nižjih frekvencah kot klasična glasba. Tako se pri rock koncertih pojavijo tudi frekvence v terčnih pasovih vse do 50 Hz [2].



Slika 15: Najpogostejša glasbila v sodobni glasbi in pripadajoči frekvenčni razponi, povzeto po Adelman-Larsen [1]

V skladu s sliko 12, ki prikazuje pomen odmevnega časa, lahko sliko 15 razumemo tudi z vidika doseganja dobre prostorske akustike. Ker nižje frekvenčni zvoki maskirajo višje-frekvenčne, je še toliko bolj pomembno, da je odmevni čas v nižjih frekvencah dovolj kratek. S tem omogočimo jasnost v basovskem frekvenčnem razponu kot v višjih frekvenčnih območjih [1]. Čeprav dolg odmevni čas negativno vpliva na akustično ugodje poslušalca in izvajalca glasbe, obstajajo zahteve po minimalnem odmevnem času v prostoru. Prekomerno dodajanje absorpcijskih površin v prostor bi ustvarilo pogoje z minimalno odmevnostjo, kar bi poslabšalo poslušalčevo obkroženost, hkrati pa ustvarilo »presuhe« akustične pogoje za glasbenike. Potreba po odmevanju zvočnega signala namreč prihaja s strani vseh udeležencev glasbenih prireditvev – poslušalec želi biti objet z zvokom, izvajalec želi imeti akustično podporo. Vendar lahko glasbenik podporo dobiva tudi prek sistema za monitoring na odru.

Za predvidene potrebe glavnega prireditvenega prostora KČB je ključnega pomena ustrezen odmevni čas v oktavnih pasovih 63 in 125 Hz, in sicer od 0,6 do 1,2 sekunde. Prav basovske frekvence, ki se pojavijo v teh pasovih, močno vplivajo na jasnost zvočnega polja in posledično na ugodje občinstva. Kot osnova parametrov prostorske akustike prireditvenih prostorov sta bila uporabljena prispevek in knjiga Adelman-Larsen et al. [1, 2]. Odgovori, pridobljeni z anketo, so pokazali, da je prav odmevni čas,  $T_{30,B}$  najbolj vplival na dožemanje akustičnih lastnosti obravnavanih

dvoran, saj so najslabše ocenjeni prireditveni prostori imeli odmevne čase krepko nad priporočeno vrednostjo 1,2 sekunde.

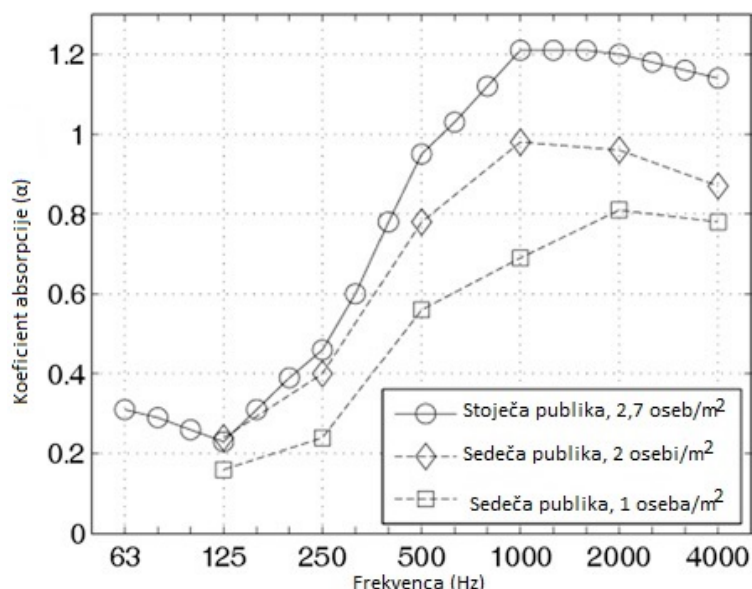
### 2.2.3.2 Vpliv občinstva

Čeprav občinstvo predstavlja vir absorbiranja zvočne energije, je ta absorpcija odvisna od gostote in položaja občinstva term njihovih oblačil. Stoječe občinstvo, ki je najbolj pogosto pri koncertih sodobne glasbe, absorbira zvočno energijo v srednje in visokofrekvenčnih pasovih do 5-krat bolj kot v nizkofrekvenčnih [1]. V tabeli 2 vidimo tipične vrednosti absorpcijskih površin občinstva pri različnih frekvencah, in sicer za 3 različna stanja [12].

Tabela 2: Tipične vrednosti absorpcijskih površin za različna stanja oseb, v  $m^2$  [12].

Oseba	Frekvenca (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Stoječa oseba v običajnih oblačilih	0,12	0,24	0,59	0,98	1,13	1,12
Stoječa oseba v zimskih oblačilih	0,17	0,41	0,91	1,30	1,43	1,47
Sedeči glasbenik z inštrumentom	0,60	0,95	1,06	1,08	1,08	1,08

Kot prikazuje slika 16, je koeficient absorpcije občinstva odvisen tudi od gostote občinstva, a je razlika opazna le v frekvenčnem območju nad 500 Hz [1]. Z izjemo



Slika 16: Koeficient absorpcije občinstva v odvisnosti od gostote občinstva in njegovega položaja, povzeto po Adelman-Larsen [1]

glasbenika z inštrumentom je v 125 Hz absorpcija za vse primere nizka, torej občinstvo ne bo imelo večjega vpliva na akustiko v območju nižjih frekvenc. Tudi zato sem v nalogi iskal rešitve za izboljšanje prostorske akustike v tem frekvenčnem območju z vnosom dodatnih absorpcijskih površin.

### 2.2.3.3 Zahteve spremenljive prostorske akustike

KČB je prostor raznolikega ustvarjanja, zato se predvideni različni dogodki, koncerti, predavanja, razstave, večeri poezije, kabaret, plesne predstave, konference, ipd. Vsem dogodkom je težko ugoditi z enotno vzpostavitvijo prostorske akustike, saj se pojavijo odstopanja potreb in razumevanja dobre akustike pri posameznih skupinah uporabnikov, kot so tonski mojstri, nastopajoči (igralci, glasbeniki, pevci) in občinstvo. Tonski mojstri pogosto želijo bolj suh prostor, torej s krajšim odmevnim časom, kot si ga želijo glasbeniki. Kot je razvidno s tabele 3 je bilo težko najti enostransko merilo, ki bi zadostilo potrebam in željam vseh udeležencev in vsem tipom prireditvev, zato sem oblikoval tri skupine postavitvev akustičnih absorberjev, ki so prilagojene na akustične zahteve posamezne skupine prireditvev.

Tabela 3: Priporočene vrednosti akustičnih parametrov za prireditveni prostor v KČB za različne tipe dogodkov

Akustični parameter	Ciljna vrednost	Opomba
$T_{30,125-2000Hz}$ [1]	0,6-0,75 s	Za prireditve sodobne glasbe v prostorih velikosti $1250 m^3$ .
$T_{30,500-1000Hz}$ [12]	0,8-1,1 s, 0,8-1,2 s oziroma 1,0-1,2 s	Prvi kriterij za glasbene dogodke, drugi za predavanja, tretji za gledališče. Velikost prostora ni določena.
$T_{opt}$ [41]	0,8 s, 0,7 s, 0,5 s oziroma 1,1 s	Prvi kriterij je za učilnice velikost $1000 m^3$ , drugi za govorne prireditve, tretji za pouk in četrti za glasbene prireditve v večnamenskih prostorih velikosti $2000 m^3$ .
$T_{60,opt}$ [36]	0,8-1,6 s oz. za 0,3-0,9 s	Za gledališča oz. za predavanja. Velikost prostora ni določena.
$T_{cilj}$ [28]	0,8 s oz. 1,0 s	Za pouk oziroma govorne prireditve v prostorih velikosti $1000 m^3$ .

Predvidene so tri različne skupine dogodkov: **glasbeni dogodki**, pri čemer prevladujejo koncerti rock glasbe, »**govorne prireditve**«, h katerim uvrščam gledališke predstave, predavanja, branja poezije idr., in **akustično nezahtevni**

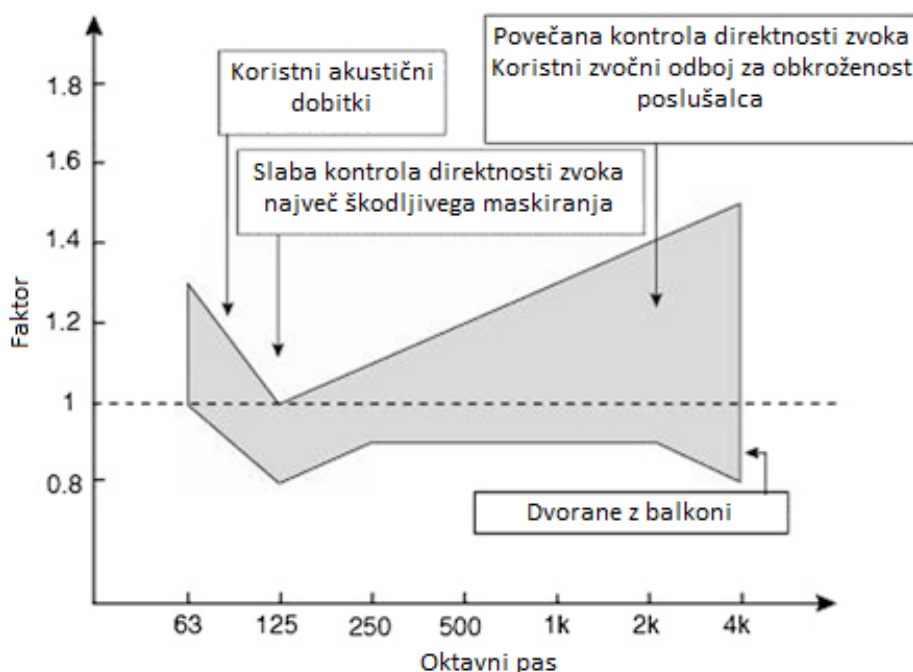
**dogodki**, h katerim spadajo razstave, delavnice, tržnica, sejmi ipd. Pri tem je treba opozoriti, da tretja skupina, ki obravnava akustično nezahtevne prireditve, nima posebnih priporočil ali zahtev po vrednostih posameznih parametrov prostorske akustike.

### 2.2.3.4 Glasbene prireditve

V kombinaciji z vrednostjo  $T_{30,125-2000Hz}$ , ki jo je priporočal Adelman-Larsen [1], je bilo definirano tudi tolerančno območje odmevnega časa v frekvenčnem razponu od 63 do 4000 Hz. Grafično tolerančno območje pri posamezni frekvenci prikazuje slika 17. Pri tem je treba poudariti, da meje tolerančnega območja določajo faktorji, ki delujejo zgolj z vrednostjo  $T_{30,125-2000Hz}$ , navedeno v tabeli 3. Srednja vrednost ciljnega odmevnega časa se izračuna po enačbi

$$T_{30} = 0,55 \text{ s} + 1,04 \times 10^{-4} \times V \left( \frac{\text{s}}{\text{m}^3} \right), \quad (2.4)$$

pri čemer je vrednost  $T_{30} = 0,68 \text{ s}$  za prireditveni prostor KČB velikosti  $1250 \text{ m}^3$  [1]. Odmevni čas v oktavnem pasu 63 Hz je lahko faktor višji od oktavnega pasu 125 Hz, saj tako prostor pripomore k ojačitvi zvoka – dvojni odmevni čas doda približno 3 dB k ravni zvočnega tlaka. Sprejemljive zgornje vrednosti faktorja  $T_{30}$  za terčne pasove v odvisnosti od vrednosti  $T_{30}$  so 1,8 pri 50 Hz, 1,4 pri 63 Hz in 1,2 pri 80 Hz.



Slika 17: Faktorji odmevnega časa za koncertne dvorane sodobne glasbe v posameznem oktavnem pasu, povzeto po Adelman-Larsen [1]

Pri tem pa ne smemo zanemariti odmevnega časa pri visokih frekvencah, saj prenizek odmevni čas v tistem frekvenčnem območju poudari nizke frekvence, s čimer daljši odmevni čas basovskih frekvenc kvari jasnost zvoka, v najslabšem primeru tudi razumljivost govora [1]. Vsekakor je prevladujoč odmevni čas v oktavnem pasu 125 Hz, saj je pri njem najmanj tolerance. Zaradi tega je bil potek razvoja rešitev osredotočen na ta del.

V spodnji tabeli (tabela 4) sem zato prikazal ciljne vrednosti odmevnega časa za prireditve sodobne glasbe, na katere se bom osredotočal tudi pri rešitvah akustičnih elementov in simulacijske analize.

Tabela 4: Priporočene vrednosti  $T_{30}$  v oktavnih pasovih od 63 do 4000 Hz za prireditveni prostor velikosti  $1250\text{ m}^3$  za sodobno glasbo, povzeto po Adelman-Larsen [1]

<b>Frekvenca (Hz)</b>	<b>63</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
Zgornji faktor $T_{30}$	1,3	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
Spodnji faktor $T_{30}$	1,0	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8
Spodnja meja	0,78	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,90
<b>Ciljna vrednost, RT</b>	<b>0,89</b>	<b>0,68</b>	<b>0,75</b>	<b>0,82</b>	<b>0,89</b>	<b>0,95</b>	<b>1,02</b>
Zgornja meja	0,98	0,75	0,83	0,90	0,98	1,05	1,13

Poleg  $T_{30}$  bom pri načrtovanju prostorske akustike za koncerte sodobne glasbe preverjal še  $D_{50}$  in  $BR$ , katerega ciljne vrednosti so prikazane v tabeli 5. Vrednost  $BR$  je po Beranek [3] privzeta kot dana, na drugi strani je vrednost po Adelman-Larsnu in sodelavcih [1] izračunana prek dane enačbe (glej razdelek 2.2.2.3) in priporočenih vrednosti odmevnega časa za koncertne dvorane sodobne glasbe. Če bi prevzel enačbo po Beraneku in priporočene vrednosti odmevnega časa po Adelman-Larsnu, bi bila ciljna vrednost razmerja basov enaka 0,84. Vseeno je študija Adelman-Larsna [1] primernejša, saj je obravnavala sodobno glasbo, zato bom kot ciljno vrednost vzel  $BR = 0,81$ .

Tabela 5: Ciljne vrednosti ostalih parametrov akustike prostora za glasbene prireditve

<b>Parameter</b>	<b>Priporočena vrednost</b>	<b>Vir</b>
$D_{50}$	0,7	Adelman-Larsen, 2014 [1]
$BR$	0,81	Adelman-Larsen, 2014 [1]

### 2.2.3.5 Govorne prireditve

Govorne prireditve imajo v splošnem podobne zahteve po vrednostih parametrov prostorske akustike kot glasbene, razlika se pojavi le v obravnavanih frekvenčnih

območjih in nekoliko daljšem odmevnem času. Človeški govor okvirno obsega frekvence na območju od 80 do 250 Hz (moški od 80 do 185 Hz, ženske od 165 do 255 Hz). Pri petju se frekvence lahko dvignejo do približno 1000 Hz [1]. Pri iskanju ciljnega odmevnega časa se bom pri simulacijah osredotočil na oktavna pasova 125 in 250 Hz. Za ciljno vrednost sem prevzel vrednost, ki jo navaja nemški standard DIN 18041:2005-05 [28] za govorne prireditve v prostorih velikosti  $1000\text{ m}^3$ , in to je  $RT_{cilj} = 1,0\text{ s}$ .

Pri govornih prireditvah sem prek vrednosti *STI* preverjal tudi govorno razumljivost. V tabeli 6 so navedene mejne vrednosti s pripadajočimi opredelitvami govorne razumljivosti, ki jih določa standard IEC 60268. Za ustrezno izvedbo prireditev je zahtevana vrednost nad 0,6, vendar je priporočena vrednost nad 0,75 [34].

Tabela 6: Mejne vrednosti *STI* za posamezne stopnje govorne razumljivosti, povzeto po standardu IEC 60268 [34]

Območje vrednosti <i>STI</i>	Govorna razumljivost
0,0 - 0,3	nezadovoljivo
0,3 - 0,45	slabo
0,45 - 0,6	sprejemljivo
0,6 - 0,75	dobro
0,75 - 1,0	odlično

### 2.2.3.6 Akustično nezahtevne prireditve

Kot akustično nezahtevne prireditve sem opredelil razstave, sejme, tržnico, različne delavnice, usposabljanja, itd. Pri teh se lahko pojavijo specifične zahteve glede prostorske akustike, vendar v splošnem ni pričakovanih strožjih zahtev, le osnovno govorno sporazumevanje med udeleženci na krajši razdalji. Razstavišča redko obravnavajo prostorsko akustiko, saj oprema in ljudje v prostoru navadno predstavljajo zadostno količino absorpcije, zato tudi ni standardiziranih priporočenih vrednosti odmevnega časa. Z namenom količinske ocene trenutnega stanja prostorske akustike v KČB sem izmerjeni odmevni čas primerjal s priporočenih odmevnim časom za prireditvene prostore, kjer se oddaja tiha, ne-ozvočena glasba, ki jo predpisuje norveški standard NS 8178. Ciljna vrednost za prostore velikosti  $1000\text{ m}^3$  znaša  $RT_{cilj}=[1,45\text{ s}, 1,75\text{ s}]$  [33].

### 2.2.3.7 Dodatne zahteve prostorske akustike

Pri govornem razumevanju ni ključen le odmevni čas prostora, temveč je pomemben dejavnik tudi razmerje med ravnjo govora in hrupa ozadja SNR (ang. *speech-to-noise*



*ratio*). Izboljšanje SNR za 10 dB lahko močno poveča govorno razumljivost. Na razmerje SNR lahko vplivamo na dva načina: z boljšo zvočno izolirnostjo od okolice oziroma z zniževanjem ravni hrupa obratovalne opreme ali pa z dvigom jakosti govora z uporabo PA-sistemov [12]. S tem namenom sem preveril tudi hrup ozadja v objektu in zunaj njega, da bi ugotovil, če je jakost hrupa potencialno moteč dejavnik, pri čemer sem si pomagal s Tehnično smernico TSG 1:005:2012 Zaščita pred hrupom v stavbah [41], v kateri so navedene zgornje vrednosti hrupa ozadja za normalno delovanje prireditvenih objektov<sup>1</sup> in so predstavljene v tabeli 7.

Tabela 7: Mejne hrupne vrednosti v prostorih,  $L_{A,eq}$  [41]

Namembnost prostora	Mejne vrednosti ekvivalentnih ravni hrupa $L_{A,eq}$ dB(A) – podnevi, zvečer, ponoči
Učilnice, predavalnice, delovni in študijski kabineti, knjižnice, čitalnice, ipd.	35

## 2.2.4 Programska orodja za analizo prostorske akustike

Akustično projektiranje je v preteklosti temeljilo na posnemanju primerov dobrih praks. Tako se je razvoj odvijal počasi, amfiteatri v antiki so poudarjali vlogo akustične podpore in zadostnega odmeva, ki so ga ustvarjali z obliko prostora in vnosom odbojnih površin. Vendar odbojev in ostalih akustičnih pojavov ni enostavno opredeliti kot pozitivnih ali negativnih, saj posamezni zvočni pojav ni nujno negativen v vsaki situaciji. Največkrat gre za posebnost prostora, ki povzroči, da nek zvočni pojav škoduje zaznavi zvoka, ko oslabi jasnost zvočnega signala, tj. poslabša razumljivost. Zaradi dolge zgodovine arhitekturnih praks se lahko številne akustične pojave predvidi v času gradnje in se jih učinkovito prepreči. Vendar akustične sanacije obstoječih objektov zahtevajo bistveno večji vložek energije, časa in denarja za doseganje ustreznih pogojev. V obeh primerih si v sodobnem svetu pomagamo z uporabo simulacijskih orodij.

Simulacijska orodja ločimo na tiste, ki temeljijo na geometrijskih metodah širjenja zvoka, in tiste, ki uporabljajo valovne metode modeliranja. Za potrebe magistrske

---

<sup>1</sup>V tehnični smernici ni posebej navedenih vrednosti za prireditvene prostore, so pa navedene vrednosti za predavanja in učilnice, pri čemer je navedeno, da »V stavbah za kulturo in razvedrilo, v stavbah za šport, v obrednih in v nerazvrščenih stavbah je treba zagotoviti, da v varovanih in poslovnih prostorih teh stavb zaradi uporabe ostalih prostorov teh stavb ne bodo presežene mejne vrednosti ravni hrupa iz preglednic 2 in 3.« [41]. Za nalogo pomemben del preglednice 2 sem navedel zgoraj, zato sem te vrednosti prevzel za celotno delovanje KČB, saj je v splošnem potreba po nizkih vrednostih hrupa strožja v primeru predavanj kot koncertov.

naloge sem uporabil programsko orodje ODEON Auditorium, ki uporablja geometrijske metode simuliranja prostorske akustike. Prednost geometrijskih metod je, da jih lahko apliciramo tako na zaprte prostore kot tudi na simulacije prostih zvočnih polj [20], slabost pa je, da predpostavijo širjenje zvoka kot žarkov in zanemarijo nekatere vidike valovne narave zvoka. To se praviloma pokaže kot slabost v območju nizkih frekvenc, kjer so tudi napake posledično večje [24]. Če je geometrijska metoda simuliranja primerna za obravnavo izbranega prostora, določimo z uporabo Schröderjeve frekvence

$$f_s = 2000\left(\frac{m}{s}\right)^{3/2} \times \sqrt{\frac{T}{V}}, \quad (2.5)$$

pri kateri je  $T$  izmerjeni odmevni čas in  $V$  volumen obravnavanega prostora [20]. V primeru obravnavane glavne industrijske hale KČB je Schröderjeva frekvenca  $f_s = 70,7$  Hz. Pri predpostavki, da je izračunana frekvenca znotraj terčnega pasu s srednjo vrednostjo 63 Hz, sem s simulacijskim orodjem obravnaval oktavne pasove nad 125 Hz. Tako sem lahko naredil simulacijo obstoječega stanja in pozneje simulacije mogočih rešitev.

Programsko orodje ODEON uporablja algoritme, ki izračunajo pozne odboje z metodo sledenja žarku (ang. *ray-tracing method*) in zgodnje zvočne odboje s hibridno kombinacijo metode zrcalnih izvirov (ang. *image source method*) ter metodo sledenja žarku za odboje, ki se pojavijo pred določenim vrstnim redom odbojev. Zgodnji razpršeni odboji so simulirani z metodo zrcalnih izvirov vsakič, ko je prepoznan zrcalni izvir. V drugem delu simulacije, ko so pozni odboji izračunani z metodo sledenja žarku, simulacija vključuje tudi sekundarne zvočne izvire, ki sevajo energijo lokalno od površin na podlagi frekvenčno odvisne usmerjenosti. Izbirati je mogoče med Lambertevo, poševno Lambertevo ali enotno usmerjenostjo v odvisnosti od izbranih odbojnih lastnosti. Prav to je prednost programskega orodja ODEON, saj omogoča prilagodljivost med izvajanjem simulacij, tudi v času trajanja zgodnjih in poznih odbojev [25].

## 2.2.5 Absorpcijski materiali

Arhitekt Walter Stahel je že v poznih 70. letih prejšnjega stoletja prepoznal kritičnost (še vedno aktualnega) linearnega sistema ekonomije, saj ta vodi v vedno večjo porabo surovin in vedno večje kopičenje odpadkov. Reševanje tega problema je pripeljalo do razvoja krožnega gospodarstva, ki je temeljil na ločevanju rasti in blaginje od naravnih surovin. Tako se prepreči odlaganje odpadkov, saj se jih v resnici le preusmeri v prave vrednostne verige [6].

Med sedmimi elementi krožnega gospodarstva sta dva, ki sem ju v nalogi želel v največji meri upoštevati:

- uporabiti odpadke kot surovino in
- načrtovati za prihodnost.

Če v grajenem okolju želimo doseči trajnostni razvoj, nista dovolj le optimizacija uporabe energije in raba lesa kot gradbenega materiala, temveč je treba trajnostno pogledati tudi na ostale vidike, med drugim na uporabo naravnih, ekoloških ali recikliranih materialov pri načrtovanju opreme. Skozi to perspektivo sem želel med odpadki najti materiale, ki bi imeli zvočno absorpcijske lastnosti. Odpadki so zahteven problem, s katerim se soočamo in se bomo še intenzivnejše soočali v prihodnosti. Pojem odpadka je povezan tudi s človeško željo, ki v človeku sproži iskanje nečesa, kar si v življenju želi pridobiti, nekaj, kar želi posedovati. Zato odpadek ne predstavlja le neuporabne surovine, temveč ga čustveno vrednotimo. Tako lahko material, narejen iz odpadkov, pri nekom izvabi negativna čustva, kar otežuje prihodnjo uporabo odpadkov v gradbeništvu. Kljub temu lahko dojemamo odpadke kot samostojen »vir« surovin, ki je obnovljiv [11]. Pri načrtovanju akustične opreme sem stremel k uporabi recikliranih materialov, prav z namenom spopadanja z razvrednotenjem odpadnega materiala.

