



OBIEKT:

Pokój do odsłuchu stereo

TEMAT:

Projekt adaptacji akustycznej dedykowanego pokoju
w domu jednorodzinnym

AUTOR:

Mirosław Andrejuk

Spis treści:

Spis treści:	2
1. Wprowadzenie	2
1.1 Założenia projektowe	2
1.2 Wymagania projektowe	4
2. Obliczenia	4
2.1 Rezonanse akustyczne pomieszczenia	4
2.2 Kryterium Bonello	8
2.3 Lokalizacja punktu odsłuchowego	8
2.4 Odbicia dźwięku	9
2.5 Czas pogłosu - obliczanie	11
2.6 Czas pogłosu – pomiary	12
3. Adaptacja akustyczna – opis zastosowanych rozwiązań.....	14

1. Wprowadzenie

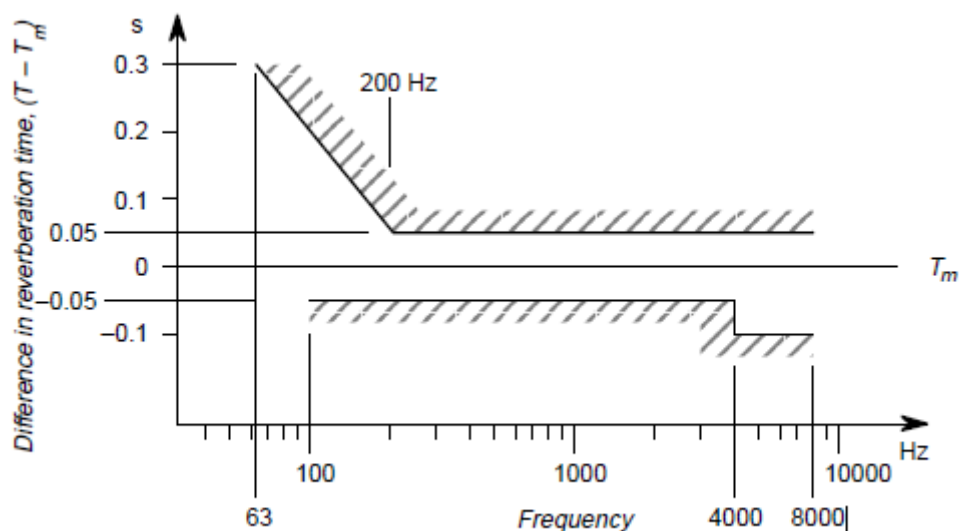
Niniejszy projekt dotyczy adaptacji akustycznej osobnego pomieszczenia w domu jednorodzinnym. Projektowane pomieszczenie ma pełnić rolę pokoju odsłuchowego. Celem jest stworzenie jak najlepszego pomieszczenia pod względem akustycznym bez wchodzenia w kompromisy związane ze stroną estetyczną zastosowanych rozwiązań.

1.1 Założenia projektowe

Idealne pomieszczenie odsłuchowe charakteryzuje się naturalnymi warunkami akustycznymi, czyli możliwie jak najrówniejszą charakterystyką częstotliwości i odpowiednim czasem pogłosu. Zapis

nagrania na przykład koncertu orkiestry symfonicznej w sali koncertowej o czasie pogłosu 2,5 sekundy będzie zawierał słyszalny pogłos w każdym dźwięku i podczas jego wybrzmiewania. Jeśli w pomieszczeniu odsłuchowym czas pogłosu będzie dłuższy niż optymalny to odsłuchiwana muzyka nie będzie posiadała takiej dynamiki jak koncert na żywo. Dźwięki będą dłużej zanikały przez co poszczególne instrumenty będą się ze sobą zlewały. Wyrównanie charakterystyki niskich częstotliwości za pomocą pułapek basowych spowoduje skrócenie czasu pogłosu oraz zlikwiduje podbicia i spadki basu wynikające głównie z rezonansów pomieszczenia. Dzięki temu bas będzie mocniejszy, bardziej zwarty, dynamiczny i zróżnicowany.