Tipi absorberjev so bili predstavljeni in pojasnjeni v razdelku 2.2.2 *Prostorska akustika* na strani 16, kjer je prikazano, da so za absorpcijo nizkih frekvenc primerni panelni ali Helmholtzevi absorberji. V osnovi sem stremel k uporabi (odpadnega) lesa kot naravne in obnovljive surovine, vendar ima les skozi perspektivo akustičnih absorberjev tudi nezadovoljive absorpcijske lastnosti. Z namenom zadostnega absorbiranja je resonatorske absorberje treba sestavljati v debelejših sestavah oziroma v kombinaciji z drugim materialom kot polnilom. Prvo zmanjšuje uporabno prostornino prireditvenega prostora in povečuje količino uporabljenega lesa, kar poudari tudi drugo težavo lesa – njegovo težo. Sistemi panelnih in Helmholtzevih absorberjev so lahko zapleteni, s čimer povečujejo zahteve po ustrezni podkonstrukciji in pritrdilnem materialu. Kombiniranje z drugim polnilnim materialom je težavno, saj se za polnilo navadno uporabi mineralne volne ali različne pene polimernega izvora. S tem v element vnašamo surovino, ki ni naravnega izvora in ni obnovljiva. Tretja pomanjkljivost pa je njegova požarna varnost. V industrijskih objektih se najpogosteje srečamo s kovino in betonom, ki pri morebitni evakuaciji zagotavljata ustrezno požarno varnost. Les je v takem primeru potrebno zaščiti s protipožarnimi premazi. Reševanje projektantskih vprašanj zahteva tudi širši vpogled na končno rabo prostora, saj le tako lahko trajnostno rešujemo tovrstna vprašanja. Takšen primer je bilo reševanje okenskih odprtín. Prireditveni prostori največkrat ne potrebujejo le izoliranosti od zunanjih zvočnih virov, temveč tudi od zunanjih svetlobnih virov. Zato sem predvidel zatemnjevanje prostora s prekrivanjem okenskih odprtín z zavesami, ki pa bi služile tudi kot absorpcijske površine. S tem namenom sem raziskal uporabo odpadnega tekstila za izdelavo absorpcijskih zaves. Da sem povečal učinkovitost tovrstnega

materiala, sem s pomočjo enačbe 2.2 določil odmik zavese od toge podlage. Za idealen primer absorpcije pri 125 Hz odmik znaša 0,69 m.

### 2.2.5.1 Umestitev absorpcijskih materialov

V splošnem je umeščanje absorberjev in difuzorjev v prireditveni prostor težavno, saj morajo dodani materiali izboljšati akustiko v prostoru, a pri tem ne smejo pokvariti vidnega polja občinstva. Pri umeščanju absorpcijskih površin pa so tudi druge omejitve,



Slika 18: Industrijski notranji žerjav, element oranžne barve

med njimi tla, ki predstavljajo velik delež vseh površin, a so pogosto neprimerna za vnos absorpcije. Poleg tega so v primeru KČB dodatna omejitev tudi arhitekturne posebnosti industrijske hale. Ena izmed značilnih je obokan strop, ki ga je bilo pomembno ohraniti vidnega tudi po prenovi. S tem namenom sem razvil sistem spremenljivih akustičnih absorberjev, ki se lahko prilagajajo prireditvi in hkrati ne zakrijejo stropa – ne v celoti in ne trajno. Stremel sem k izkoriščanju teh posebnosti, zato sem za umestitev uporabil elemente industrije, ki so se ohranili od časa uporabe. Med njimi je notranji žerjav z nosilnostjo 1000 kg, ki se premika od predvidenega odra proti občinstvu. Na sliki 18 vidimo, da je žerjav nameščen na profile I, na sliki zelene barve, ki potekajo vzporedno z daljšo stranico industrijske hale. Delujoči žerjav in jekleni I-nosilci, po katerih se premika, so bili prepoznani kot mogoči elementi za umeščanje modularnega absorpcijskega panela, ki bi lahko reševal izziv večnamenske rabe prireditvenega prostora.

### 3 METODOLOGIJA IN MERITVE

Za vnaprej določene meritve smo prostor pripravili tako, da je čim bolj predstavljal način uporabe v prihodnosti. Prekrite so bile vse odprtine, kjer ni bilo nameščenih vrat ali oken, oziroma so bila ta poškodovana do te mere, da niso dopuščala zadostnega zapiranja. Na spodnji sliki je prikazano zapiranje poškodovanih odprtin. S tem smo zagotovili omejen volumen obravnave, brez povezav s sosednjimi prostori, v katerih bi se lahko pojavil sekundarni odmev. Ta bi namreč lahko vplival na rezultate meritev odmevnega časa.



Slika 19: Manjkajoči elementi odprtin stavbnega ovoja, prekriti z lesenimi ploščami

V industrijski hali stavbe nekdanjega ključavničarstva so bile opravljene osnovne meritve prostorske akustike v skladu s standardom *ISO 3382-1: Akustika – Merjenje akustičnih parametrov v prostorih – 1. del: Prostori za prireditve* [32]. Standard veleva, da je meritve odmevnega časa mogoče opraviti v katerem koli od stanj zasedenosti. Prostore je priporočljivo s spremenljivimi pogoji prostorske akustike preveriti v različnih stanjih zasedenosti. Tako je mogoče izmeriti odmevni čas prostora ob različnih predvidenih uporabah, kar pripomore k širšemu razumevanju specifičnih karakteristik tako prostorske akustike kot tudi geometrije izbranega prostora. Pri opisovanju stanja zasedenosti v času meritev je natančnost opisa ključnega pomena, saj lahko majhna razlika glede odrskih zaves ali dodatnega dela orkestra oziroma nastopajočih bistveno vpliva na obravnavo in interpretacijo rezultatov. Ker meritve v

okupiranem stanju niso bile izvedljive in lahko občinstvo kvečjemu pozitivno vpliva na meritve doseganja ustreznega odmevnega časa, je bilo izbrano merjenje v neokupiranem stanju prostora. Zato smo iz prostora umaknili tudi večino opreme, za katero ni predvidena stalna uporaba, kot so mize in stoli za predavanja. V prostoru so ostali le nekateri stalni kosi opreme in oprema na delih, kjer ni bilo predvidenega odra ali občinstva, npr. v zaodrju in ob straneh vhoda. Sprva so bile predvidene meritve brez specifične količine in postavitve opreme z namenom pridobitve osnovne prostorske akustike izbrane industrijske hale. Ta predpostavka je bila določena na podlagi možnosti izvedbe dodatnih meritev v fazi testiranja sistemskih rešitev za posamezen namen uporabe prostora [32].

### 3.1 PODPORNE MERITVE

Pred posameznimi meritvami prostorske akustike smo opravili meritve hrupa ozadja na karakteristični legi v dvorani in zunaj nje. Vse meritve so spremljale še meritve velikosti prostora in leg izvora zvoka ter mikrofona. Te so bile izvedene z uporabo 3D laserskega skeniranja, ki nam je omogočilo hitre meritve z natančnostjo 1 cm. Uporabljena je bila strojna oprema Trimble X7 in programska oprema Trimble RealWorks. Na sliki 20 je prikazana uporaba 3D skenerja med meritvijo.



Slika 20: Prikaz uporabe 3D skenerja med meritvijo



Temperatura in relativna vlažnost prostora sta pomembna dejavnika pri obdelavi rezultatov, zato je pomembno, da ju v času meritev beležimo periodično z natančnostjo  $\pm 1$  °C za temperaturo prostora in 5 % za relativno vlažnost. V tabeli 8 so predstavljene vrednosti izmerjene temperature in relativne vlažnosti zraka na dan meritev ob začetku in koncu meritev. Povprečna temperatura in vlažnost zraka med meritvami sta bili 5,7 °C in 43,5 %.

Tabela 8: Temperatura in relativna vlažnost zraka v času meritev

Datum in čas meritve	T (°C)	rH (%)
Začetek merjenja: 2. 3. 2022 ob 9.50	4,5	48,2
Konec merjenja: 2. 3. 2022 ob 15:45	5,8	43,4

## 3.2 OPREMA

### 3.2.1 Zvočnik, generator signala in frekvenčni razpon

Meritve odmevnega časa z metodo prekinjenega hrupa in meritev impulznega odziva so potekale z uporabo istega mikrofona in zvočnega izvora. Uporabljen je bil neusmerjen zvočnik oblike dodekaedra in znamke NTi Acoustics tip DS3 v kombinaciji z nizko-tonskim zvočnikom. To je izpolnilo zahtevo po oddajanju zvoka vsesmerno in enakomerno skozi celoten slušni spekter. Pri tem je bilo treba izpolniti tudi zahtevo po zadostnem zvočnem tlaku, s katerim je bil ustvarjen zadosten dinamičen razpon nad ravnjo hrupa ozadja. V primeru metode impulznega odziva je to pomenilo, da je razlika med maksimalno vrednostjo ravni zvočnega tlaka, ki ga oddaja zvočni vir, in hrupom ozadja vsaj 45 dB, oziroma v primeru računanja  $T_{20}$  vsaj 35 dB nad ravnjo hrupa ozadja. Navedeno je moralo veljati v vseh obravnavanih frekvenčnih razponih.

Ob uporabi metode prekinjenega hrupa je zvočni signal generiral oddajnik NTi Audio XL2 Audio and Acoustic Analyzer. Izbrani signal je bil roza šum, pri katerem vsak oktavni pas vsebuje enako količino zvočne energije. Pri meritvah impulznega odziva je predvajani signal generiralo programsko orodje AFMG Easera različice 1.2 prek prenosnega računalnika.

Standard ISO 3382-1 definira frekvenčni razpon meritev v odvisnosti od tipa meritev, pri čemer je priporočen razpon od 250 do 2000 Hz [32]. Za potrebe meritev odmevnega časa je bil izbran frekvenčni razpon od 80 do 5000 Hz, saj se pri moderni glasbi predvideva bistveno nižje frekvence kot pri klasični glasbi ali gledaliških predstavah [2]. Meritve impulznega odziva so navadno izvedene v širšem razponu, a je bila analiza frekvenčno omejena na prej omenjeni razpon.

### 3.2.2 Mikrofon

Oddajani signal smo pri obeh metodah zajeli z vsesmernim mikrofonom znamke NTi. V primeru meritev odmevnega časa z metodo prekinjenega hrupa je bil mikrofون pritrjen na vmesnik NTi Audio XL2, ki je omogočal sočasni prikaz krivulje upada zvočnega tlaka ter snemanje zvočnega signala in shranjevanje podatkov za poznejšo obdelavo. Pri meritvah impulznega odziva je to nalogo opravljalo kar programsko orodje AFMG Easera, ki je tudi generiralo signal. V skladu s standardom ISO 3382:1 smo lege mikrofona določili glede na pričakovan položaj občinstva tako po višini kot tudi po prostorski razporeditvi, pri čemer je bil cilj zaobjeti celoten prostor. To je bilo ključnega pomena, saj smo lahko med analizo rezultatov ugotovili variiranje prostorske akustike posameznih meritvenih leg. Te morajo ustrezati tudi ostalim določilom:

- razdalja med dvema legama mikrofona naj bo vsaj  $1/2$  valovne dolžine pričakovanih frekvenc, kar je v primeru popularne glasbe približno 2 m,
- razdalja med mikrofonom in najbližjo odbojno površino naj bo vsaj  $1/4$  valovne dolžine, tj. 1 m,
- razdalja med mikrofonom in zvočnim virom naj bo zadostna, da se prepreči vpliv direktnega zvočnega valovanja,
- v prireditvenih prostorih naj bo višina mikrofona v primeru sedečega občinstva 1,2 m, oziroma 1,7 m za stoječe občinstvo [32].

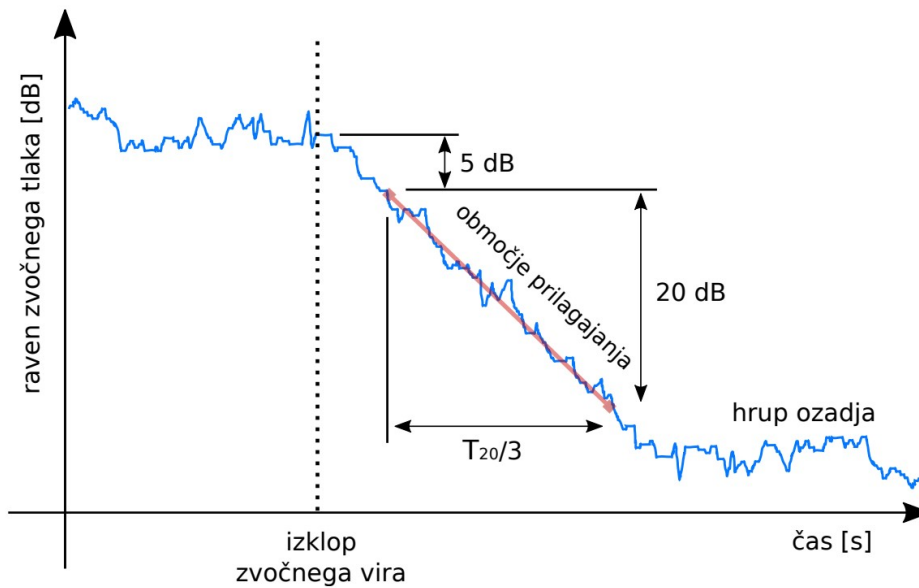
Legi izvora hrupa je po standardu ISO 3382:1 določena glede na pričakovano lego zvočnih virov pri običajno uporabi prostora, in sicer s priporočeno višino zvočnega vira 1,5 m nad tlemi. Za potrebe meritev prekinjenega hrupa potrebujemo vsaj dve različni legi izvora hrupa.

## 3.3 MERITVE Z METODO PREKINJENEGA HRUPA

Meritve z metodo prekinjenega hrupa (ang. *interrupted noise method*) potekajo po principu analize padanja ravni zvočnega tlaka po prekinitvi oddajanja trajajočega hrupa. Ob vzpostavitvi konstantne ravni zvočnega tlaka prekinemo oddajanje signala in spremljamo padanje ravni zvočnega tlaka. Meritev na posamezni legi ponovimo večkrat, da dobimo reprezentativno vrednost odmevnega časa s povprečenjem posameznih meritev. Raven zvočnega tlaka merimo v oktavnih ali terčnih pasovih, saj nas zanima frekvenčno odvisen odmevni čas. Kako se določi odmevni čas posamezne meritve je prikazano na sliki 21, na kateri je predstavljena meritev  $T_{20}$ , vendar je način delovanje za ostale odmevne čase enak [12, 20, 32]. Območje padanja ravni zvočnega



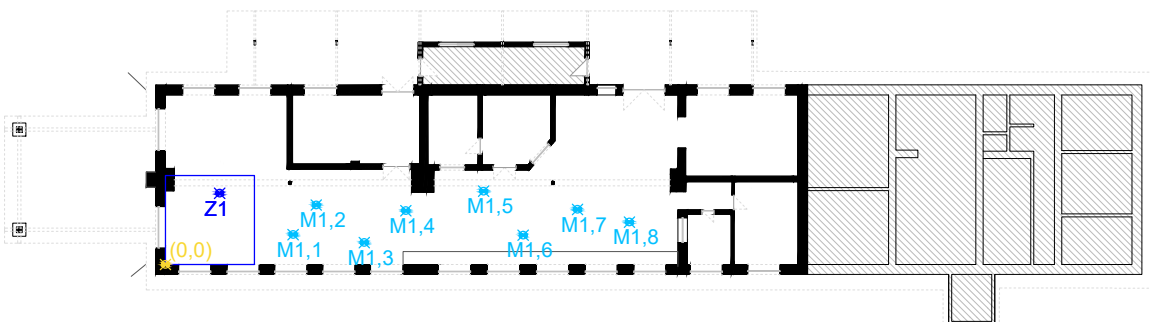
tlaka po izklopu zvočnega vira najprej linearno aproksimiramo, kar nam pozneje omogoči ekstrapolacijo meritve  $T_{20}$  na  $T_{60}$  [20].



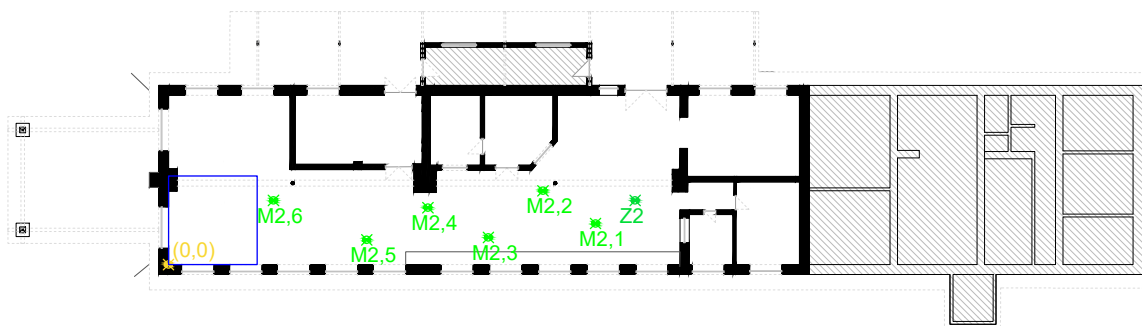
Slika 21: Način računanja odmevnega časa  $T_{20}$  iz rezultatov meritev pridobljenih z metodo prekinjenega hrupa [20]

### 3.3.1 Lege meritev

Število leg mikrofona smo izbrali glede na zahteve po ustrezni natančnosti meritev in velikost prostora, ki jih določa ISO 3382-1 [32]. V prilogi A omenjenega standarda je določeno, da je potrebnih najmanj 6, 8 oziroma 10 meritev za prireditvene prostore z zmogljivostjo za 500, 1000 oziroma 2000 sedežev. Največja možna zmogljivost industrijske hale v KČB je 500 sedežev oziroma 800 mest za stoječe občinstvo (pri gostoti  $2,7 \text{ oseb}/\text{m}^2$ ) [2]. Zato smo s prvo lego zvočnega vira opravili meritve na 8 različnih legah mikrofona in pri drugi legi zvočnega vira na 6 različnih legah mikrofona.



Slika 22: Lege meritev odmevnega časa z metodo prekinjenega hrupa – lega izvora 1



Slika 23: Lege meritev odmevnega časa z metodo prekinjenega hrupa – lega izvora 2

Ker na večini koncertov sodobne glasbe občinstvo stoji, je bilo 8 od 14 meritev opravljenih pri višini mikrofona od 1,65 m do 1,78 m, preostalih 6 meritev pa je bilo opravljenih za primer sedečega občinstva, tam je bila višina mikrofona od 1,02 m do 1,36 m. Lege so prikazane v tabeli 9. Koordinatno izhodišče je bilo postavljeno v notranji spodnji levi kot hale, kot je na načrtih na slikah 22 in 23 označeno z rumeno barvo.

Tabela 9: Koordinate leg mikrofонов in izvora hrupa za meritve odmevnega časa z metodo prekinjenega hrupa

Oznaka meritve	X (m)	Y (m)	Z (m)
Z1 – lega zvočnika 1	3,66	4,81	1,61
Z2 – lega zvočnika 2	31,57	4,34	1,59
M1,1	8,62	2,02	1,65
M1,2	10,17	4,02	1,03
M1,3	13,42	1,48	1,02
M1,4	16,23	3,63	1,72
M1,5	21,48	4,95	1,72
M1,6	24,15	1,98	1,22
M1,7	27,82	3,72	1,72
M1,8	31,32	2,86	1,73
M2,1	28,89	2,78	1,72
M2,2	25,33	4,99	1,36
M2,3	21,64	1,84	1,15
M2,4	17,55	3,85	1,16
M2,5	13,41	1,67	1,75
M2,6	7,10	4,34	1,78

Rezultati so bili zbrani kot frekvenčno odvisni odmevni časi za vsako meritveno lego, kar mi je omogočilo podrobnejšo analizo prostorske akustike. Tako sem lahko pregledal posamezne rezultate in glede na znane lege posameznih meritev določil, če se zvočna polja v različnih delih industrijske hale razlikujejo [32].

### 3.4 MERITVE IMPULZNEGA ODZIVA

Impulzni odziv prostora lahko merimo na različne načine, večinoma se uporablja princip zvočnega signala na osnovi impulza, npr. strel s pištolo, kratek pisk, eksplozija, itd. V splošnem velja, da je ustrezen kakršen koli zvočni signal, ki pokriva želeni frekvenčni spekter za celovito in merodajno analizo zvočnega odziva [32]. Oddajani zvočni signal mora proizvesti zadostno raven zvočnega tlaka, da se krivulja upada zvočnega tlaka začne vsaj 35 dB nad ravnjo zvočnega tlaka hrupa ozadja, oziroma v primeru  $T_{30}$  vsaj 45 dB.

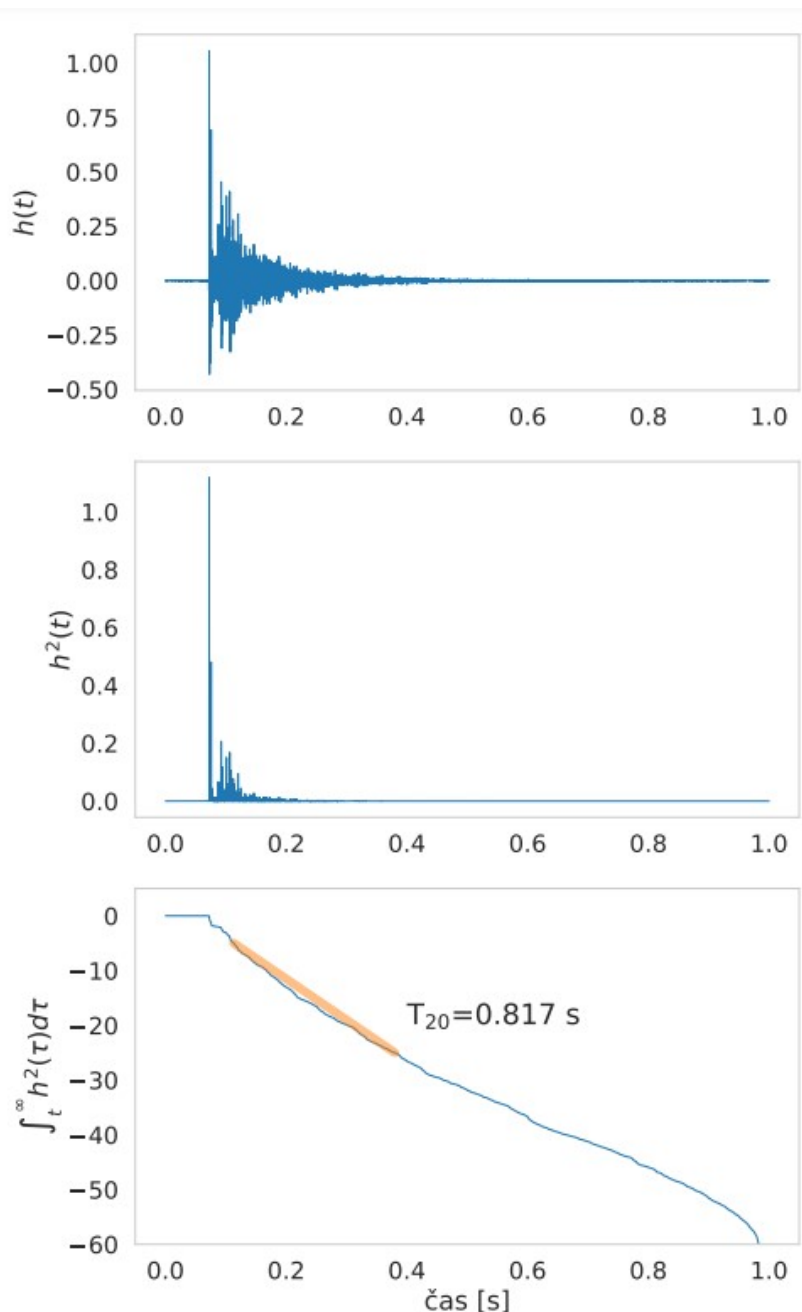
Na osnovi impulznega odziva je poleg odmevnega časa mogoče določiti več akustičnih parametrov, in sicer prek različnih integracijskih operacij. Za določitev odmevnega časa najprej razdelimo meritve na posamezne frekvenčne pasove, nato pa se filtriran signal kvadrira in obratno integrira, da pridobimo krivuljo upadanja ravnj zvočnega tlaka [20]. V idealnem primeru brez hrupa ozadja za meje integriranja lahko izberemo konec impulznega odziva in začetek kvadrata impulznega odziva. Tako lahko po standardu ISO 3382:1 [32] pridemo do krivulje upada kot funkcije časa z enačbo (3.1):

$$E(t) = \int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau, \quad (3.1)$$

kjer je

- p zvočni tlak impulznega odziva kot funkcija časa,
- E energija krivulje upada zvočnega tlaka kot funkcije časa in
- t čas.