W celu wyznaczenia wartości charakteryzujących idealne warunki akustyczne w pomieszczeniu zamkniętym opracowano normę EBU Tech 3276 do której będą się odnosił podczas obliczeń. Definiuje ona odchył od optymalnego czasu pogłosu pomieszczeń na poziomie $\pm 0,05$ s. Wartość optymalną czasu pogłosu (punkt 0 na osi czasu) oblicza się i jest ona zależna od kubatury pomieszczenia.



Rysunek 1 – Tolerancja odchyłu czasu pogłosu

1.2 Wymagania projektowe

Pomieszczenie charakteryzuje się dość dużą długością, względem szerokości pomieszczenia. Sufit i ściany są wykonane z płyty GK. Podłoga jest wykonana z desek, na których leżą dywany zakrywające ok. 90% powierzchni podłogi.

Cała przednia ściana zostanie zagospodarowana urządzeniami akustycznymi i meblami na płyty. Po bokach przedniej ściany oraz pod sufitem zostaną umieszczone pułapki basowe. W miejscach pierwszych odbić na ścianach zostaną ustawione dyfuzory szczelinowe. Sufit zostanie przełamany w celu redukcji podbić wynikających z rezonansów pomieszczenia. Również w tym celu na przedniej ścianie połączenie pułapek basowych i dyfuzorów stworzy jeden wielki fraktal (dyfuzor w dyfuzorze).

Ze względu na osobiste preferencje co do bardziej żywej akustyki pochłaniacze szerokopasmowe będą dodawane w małych ilościach po skompletowaniu docelowego systemu audio o ile zajdzie taka potrzeba.

2. Pomiary i obliczenia

Obliczenia w ramach analizy pola akustycznego w pomieszczeniu dokonuje się za pomocą różnych metod w zależności od pasma częstotliwości. Każda z tych metod dotyczy konkretnego pasma i poza nim jest obciążona dużym błędem pomiarowym. Poszczególne metody i ich pasma precyzyjnych wyliczeń prezentują się następująco:

- metoda falowa: 20-150Hz – używana przy wyliczaniu rezonansów pomieszczenia
- metoda statystyczna: 125Hz – 4kHz – używana do wyliczeń czasu pogłosu
- metoda geometryczna: powyżej 800Hz – używana do obliczania czasów docierania dźwięków z pierwszych odbić względem dźwięku bezpośredniego

2.1 Rezonanse akustyczne pomieszczenia

Obliczenie częstotliwości rezonansowych pomaga w scharakteryzowaniu zniekształceń niskich częstotliwości. W pomieszczeniu występują trzy typy rezonansów:

- Osiowy (fale odbijają się pomiędzy dwiema naprzeciwległymi płaszczyznami)
- Styczny (fale odbijają się pomiędzy czterema różnymi płaszczyznami)
- Skośny (fale odbijają się pomiędzy wszystkimi sześcioma płaszczyznami)