Na rezultate in analizo meritev ima vpliv tudi hrup ozadja, ki ga je treba ustrezno obdelati in sicer z določitvijo meje integracije. Najbolj preverljive rezultate dobimo, ko je raven hrupa ozadja vsaj enaka ocenjeni ravni in hkrati 15 dB pod najvišjo ravnjo impulznega odziva [32]. Integracijski koraki od grafa časovnega poteka zvočnega tlaka do določitve odmevnega časa so prikazani na sliki 24.



Slika 24: Prikaz korakov metode – od meritve impulznega odziva do odmevnega časa  $T_{20}$ , povzeto po Prisljan [20]

Za potrebe magistrskega dela sem pri meritvah impulznega odziva uporabil zvočni signal kot »čivk« (ang. *chirp*), pri katerem so se frekvence z oddajanjem signala višale (ang. *up-chirp*).

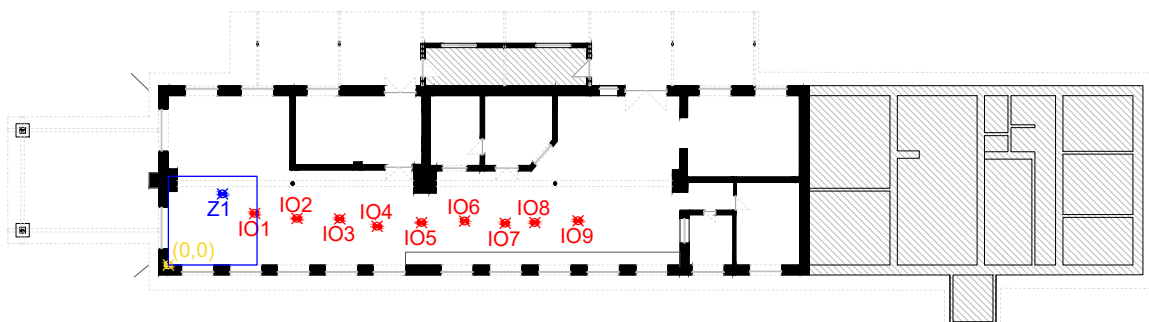
### 3.4.1 Lege meritev

Signal smo predvajali prek zgoraj opisane opreme, na prvi legi izvora hrupa. Odziv smo izmerili z mikrofonom na devetih legah. Prikaz leg je viden v tabeli 10 in na

sliki 25. Ker sem najprej želel določiti  $T_{30}$ , sem določil najvišjo raven impulznega odziva vsaj 45 dB nad ravnjo hrupa ozadja.

Tabela 10: Koordinate leg mikrofонов in izvora hrupa za meritve impulznega odziva

Oznaka meritve	X (m)	Y (m)	Z (m)
IO1	5,83	3,48	1,50
IO2	8,70	3,14	1,51
IO3	11,59	3,12	1,43
IO4	14,02	3,03	1,51
IO5	17,12	2,86	1,51
IO6	20,04	2,97	1,51
IO7	22,78	2,82	1,50
IO8	24,78	2,87	1,51
IO9	27,71	2,99	1,50



Slika 25: Lege meritev impulznega odziva

Poleg računanja odmevnega časa različnih razponov nam je metoda impulznega odziva omogočila tudi računanje drugih parametrov prostorske akustike, med drugim za potrebe te naloge  $D_{50}$  in BR, kot sta definirana v razdelku 2.2.2.3.

### 3.5 MERITVE ZVOČNE ABSORPCIJE

Pri snovanju akustičnih elementov sem stremel k uporabi odpadnega tekstila, ki sem ga zbral in mu izmeril akustične lastnosti. Meritve absorpcijskih koeficientov lahko potekajo bodisi v odmevnici bodisi v impedančni cevi. Izbral sem slednje, ki sem jih izvedel v skladu s standardom ISO 10534-2 [27].

Tako za meritve absorpcije kot transmisije je bil uporabljen merilni sistem Brüel & Kjær tipa 4206-T z nameščeno kovinsko cevjo premera  $\phi = 100 \text{ mm}$ , širokopasovnim zvočnikom in pritrdilnimi elementi za merjence, pri čemer sem si

pomagal z obojestranskim lepilnim trakom. Merilni sistem, prikazan na sliki 26, vključuje še:

- 4 kondenzatorske mikrofone premera 1/4 palca znamke Brüel & Kjaer tipa 4187 s serijskimi številkami 3229791, 3229790, 3229755 in 3229754 (zadnja dva sta bila uporabljena le pri meritvah transmisije),
- modul za zajem s štirimi kanali in za oddajanje zvočnih signalov z dvema kanaloma znamke Brüel & Kjaer tipa LAN-Xi 3060-A-042 s serijsko številko 3160-107471,
- ojačevalec Brüel & Kjaer tipa 2735 s serijsko številko 2735-100819 in
- programsko opremo Brüel & Kjaer PULSE LabShop, ki smo jo upravljali na prenosnem računalniku, na katerega je bil povezan merilni sistem.

V cev, ki ima na eni strani izvor zvoka, na drugi pa togo podlago, sem fiksno namestil 2 mikrofona na določeni mesti, poravnana z notranjim plaščem cevi. Vzorec je bil nato nameščen med togo podlago in mikrofona, pri čemer je bil odmik od mikrofona fiksni, odmik od toge podlage pa smo med meritvami prilagajali. Ko se oddaja širokopasovni naključni zvočni signal, se vzpostavi stoječe zvočno valovanje. Na podlagi razlike v oddajanem in zajetem zvočnem signalu lahko določimo koeficient odboja ob pravokotnem vpadu zvoka, prek katerega določimo akustične lastnosti merjenca [27].



Slika 26: Merilni sistem Brüel & Kjaer tip 4206-T pripravljen za meritve absorpcijskih koeficientov.

Treba je poudariti, da je koeficient absorpcije izmerjen v impedančni cevi osnovan na pravokotnem vpadu zvočnega valovanja, zato ga imenujemo tudi absorpcijski koeficient

normalnega vpadanja (ang. *normal-incidence absorption coefficient*). Vrednosti zato niso neposredno primerljive s tistimi, izmerjenimi v difuznem zvočnem polju, npr. v odmevnici. Rezultat meritev je vrednost koeficienta absorpcije od 0 do 1 (za več o absorpciji glej razdelek 2.2.2).

Konfiguracija meritev zvočne transmisije poleg prej omenjenih elementov vsebuje še dodatna mikrofona. V cevi smo namestili dva para mikrofonov na fiksnih medsebojnih razdaljah, mednje pa namestili merjenec. Zvočni signal smo oddajali na dveh različnih koncih prostega dela cevi. Pri prvem primeru s približkom popolne absorpcije je uporabljena poliuretanska pena debeline 10 cm, drugi primer je brez absorpcije z odprto cevjo. Z meritvami zvočnega tlaka pred in za merjencem določimo koeficient zvočne transmisije, prek katerega izračunamo dušenje oziroma faktor transmissijskih zvočnih izgub  $T_L$  (ang. *sound transmission loss*) [27].

Nastavitve meritev, opravljenih za potrebe te naloge so predstavljene v tabeli 11. Cev premera  $\phi = 100 \text{ mm}$  omogoča meritve med oktavnima pasovoma 16 in 2000 Hz. Ker sem obravnaval spekter zvoka od 125 do 4000 Hz in ker koeficienti zvočne absorpcije tekstila praviloma limitirajo z naraščanjem frekvenc, so tovrstne meritve zadostovale za nadaljnje analize. Pri meritvah transmisije sem za izvajanje simulacij potreboval enoštevilsko vrednost koeficienta transparentnosti, ki sem ga izračunal prek faktorja  $T_L$ , izmerjenega pri 1000 Hz, zato sem izvajal meritve pri enakih nastavitvah.

Tabela 11: Nastavitve meritev koeficienta absorpcije in transmisije v impedančni cevi.

<b>Konfiguracija meritev</b>	
Tip cevi	Večja cev s širšim razmakom mikrofonov
Premer cevi	10 cm
Razdalja mikrofona–mikrofon	10 cm
Razdalja mikrofona–vzorec	10 cm
Razdalja vzorec–izvor	30 cm
Spodnja frekvenčna omejitev	50 Hz
Frekvenčna resolucija	2 Hz
Št. korakov	800
Št. povprečij	150
Uporabljen zvočni signal	naključni

V lokalnih izmenjevalnicah oblačil sem nabral različne materiale, ki sem jih v osnovi ločil na zračno prepustne in neprepustne, ki so skozi perspektivo zvočnih absorberjev neustrezni. Nato sem kose oblačil ločil na tiste z večjimi površinami in tiste z manjšimi. Tako so med primernimi oblačili ostali le še majice, puloverji in hlače. Tekstil z večjimi površinami, kot so plašči, prti in posteljnina so težje dostopni, saj jih ljudje navadno zavržemo v bistveno slabšem stanju, zato za potrebe magistrskega dela

niso bili primerni. Med izbranim tekstilom sem poiskal različne vrste materialov, saj sem želel preveriti absorpcijske lastnosti glede na osnovno surovino. Nato sem zbran tekstil popisal, izmeril njegovo gostoto in začel izvajati meritve akustičnih lastnosti v impedančni cevi. Faktor transmisijskih zvočnih izgub sem izmeril za vzorce B100-2-40, B60P40-2-40 in V70N30-2-40. Obravnavan tekstil je naveden v tabeli 12.

Tabela 12: Seznam merjenega odpadnega tekstila in sestava meritev

Material	Gostota ( $g/m^2$ )	Slojnost	Odmik od toge površine za meritve absorpcije	Oznaka meritev
100-% bombaž	150	enoslojno	1 cm	B100-1-0
			20 cm	B100-1-20
		dvoslojno narazen 1 cm	1 cm	B100-2-0
			20 cm	B100-2-20
			40 cm	B100-2-40
60-% bombaž + 40-% poliester	620	enoslojno	1 cm	B60P40-1-0
			20 cm	B60P40-1-20
		dvoslojno narazen 1 cm	1 cm	B60P40-2-0
			20 cm	B60P40-2-20
			40 cm	B60P40-2-40
70-% viskoza + 30-% najlon	270	enoslojno	1 cm	V70N30-1-0
			20 cm	V70N30-1-20
		dvoslojno narazen 1 cm	1 cm	V70N30-2-0
			20 cm	V70N30-2-20
			40 cm	V70N30-2-40

Začetno stanje meritev je bil ničelni odmik od toge površine, kot stanje v katerem imajo obravnavani materiali predvidene najslabše absorpcijske lastnosti. Odmik za 20 cm je predviden v primeru zaves pod stropom, saj je višinska razlika med spodnjo in zgornjo točko oboka 20 cm. Najvišji odmik, 40 cm, je predviden v primeru uporabe zaves ob oknih, saj so zdajšnja okna pomaknjena 40 cm zunaj ravni notranje stene. Poleg tega so bile narajene variacije v slojnosti sestave. Ker so zavese največkrat nabrane, smo izvedli meritve dvoslojne sestave, saj ta v splošnem predstavlja podobne absorpcijske lastnosti kot nabrana zavesa. Pri pritrjevanju vzorcev v impedančno cev sem si pomagal z obojestranskim lepilnim trakom – namestitev vzorca je prikazana na sliki 27.





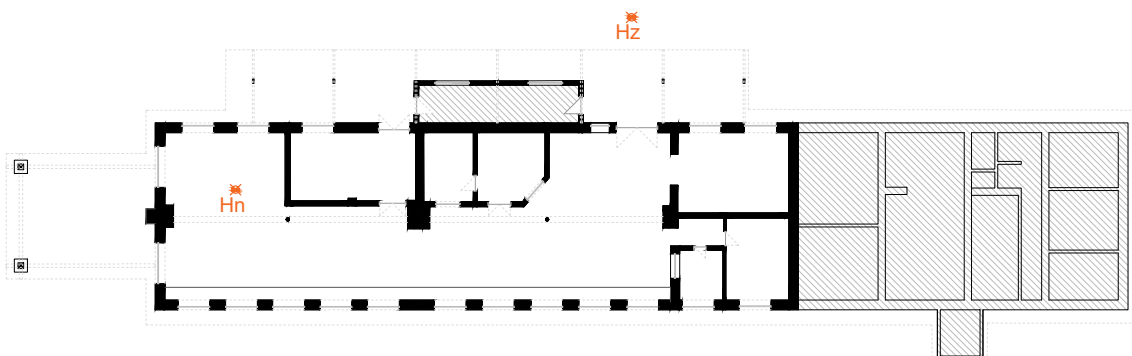
Slika 27: Prikaz namestitve vzorca v impedančno cev – na sliki je vzorec 100-% bombaža.

## 4 REZULTATI

### 4.1 OBSTOJEČE STANJE PROSTORSKE AKUSTIKE

#### 4.1.1 Meritve hrupa ozadja

Pred začetkom meritev s prekinjenim hrupom smo izmerili hrup ozadja zunaj objekta in v njegovi notranjosti. Legi sta prikazani na sliki 28, rezultati meritev pa v tabeli 13.



Slika 28: Legi meritev hrupa ozadja v objektu in zunaj njega.

Eno številčno vrednost meritev hrupa ozadja sem izračunal z enačbo:

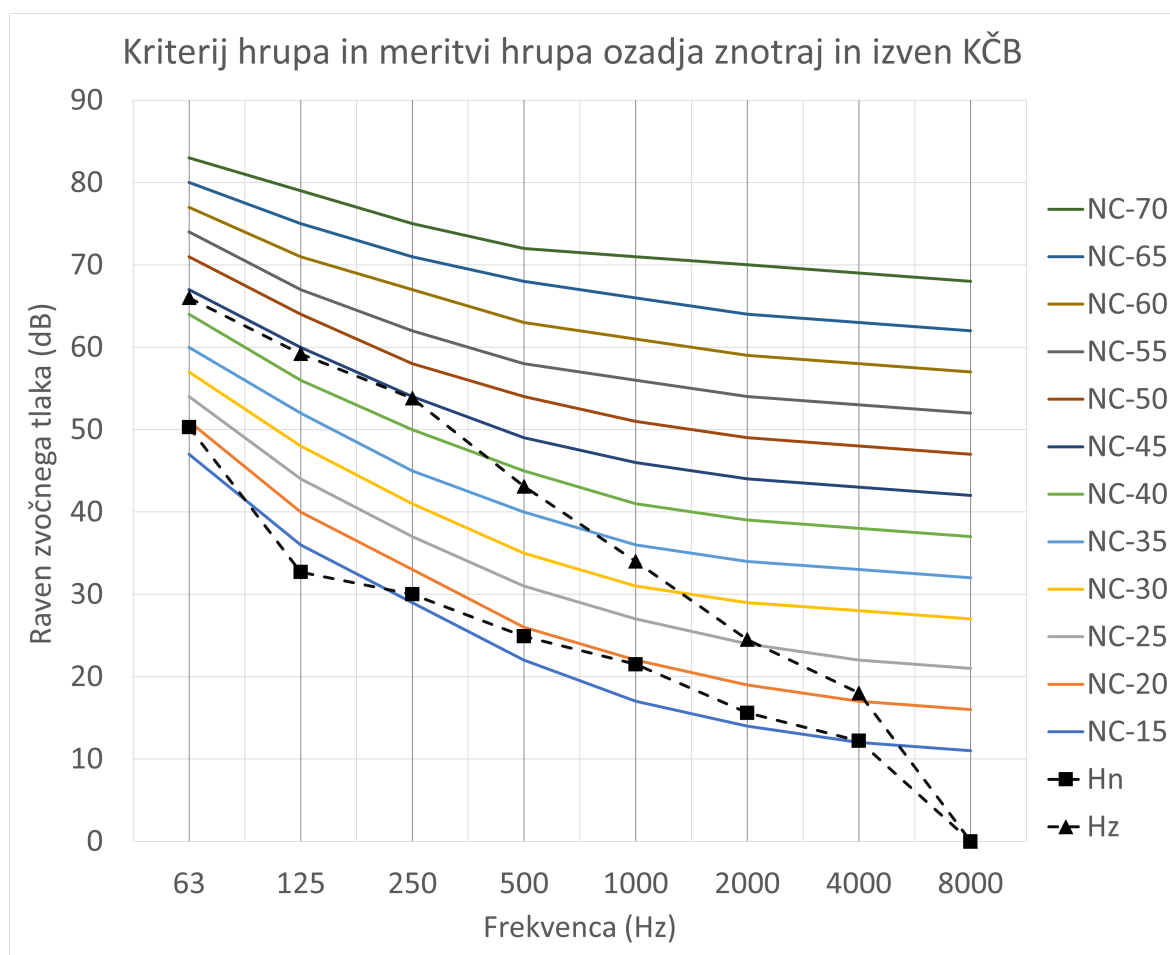
$$L_{Z,eq} = 10 \times \log_{10} \sum_i 10^{p_i/10}, \quad (4.1)$$

pri kateri je  $p_i$  posamezna meritev jakosti hrupa. Pri obdelavi meritev je treba uporabiti utežitvene funkcije. V nalogi sem uporabil utežitveno krivuljo A.  $L_{A,eq}$  v notranjosti KČB znaša 33,0 dB(A), kar je manj kot 35 dB, ki jih predpisuje Tehnična smernica TSG-1-005:2012 [41] kot mejno vrednost hrupa v učilnicah, predavalnicah, delovnih in študijskih kabinetih, knjižnicah, čitalnicah, ipd. Zahteve Tehnične smernice so izpolnjene že v zdajšnjem stanju, zato sanacija obstoječega stavbnega pohištva z namenom znižanja ravni hrupa ozadja ni potrebna, je pa zaželena.

Tabela 13: Rezultati meritev hrupa ozadja v terčnih pasovih

Frekvenca (Hz)	Hrup ozadja v objektu – $H_n$ (dB)	Hrup ozadja zunaj objekta – $H_z$ (dB)
$L_{A,eq}$	33,0	53,4

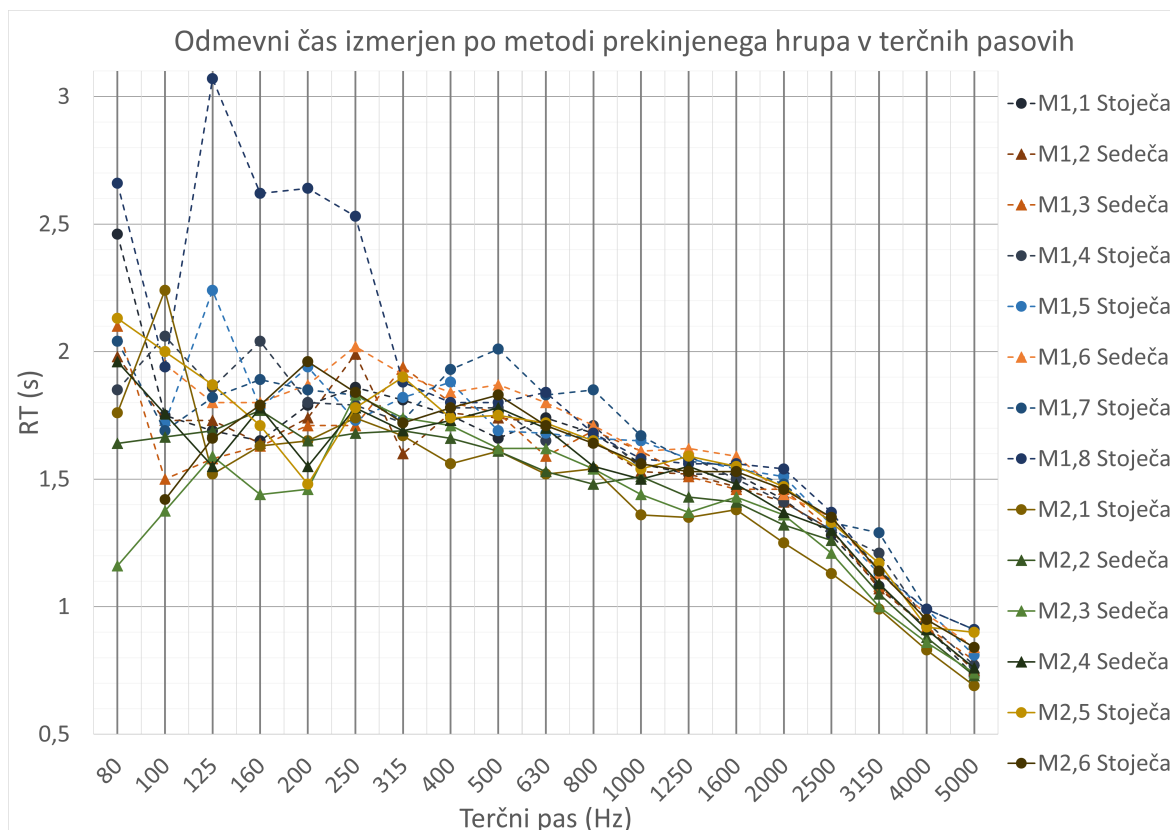
Poleg  $L_{A,eq}$  je bil obravnavan tudi kriterij hrupa (ang. *noise criterion*), označen tudi kot NC. S pomočjo te metode smo določili hrup ozadja in ga primerjali s priporočeno vrednostjo za predavalnice (NC 25–30) in koncertnimi dvoranami (NC 15–20) [8]. Iz rezultatov meritev hrupa ozadja sem s pomočjo grafikona na sliki 29 ugotovil, da za KČB velja oznaka NC-20, kar ustreza priporočilom.



Slika 29: Krivulje kriterija hrupa in meritvi hrupa ozadja v objektu KČB ( $H_n$ ) in zunaj njega ( $H_z$ )

### 4.1.2 Metoda prekinjenega hrupa

Meritve z metodo prekinjenega hrupa so bile izvedene v skladu s standardom SIST EN ISO 3382-1 [32] in so predstavljene v razdelku 3.3 na strani 40. Rezultati meritev so predstavljeni v tabeli 14, v kateri so navedene vrednosti za 8 meritev pri prvi legi izvora hrupa in 6 pri drugi legi izvora hrupa, predstavljeni na slikah 22 in 23 na strani 41.



Slika 30: Rezultati meritev odmevnega časa z metodo prekinjenega hrupa

Kot je vidno na sliki 30, izmerjena vrednost odmevnega časa na merilni legi M1,8 v terčnih pasovih pod 250 Hz bistveno odstopa od rezultatov na preostalih merilnih legah. Razlog je v legi mikrofona, saj je bil mikrofona postavljen 28 m stran od izvora na nasprotni strani prostora in dovolj blizu notranje zastekljene površine in radiatorja, ki sta se v času delovanja zvočnega vira vzbudila. Ker je bil njun odziv očitno daljši od akustičnega odziva prostora, sta po izklopu primarnega vira še vedno delovala kot izvor zvoka in s tem povzročila daljšo izmerjeno vrednost odmevnega časa. Zato smo meritev M1,8 izvzeli iz nadaljnjih analiz. Ta pojav je bil tudi opomin, da je v sklopu sanacije treba poskrbeti za ustrezno pritrditev elementov, ki bi lahko povzročili tovrstne anomalije.

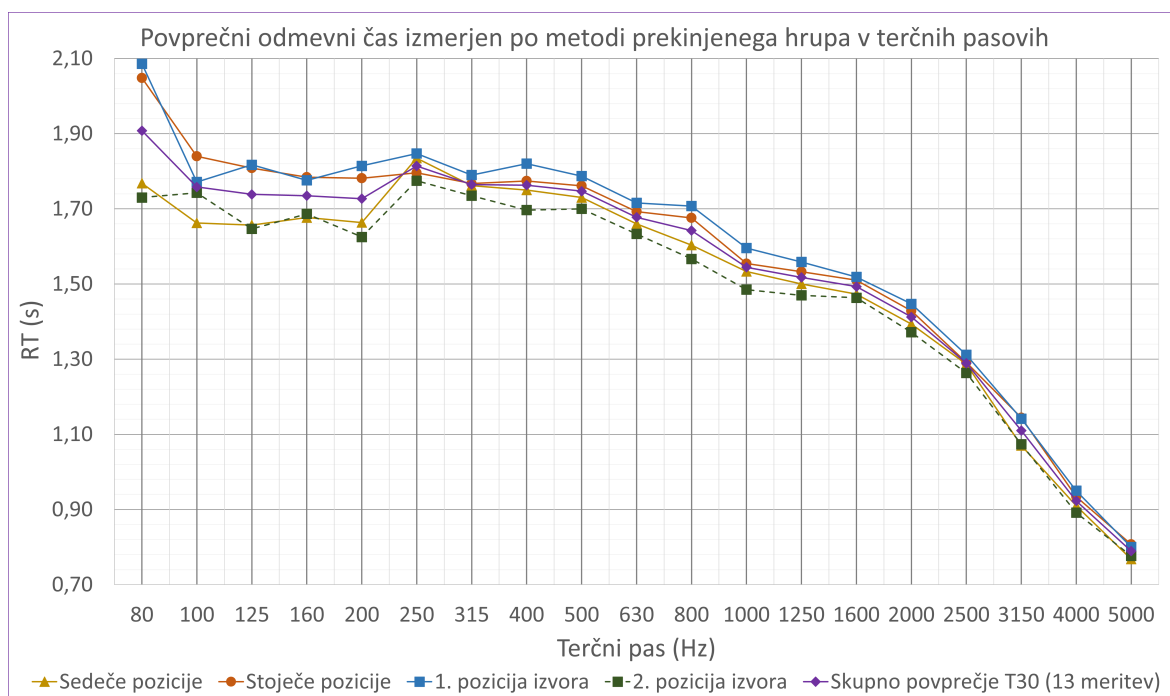
Poleg anomalije merilne lege M1,8 je na sliki 31 in v tabeli 14 viden tudi sistematični vpliv lege mikrofona glede na izvor. Vrednosti izmerjenega odmevnega časa se namreč

Tabela 14: Rezultati meritev odmevnega časa  $T_{30}$  z metodo prekinjenega hrupa v terčnih pasovih

Frekvenčni pas (Hz)	Povprečje 14 meritev	M1,1	M1,2	M1,3	M1,4	M1,5	M1,6	M1,7	M1,8	M2,1	M2,2	M2,3	M2,4	M2,5	M2,6
80	1,98	2,46	1,98	2,1	1,85			2,04	2,66	1,76	1,64	1,16	1,96	2,13	
100	1,82	1,75	1,73	1,5	2,06	1,72	1,95	1,69	1,94	2,24				2	1,42
125	1,83	1,69	1,73	1,58	1,86	2,24	1,8	1,82	3,07	1,52	1,69	1,59	1,55	1,87	1,66
160	1,8	1,65	1,64	1,63	2,04	1,78	1,8	1,89	2,62	1,63	1,77	1,44	1,78	1,71	1,79
200	1,79	1,79	1,74	1,71	1,8	1,94	1,87	1,85	2,64	1,65	1,65	1,46	1,55	1,48	1,96
250	1,87	1,86	1,99	1,71	1,79	1,73	2,02	1,83	2,53	1,74	1,68	1,83	1,78	1,78	1,84
315	1,77	1,81	1,6	1,94	1,72	1,82	1,91	1,73	1,88	1,67	1,69	1,74	1,69	1,9	1,72
400	1,77	1,75	1,76	1,8	1,78	1,88	1,84	1,93	1,8	1,56	1,66	1,71	1,73	1,74	1,78
500	1,75	1,66	1,74	1,76	1,78	1,69	1,87	2,01	1,8	1,61	1,61	1,62	1,78	1,75	1,83
630	1,69	1,74	1,72	1,59	1,65	1,68	1,8	1,83	1,84	1,52	1,53	1,62	1,7	1,72	1,71
800	1,64	1,68	1,65	1,69	1,71	1,66	1,71	1,85	1,68	1,54	1,48	1,54	1,55	1,65	1,64
1000	1,55	1,56	1,53	1,61	1,54	1,65	1,61	1,67	1,58	1,36	1,51	1,44	1,5	1,54	1,56
1250	1,52	1,52	1,52	1,51	1,59	1,58	1,62	1,57	1,56	1,35	1,43	1,37	1,55	1,59	1,53
1600	1,5	1,52	1,47	1,46	1,5	1,54	1,59	1,55	1,56	1,38	1,41	1,43	1,48	1,55	1,53
2000	1,42	1,42	1,41	1,46	1,41	1,51	1,44	1,48	1,54	1,25	1,32	1,36	1,37	1,47	1,46
2500	1,3	1,28	1,3	1,3	1,3	1,32	1,35	1,33	1,37	1,13	1,26	1,21	1,3	1,33	1,35
3150	1,11	1,08	1,07	1,08	1,21	1,13	1,13	1,29	1,14	0,99	1,05	1	1,09	1,17	1,14
4000	0,93	0,92	0,92	0,92	0,94	0,99	0,97	0,99	0,99	0,83	0,88	0,86	0,91	0,92	0,95
5000	0,8	0,73	0,75	0,79	0,77	0,81	0,84	0,91	0,91	0,69	0,73	0,74	0,76	0,9	0,84

večajo z oddaljenostjo od izvora, kar je pričakovano glede na obliko prostora. To se pojavi predvsem, ko smo mikrofona premaknili iz ene polovice prostora skozi srednji obok v drugi del. Tam se lokalna širina hale poveča, s čimer se poveča tudi volumen prostora. Zanimivo je tudi, da so meritve z izvorom v točki  $Z_2$  večinoma manjše za približno 0,1 s, kar ni povsem pričakovano.

Opaziti je tudi razlike v meritvah glede na višino mikrofona. Ta ima sistematični vpliv na odmevni čas v frekvenčnem območju pod 250 Hz, in sicer je odmevni čas nižji v primeru nižjih (sedečih) leg. Opažanje kaže na vpliv modalnih oblik v vertikalni smeri, kar je postavilo dodatno vodilo pri iskanju rešitev, saj je bilo treba vstaviti absorpcijske elemente v strop.



Slika 31: Povprečne vrednosti meritev odmevnega časa z metodo prekinjenega hrupa glede na lego izvora

Med drugim je dobro viden tudi vpliv atenuacije zvoka v zraku, saj odmevni čas z naraščanjem frekvenc po terčnem pasu 400 Hz zmeroma pada.

### 4.1.3 Metoda impulznega odziva

Z metodo impulznega odziva nismo le preverili meritve odmevnega časa, opravljene z metodo prekinjenega hrupa, temveč nam je metoda omogočila izračun drugih parametrov prostorske akustike (gl. tabelo 5 v razdelku 2.2.3.4). Pri določanju pomembnih parametrov sem se oprl na študiji Adelman-Larsna in sodelavcev [1, 2], ki so raziskovali 20 različnih dvoran za koncerte sodobne glasbe. Tako sem pridobil

vrednosti, s katerimi sem lahko primerjal svoje rezultate meritev in pozneje simulacij. Med obravnavanimi sta razmerje basov  $BR$  in definicija  $D_{50}$ .

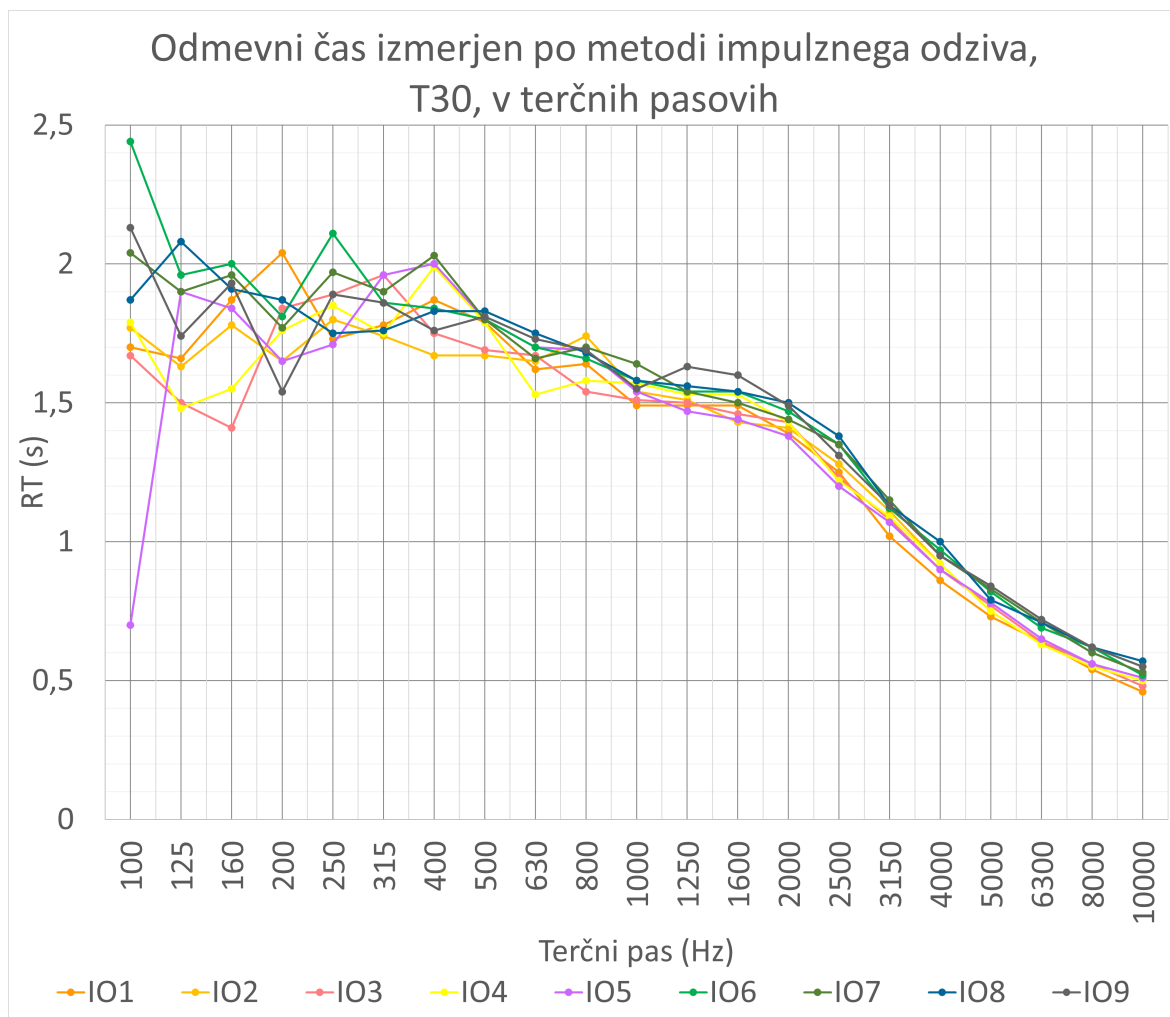
V tabeli 15 so predstavljeni rezultati meritev odmevnega časa kot vrednosti  $T_{30}$ , izračunanih z metodo impulznega odziva. Povprečno odstopanje odmevnega časa v terčnih pasovih, izmerjenega po obeh metodah, je 0,02 s, največje odstopanje pa 0,10 s. Tako ugotavljam, da je ujemanje rezultatov meritev z obema metodama visoko. Več o primerjavi rezultatov obeh metod v poglavju 4.1.4.

Tabela 15: Rezultati meritev odmevnega časa  $T_{30}$  z metodo impulznega odziva v terčnih pasovih

Terčni pas (Hz)	Meritev $T_{30}$ (s)									Povprečje 9 meritev
	IO1	IO2	IO3	IO4	IO5	IO6	IO7	IO8	IO9	
100	1,7	1,77	1,67	1,79	0,7	2,44	2,04	1,87	2,13	1,79
<b>125</b>	1,66	1,63	1,5	1,48	1,9	1,96	1,9	2,08	1,74	1,76
160	1,87	1,78	1,41	1,55	1,84	2	1,96	1,91	1,93	1,81
200	2,04	1,65	1,84	1,76	1,65	1,81	1,77	1,87	1,54	1,77
<b>250</b>	1,73	1,8	1,89	1,85	1,71	2,11	1,97	1,75	1,89	1,86
315	1,78	1,74	1,96	1,75	1,96	1,86	1,9	1,76	1,86	1,84
400	1,87	1,67	1,75	1,99	2	1,84	2,03	1,83	1,76	1,86
<b>500</b>	1,79	1,67	1,69	1,79	1,8	1,8	1,8	1,83	1,81	1,78
630	1,62	1,65	1,67	1,53	1,7	1,7	1,66	1,75	1,73	1,67
800	1,64	1,74	1,54	1,58	1,69	1,66	1,7	1,68	1,69	1,66
<b>1000</b>	1,49	1,54	1,51	1,57	1,54	1,58	1,64	1,58	1,55	1,56
1250	1,49	1,51	1,5	1,53	1,47	1,54	1,54	1,56	1,63	1,53
1600	1,49	1,43	1,46	1,53	1,44	1,54	1,5	1,54	1,6	1,50
<b>2000</b>	1,39	1,41	1,43	1,43	1,38	1,47	1,44	1,5	1,49	1,44
2500	1,25	1,28	1,23	1,22	1,2	1,35	1,35	1,38	1,31	1,29
3150	1,02	1,11	1,08	1,09	1,07	1,12	1,15	1,13	1,13	1,10
<b>4000</b>	0,86	0,92	0,9	0,92	0,9	0,97	0,95	1	0,95	0,93
5000	0,73		0,77	0,75	0,78	0,82	0,83	0,79	0,84	0,79
6300	0,64		0,64	0,63	0,65	0,69	0,71	0,71	0,72	0,67
<b>8000</b>	0,54		0,56	0,55	0,56	0,62	0,6	0,62	0,62	0,58
10000	0,46		0,48	0,5	0,51	0,52	0,53	0,57	0,55	0,52

Rezultati so predstavljeni tudi grafično na sliki 32. Z naraščajočo zaporedno številko meritve narašča tudi oddaljenost od izvora zvoka. Na sliki so s toplimi barvami označene meritve v prvi polovici dvorane in s hladnimi barvami tiste v bolj oddaljeni polovici. Razvidno je, da je odmevni čas v bližjih legah krajši kot v bolj oddaljenih. To

je očitno predvsem v območju višjih frekvenc, kjer sta dva snopa krivulj. Ugotovitve so enake kot v primeru meritev s prekinjenim hrupom.



Slika 32: Rezultati meritev odmevnega časa z metodo impulznega odziva

Poleg odmevnega časa smo z meritvami impulznega odziva določili tudi razmerje basov  $BR$ , definirano v razdelku 2.2.2.3 na strani 23. Rezultati so zbrani v tabeli 16, iz katere je razvidno, da trenutno stanje odstopa od ciljne vrednosti po Adelman-Larsnu [1], saj je  $BR_{A-L} = 0,81$ . Trenutno stanje ima daljši odmevni čas v basovskih frekvencah. Pomembno je, da s sanacijo ne porušimo tega razmerja in ga celo poslabšamo, predvsem z vnašanjem absorpcije v višjem frekvenčnem območju.

Tabela 16: Rezultati izračuna razmerja basov  $BR$  prek rezultatov meritev impulznega odziva

Meritev/ Referenca	IO1	IO2	IO3	IO4	IO5	IO6	IO7	IO8	IO9	Ciljna vrednost
$BR_{A-L}$	1,12	1,15	1,09	1,04	1,17	1,19	1,18	1,14	1,13	0,81



Dodatno smo preverili tudi faktor  $D_{50}$ . Rezultati meritev so zbrani v tabeli 17. Iz pregleda rezultatov lahko zaključimo, da je trenutno stanje neustrezno, saj je povprečna vrednost faktorja  $D_{50}$  prenizka. Ob razvijanju rešitev akustične sanacije bo treba uravnesiti količino zgodnjih in poznih energij, ki prispejo do občinstva.

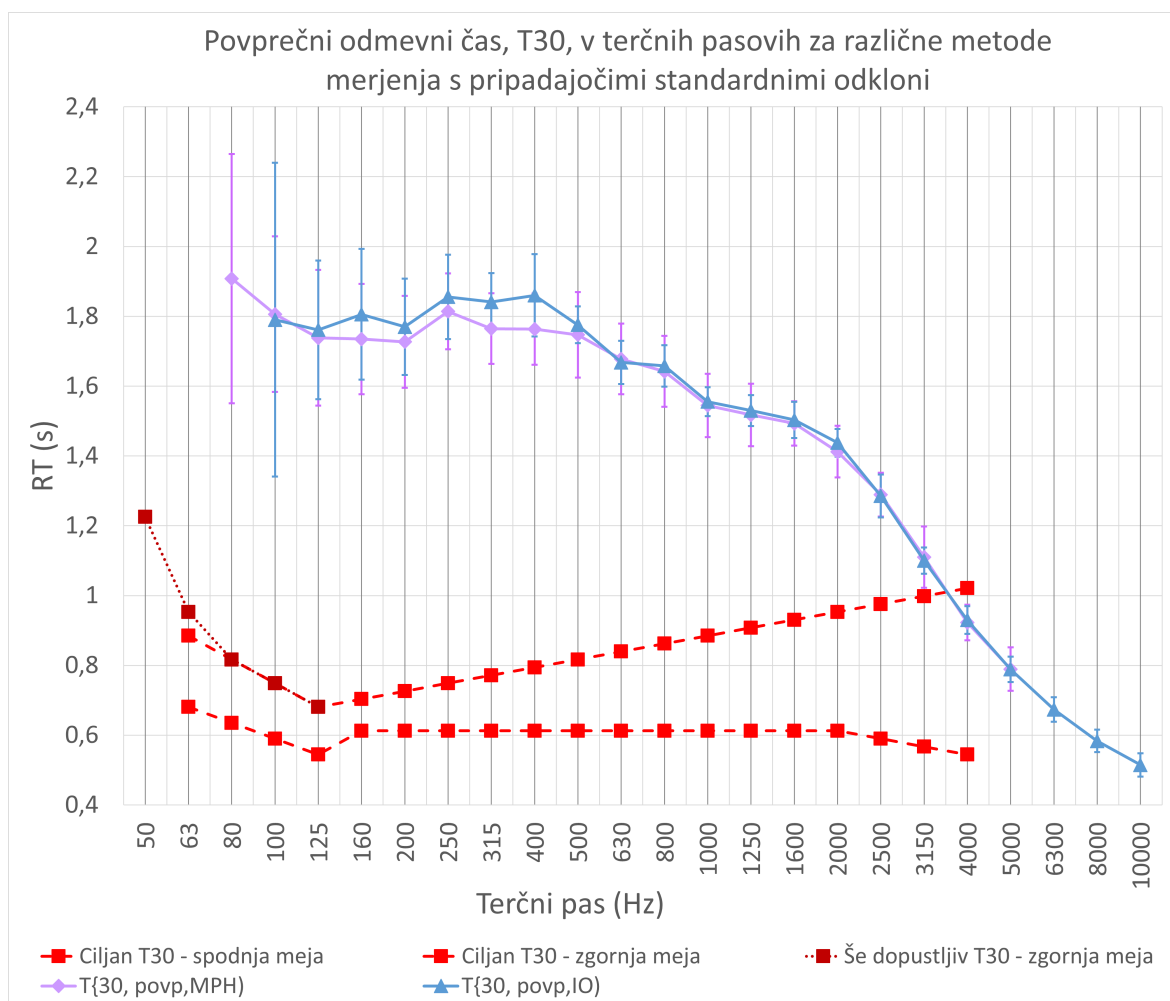
Tabela 17: Rezultati meritev definicije,  $D_{50}$  z metodo impulznega odziva –  $D_{50,cilj} = 0,7$

$f$ (Hz)	Meritve $D_{50}$									$IO_{povp}$
	IO1	IO2	IO3	IO4	IO5	IO6	IO7	IO8	IO9	
100	0,344	0,087	0,173	0,135	0,093	0,021	0,042	0,048	0,026	0,108
<b>125</b>	0,129	0,188	0,136	0,223	0,041	0,054	0,065	0,115	0,128	0,120
160	0,334	0,323	0,112	0,330	0,335	0,103	0,105	0,059	0,140	0,205
200	0,634	0,119	0,212	0,260	0,457	0,319	0,190	0,257	0,236	0,298
<b>250</b>	0,414	0,442	0,126	0,303	0,152	0,321	0,168	0,241	0,051	0,246
315	0,603	0,407	0,273	0,165	0,202	0,197	0,078	0,173	0,169	0,252
400	0,353	0,466	0,401	0,367	0,239	0,156	0,252	0,130	0,140	0,278
<b>500</b>	0,516	0,435	0,302	0,250	0,320	0,177	0,273	0,228	0,192	0,299
630	0,427	0,391	0,378	0,345	0,318	0,294	0,283	0,254	0,176	0,318
800	0,411	0,346	0,249	0,204	0,247	0,250	0,312	0,254	0,138	0,268
<b>1000</b>	0,344	0,376	0,277	0,278	0,385	0,284	0,248	0,282	0,248	0,302
1250	0,519	0,426	0,346	0,253	0,327	0,339	0,430	0,301	0,240	0,353
1600	0,472	0,358	0,328	0,368	0,385	0,332	0,280	0,331	0,322	0,353
<b>2000</b>	0,468	0,322	0,392	0,261	0,315	0,207	0,261	0,319	0,322	0,319
2500	0,514	0,378	0,426	0,388	0,404	0,398	0,292	0,307	0,257	0,374
3150	0,492	0,468	0,409	0,417	0,457	0,342	0,308	0,346	0,342	0,398
<b>4000</b>	0,567	0,551	0,539	0,441	0,490	0,483	0,432	0,367	0,408	0,475
5000	0,594	0,630	0,533	0,560	0,557	0,531	0,536	0,487	0,529	0,551
6300	0,694	0,673	0,502	0,597	0,694	0,568	0,635	0,585	0,600	0,616
<b>8000</b>	0,749	0,747	0,705	0,715	0,690	0,714	0,638	0,689	0,663	0,701
10000	0,749	0,819	0,717	0,735	0,795	0,717	0,721	0,729	0,722	0,745
$D_{50,povp}$	<b>0,492</b>	<b>0,426</b>	<b>0,359</b>	<b>0,362</b>	<b>0,376</b>	<b>0,324</b>	<b>0,312</b>	<b>0,310</b>	<b>0,288</b>	<b>0,361</b>

#### 4.1.4 Primerjava različnih metod merjenja odmevnega časa

Na sliki 33 so prikazani povprečni rezultati meritev odmevnega časa z metodo prekinjenega hrupa in z metodo impulznega odziva s pripadajočimi standardnimi odkloni v posameznih terčnih pasovih. Poleg tega je na sliki začrtano tolerančno območje ciljnih vrednosti odmevnega časa za prireditve sodobne glasbe, ki so definirane v razdelku 2.2.3.4. Rezultati so skladni, pri čemer sem opravil 14 meritev z metodo prekinjenega hrupa (oziroma 13 merodajnih) in 9 z metodo impulznega odziva, kar

kaže na ponovljivost rezultatov in merodajnost zbranih podatkov. Ker sem predvidel uporabo metode impulznega odziva za morebitno merjenje stanja po sanaciji, sem v nadaljnji obravnavi uporabljal rezultate meritev impulznega odziva.



Slika 33: Primerjava rezultatov meritev odmevnega časa z različnima metodama z označeno standardno deviacijo med merilnimi legami in tolerančnim območjem ciljnega odmevnega časa, povzeto po Adelman-Larsen [1]

Na sliki je vidno tudi, da je standardni odklon največji pri meritvah v najnižjih frekvenčnih območjih, tj. pod 125 Hz. To je pričakovano, saj je zaradi lastnosti nizkofrekvenčnega zvočnega valovanja in narave meritev večji vpliv lege in orientacije mikrofona.

## 4.2 AKUSTIČNE SIMULACIJE IN RAZVITE REŠITVE

V splošnem se pri akustičnih sanacijah za vnos absorpcijskih površin pogosto najprej izkoristi strop [41]. Analizirana industrijska hala v KČB spada med tiste

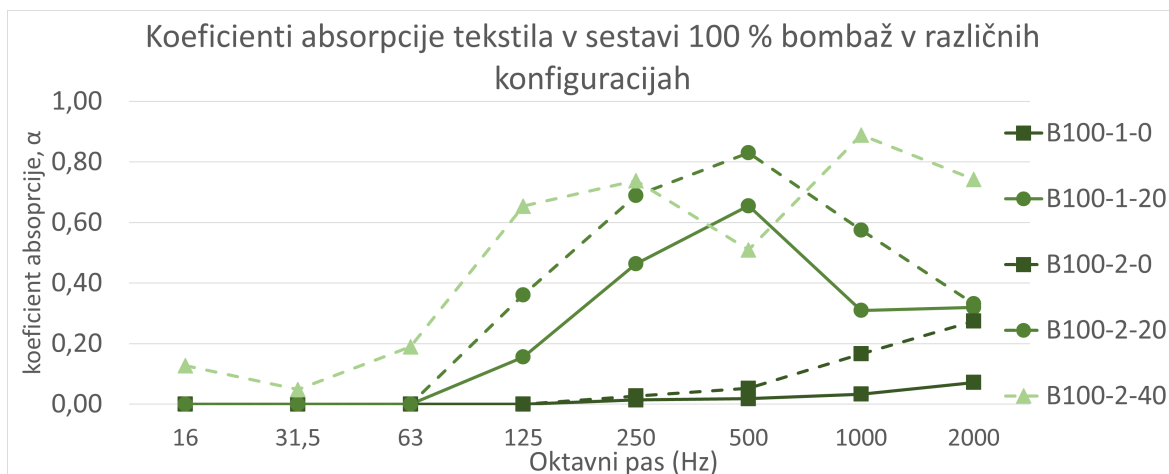
primere, pri katerih je vnos absorpcijskih površin v strop otežen. V hali KČB je strop arhitekturna posebnost, zato sem ga želel čim manj zakriti. Osredotočil sem se na uporabo spremenljivih akustičnih absorberjev, ki jih lahko v času, ko ni (glasbenih) prireditev, pospravimo. Rešitev sem našel v absorpcijski zavesi, ki jo lahko razvijemo po dolžini prireditvenega prostora tik pod spodnjo točko obokanega stropa.