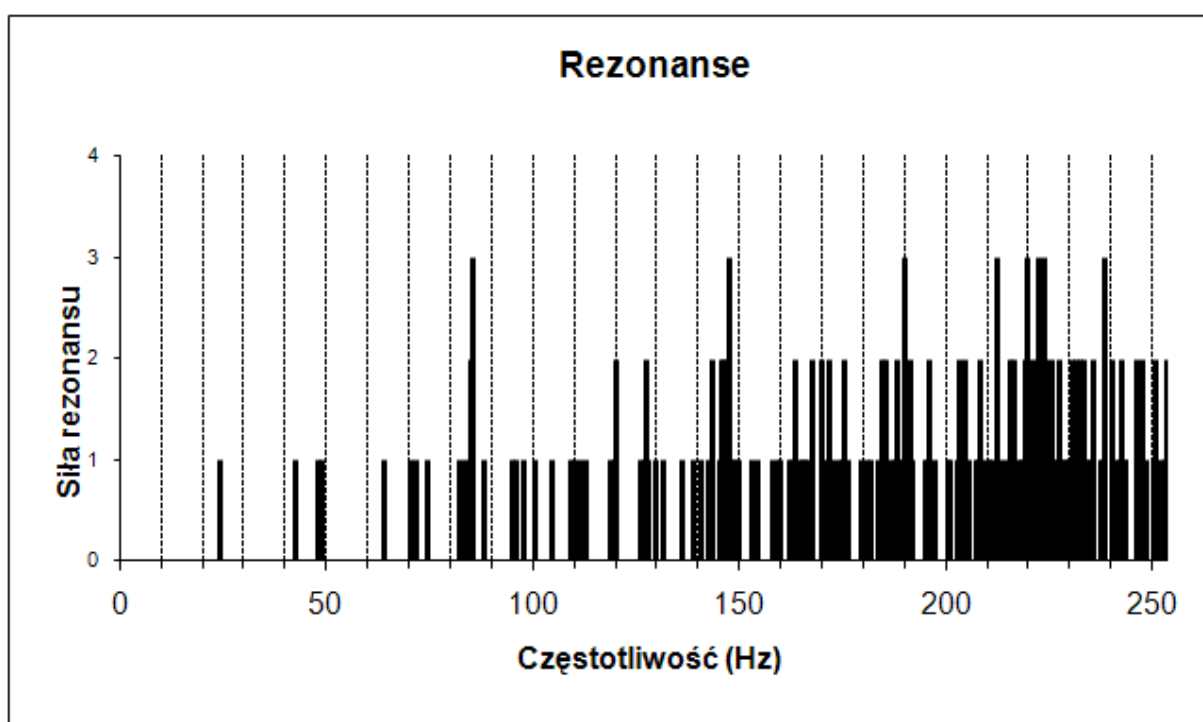
Wyniki i analiza rozkładu poszczególnych typów i częstotliwości rezonansów wskazują przy których częstotliwościach można spodziewać się wyraźnych podbić lub spadów ciśnienia akustycznego niskich częstotliwości. Tabela1 przedstawia wyliczone częstotliwości i typy rezonansów w paśmie do 175Hz.

Rezonanse				
nx	ny	nz	f	Typ
1	0	0	23,9	Osiowy
0	1	0	42,4	Osiowy
2	0	0	47,8	Osiowy
1	1	0	48,7	Styczny
2	1	0	63,9	tyczny
0	0	1	70,3	Osiowy
3	0	0	71,7	Osiowy
1	0	1	74,2	Styczny
0	1	1	82,1	Styczny
3	1	0	83,4	Styczny
0	2	0	84,9	Osiowy
2	0	1	85,0	Styczny
1	1	1	85,5	Skośny
1	2	0	88,2	Styczny
2	1	1	95,0	Skośny
4	0	0	95,7	Osiowy
2	2	0	97,4	Styczny
3	0	1	100,4	Styczny
4	1	0	104,6	Styczny
3	1	1	109,0	Skośny
0	2	1	110,2	Styczny
3	2	0	111,1	Styczny
1	2	1	112,7	Skośny
4	0	1	118,7	Styczny
5	0	0	119,6	Osiowy
2	2	1	120,1	Skośny
4	1	1	126,0	Skośny
5	1	0	126,9	Styczny
0	3	0	127,3	Osiowy
4	2	0	127,9	Styczny
1	3	0	129,5	Styczny
3	2	1	131,5	Skośny
2	3	0	136,0	Styczny
5	0	1	138,7	Styczny
0	0	2	140,5	Osiowy
1	0	2	142,5	Styczny
6	0	0	143,5	Osiowy
5	1	1	145,0	Skośny
0	3	1	145,4	Styczny
4	2	1	145,9	Skośny
3	3	0	146,1	Styczny
5	2	0	146,6	Styczny
0	1	2	146,8	Styczny
1	3	1	147,3	Skośny
2	0	2	148,4	Styczny
1	1	2	148,7	Skośny
6	1	0	149,6	Styczny
2	3	1	153,1	Skośny
2	1	2	154,4	Skośny
3	0	2	157,8	Styczny
4	3	0	159,2	Styczny
6	0	1	159,8	Styczny
3	3	1	162,1	Skośny
5	2	1	162,6	Skośny
3	1	2	163,4	Skośny
0	2	2	164,2	Styczny
6	1	1	165,3	Skośny
1	2	2	165,9	Skośny
6	2	0	166,7	Styczny
7	0	0	167,4	Osiowy
0	4	0	169,7	Osiowy
4	0	2	170,0	Styczny
2	2	2	171,0	Skośny
1	4	0	171,4	Styczny
7	1	0	172,7	tyczny
4	3	1	174,0	Skośny

Tabela1 – Rozkład rezonansów

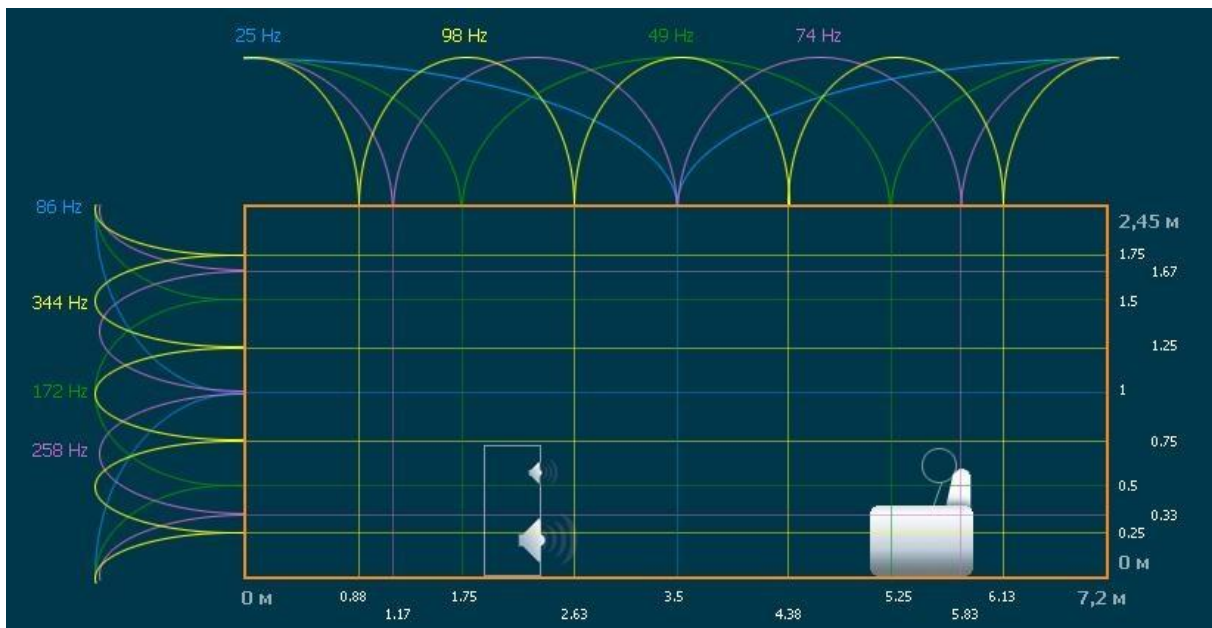
Najbardziej szkodliwe są rezonanse występujące samotnie w odstępie 20Hz od najbliższych sąsiednich rezonansów, oraz takie które występują bardzo blisko siebie lub wręcz nakładają się na siebie.

Na poniższym wykresie przedstawiłem rozkład rezonansów z uwzględnieniem siły ich rozkładu przez zróżnicowanie wysokości słupka. Jak pierwsza częstotliwość rezonansowa powtórzona trzy razy występuje przy 85Hz, kolejna przy 147Hz co może powodować podbicia w tych okolicach. Wraz ze wzrostem częstotliwości występuje naturalne zagęszczenie rezonansów i ma ono regularny przebieg. Największa odległość pomiędzy rezonansami to $(42,4 - 23,9 =) 18,5$ Hz pomiędzy pierwszym rezonansem długości pomieszczenia, a pierwszym rezonansem szerokości pomieszczenia. Jest to spowodowane dużą dysproporcją długości pomieszczenia do jego szerokości i wysokości. Kolejna duża przerwa pomiędzy rezonansami występuje przed pierwszym rezonansem wysokości pomieszczenia i wynosi $(63,9 - 48,7 =) 15,2$ Hz.