Pred iskanjem rešitev sem določil, katera oprema v prostoru je nujna za izvedbo dejavnosti posamezne predvidene skupine dogodkov. Tako sem za prvo skupino koncerte sodobne glasbe predvidel obvezno uporabo zaves, ki preprečijo vdor svetlobe v prostor skozi okna, in uporabo zaodrja. Enako sem predvidel za drugo skupino, ki zajema gledališke predstave in podobne prireditve, osredotočene na govor. V tej skupini je bilo treba določiti nekatere prilagoditve za predavanja, zato sem zanj ločeno obravnaval postavitve akustičnih elementov, a prav tako predvidel uporabo zaves. Za tretjo skupino prireditev sem predvidel, da notranja oprema ni nujna za izvajanje programa.

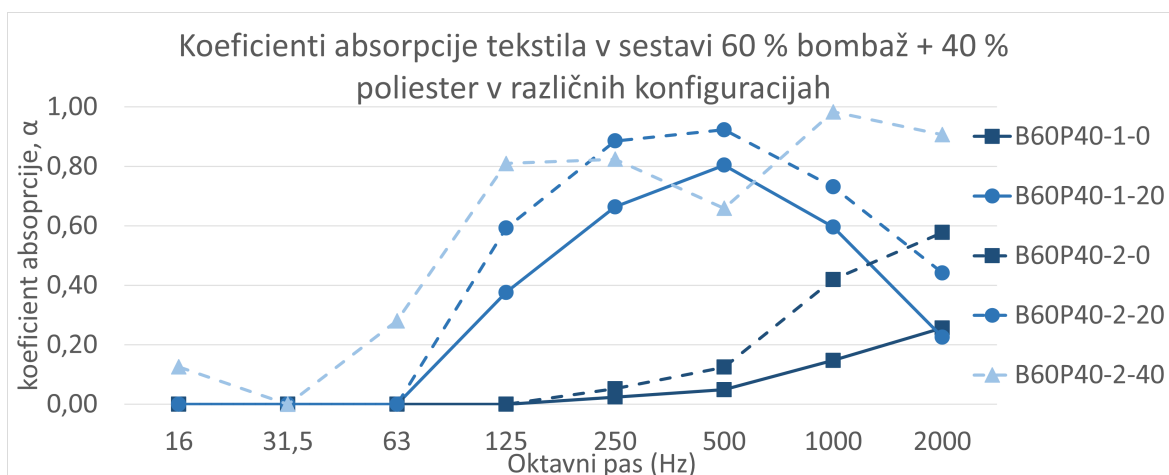
Poleg obvezne opreme sem določil tudi fiksne in variabilne elemente akustične ureditve. Primer fiksnega absorpcijskega elementa je absorpcijski panel, nameščen na notranjem žerjavu, zato sem ta element uporabil v vseh ponovitvah simulacij akustične sanacije. Tudi ostalo nujno opremo, sem želel uporabiti v svoj prid, zato sem zanj predvidel uporabo v akustične namene, oz. v njej prepoznal potencial za vnos absorpcijskih površin. Tako so med variabilnimi elementi akustične ureditve različne vrste zaves ob oknih na zunanjih in notranjih stenah, zavesa nad odrom, stropne zavese vzdolž prizorišča in pregradne zavese med odrom in zaodrjem.

#### 4.2.1 Reciklirani materiali

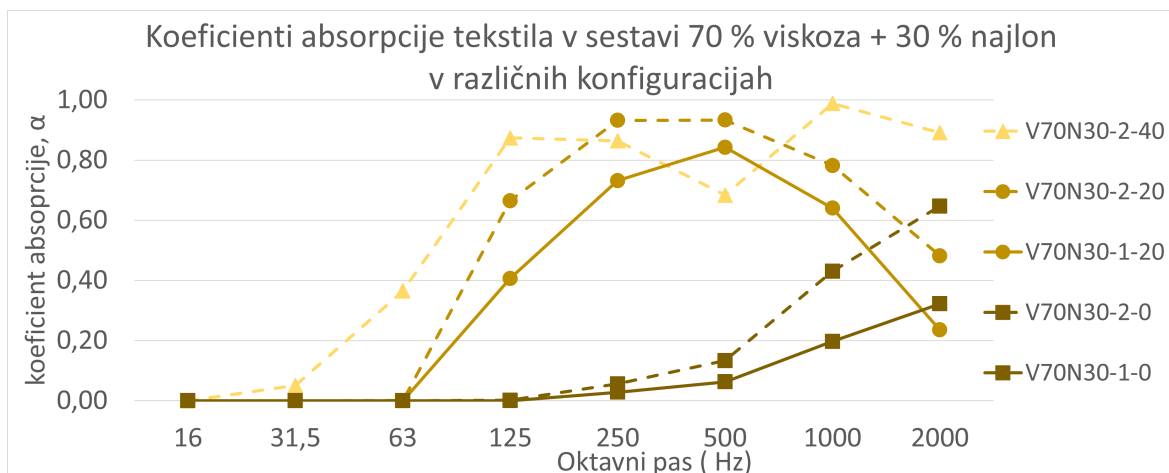
Rezultati meritev absorpcijskih koeficientov odpadnega tekstila (gl. razdelek 3.5) so zbrani na grafikonih na slikah 34, 35 in 36. Izmerjene vrednosti odpadnega tekstila so višje od pričakovanih. Značilen primer je  $\alpha_{125Hz}$  za V70N30-2-40, ki znaša približno 0,90. Najustreznejšo opcijo sem prepoznal v dvoslojni sestavi z odmikom 40 cm in 20 cm od toge površine. Ker je bilo v naboru odpadnega materiala težko dobiti zgolj takega iz 70 % viskoze in 30 % najlona, sem izmerjene vrednosti absorpcijskih koeficientov v posameznem oktavnem pasu povprečil med različnimi tkaninami. Pridobljeno povprečno vrednost vseh treh različnih materialov sem nato uporabil v nadaljnji analizi pri izvajanju simulacij akustične sanacije KČB.



Slika 34: Rezultati meritev absorpcijskega koeficienta v oktavnih pasovih odpadnega tekstila v sestavi 100-% bombaž pri različnih konfiguracijah



Slika 35: Rezultati meritev absorpcijskega koeficienta v oktavnih pasovih odpadnega tekstila v sestavi 60-% bombaž in 40-% poliester pri različnih konfiguracijah



Slika 36: Rezultati meritev absorpcijskega koeficienta v oktavnih pasovih odpadnega tekstila v sestavi 70-% viskoza in 30-% najlon pri različnih konfiguracijah

Poleg merjenja koeficienta absorpcije različnih tkanin sem izmeril tudi transmisivne zvočne izgube  $T_{Ln}$ , prek katerih sem nato izračunal vrednost koeficienta transparentnosti  $k_T$ . Rezultati meritev  $T_{Ln}$  pri 1000 Hz so zbrani v tabeli 18.

Tabela 18: Vrednosti  $T_{Ln}$  pri 1000 Hz za tekstil različnih sestav pri dvoslojni konfiguraciji

	$T_{Ln}(\text{dB})$		
$f$ (Hz)	B100-2-40	B60P40-2-40	V70N30-2-40
1000	2,02	2,86	3,51

## 4.2.2 Kalibracijski model

Simulacije potencialnih rešitev sem izvajal v programskem orodju Odeon Auditorium (gl. razdelek 2.2.4). Orodje v svojih simulacijah uporablja impulzni odziv, ki sem mu moral določiti dolžino trajanja, število zgodnjih in poznih odbojev. Ker sem želel doseči dolžino trajanja, ki bo zagotovila ponovljivost rezultatov, sem določil dolžino 3000 ms, števili zgodnjih in poznih odbojev pa na 2500 oziroma 5000. Te vrednosti so presegle priporočene minimalne vrednosti, a hkrati omogočile obvladljivo dolžino trajanja posameznega izračuna.

Poleg pospešitve merjenja leg mikrofонов in izvorov zvoka pri terenskih meritvah, je 3D skeniranje koristilo tudi pri tvorbi in umerjanju simulacijskega modela. Orodje ima sicer pomanjkljivosti, predvsem pri pretvorbi oblaka točk v 3D model, saj je za začetnika programska oprema zahtevna. Kljub temu je to pospešilo izmero velikosti prostora in ročnega 3D modeliranja hale. Koristilo pa je tudi pri umerjanju 3D simulacijskega modela. To je temeljilo prav na sovpadanju merilnih leg mikrofонов in »merilnih« leg v simulacijskem orodju. Tako sem za umerjanje vnesel vseh 9 merilnih leg impulznega odziva in položaj izvora Z1. Po vsaki ponovitvi sem preveril izračunani povprečni odmevni čas za vse lege in ga primerjal z izračunanim povprečnim odmevnim časom, izmerjenim z impulznim odzivom. Pri tem je bilo treba upoštevati vsak oktavni pas posebej, saj je bil absorpcijski koeficient vnesen v odvisnosti od frekvence. Ob ustreznem povprečnem odmevnem času sem preveril še ujemanje med istoležečimi simulacijskimi in merilnimi legami. V tabeli 19 so prikazane posamezne vrednosti ter absolutne in relativne razlike med rezultati.

Kot je vidno v tabeli, se absolutne vrednosti povprečnega odklona med izmerjeno in simulacijsko vrednostjo odmevnega časa gibljejo od 0,02 s do 0,12 s oziroma relativno glede na povprečno vrednost odmevnega časa znotraj posameznega oktavnega pasu od 1,6 % do 12,3 %. V ključnih oktavnih pasovih od 125 do 2000 Hz ujemanje simulacijskih in izmerjenih vrednosti ocenjujem kot ustrezno, saj so absolutni odkloni odmevnega časa manjši od 0,03 s.

Tabela 19: Primerjava rezultatov odmevnega časa meritev in simulacij v istoležečih legah

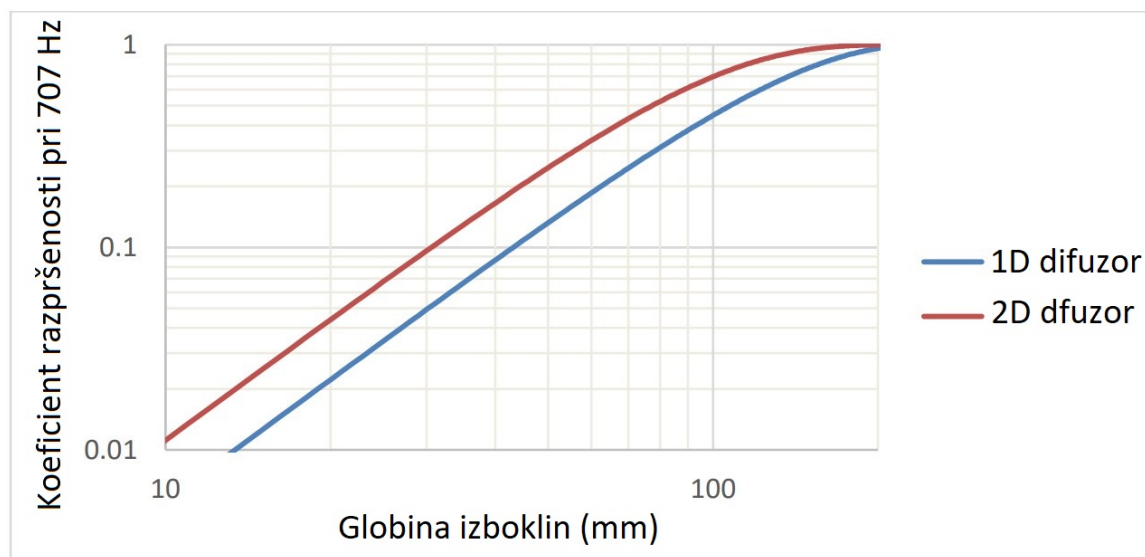
	$T_{30}$						
<b>Iteracija \ <math>f</math> (Hz)</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000</b>
IO1 – Odeon	1,71	1,78	1,7	1,51	1,37	0,88	0,53
IO1 – meritev	1,74	1,79	1,74	1,53	1,41	0,97	0,6
<b>Absolutni odklon</b>	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>	<b>0,04</b>	<b>0,09</b>	<b>0,07</b>
IO2 – Odeon	1,73	1,79	1,71	1,52	1,38	0,89	0,53
IO2 – meritev	1,77	1,76	1,67	1,55	1,4	1,04	0,61
<b>Absolutni odklon</b>	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>	<b>0,15</b>	<b>0,08</b>
IO3 – Odeon	1,77	1,83	1,74	1,54	1,4	0,9	0,54
IO3 – meritev	1,52	1,87	1,69	1,51	1,41	1,02	0,62
<b>Absolutni odklon</b>	<b>0,25</b>	<b>0,04</b>	<b>0,05</b>	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>	<b>0,12</b>	<b>0,08</b>
IO4 – Odeon	1,77	1,84	1,75	1,54	1,39	0,91	0,55
IO4 – meritev	1,53	1,81	1,76	1,55	1,44	1,03	0,61
<b>Absolutni odklon</b>	<b>0,24</b>	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,05</b>	<b>0,12</b>	<b>0,06</b>
IO5 – Odeon	1,8	1,86	1,77	1,56	1,42	0,94	0,57
IO5 – meritev	1,9	1,82	1,8	1,53	1,38		
<b>Absolutni odklon</b>	<b>0,1</b>	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>	<b>0,03</b>	<b>0,04</b>		
IO6 – Odeon	1,81	1,87	1,78	1,57	1,43	0,98	0,61
IO6 – meritev	1,92	1,95	1,77	1,58	1,49	1,11	0,68
<b>Absolutni odklon</b>	<b>0,11</b>	<b>0,08</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,06</b>	<b>0,13</b>	<b>0,07</b>
IO7 – Odeon	1,8	1,85	1,77	1,58	1,44	1	0,64
IO7 – meritev	1,9	1,9	1,76	1,6	1,45	1,13	0,69
<b>Absolutni odklon</b>	<b>0,1</b>	<b>0,05</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,13</b>	<b>0,05</b>
IO8 – Odeon	1,8	1,85	1,77	1,58	1,45	1,01	0,64
IO8 – meritev	1,97	1,79	1,79	1,59	1,5	1,1	0,7
<b>Absolutni odklon</b>	<b>0,17</b>	<b>0,06</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,05</b>	<b>0,09</b>	<b>0,06</b>
IO9 – Odeon	1,79	1,83	1,75	1,56	1,44	1	0,64
IO9 – meritev	1,86	1,83	1,76	1,62	1,52	1,1	0,71
<b>Absolutni odklon</b>	<b>0,07</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>0,06</b>	<b>0,08</b>	<b>0,1</b>	<b>0,07</b>
$T_{30,povp}$ - Odeon	1,77	1,83	1,75	1,55	1,41	0,94	0,58
$T_{30,povp}$ - Meritev	1,79	1,84	1,75	1,56	1,44	0,94	0,58
<b>Absolutni odklon</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>0,03</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
<b>Povprečni absolutni odklon</b>	<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,04</b>	<b>0,12</b>	<b>0,07</b>
<b>Relativni povprečni odklon</b>	<b>7,7 %</b>	<b>2,3 %</b>	<b>1,6 %</b>	<b>1,7 %</b>	<b>3,1 %</b>	<b>12,3 %</b>	<b>11,6 %</b>

Zvočno absorptivnost in faktor sipanja zvočnega valovanja sem prilagajal po priporočil, najdenih v priročniku za uporabo simulacijskega orodja OdeonAuditorium. Te sem ob ponavljanjih določal znotraj posameznega oktavnega pasu tako, da je simulacijski izračun odmevnega časa  $T_{30}$ ,  $D_{50}$  in  $BR$  na koncu sovpadal s tistim, izmerjenim z impulznim odzivom na lokaciji. Kalibracijski model oziroma model obstoječega stanja sem uporabljal kot osnovo za razvoj rešitev pri obravnavi posameznih skupin. Uporabljene vrednosti faktorja absorpcije in sipanja zvočnega valovanja za obstoječe in nove predvidene površine so predstavljene v tabeli 20.

Tabela 20: Absorpcijske lastnosti materialov, uporabljenih pri simulacijah akustične sanacije

Material	Absorpcijski koeficient							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Enoslojno steklo (privzeto iz Odeona)	0,18	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
Strop	0,09	0,09	0,10	0,10	0,12	0,12	0,17	0,22
Obstoječi material obodnih površin	0,09	0,09	0,10	0,10	0,12	0,12	0,17	0,22
Mešan dvoslojni tekstil – odmik 20 cm	0,00	0,54	0,84	0,90	0,70	0,42	0,40	0,40
Mešan dvoslojni tekstil – odmik 40 cm	0,28	0,78	0,81	0,62	0,95	0,85	0,81	0,40

Posebnost obravnave je bil obokan strop, ki je akustično gledano svojevrsten izziv, v primeru KČB pa je ta strop dodatno valovit. Najprej sem določil tip materiala, pri čemer sem izbral možnost »fractional«, ki programskemu orodju omogoča, da obokane površine, ki so z namenom risanja 3D modela razdeljene v več površin, prepozna kot eno skupino. Preostalim površinam sem določil tip »normal«. Ker je stropna pločevina valovita, sem uporabil usmeritve orodja, kot je graf na sliki 37 za določitev koeficienta razpršenosti zvočnega valovanja. Grafikon na sliki 37 se sicer uporablja za difuzorje s piramidnimi izboklinami. V primeru stropne pločevine je globina teh valov od 50 do 60 mm, zato sem uporabil vrednost koeficienta razpršenosti 0,20. Za preostale površine sem določil koeficient razpršenosti 0,00.



Slika 37: Koefficient razpršenosti v odvisnosti od globine piramid difuzorjev, povzeto po Odeon Manual [19]

Poleg tipa materiala in koeficienta razpršenosti sem določil še koeficient transparentnost, in sicer z enačbo 4.2. Osnovan je na meritvah  $T_{Ln}$  – transmisijskih izgubah zvočnega valovanja v impedančni cevi. Ker mora biti vrednost v simulacijskem orodju Odeon enoštevilska, sem najprej prevzel vrednost  $T_{Ln}$  pri 1000 Hz. Nato sem izračunane vrednosti koeficienta transparentnosti za posamezni tekstilni material povprečil in v nadaljevanju uporabil povprečno vrednost  $k_T = 0,525$  za vse vrste tekstila. Za preostale površine je koeficient transparentnosti 0,000.

$$k_T = 10^{-T_{Ln}/10} \quad (4.2)$$

### 4.2.3 Sistemske rešitve za različne namene uporabe

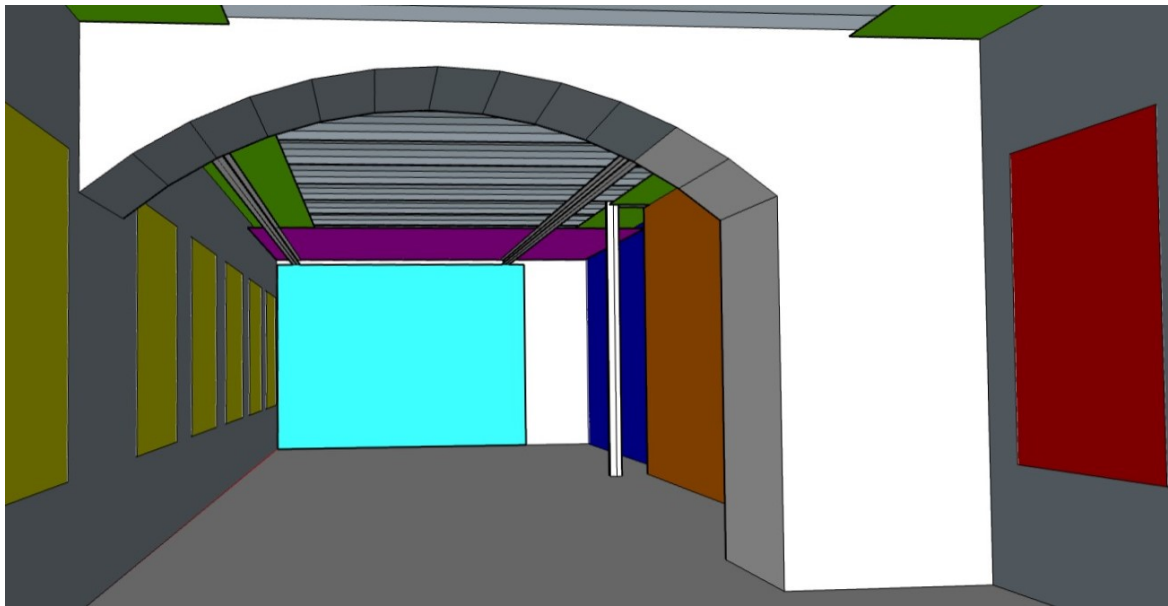
Kot omenjeno na začetku poglavja 4.2, so bili vgrajeni elementi ločeni na fiksne in variabilne. To je predstavljeno na sliki 38, na kateri je fiksni element – akustični panel na žerjavu – obarvan v svetlo modro. Prikazani so tudi naslednji variabilni elementi:

- zavese ob oknih na zunanjih stenah v rumeni barvi,
- zavese nad odrom v vijolični barvi,
- stropne zavese vzdolž prizorišča v zeleni barvi,
- pregradne zavese med odrom in zaodrjem v temno modri barvi,
- zavese ob oknih na notranjih stenah v rdeči barvi,



- zavesa prek lateralne stene v prvi polovici odra v oranžni barvi in
- zavesa na steni nasproti odra (na sliki 39 v razdelku 4.2.7.1) v roza barvi.

Simulacije sem izvajal večkrat, in sicer tako, da sem najprej izvedel simulacijo s fiksnimi elementi, nato sem dodal nujne elemente, kot so zavese za zastiranje zunanje svetlobe in zaodrja, na koncu pa še dodatne elemente, dokler nisem dosegel ciljnega stanja prostorske akustike.



Slika 38: Pogled proti odru z različno obarvanimi akustičnimi elementi in sredinskim obokom.

#### 4.2.4 Skupina 1 - koncerti sodobne glasbe

Rezultati terenskih meritev odmevnega časa (gl. sliko 33) kažejo, da trenutno stanje prostorske akustike ni primerno za izvajanje koncertov sodobne glasbe, saj odmevni čas obstoječega stanja bistveno odstopa od zahtevanih vrednosti. Odmevni čas v oktavnih pasovih od 125 do 2000 Hz je treba razpoloviti, ponekod pa je odstopanje od ciljnih vrednosti še večje. Med obravnavanjem prve skupine predvidenih dogodkov sem se osredotočil na zahteve koncertov sodobne glasbe. Pri njej prevladuje oktavni pas 125 Hz, zato je bilo snovanje rešitev osredotočeno nanj. Izvedel sem 7 iteracij. Postavitve akustičnih elementov so prikazane v tabeli 21.

Najprej sem v prostor poleg absorpcijskega panela umestil še zavese na zunanjih in notranjih oknih ter zaveso med odrom in zaodrjem. Nato sem postopoma dodajal absorpcijske površine oziroma spreminjal njihovo lego. Vsi omenjeni elementi so sestavljeni iz dvoslojnega tekstila z medsebojnim razmikom 1 cm in odmikom od

Tabela 21: Seznam uporabljenih akustičnih elementov in pripadajočih absorpcijskih površin pri posamezni ponovitvi simulacije v prvi skupini

Postavitve iteracij 1. skupine								
Akustični element	Umerjen model	1. iteracija	2. iteracija	3. iteracija	4. iteracija	5. iteracija	6. iteracija	7. iteracija
Fiksen abs. panel ( $m^2$ )	Ne	Da (2 x 18,5)	Da (2 x 18,5)	Da (2 x 18,5)	Da (2 x 18,5)	Da (2 x 18,5)	Da (1 x 18,5)	Da (1 x 18,5)
Zavese prek oken ( $m^2$ )	Ne	Da (63,81)	Da (63,81)	Da (63,81)	Da (63,81)	Da (63,81)	Da (63,81)	Da (63,81)
Zavese zaodrja ( $m^2$ )	Ne	Da (35,35)	Da (35,35)	Da (35,35)	Da (35,35)	Da (35,35)	Da (35,35)	Da (35,35)
Zavesa nasproti odra ( $m^2$ )	Ne	Da (17,07)	Da (17,07)	Da (17,07)	Da (17,07)	Da (17,07)	Da (17,07)	Da (17,07)
Zavese nad odrom ( $m^2$ )	Ne	Ne	Da, odmik 20 cm (36)	Da, odmik 40 cm (36)	Da, odmik 40 cm (36)	Da, odmik 40 cm (36)	Da, odmik 40 cm (36)	Da, odmik 40 cm (36)
Stropne vzdolžne zavese ( $m^2$ )	Ne	Ne	Ne	Ne	Da (63,08)	Da (63,08)	Da (63,08)	Da (63,08)
Zavesa prek lateralne stene ( $m^2$ )	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Da (33,52)	Da (33,52)	Ne
<b>Skupna količina absorpcijskih površin (<math>m^2</math>)</b>	<b>0,00</b>	<b>153,23</b>	<b>189,23</b>	<b>189,23</b>	<b>252,31</b>	<b>285,83</b>	<b>267,33</b>	<b>233,81</b>

toge površine 40 cm. Izjema je bil le absorpcijski panel, ki je bil prvotno načrtovan s tekstilom na obeh straneh in z enakim medsebojnim odmikom stranic (40 cm). Rezultati prve simulacije so bili obetavni, saj je bil odmevni čas nad oktavnim pasom 1000 Hz že zadovoljiv. V oktavnem pasu 125 Hz ga je bilo še vedno treba prepoloviti. Vsi rezultati so zbrani v tabeli 22.

Tabela 22: Rezultati  $T_{30}$  iz simulacij za prvo skupino predvidenih dogodkov; barva posamezne celice določa ustreznost: oranžna – neustrezna vrednost, rumena – zadovoljiva vrednost, zelena – ustrezna vrednost, modra – »presuh« prostor

$f$ (Hz)	<b>63</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000</b>	$T_{30,povp}$
Ciljni $T_{30}$ (s)		<b>0,68</b>	<b>0,75</b>	<b>0,82</b>	<b>0,89</b>	<b>0,95</b>	<b>1,02</b>		
Obstoječe stanje	<b>1,79</b>	<b>1,78</b>	1,83	1,75	1,55	1,41	0,94	<b>1,57</b>	<b>1,6</b>
1. iteracija	<b>1,9</b>	<b>1,19</b>	1,02	0,97	0,97	1,04	0,74	<b>0,48</b>	<b>1,0</b>
2. iteracija	<b>1,81</b>	<b>1,17</b>	1,04	1,01	0,97	0,99	0,72	<b>0,47</b>	<b>1,0</b>
3. iteracija	<b>1,8</b>	<b>1,15</b>	1,00	0,95	0,94	0,99	0,71	<b>0,47</b>	<b>0,9</b>
4. iteracija	<b>1,81</b>	<b>0,94</b>	0,74	0,69	0,77	0,89	0,68	<b>0,45</b>	<b>0,7</b>
5. iteracija	<b>1,82</b>	<b>0,99</b>	0,71	0,65	0,75	0,90	0,67	<b>0,45</b>	<b>0,7</b>
6. iteracija	<b>1,81</b>	<b>0,92</b>	0,77	0,73	0,76	0,86	0,65	<b>0,43</b>	<b>0,7</b>
7. iteracija	<b>1,84</b>	<b>1,01</b>	0,79	0,74	0,82	0,92	0,69	<b>0,46</b>	<b>0,8</b>

Iteraciji 2 in 3 sta vključevali še absorpcijsko zaveso z različnim odmikom od obokanega stropa, 20 oziroma 40 cm od zgornje točke oboka. Presenetljivo je to le malo prispevalo k znižanju odmevnega časa.

Glavni dejavnik izboljšave prostorske akustike se kaže v prerazporeditvi zvočnih absorberjev enakomerno po celem prostoru – delno to dosežemo z zavesami čez okna, ki so tako ali tako nujne zaradi preprečevanja vdora zunanje svetlobe, drugi del pa k prostorski razporeditvi prinesejo pasovni absorberji po celem stropu v širini 1 m vzdolžno z daljšo stranjo hale. To sem preveril z iteracijo 4, pri kateri se je pokazalo občutno izboljšanje izračunanih odmevnih časov. Absorberji so umeščeni 20 cm od toge površine, v resnici pa je ta odmik od 5 do 30 cm zaradi valovitega stropa. S tem sem izbral konservativen pristop k izvajanju simulacij.

Pri 5. iteraciji sem dodal še absorpcijsko zaveso ob stransko steno, ki se nadaljuje od zavesne med zaodrjem in odrom proti vhodu (gl. oranžen element na sliki 38). Rezultati so pokazali, da ta element sam po sebi nima večjega vpliva.

S 6. iteracijo sem v resnici zmanjšal količino absorpcijskih površin, saj sem eno stran absorpcijskega panela spremenil iz tekstila v togo leseno podlago. Ta popravek kaže na izboljšave pri absorpciji zvoka, če uporabimo tudi zavesne na stranski steni. To je potrdila 7. iteracija, pri kateri sem odstranil absorpcijske zavesne s stranske stene.

Tako sem ugotovil, da toga površina na panelu nima pozitivnih učinkov na odmevni čas, če ni absorpcijskih zaves na stranski steni.

Tabela 23: Rezultati  $D_{50}$  iz simulacij prve skupine; barva posamezne celice določa ustreznost: oranžna – neustrezna vrednost, rumena – zadovoljiva vrednost, zelena – ustrezna vrednost

$f$ (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	$D_{50,povp}$
$D_{50,povp-IO}$		0,23	0,28	0,32	0,34	0,35	0,46	0,67	<b>0,38</b>
<b>Ciljni <math>D_{50}</math></b>	<b>0,7</b>								
Obstoječe stanje	0,29	0,29	0,29	0,3	0,33	0,36	0,5	0,7	<b>0,32</b>
1. iteracija	0,28	0,45	0,53	0,56	0,55	0,51	0,63	0,79	<b>0,55</b>
2. iteracija	0,27	0,59	0,58	0,61	0,60	0,54	0,65	0,80	<b>0,61</b>
3. iteracija	0,27	0,50	0,59	0,62	0,61	0,54	0,66	0,80	<b>0,61</b>
4. iteracija	0,27	0,57	0,68	0,71	0,67	0,58	0,68	0,82	<b>0,69</b>
5. iteracija	0,27	0,61	0,72	0,75	0,72	0,62	0,71	0,84	<b>0,73</b>
6. iteracija	0,27	0,61	0,73	0,76	0,72	0,61	0,71	0,83	<b>0,74</b>
7. iteracija	0,27	0,57	0,67	0,70	0,67	0,59	0,69	0,82	<b>0,68</b>

Poleg odmevnega časa sem pri prvi skupini obravnaval tudi  $D_{50}$  in  $BR$ . Rezultati  $D_{50}$  simulacij so zbrani v tabeli 23, iz katere je razvidno, da so vrednosti za iteracije 4, 5, 6 in 7 ustrezne.

Tabela 24: Rezultati  $BR$  iz simulacij prve skupine; barva posamezne celice določa ustreznost: oranžna – neustrezna vrednost, rumena – zadovoljiva vrednost, zelena – ustrezna vrednost

$f$ (Hz)	$BR_{A-L}$
$BR_{povp-IO}$	1,09
<b>Ciljna vrednost BR</b>	<b>0,81</b>
Obstoječe stanje	1,14
1. iteracija	1,10
2. iteracija	1,11
3. iteracija	1,11
4. iteracija	1,06
5. iteracija	1,10
6. iteracija	1,06
7. iteracija	1,08

Rezultati razmerja basov  $BR$  so zbrani v tabeli 24 in kažejo na neustrezno stanje, saj je osnovna ciljna vrednost 0,81 močno presežena. Previsoke vrednosti so zaradi neustreznega razmerja odmevnega časa v nizkih in visokih frekvenčnih pasovih. Razlog je predvsem predolg odmevni čas v frekvenčnem pasu 125 Hz in nekoliko prekratek odmevni čas v frekvenčnih pasovih 500 in 2000 Hz. Za izboljšanje razmerja basov bi morali prvega skrajšati in drugega podaljšati, a to z uporabo izbranega tekstilnega absorberja ni izvedljivo. Nižji odmevni čas pri 125 Hz bi dosegli šele pri bistveno večjih količinah absorpcijskih površin, pri čemer bi bil v tem primeru odmevni čas v višjih frekvencah zagotovo prenizek. Treba je poudariti, da je stanje lahko v dejanski uporabi še slabše, saj občinstvo absorbira predvsem zvok pri visokih frekvencah (gl. tabelo 2 in sliko 16). Priporočene vrednosti  $BR$  bi lahko dosegli z vnosom specifičnih absorpcijskih površin, ki bi bile usmerjene predvsem na frekvenčni pas 125 Hz.

Ob pregledu rezultatov simulacij za prvo skupino predvidenih dogodkov sem ugotovil, da je z upoštevanjem omejitev izbranih absorpcijskih materialov najustreznejša uporaba akustičnih elementov v primeru 6. oblike iteracij.

## 4.2.5 Skupina 2 - govorne prireditve

V drugi skupini sem obravnaval prireditve, osredotočene na govor, med katere sem uvrstil gledališke predstave in njim podobne dogodke ter predavanja. Med izvajanjem simulacij sem odkril, da imajo tovrstne prireditve sicer podobnosti, a zahtevajo drugačno prostorsko akustiko in razporeditev akustičnih elementov. Ustvaril sem različne iteracije, ki so pokrivalo celoten nabor. Položaj in usmerjenost gledališkega odra sta enaka kot pri koncertih sodobne glasbe (gl. sliko 4).

Tabela 25: Seznam uporabljenih akustičnih elementov in pripadajočih absorpcijskih površin pri posamezni iteraciji za gledališča v drugi skupini

Postavitve iteracij za gledališča znotraj 2. skupine						
Akustični element	Umerjen model	1. iteracija	2. iteracija	3. iteracija	4. iteracija	
Fiksen abs. panel ( $m^2$ )	Ne	Da (1 x 18,5)	Da (1 x 18,5)	Da (1 x 18,5)	Da (1 x 18,5)	
Zavese prek oken ( $m^2$ )	Ne	Da (63,81)	Da (63,81)	Da (63,81)	Da (63,81)	
Zavese zaodrja ( $m^2$ )	Ne	Da (35,35)	Da (35,35)	Da (35,35)	Da (35,35)	
Zavesa nasproti odra ( $m^2$ )	Ne	Da (17,07)	Da (17,07)	Da (17,07)	Da (17,07)	
Zavese nad odrom ( $m^2$ )	Ne	Ne	Da, odmik 40 cm (36)	Ne	Da, odmik 40 cm (36)	
Stropne vzdolžne zavese ( $m^2$ )	Ne	Ne	Ne	Da (63,08)	Da (63,08)	
Zavesa prek lateralne stene ( $m^2$ )	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	
<b>Skupna količina absorpcijskih površin (<math>m^2</math>)</b>	<b>0,00</b>	<b>134,73</b>	<b>170,73</b>	<b>197,81</b>	<b>233,81</b>	

Postavitve akustičnih elementov obravnavanih iteracij za gledališča so predstavljene v tabeli 25. Prva iteracija znotraj drugi skupine je imela enako postavitev akustičnih elementov kot prva iteracija za prvo skupino, torej absorpcijske zavese na zunanjih in notranjih oknih, zaveso med zaodrjem in odrom ter absorpcijski panel na žerjavu.

Tega sem obravnaval s togo leseno stranjo na hrbtni strani, saj sem pri simulacijah prve skupine ugotovil, da je tako mogoče bolj učinkovito doseči ustrezne akustične pogoje. Druga iteracija je imela prav tako dodano zaveso nad odrom 40 cm od vrha obokanega stropa. Dodatne pasove stropnih absorpcijskih zaves vzporedno s prostorom v širini 1 m, a brez absorpcijskega elementa nad odrom, sem obravnaval v tretji iteraciji. Pri četrti iteraciji sem združil elemente prejšnjih iteracij, torej mjerne elemente, pasovne stropne absorberje in elemente nad odrom. Tako sem prišel do rezultatov, ki zagotavljajo ustrezne akustične pogoje za izvedbo gledaliških predstav. Pri tem sem bil pozoren na frekvenčna pasova 125 in 250 Hz, pri katerih sem uspešno dosegel nižjo vrednost od ciljne vrednosti 1,00 s. V tabeli 26 so predstavljeni rezultati  $T_{30}$ , pri katerih sem se osredotočil na gledališče.

Tabela 26: Rezultati  $T_{30}$  iz simulacij za drugo skupino predvidenih dogodkov – 1. del, osredotočen na gledališče; barva posamezne celice določa ustreznost: oranžna – neustrezna vrednost, rumena – zadovoljiva vrednost, zelena – ustrezna vrednost, modra »presuh« prostor

$f$ (Hz)	<b>63</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000</b>	$T_{30,povp}$
$T_{30,povp-MPH}$		<b>1,74</b>	1,81	1,75	1,54	1,41	0,92		
$T_{30,povp-IO}$		<b>1,79</b>	1,84	1,75	1,56	1,44	0,94	0,58	
<b>Ciljni <math>T_{30}</math></b>		<b>1,00</b>	<b>1,00</b>						
Obstoječe stanje	1,79	<b>1,78</b>	<b>1,83</b>	1,75	1,55	1,41	0,94	1,57	<b>1,60</b>
1. iteracija	1,83	<b>1,19</b>	<b>1,02</b>	0,95	0,98	1,04	0,75	0,49	<b>1,00</b>
2. iteracija	1,83	<b>1,21</b>	<b>1,07</b>	1,01	0,99	1,03	0,73	0,47	<b>1,00</b>
3. iteracija	1,91	<b>1,03</b>	<b>0,88</b>	0,84	0,83	0,93	0,69	0,46	<b>0,80</b>
4. iteracija	1,82	<b>0,98</b>	<b>0,83</b>	0,79	0,80	0,89	0,67	0,45	<b>0,80</b>

Znova sem obravnaval tudi akustična parametra  $D_{50}$  in  $BR$ , saj se pri gledaliških predstavah, kabaretu ali večerih poezije pojavljajo tudi glasbene točke. Rezultati so zbrani v tabelah 27 in 28. Kot je razvidno,  $BR$  ne dosega ciljnih vrednosti, razlog je enak kot v primeru pri prvi skupini prireditvev.

Drugače je v primeru  $D_{50}$ , ki pri četrti iteraciji dosega ciljno vrednost  $D_{50} = 0,7$ . Tako sem ugotovil, da je uporaba akustičnih elementov pri 4. iteraciji najustreznejša za gledališke prireditve. Stanje je zadovoljivo tudi pri 3. iteraciji, a je končna postavitev akustičnih elementov odvisna od zahtev posameznega dogodka. Kjer je več glasbe, priporočamo postavitev 4. iteracije.

Tabela 27: Rezultati  $BR$  iz simulacij druge skupine za gledališke predstave; barva posamezne celice določa ustreznost: oranžna – neustrezna vrednost, rumena – zadovoljiva vrednost, zelena – ustrezna vrednost

$f$ (Hz)	$BR_{A-L}$
$BR_{povp-IO}$	1,09
<b>Ciljna vrednost BR</b>	<b>0,81</b>
Obstoječe stanje	1,14
1. iteracija	1,15
2. iteracija	1,14
3. iteracija	1,14
4. iteracija	1,14

Tabela 28: Rezultati  $D_{50}$  iz simulacij drugo skupine za gledališke predstave; barva posamezne celice določa ustreznost: oranžna – neustrezna vrednost, rumena – zadovoljiva vrednost, zelena – ustrezna vrednost

$f$ (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	$D_{50,povp}$
$D_{50,povp-IO}$		0,23	0,28	0,32	0,34	0,35	0,46	0,67	0,38
<b>Ciljni <math>D_{50}</math></b>	<b>0,7</b>								
Obstoječe stanje	0,29	0,29	0,29	0,3	0,33	0,36	0,5	0,7	<b>0,32</b>
1. iteracija	0,27	0,46	0,54	0,57	0,55	0,50	0,62	0,78	<b>0,56</b>
2. iteracija	0,28	0,49	0,57	0,60	0,59	0,53	0,65	0,80	<b>0,59</b>
3. iteracija	0,27	0,51	0,61	0,64	0,60	0,53	0,64	0,79	<b>0,62</b>
4. iteracija	0,28	0,56	0,67	0,69	0,66	0,58	0,68	0,82	<b>0,68</b>

V drugem delu druge skupine prireditvev so bila obravnavana predavanja, pri katerih sem predvidel dva različna položaja predavatelja: za manjša predavanja (občinstvo do 30 ljudi, slika 4) in za večja predavanja, pri katerih je predavatelj na odru. Za večja predavanja sem izvedel dve iteraciji, za manjša pa zgolj eno. Postavitve akustičnih elementov za te iteracije so predstavljene v tabeli 29.

Za večja predavanja sem najprej izvedel iteracijo, označeno z zaporedno številko 5, pri kateri sem obravnaval le obvezne akustične elemente, torej absorpcijske zavese na zunanjih oknih in absorpcijski panel, ki je bil postavljen ob rob sredinskega oboka tako, da je prepolovil halo na dva ločena prostora. Pri 6. iteraciji sem želel izboljšati stanje prejšnje iteracije tako, da sem dodal še absorpcijski element nad predavatelja. Ta je enak kot v primeru elementa nad odrom pri prvi skupini prireditvev, torej gre za dvoslojni tekstil z medsebojnim razmikom 1 cm 40 cm od zgornje točke obokanega stropa. Obravnaval sem tudi primer manjšega predavanja, pri katerem je



Tabela 29: Seznam uporabljenih akustičnih elementov in pripadajočih absorpcijskih površin pri posamezni iteraciji za predavanja v drugi skupini

Postavitve iteracij za predavanja znotraj 2. skupine				
Akustični element	Umerjen model	5. iteracija	6. iteracija	7. iteracija
Fiksen abs. panel ( $m^2$ )	Ne	Da (1 x 18,5)	Da (1 x 18,5)	Da (1 x 18,5)
Zavese prek oken ( $m^2$ )	Ne	Da (45,55)	Da (45,55)	Da (45,55)
Zavese zaodrja ( $m^2$ )	Ne	Ne	Ne	Ne
Zavesa nasproti odra ( $m^2$ )	Ne	Ne	Ne	Ne
Zavese nad odrom ( $m^2$ )	Ne	Ne	Da, odmik 40 cm (36)	Ne
Stropne vzdolžne zavese ( $m^2$ )	Ne	Ne	Ne	Ne
Zavesa prek lateralne stene ( $m^2$ )	Ne	Ne	Ne	Ne
<b>Skupna količina absorpcijskih površin (<math>m^2</math>)</b>	<b>0,00</b>	<b>64,05</b>	<b>100,05</b>	<b>64,05</b>

bila postavitev akustičnih elementov enaka 5. iteraciji, razlika je bila le v legi izvora zvoka in obravnavanih legah mikrofona. V tabeli 30 so navedeni rezultati simulacij za predavanja.

Tabela 30: Rezultati  $T_{30}$  iz simulacij za drugo skupino predvidenih dogodkov – drugi del, osredotočen na predavanja; barva posamezne celice določa ustreznost: oranžna – neustrezna vrednost, rumena – zadovoljiva vrednost, zelena – ustrezna vrednost, modra »presuh« prostor

$f$ (Hz)	<b>63</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000</b>	$T_{30,povp}$
$T_{30,povp-MPH}$		<b>1,74</b>	1,81	1,75	1,54	1,41	0,92		
$T_{30,povp-IO}$		<b>1,79</b>	1,84	1,75	1,56	1,44	0,94	0,58	
<b>Ciljni <math>T_{30}</math></b>		<b>1,00</b>	<b>1,00</b>						
Obstoječe stanje	1,79	<b>1,78</b>	<b>1,83</b>	1,75	1,55	1,41	0,94	1,57	<b>1,60</b>
5. iteracija	1,73	<b>1,19</b>	<b>1,02</b>	0,96	0,97	1,04	0,75	0,49	<b>1,00</b>
6. iteracija	1,68	<b>1,00</b>	<b>0,79</b>	0,74	0,78	0,91	0,68	0,45	<b>0,80</b>
7. iteracija	1,73	<b>1,19</b>	<b>1,03</b>	0,98	0,97	1,04	0,75	0,48	<b>1,00</b>

Iz tabele je razvidno, da postavitev akustičnih elementov pri 6. iteraciji ustvarja boljše akustične pogoje v frekvenčnih pasovih 125 in 250 Hz, kjer je tudi večji del človeškega govornega spektra. Poleg  $T_{30}$  sem pri predavanjih analiziral tudi vrednosti parametra  $STI$ , predstavljene v tabeli 31. Te sicer ne dosegajo priporočenih vrednosti nad 0,75, vendar so v območju dobrega stanja govorne razumljivosti (gl. tabelo 6 na strani 32).

Tabela 31: Rezultati  $STI$  iz simulacij za drugo skupino predvidenih dogodkov – drugi del, osredotočen na predavanja; barva posamezne celice določa ustreznost: rumena – zadovoljiva vrednost, zeleno-rumena – dobro stanje

$f$ (Hz)	$STI$	$STI_{moski}$	$STI_{zenski}$
Ciljna vrednost	zahtevano nad 0,6 – priporočeno nad 0,75		
Obstoječe stanje	0,5	0,49	0,51
5. iteracija	0,62	0,61	0,63
6. iteracija	0,67	0,66	0,67
7. iteracija	0,63	0,63	0,64

Tako sem ugotovil, da je za večja predavanja najustreznejša postavitev 6. iteracije. Pri manjših predavanjih ustreza postavitev 7. iteracije, čeprav bi postavitev, predlagana za večja predavanja, pripomogla k govorni razumljivosti tudi v tem primeru.

#### 4.2.6 Skupina 3 - akustično nezahtevni dogodki

Meritve obstoječega stanja so pokazale, da so trenutni akustični pogoji blizu ustreznih za izvedbo akustično nezahtevnih dogodkov. Kljub temu obstaja potreba po absorpciji zvoka v oktavnih pasovih 125 in 250 Hz, saj sta najpomembnejša za govorno razumljivost v prostoru. Pri prvi iteraciji sem uporabil le fiksno akustično opremo, torej absorpcijski panel. S tem sem že dosegel ustrezno stanje, saj je v frekvenčnem območju od 125 do 1000 Hz odmevni čas znotraj ciljnega območja. Izvedel sem še 2. iteracijo, pri kateri sem akustični element premaknil v drugo lego, da bi odkril odvisnost odmevnega časa od lege absorpcijskega panela. Rezultati kažejo na prav tako ustrezne akustične pogoje, ki se bodo z vnosom opreme in uporabnikov še izboljšali.

Tabela 32: Rezultati  $T_{30}$  iz simulacij za tretjo skupino predvidenih dogodkov; barva posamezne celice določa ustreznost: zelena – ustrezna vrednosti, modra »presuh« prostor

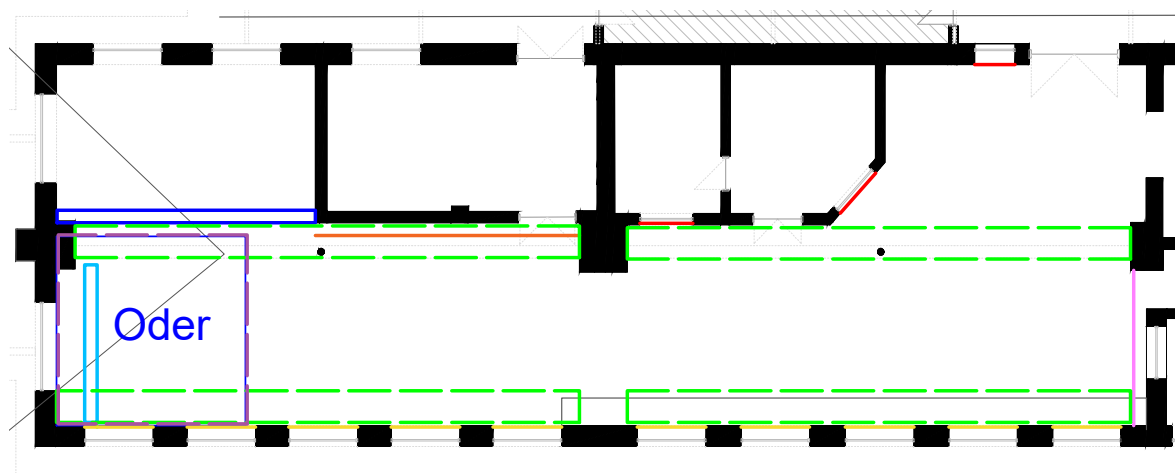
$f$ (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	$T_{30,povp}$
$T_{30,povp-MPH}$		1,74	1,81	1,75	1,54	1,41	0,92		
$T_{30,povp-MPH}$		1,79	1,84	1,75	1,56	1,44	0,94	0,58	
<b>Ciljni <math>T_{30}</math></b>	<b><math>RT_{cilj} = [1,45 \text{ s}, 1,75 \text{ s}]</math></b>								
Obstoječe stanje	1,79	1,78	1,83	1,75	1,55	1,41	0,94	1,57	1,60
1. iteracija	1,76	1,66	1,67	1,59	1,43	1,34	0,90	0,55	1,5
2. iteracija	1,72	1,63	1,64	1,56	1,41	1,31	0,89	0,55	1,5

#### 4.2.7 Načrti uporabe spremenljivih akustičnih elementov

Kot končni izdelek akustične sanacije sem predvidel načrte postavitve akustičnih elementov za posamezno predvideno prireditvev – enega za koncerte sodobne glasbe in tri za govorne prireditve. Izjema je tretja skupina, ki ne potrebuje načrta, saj so akustični pogoji ustrezni ob kakršnem koli položaju absorpcijskega panela kot edinega in fiksnega elementa.

##### 4.2.7.1 Skupina 1 - koncerti sodobne glasbe

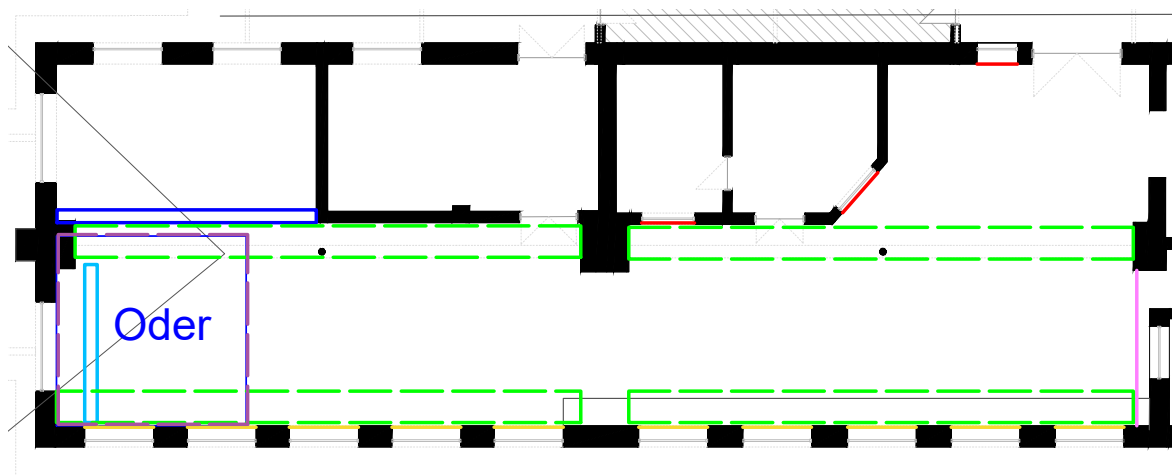
Pri prvi skupini sem načrt akustičnih elementov ustvaril na osnovi 6. iteracije.



Slika 39: Načrt postavitve akustičnih elementov za koncerte sodobne glasbe – barve so v skladu z opredelitvijo na sliki 38, prekinjena črta predstavlja stropne elemente, polna črta pa vertikalne elemente

#### 4.2.7.2 Skupina 2 - gledališče

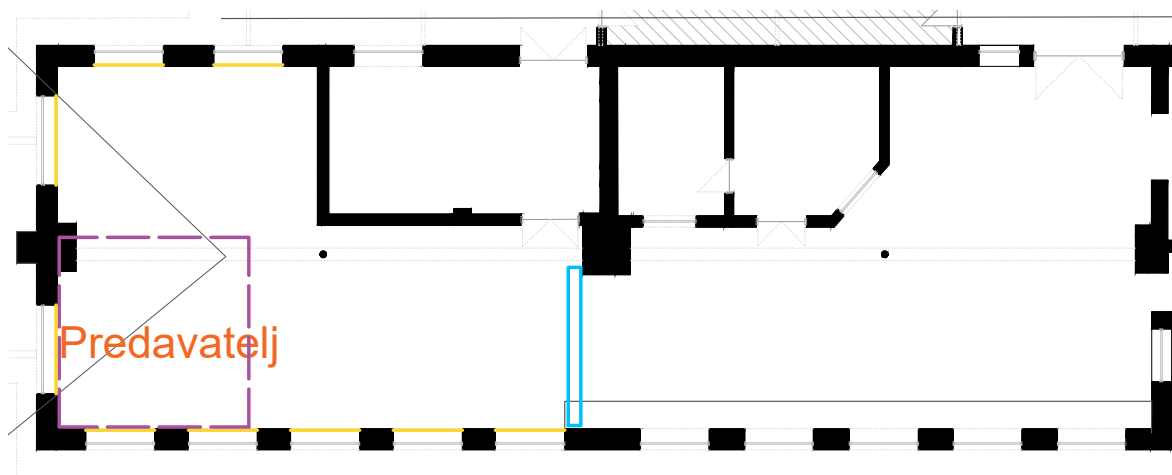
Za gledališke predstave sem predvidel uporabo akustičnih elementov 4. iteracije druge skupine.



Slika 40: Načrt postavitve akustičnih elementov za gledališče – barve so v skladu z opredelitvijo na sliki 38, prekinjena črta predstavlja stropne elemente, polna črta pa vertikalne elemente

#### 4.2.7.3 Skupina 2 - večje predavanje

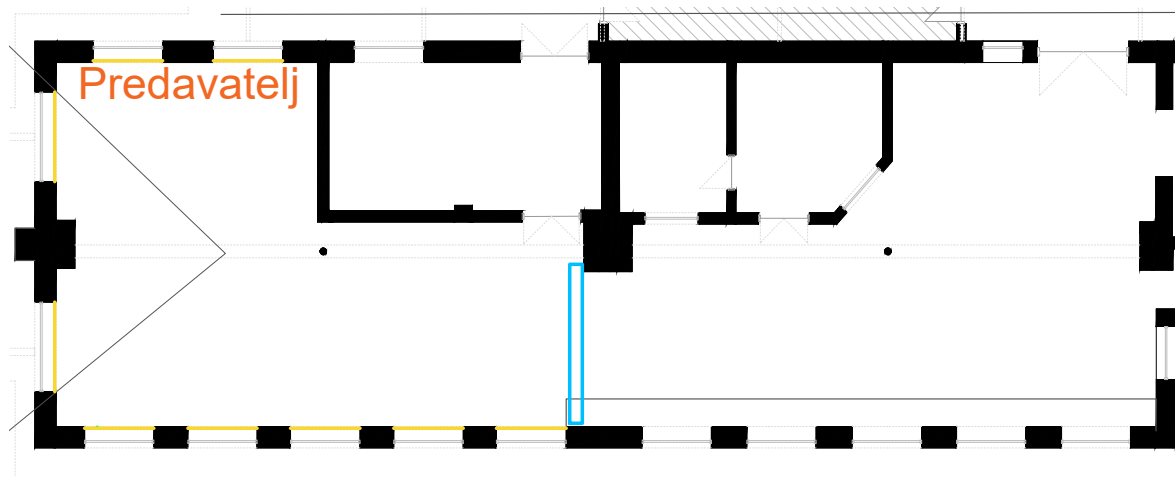
Večjim predavanjem sem namenil načrt postavitve akustičnih elementov v skladu s 6. iteracijo druge skupine.



Slika 41: Načrt postavitve akustičnih elementov za večja predavanja – barve so v skladu z opredelitvijo na sliki 38, prekinjena črta predstavlja stropne elemente, polna črta pa vertikalne elemente

#### 4.2.7.4 Skupina 2 - manjše predavanja

Kot pojasnjeno v razdelku 4.2.5, je za manjša predavanja predvidena postavitev akustičnih elementov, obravnavana v 7. iteraciji druge skupine. Kljub temu je dodaten vnos absorpcijskih površin koristen, kot primer izpostavljam postavitev za večja predavanja.

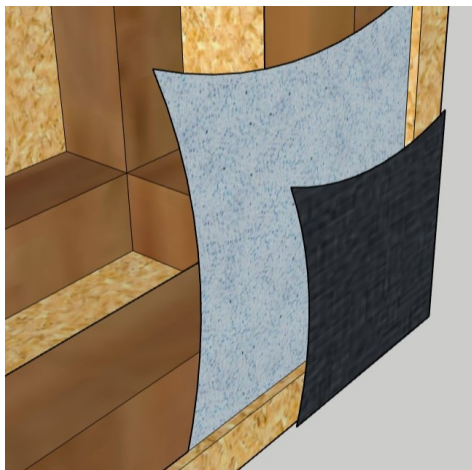


Slika 42: Načrt postavitve akustičnih elementov za manjša predavanja – barve so v skladu z opredelitvijo na sliki 38, prekinjena črta predstavlja stropne elemente, polna črta pa vertikalne elemente

#### 4.2.7.5 Modularni absorpcijski panel

Glavna sistemska rešitev je bilo izkoriščanje notranjega žerjava, na katerega sem namestil modularni absorpcijski panel. Ta predstavlja vnos večje količine absorpcijskih površin, ki se lahko premikajo po prostoru. Poleg tega je modularni panel sestavljen iz tekstila v temni barvi na eni strani in toge lesene površine v svetli barvi na drugi strani. To omogoča, da se panel uporablja tudi kot projekcijska površina za predavanja ali celo za vizualne učinke med koncerti in gledališkimi predstavami. Ker je panel mogoče vrteti, ga lahko prestavimo tudi na en sam nosilec in ga tako usmerimo pravokotno na izvor, npr. pri malih predavanjih (gl. sliko 4). Modularni panel lahko premaknemo do sredinskega oboka, kjer si lahko dodatno pomagamo z zavesami in tako še bolj zapremo prostor ter zmanjšamo volumen.

Pri načrtovanju panela sem upošteval 10 principov načrtovanja za razgradnjo, predvsem načelo, da so spoji različnih materialov dostopni, kar omogoča hitrejšo popravilo ali zamenjavo sestavnih delov [6]. Spoji so mehanski brez uporabe lepila, saj se leseni elementi za okvir med seboj vijačijo, na njih se s kovinskimi spojkami spenja najprej prva in nato druga plast tekstila, vmes je leseni element debeline 1 cm.



Slika 43: Detajl spoja lesenih elementov in tekstila v vogalu absorpcijskega panela



Slika 44: Objemka za pritrditev lesenega okvirja na kovinski I-nosilec

Kovinske spojke omogočajo tudi natančno napenjanje tekstila. Tekstilne površine so sestavljene iz različnih elementov, ki so med seboj šivani. Sestave absorpcijskega panela je predstavljena na sliki 43: temno rjavi elementi imajo presek 10/10 cm, svetlo rjave OSB plošče so debele 3 cm, element med plastema tekstila je debel 1 cm.

Poleg sestave absorpcijskega panela sem določil tudi njegovo montažo na obstoječo konstrukcijo kovinskih I-nosilcev, ki trenutno nosijo notranji žerjav. Pri tem je bila v ospredju zahteva po enostavnem spreminjanju položaja panela. To sem rešil z uporabo nastavljivih objemk (gl. sliko 44), ki se hitro odvijajo in omogočajo vrtenje panela.

#### 4.2.7.6 Zaves

Vgradnja tekstilnih stropnih absorberjev je bila načrtovana v obliki koluta, ki se razvija po vnaprej določeni trasi s pomočjo jeklenih vrvi na robovih zaves. Koluti so naviti na palico premera 5 cm in bi z zunanjim premerom 62 cm lahko dosegli dolžino absorberja približno 6 m, pri čemer sem za debelino materiala določil 0,5 cm. V času neuporabe bi bili horizontalni elementi naviti ob robovih sten pod stropom, ko pa bi bilo treba prostor povsem izprazniti, bi jih lahko sneli skupaj z navijalno palico, ki bi bila nameščena na zatiče.

Vertikalne elemente bi lahko namestili na dvotirne karnise, kot je to običajno za zaves.

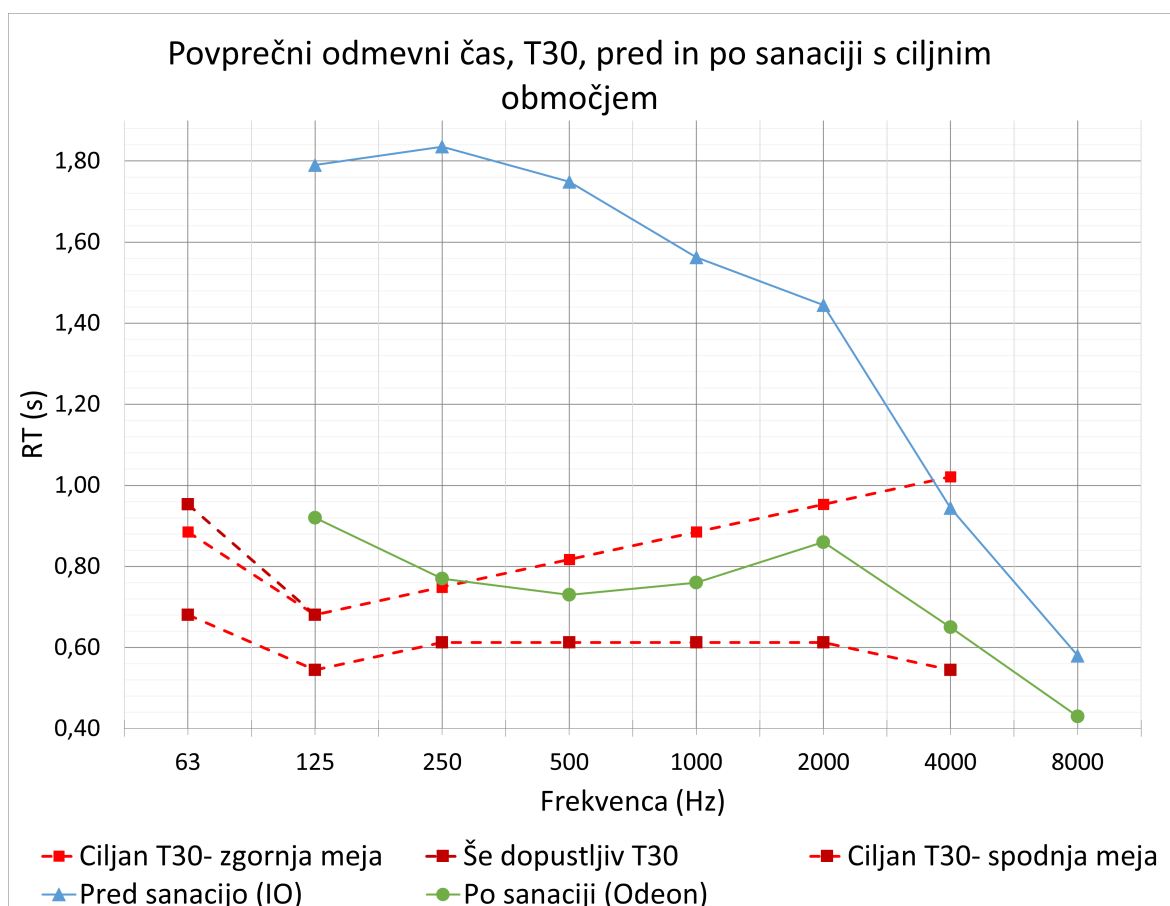
## 5 DISKUSIJA

Rešitve za posamezne skupine prirediteljev se med seboj pričakovano razlikujejo, zato tudi količina potrebnih absorpcijskih površin. Največkrat so uporabljene iste lege za določen tip absorberjev, s čimer smo poenostavili prilagajanje postavitve akustičnih elementov in posledično pospešili postopek spreminjanja ureditve prostora. Zaradi sovpadanja določenih površin in uporabe nekaterih akustičnih elementov za le eno vrsto prireditve, se v nadaljevanju navedene vsote absorpcijskih površin ne sme seštevati za vse rabe prostora. Po temeljitem pregledu uporabljenih akustičnih elementov sem dobil eno-številsko vrednost vsote površin uporabljenega tekstila. Ta znaša  $565,96 m^2$ , oziroma  $282,98 m^2$  absorpcijskih površin, ker so elementi dvoslojni. Delež absorpcijskih površin je približno 24,1 % vseh površin v hali. V praksi se pogosto pojavlja groba ocena potrebnih absorpcijskih površin, ki naj bi znašala tretjino površin celotnega prostora. Sklepam, da sem s svojo predlagano rešitvijo prostorske akustike ustvaril boljše stanje od pričakovanega, posebno glede učinkovitosti porabe materiala in ohranjanja osnovnega industrijskega videza prostora. Razlog za nedoseganje ocene je v razmerju obodnih površin in volumna obravnavanega prostora, saj je hala izrazito podolgovata. Dolžina hale je namreč trikratnik širine, oziroma, če gledamo večinski ožji del, je razmerje 1 : 5. V primerjavi s klasičnimi oblikami koncertnih dvoran, v katerih bi imeli za enak volumen manj obodnih površin, je naše razmerje absorpcijskih in obodnih površin razumljivo manjše.

### 5.1 KONCERTI SODOBNE GLASBE

S postavitvijo akustičnih elementov 6. iteracije v prvi skupini, predstavljene v razdelku 4.2.7.1, sem dosegel zadovoljivo stanje prostorske akustike za izvedbo koncertov sodobne glasbe. Rezultati simulacij v tabeli 22 še vedno kažejo, da odmevni čas v oktavnem pasu 125 Hz ne ustreza zahtevam. A vendarle se je treba zavedati omejitev prostora in zahtevnosti te vrste dogodkov. Kot je prikazano na sliki 45, je stanje po sanaciji z izjemo omenjenega oktavnega pasu znotraj ciljnega območja. Dosegel sem, da se je v oktavnem pasu 125 Hz odmevni čas prepopolovil, s čimer sem akustične pogoje hale KČB močno izboljšal.

Pri pregledu rezultatov sem ugotovil tudi, da je razmerje basov sicer neustrezno, a bi to lahko posledično reševali z zvočnimi učinki, ki jih dodaja tonski mojster. V navadi je, da z uporabo PA-sistema tonski mojster dodaja odmevnost in uravnava



Slika 45: Primerjava vrednosti odmevnega časa pred in po sanaciji ter označeno ciljno območje

barvo ter toplino zvoka. To je nujno tudi zaradi različne gostote občinstva, ki dodatno vpliva na večjo absorpcijo v višje-frekvenčnem območju (gl. razdelek 2.2.3.2). Na  $BR$  vpliva predvsem predolg odmevni čas v oktavnem pasu 125 Hz, a bi razmerje basov lahko uravnali z dodajanjem odmevnosti v oktavnih pasovih nad 500 Hz. Vsekakor dodatna količina izbranega materiala ne bi rešila problematike predolgega odmevnega časa v oktavnem pasu 125 Hz, saj bi z znižanjem  $T_{30,125 Hz}$  znižali tudi odmevni čas v visoko-frekvenčnem območju, kar bi lahko povzročilo dodatne zaplete. Poleg tega bi dodatna količina predvidenega absorpcijskega materiala bodisi zmanjšala uporabno površino tlorisa in posledično števila obiskovalcev bodisi bi povsem prekrila strop in s tem izničila prizadevanja, da poudarimo arhitekturne posebnosti hale. Za reševanje previsokega odmevnega časa v oktavnem pasu 125 Hz bi bilo treba uporabiti drugačne akustične elemente, ki bi bili načrtovani za absorpcijo zvoka pri 125 Hz.

Na drugi strani so vrednosti parametra  $D_{50}$  ustrezne tudi brez dodatnih posegov tonskega mojstra.



Koncerti sodobne glasbe so bili najzahtevnejši od obravnavanih vrst prireditev, zato je pri njih uporabljenih največ absorpcijskih površin. Skupno gre za 267,33  $m^2$  absorpcijskih površin oziroma 534,66  $m^2$  uporabljenega tekstila. K vsoti absorpcijskih površin največ prispevajo okna, ki imajo v tem primeru skupno površino 63,81  $m^2$ . Vrednosti so predstavljene v tabeli 33. Zanimivo je tudi, da najustreznejši akustični pogoji niso bili doseženi pri največji skupni količini absorpcijskih površin. S ponovljivostjo rezultatov sem večkrat preveril in zagotovil, da je postavitve absorpcijskih elementov enaka navedbi v opisu in da ni morebitnih napak pri simulacijah.

Tabela 33: Vnesene absorpcijske površine za izvedbo predvidene postavitve akustičnih elementov prireditev iz skupine 1

<b>1. skupina - koncerti sodobne glasbe</b>		
Lega	Površina ( $m^2$ )	Vsota ( $m^2$ )
Okna	6,15	63,81
	10 x 4,75	
	3,71	
	3,66	
	2,79	
Stropni nad odrom	36	36
Zaodrje	35,35	35,35
Lateralna stena	33,52	33,52
Stropni pasovi (spredaj)	16	31,7
	7,7	
	4,8	
	3,2	
Stropni pasovi (zadaj)	15,88	31,38
	7,8	
	7,7	
Absorpcijski panel	18,5	18,5
Nasproti odra	17,07	17,07
<b>Skupno:</b>		<b>267,33</b>

S predlagano sanacijo bi dosegli zadovoljivo stanje. Pri tem bi rad poudaril, da je bil odmik od toge podlage v splošnem ocenjen konservativno, zato lahko v praksi pričakujemo boljše rezultate. Predpostavljaj sem tudi, da bo moral tonski mojster dodajati zvočne učinke, saj ima obravnavana sodobna glasba več podzvrsti, vsako s svojimi specifičnimi zahtevami.

## 5.2 GLEDALIŠČE

Rezultati simulacij prostorske akustike za gledališke predstave in podobne prireditve prikazujejo akustične pogoje, ki zagotavljajo kakovostno izvedbo. S 4. iteracijo (gl. tabele 26, 28 in 27) smo dosegli stanje, ki ustreza zastavljenim zahtevam po odmevnem času in definiciji. Za gledališke predstave so bile bolj kot celoten spekter ključne vrednosti  $T_{30}$  v oktavnih pasovih 125 in 250 Hz. Ciljna vrednost  $T_{30,cilj} = 1,00$  s je bila v oktavnih pasovih 125 in 250 Hz dosežena. Blizu ciljne vrednosti 0,7 je bila tudi vrednost  $D_{50}$ . Edina izjema je bilo razmerje basov, ki je pomembno le pri izvajanju glasbenih nastopov v gledališču. O izboljšanju stanja  $BR$  je bilo več zapisanega v razdelku 5.1.

Tabela 34: Vnesene absorpcijske površine za izvedbo predvidene postavitve akustičnih elementov prireditev iz skupine 2 – gledališče

2. skupina - gledališče		
Lega	Površina ( $m^2$ )	Vsota ( $m^2$ )
Okna	6,15	63,81
	10 x 4,75	
	3,71	
	3,66	
	2,79	
Stropni nad odrom	36	36
Zaodrje	35,35	35,35
Stropni pasovi (spredaj)	16	31,7
	7,7	
	4,8	
	3,2	
Stropni pasovi (zadaj)	15,88	31,38
	7,8	
	7,7	
Absorpcijski panel	18,5	18,5
Nasproti odra	17,07	17,07
<b>Skupno:</b>		<b>233,81</b>

Predvidena postavitve akustičnih elementov za gledališče je zelo podobna postavitvi za koncerte sodobne glasbe. Izjema so absorberji na lateralni steni. Tako je skupna vsota absorpcijskih površin za gledališče 233,81  $m^2$ . Kot zapisano v razdelku 4.2.5, lahko odvezamo stropni absorber nad odrom, pri čemer v prostor vnesemo 36  $m^2$  manj absorpcijskih površin. Uporabljene absorpcijske površine so predstavljene v tabeli 34.

## 5.3 PREDAVANJA

Pri pregledu rezultatov simulacij predlaganih rešitev za dogodke v obliki predavanj (gl. tabeli 30 in 31) sem ugotovil, da predlagana rešitev 6. iteracije ustreza zahtevam, ki so bile zastavljene za predavanja v razdelku 2.2.3.5, saj je odmevni čas krajši od ciljnega:  $T_{30,cilj} = 1,00 s$ . Enako kot pri gledaliških predstavah je tudi tu prevladoval govor, zato sem se osredotočil na vrednosti v oktavnem pasu 125 in 250 Hz, pri katerih sem dosegel  $T_{30,125 Hz} = 1,00 s$  oziroma  $T_{30,250 Hz} = 0,79 s$ . Tudi vrednost STI je nad priporočeno vrednostjo  $0,6 - STI_{povp} = 0,67$ . Postavitev akustičnih elementov je poleg načrta na sliki 4.2.7.3 prikazana tudi na sliki 46.

Tabela 35: Vnesene absorpcijske površine za izvedbo predvidene postavitve akustičnih elementov prireditve iz skupine 2 – večja predavanja

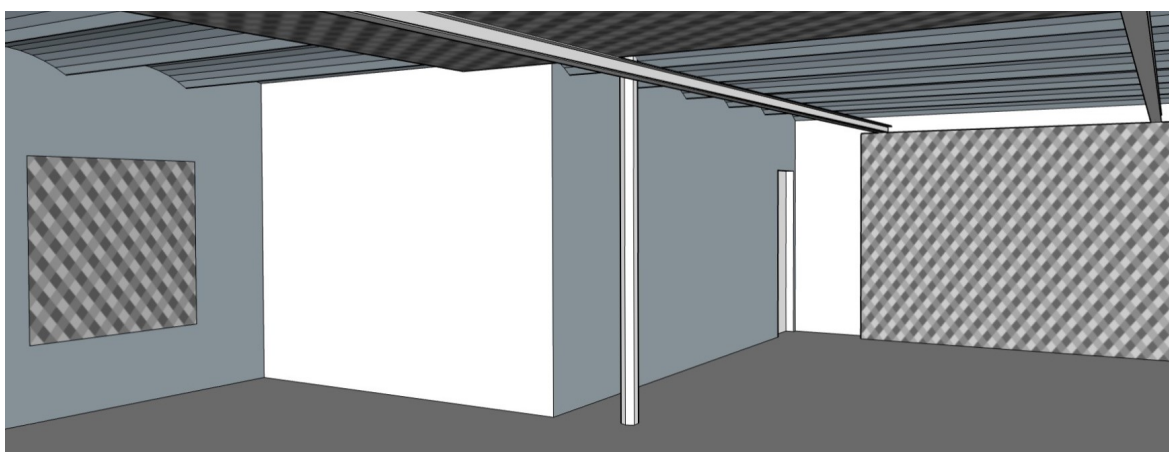
2. skupina - večje predavanja		
Legra	Površina ( $m^2$ )	Vsota ( $m^2$ )
Okna	2 x 6,15	45,55
	7 x 4,75	
Stropni nad odrom	36	36
Absorpcijski panel	18,5	18,5
<b>Skupno:</b>		<b>100,05</b>

Za predavanja je predvidena uporaba le leve polovice prostora, pri čemer bi celotno halo razpolovili z umestitvijo absorpcijskega panela tik ob sredinski obok. Za dodatno razmejitev prostora bi lahko uporabili še zavese na drugi strani oboka, od tal do stropa, vendar teh za zdaj nisem predvidel. V primeru dejanske izvedbe sanacije bi ta dodatni ukrep izvedli, če bi bilo večje odstopanje od rezultatov simulacij. Z izbrano rešitvijo smo v prostor vnesli absorpcijske površine le prek zunanjih oken na tej polovici, absorpcijskega panela in – v primeru večjih predavanj – s stropnim absorberjem nad odrom oziroma v obravnavanem primeru nad predavateljem. Skupna količina absorpcijskih površin za večja predavanja znaša  $100,05 m^2$ , kar prikazuje tabela 35.

Tudi manjša predavanja bi enako kot večja izvedli le v polovici hale, pri čemer nisem predvidel uporabe stropnih absorberjev. S tem se je skupna vsota absorpcijskih površin zmanjšala na  $64,05 m^2$ , čeprav bi bila dodatna absorpcija zvoka v resnici dobrodošla pri splošni govorni razumljivosti. Predvidevam, da bi se pri dejanski uporabi prostora ugotovilo, koliko absorpcijskih elementov je treba še dodati. Končne vrednosti predvidenih absorpcijskih površin so predstavljene v tabeli 36.

Tabela 36: Vnesene absorpcijske površine za izvedbo predvidene postavitve akustičnih elementov prirediteljev iz skupine 2 – manjša predavanja

<b>2. skupina - manjše predavanje</b>		
Lega	Površina ( $m^2$ )	Vsota ( $m^2$ )
Okna	2 x 6,15	45,55
	7 x 4,75	
Absorpcijski panel	18,5	18,5
Skupno:		64,05



Slika 46: Pogled s položaja predavatelja v primeru večjih predavanj z akustičnimi elementi v karirastem vzorcu.

### 5.3.1 Mnenje uporabnikov

Ker je bila industrijska hala znotraj KČB tudi v zdajšnjem stanju že večkrat uporabljena za predavanja, sem lahko pri snovanju rešitev upošteval izkušnje uporabnikov prostora. Največkrat so bila izvedena manjša predavanja, pri čemer je treba poudariti, da prostor ni bil zagrajen pri srednjem oboku niti ni bil zatemnjen z uporabo zaves. Intervjuvanci so bili bodisi predavatelji bodisi poslušalci in so bili s trenutnim stanjem akustike zadovoljni. Pritožili so se le nad hrupom ozadja, saj je ta zaradi manjkajočih in razbitih oken trenutno višji od zaželenega. Ocenjujem, da bi predlagana rešitev za manjša predavanja že ustrezno izboljšala prostorsko akustiko.

## 5.4 AKUSTIČNO NEZAHTEVNI DOGODKI

Kmalu po terenskih meritvah smo ugotovili, da za akustično nezahtevne dogodke ne bo treba opraviti posebnih analiz. Izmerjeni odmevni čas obstoječega stanja je bil zelo blizu ciljnim vrednostim (gl. tabelo 32). Z uporabo absorpcijskega panela, ki je

edini »fiksni« akustični element, saj zanj ni predviden umik iz prostora, so akustični pogoji dokončno postali ustrezni. Odmevni čas je tako v širšem frekvenčnem območju znotraj priporočenih vrednosti, pri čemer sem se zaradi govorne razumljivosti znova osredotočil na oktavni pas 125 Hz. Poudariti moram, da se bo stanje v dejanski uporabi le še izboljšalo, saj se bo z vnosom opreme in ljudi odmevni čas še skrajšal.

## 5.5 PRIMERJAVA Z DRUGIMI KONCERTNIMI DVORANAMI SODOBNE GLASBE

Naredil sem tudi primerjavo vrednosti  $T_{30,63-125 \text{ Hz}}$ ,  $T_{30,250-2k \text{ Hz}}$ ,  $D_{50}$  in  $BR$ , ki jih je pridobil Adelman-Larsen [1] za primerljivo velike dvorane, v katerih prirejajo koncerte sodobne glasbe. S tem sem se želel prepričati, če je predlagana rešitev (gl. načrt na sliki 39 v razdelku 4.2.7.1) primerljiva z drugimi obstoječimi dvoranami. Vrednosti so predstavljene v tabeli 37. Pri primerjavi sem upošteval štiri dvorane, ki imajo za do 20 % večji ali manjši volumen od KČB. V študiji Adelman-Larsna je obravnavanih 20 različnih dvoran za koncerte sodobne glasbe, pri čemer so izmerjeni tako objektivni parametri prostorske akustike z meritvami impulznega odziva kot tudi subjektivni parametri z anketiranjem uporabnikov prostora, med katere so bili vključeni akustični strokovnjaki in glasbeniki. To je omogočilo razvrstitev obravnavanih hal od najboljše (1) do najslabše (20) in pripis subjektivne ocene [1].

Primerjal sem odmevni čas, ki ga je Adelman-Larsen [1] ločil na basovski odmevni čas, pri katerem je bil opazovan povprečni odmevni čas v oktavnih pasovih 63 in 125 Hz, in srednjefrekvenčni odmevni čas kot povprečje odmevnega časa med oktavnima pasovoma 250 in 2000 Hz. Poleg tega sem primerjal še razmerje basov  $BR$  in definicijo  $D_{50}$ . Pri tem je pomembno opomniti, da so bile simulacije v moji študiji omejene na frekvenčni razponu od 125 do 4000 Hz, zato je vrednost  $T_{30,63-125 \text{ Hz}}$  za KČB označena

Tabela 37: Primerjava rezultatov predvidenega stanja po sanaciji v KČB z drugimi primerljivo velikimi dvoranami za koncerte sodobne glasbe, povzeto po Adelman-Larsen [1]

Dvorana	Velikost (m <sup>3</sup> )	$T_{30,63-125 \text{ Hz}}$ (s)	$T_{30,250-2k \text{ Hz}}$ (s)	$D_{50}$	BR	Subjektivna ocena
Loppen	890	0,9	0,8	0,7	1,2	9
Skraen	1100	1,5	0,8	0,4	1,8	13
Paletten	1420	1	0,9	0,7	1	8
Stars	1440	0,6	0,6	0,8	0,9	4
KČB	1250	0,92*	0,78	0,74	1,06	x

z zvezdico, saj sem zanemaril vrednost za oktavni pas 63 Hz, ki sem jo pridobil med simulacijami, in privzel le vrednost za oktavni pas 125 Hz.

Rezultati kljub temu prikazujejo ustrezen odmevni čas, ki je primerljiv s tistim v dvoranih Paletten in Loppen, ki sta ocenjeni kot 8. oziroma 9. najboljša dvorana. V primerjavi z najboljšo dvorano na seznamu, Stars, predvideno stanje v KČB ne bo doseglo enako kakovostnih akustičnih pogojev. Odstopanje je predvsem pri  $T_{30,63-125 Hz}$ . Na drugi strani je pridobljena vrednost  $BR$  primerljiva z izbranimi dvoranami. Če bi na podlagi primerjanih parametrov med 20 obravnavanih dvoran umestil KČB, bi bila verjetno blizu Paletten, a boljša od dvorane Loppen, približno na 9. mestu. S tem lahko dodatno potrdim, da je predlagana rešitev akustične sanacije ustrezna za vse predvidene vrste prirediteljev.

## 6 ZAKLJUČEK

V začetku naloge sem si zadal dokaj splošno vprašanje (če ima industrijska dediščina potencial, da postane kakovostno večnamensko prizorišče), ki sem ga pozneje zožil in dodatno določil s podvprašanji. Odgovor sem iskal v raziskovanju Kreativne četrti Barutana, pri kateri sem obravnaval tri različne skupine dogodkov. Pri pregledu rezultatov tako meritev na lokaciji kot simulacij sem bil vedno znova presenečen in navdušen, saj sem pričakoval slabše akustične pogoje. Med obravnavanjem akustične sanacije in snovanjem rešitev sem imel ves čas v mislih omejitve prostora. Kot številne stavbe industrijske dediščine je tudi Barutana grajena iz zelo trdnih materialov, togih povezav z malo ali celo nič zvočno absorpcijskih površin. Pričakoval sem, da bo obokan in valovit kovinski strop povzročal težave, saj bo prišlo do nehomogenih akustičnih pogojev, ki bodo močno kvarili akustične pogoje in posledično izkušnjo uporabnika. Zato sem si zadal realno dosegljive cilje akustične ureditve. A so rezultati simulacij presegle pričakovanja in pokazali, da ima KČB možnost postati kakovostno prizorišče različnih javnih dogodkov.

Razkorak med izmerjenimi vrednostmi akustičnih parametrov obstoječega stanja in ciljnim vrednostmi je bil sprva videti nepremostljiv, če bi želel uporabiti reciklirane materiale, ki sem jih predvidel. V nasprotju z domnevami so bili rezultati meritev akustičnih lastnosti odpadnega tekstila optimistični. Dvomi, predvsem o izvedljivosti, so se razblinili in vnos predvidene količine absorpcijskih površin je postal izvedljiv. Izkazalo se je, da ima izbrani tekstil velik potencial, toliko večji, če v obravnavo vključimo velike količine zavrženega tekstila, ki je na razpolago. Na drugi strani pa nam odpadni tekstil odpira nova vprašanja, med drugim, kako je s požarno varnostjo, časovno obstojnostjo, možnostjo čiščenja, nevarnostjo naselitve pršic in navsezadnje tudi z estetiko. Če bi bilo ta material, ki ga imamo na odlagališčih odpadkov na pretek, tako enostavno predelati in znova uporabiti, bi morali zagotoviti, da v primeru nezgod ne bi povzročili še večje škode.

Prva obravnavana skupina dogodkov so bili koncerti sodobne glasbe, ki so jih do zdaj večinoma prirejali v bližnjih, a premajhnih in arhitekturno neprimernih prostorih partnerske organizacije Zavoda Mladinski center Kotlovnica. Ciljne vrednosti, osnovane na študiji Adelman-Larsna [1], so bile večinoma dosežene. Definicija  $D_{50}$  je bila z različnimi iteracijami dosežena, enako tudi odmevni čas  $T_{30}$ . Pri tem je bilo odstopanje opaziti le pri oktavnem pasu 125 Hz, vendar se je pri primerjavi z drugimi koncertnimi dvoranami izkazalo, da gre za pogost pojav. Doseganje absorpcije zvoka

pri nižjih frekvencah je v primerjavi z visokimi frekvencami namreč zahtevno. Čeprav so imeli obravnavani absorpcijski materiali večinoma odlične akustične lastnosti, bi za krajšanje odmevnega časa v oktavnem pasu 125 Hz morali vpeljati drug absorpcijski material oziroma drug tip absorberja. Če bi želel stanje izboljšati le z uporabo recikliranega tekstila, bi to lahko povzročilo krajšanje že tako kratkega odmevnega časa v višjih frekvencah. Prav kratak odmevni čas v višjih frekvencah je skupaj z dolgim odmevnim časom v nižjih frekvencah pripeljal do previsokih vrednosti razmerja basov  $BR$ . Za izboljšanje tega sem pri zasnovani postavitvi akustičnih elementov za koncerte sodobne glasbe videl možnosti rešitve z uporabo zvočnih učinkov, ki jih omogoča uporaba PA-sistema.

V drugi skupini dogodkov sem obravnaval prireditve, pri katerih je v ospredju govor, ki sem jih pozneje ločil na dve podskupini: gledališke predstave in njim podobne prireditve ter predavanja. Pri obeh podskupinah sem se osredotočil na vrednosti odmevnega časa v oktavnem pasu 125 in 250 Hz. S predlagano postavitvijo akustičnih elementov za gledališča (gl. načrt na sliki 40) sem dosegel ustrezne vrednosti odmevnega časa in  $D_{50}$ . Težava glede  $BR$  ostaja, a je v primerjavi s prvo skupino manj kritična, saj vpliva le na morebitne glasbene točke. Pri predavanjih sem želel halo prepoloviti s premikom akustičnega panela vse do sredinskega oboka in sem poleg odmevnega časa obravnaval še parameter  $STI$ . Pri obeh parametrih sem dosegel ciljne vrednosti.

Pogojem akustično nezahtevnih dogodkov, ki so bili obravnavani kot tretja skupina prireditev, je bolj ali manj zadoščeno že v obstoječem stanju. Načrtovan absorpcijski panel, ki ga ne bomo umikali iz prostora, je izboljšal stanje in zagotovil doseganje ciljnih vrednosti akustičnih parametrov. Poleg tega se bo stanje med uporabo kvečjemu izboljšalo, saj vsak uporabnik absorbira zvok in posledično krajša odmevni čas. Treba je dodati, da je bilo med akustično nezahtevnimi dogodki predvideno tudi izvajanje različnih vrst delavnic in seminarjev. Pred njihovo izvedbo moramo kljub temu premisliti, ali načrtujemo dogodek, ki bo vseeno odvisen od akustičnih pogojev. Zato tudi pri tretji skupini dogodkov priporočamo sprotno prilagajanje prizorišča, kar predvideni način vgradnje akustičnih elementov omogoča.

Čeprav smo dosegli ustrezno stanje, se je sčasoma pokazalo nekaj dodatnih izzivov. Že pri meritvah obstoječe prostorske akustike je bilo jasno, da je treba vse elemente čvrsto pritrditi, saj lahko v nasprotnem primeru povzročijo akustične anomalije. In teh elementov v prostoru ni malo. Izziv je predstavljala tudi oblika prostora, saj je prostor s srednjim obokom razdeljen na pol, vsaka polovica pa se z oddaljenostjo od sredine razširi. Postavlja se vprašanje, kako bodo poslušalci in gledalci na polovici, bolj oddaljeni od odra, doživljali koncert ali predstavo. Tu vidim tudi potencial za nadaljnje delo – najprej – pri iskanju ustrežnejše geometrije hale v sodelovanju z arhitekti, pa tudi pri raziskovanju vpliva sredinske zožitve prostora na obiskovalčevo izkušnjo.



V svoje načrte sem želel vključiti trajnostne pristope inženirstva, kot je t.i. načrtovanje za razgradnjo. Ta je najbolj očiten pri načrtovanju spremenljivih akustičnih elementov in njihovi enostavni sestavi. Izkazalo se je tudi, da je tekstil zelo primeren material za načrtovanje z razgradnjo, saj omogoča različne oblike pritrjevanja in obdelovanja. Zaradi omejenega obsega magistrskega dela sem moral poenostaviti načrtovalski del izvedbe akustičnih elementov. Čeprav sem s tem zanemaril ta motiv in se osredotočil na simulacije, sem z možnostmi uporabe tega načrtovalskega pristopa zadovoljen. Ugotovil sem, da če se dovolj poglobimo v študijo danosti obravnavanega prostora, se lahko kreativno izkoristi potencial prostora in poudari njegove posebnosti. Uporaba notranjega žerjava in omejevanje števila uporabljenih materialov pri tvorbi kompozitov, kot je absorpcijski panel, ocenjujem kot uspešen korak k načrtovanju za prihodnost.

Za potrebe te naloge sem uporabil tudi 3D lasersko skeniranje. To se je kot pomožno orodje za izvajanje akustičnih meritev izkazalo kot zelo ustrezno in uporabno, saj je pospešilo postopek izmere velikosti prostora in leg mikrofonov ter izvora zvoka. Prav tako je prispevalo k natančnosti postopka umerjanja simulacijskega modela. Ob lažji pretvorbi v druga programska orodja bi 3D skeniranje lahko odprlo nove možnosti raziskovanja 3D zvočnega polja. Omeniti je treba tudi možnost nadaljnjih raziskav v smeri samodejnega prepoznavanja lege mikrofona na podlagi prej določenih vzorcev ali barv. Postopek bi lahko z uporabo akustične kamere ali drugih mrež mikrofonov pripeljal tudi do raziskovanja 3D zvočnega polja in razvoja novih akustičnih parametrov.

Končne številske rezultate in izdelane načrte postavitve akustičnih elementov ocenjujem kot uspešne. Doseženi odmevni časi za posamezne skupine prireditev ustrezajo zastavljenim zahtevam, zadovoljivi so tudi ostali akustični parametri. Izjema je razmerje basov, ki ga opredeljujem kot manj kritičnega. Kljub temu bi bilo v nadaljnjem delu smiselno raziskati možnosti umeščanja tudi drugačnih tipov zvočno absorpcijskih elementov v prostor, ki bi ciljali na absorpcijo basovskih frekvenc. V splošnem ocenjujem, da sem uspešno zasnoval akustično sanacijo za vse tri predvidene skupine prireditev. Ker imajo načrtovani akustični elementi v posameznih skupinah iste lege, sem izpolnil zahtevo po prilagodljivi namembnosti prostora. Akustična sanacija je izvedljiva in trajnostna, s čimer sem zadostil tudi svojim osnovnim zahtevam. Sklenem lahko s trditvijo, da ima Barutana kot prireditveni prostor s prilagodljivo akustiko velik potencial za prirejanje različnih vrst dogodkov.

## 7 LITERATURA IN VIRI

- [1] N. W. Adelman-Larsen. *Rock and Pop Venues*. Springer, Berlin Heidelberg, 2014. (Citirano na straneh VI, VIII, IX, X, 14, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 54, 56, 58, 85 in 87.)
- [2] N. W. Adelman-Larsen, E. R. Thompson, and A. C. Gade. Suitable reverberation times for halls for rock and pop music. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127, 1, (2010), str. 247-255. (Citirano na straneh 21, 23, 24, 25, 26, 27, 39, 41 in 54.)
- [3] L. Beranek. *Concert Halls and Opera Houses*. Springer, New York, 2004. (Citirano na straneh 23, 24, 25 in 31.)
- [4] L. Beranek. Concert hall acoustics. *Journal of Audio Engineering Society*, 56, 7/8, (2008), str. 532-544. (Citirano na straneh 23, 24 in 25.)
- [5] U. Berardi. Clarifying the new interpretations of the concept of sustainable building. *Sustainable Cities and Society*, 8, (2013), str. 72-78. (Citirano na straneh 5 in 6.)
- [6] M. Brown and E. Haselsteiner. *COST Action CA16114 RESTORE: REthinking Sustainability TOwards a Regenerative Economy*. Working Group One Report, (2018), str. 118. (Citirano na straneh 7, 8, 9, 34 in 77.)
- [7] P. Crowther. Chapter 18: Re-valuing construction materials and components through design for disassembly. *Unmaking Waste in Production and Consumption: Towards the Circular Economy*, (2018), str. 309-321. (Citirano na strani 4.)
- [8] Engineering ToolBox. NC - the Noise Criterion, 2004. (Zadnji dostop 10.08.2022 na spletni strani: <https://www.engineeringtoolbox.com/nc-noise-criterion-d.725.html>). (Citirano na strani 51.)
- [9] Eurostat. Final energy consumption by sector, 2022. (Zadnji dostop: 08.08.2022 na spletni strani: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/>). (Citirano na strani 4.)
- [10] B. Hawkins. Acoustics historical and philosophical development. *American Journal of Physics*, 43, 2, 1975, str. 196. (Citirano na straneh IX, 12 in 13.)

- [11] D. E. Hebel, M. H. Wisniewska, and F. Heisel. *Building from Waste*. De Gruyter, Berlin, 2014. (Citirano na straneh 5 in 35.)
- [12] F. Jacobsen, T. Poulsen, J. H. Rindel, A. C. Gade, and M. Ohlrich. *Fundamentals of Acoustics and Noise Control*. Technical University of Denmark, Lyngby, 2009. (Citirano na straneh VI, IX, 14, 17, 18, 19, 20, 21, 24, 25, 28, 29, 33 in 40.)
- [13] R. W. Krug. Sound level meters. *Encyclopedia of Acoustics*, 2007, str. 1845-1854. (Citirano na straneh IX in 25.)
- [14] R. Kunič, N. Šubic, and M. Dovjak. Hrup v stavbah za izobraževanje. *prispevek na konferenci NIJZ Delavnica: Hrup in zdravje v šolah*, Ljubljana, 2019. (Citirano na straneh IX, 18 in 19.)
- [15] M. Kuret. *Kamnik Sever (Idejna zasnova revitalizacije južnega območja nekdanje Smodnišnice v Kamniku s projektom novega vstopnega objekta)*. diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 2022. (Citirano na strani 11.)
- [16] T. Lokki. Tasting music like wine: Sensory evaluation of concert halls. *Physics Today*, 67, (1), (2014), str. 27-32. (Citirano na strani 25.)
- [17] B. Mihelič, M. Nikšič, and M. Humar. *Urbanistični terminološki slovar*. ZRC SAZU, Založba ZRC, Ljubljana, 2015. (Citirano na strani 7.)
- [18] MK3. Akustični slovar, 2019. (Zadnji dostop na 08.08.2022 na spletni strani: <http://mk3.si/blog/akusticni-slovar>). (Citirano na straneh IX in 18.)
- [19] ODEON A/S. Odeon room acoustics software user's manual version 17, 2021, str. 290. (Citirano na straneh X in 64.)
- [20] R. Prislan. *Modeliranje akustike prostora z naprednimi žarkovnimi metodami*. doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 2018, str. 105. (Citirano na straneh IX, X, 16, 17, 21, 22, 23, 24, 34, 40, 41, 43 in 44.)
- [21] T. Ramesh, R. Prakash, and K. Shukla. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 42 (10), (2010), str. 1592-1600. (Citirano na strani 4.)
- [22] B. Reed. Shifting from 'sustainability' to regeneration. *Building Research and Information*, 35 (6), 2007, str. 674-680. (Citirano na strani 7.)
- [23] I. Sartori and A. Hestnes. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy and Buildings*, 39 (3), 2007, str. 249-257. (Citirano na strani 4.)

- [24] L. Savioja and U. P. Svensson. Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138 (2), 2015, str. 708-730. (*Citirano na strani 34.*)
- [25] L. Shtrepi, A. Astolfi, S. Pelzer, R. Vitale, and M. Rychtáriková. Objective and perceptual assessment of the scattered sound field in a simulated concert hall. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138 (3), 2015, str. 1485-1497. (*Citirano na straneh 17 in 34.*)
- [26] M. Stalder. *Stanje mladinskega kluba Nade Žagar ter predlagane izboljšave za namen koncertov v živo*. diplomsko delo Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 2015. (*Citirano na straneh IX, 14, 15, 16, 17 in 19.*)
- [27] Standard. ISO 10534-2: Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes, 1998. (*Citirano na straneh 45, 46 in 47.*)
- [28] Standard. DIN 18041:2004-05 Acoustic quality in small and medium-size rooms, 2004. (*Citirano na straneh 29 in 32.*)
- [29] Standard. SIST EN ISO 8178:2014 Akustika - Merjenje absorpcije zvoka v odmevnici, 1 2004. (*Citirano na strani 17.*)
- [30] Standard. ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework, 2006. (*Citirano na strani 5.*)
- [31] Standard. ISO 14044:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines, 2006. (*Citirano na strani 5.*)
- [32] Standard. ISO 3382-1 Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces, 2009. (*Citirano na straneh 21, 22, 37, 38, 39, 40, 41, 43 in 52.*)
- [33] Standard. NS 8178:2014 Acoustic criteria for rooms and spaces for music rehearsal and performance, 2014. (*Citirano na strani 32.*)
- [34] Standard. IEC 60268-16:2020 Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index, 2020. (*Citirano na straneh VI, 24 in 32.*)
- [35] H. Štih. Prenova ombočja smodnišnice v kamniku - trajni problem ali trajnostna razvojna priložnost. *30. Sedlarjevo srečanje, Urbani Izziv*, 2019. (*Citirano na strani 9.*)

- [36] M. Čudina. *Tehnična akustika: merjenje, vrednotenje in zmanjševanje hrupa in vibracij*. Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, 2014. (Citirano na strani 29.)
- [37] A. Urankar. *Idejni načrt revitalizacije območja nekdanje smodnišnice v Kamniku*. magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 2016. (Citirano na strani 10.)
- [38] M. Vodlan. *Urbanistično krajinska ureditev degradiranega območja nekdanje Kemijske Industrije Kamnik - Smodnišnice*. magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 2016, str. 100. (Citirano na straneh IX, 9 in 10.)
- [39] C. Wassilieff. Sound absorption of wood-based materials. *Applied Acoustics*, 48 (4), 1996, str. 339-356. (Citirano na strani 17.)
- [40] Y. Yohanis and B. Norton. Life-cycle operational and embodied energy for a generic single-storey office building in the uk. *Energy*, 27 (1), 2002, str. 77-92. (Citirano na strani 4.)
- [41] R. Žarnić. *Tehnična smernica TSG-1-005:2012 Zaščita pred hrupom v stavbah*. Ministrstvo za okolje in prostor, Ljubljana, 2012. (Citirano na straneh VI, 17, 21, 29, 33, 50 in 58.)