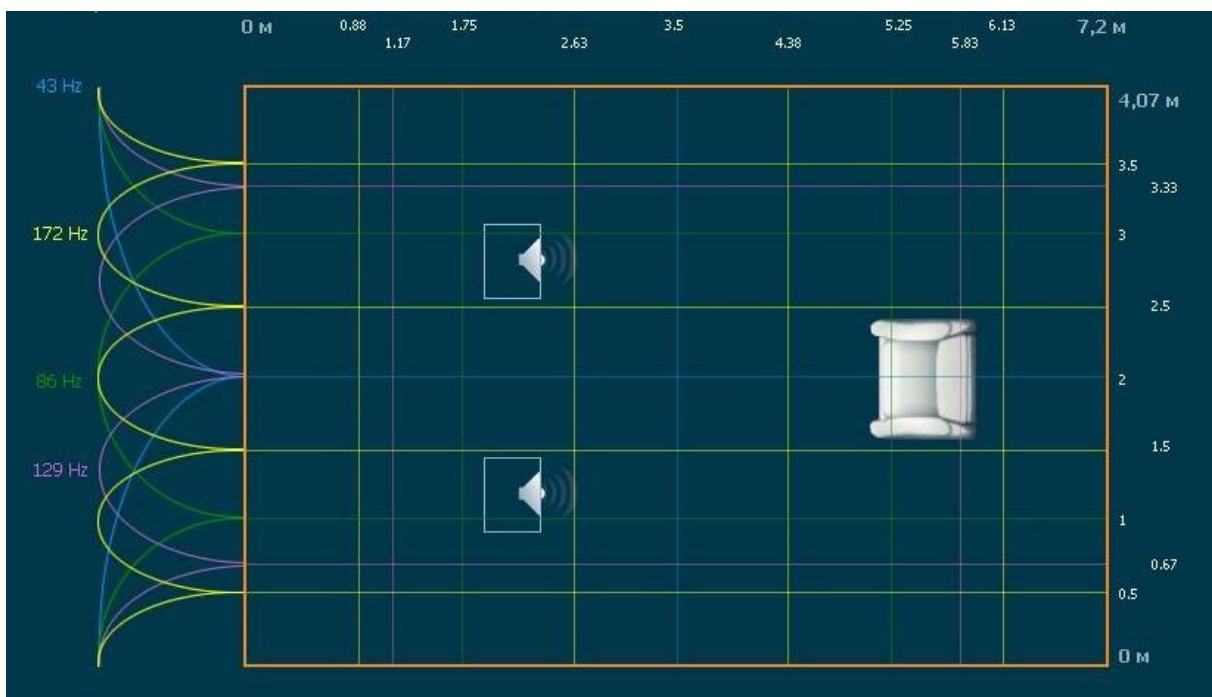


Rysunek 2 – Graficzny rozkład rezonansów

Ze względu na zamierzoną nie prostopadłość ścian bocznych, przełamanie sufitu i jego wznoszenie obliczenia rezonansów wykonałem dla uśrednionych wymiarów pomieszczenia. To oraz i inne rozwiązania opisałem w rozdziale trzecim. Graficzny rozkład rezonansów w pomieszczeniu prezentuje się następująco:



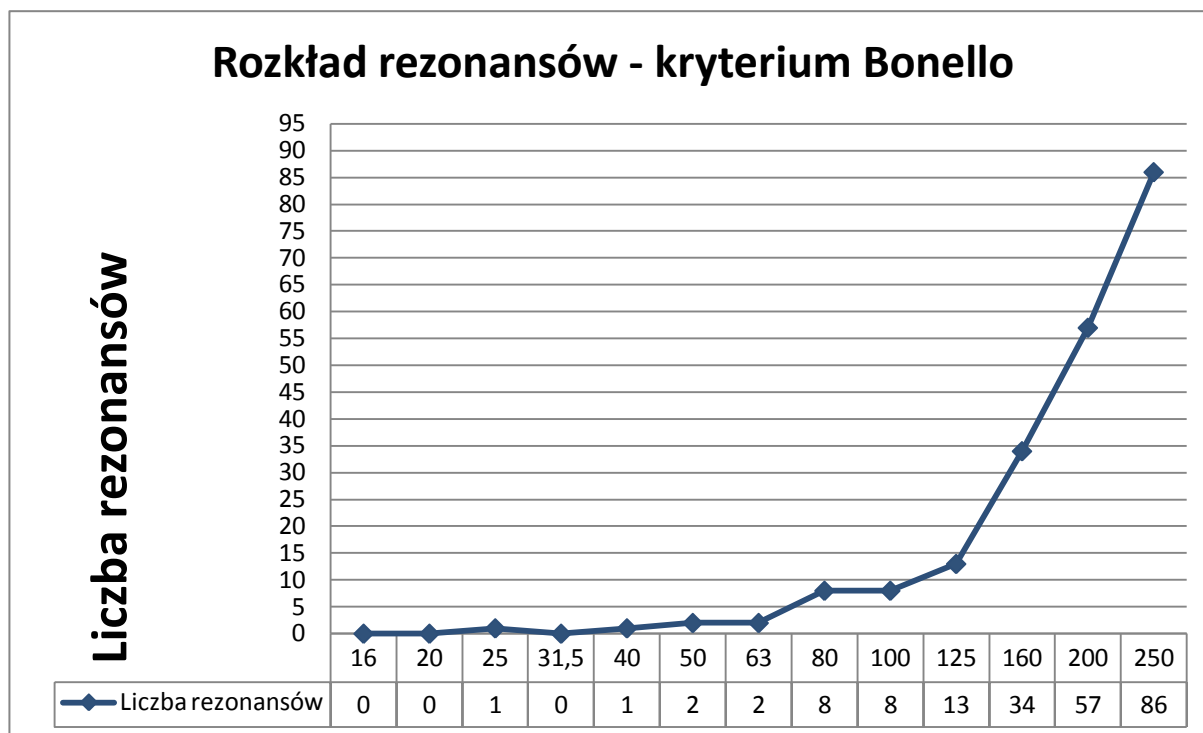
Rysunek 3 – Rozkład rezonansów długości i wysokości pomieszczenia



Rysunek 4 – Rozkład rezonansów szerokości pomieszczenia

2.2 Kryterium Bonello

Idealny rozkład rezonansów występuje przy spełnionym kryterium Bonello. Kryterium to zakłada, iż każde pasmo $\frac{1}{3}$ oktawy nie może posiadać mniejszej liczby rezonansów niż pasmo je poprzedzające. Nakładanie się na siebie częstotliwości rezonansowych jest tolerowane jedynie w przypadku wystąpienia przynajmniej pięciu częstotliwości rezonansowych w paśmie $\frac{1}{3}$ oktawy.



Rysunek 5 – Rozkład rezonansów – kryterium Bonello

Jak widać na wykresie, pasmo $\frac{1}{3}$ oktawy 28,1 – 35,4Hz o środku przy częstotliwości 31,5Hz nie posiada żadnego rezonansu. Jednak nie spełnienie tego wymogu nie stworzy dużych problemów, ponieważ jak widać na graficznym rozkładzie rezonansów są one dobrze rozmieszczone i nie nakładają się na siebie.

2.3 Lokalizacja punktu odsłuchowego

Kolumny zlokalizowałem w pozycji 180cm od tylnej ściany i 100cm od ścian bocznych (względem środka ścianki przedniej kolumny). Takie ustawienie zapewnia 200cm rozstawu pomiędzy kolumnami. Środek punktu odsłuchowego (tzw. sweet spot) mieści się 27cm od ściany tylnej i 202cm od ściany prawej. Takie usytuowanie punktu odsłuchowego spowoduje, że w miejscu odsłuchu:

Rezonans związany z długością pomieszczenia

- 1 0 0 (23,9Hz) będzie lekko wzbudzany
- 2 0 0 (47,8Hz) będzie lekko wzbudzany
- 3 0 0 (71,7Hz) będzie lekko wzbudzany

Rezonans związany z szerokością pomieszczenia

- 0 1 0 (42,4Hz) nie będzie wzbudzany
- 0 2 0 (84,9Hz) będzie wzbudzany, jednak zostanie one mocno zniwelowany dyfuzorami o różnych głębokościach na przedniej ścianie
- 0 3 0 (127,3Hz) nie będzie wzbudzany

Rezonans związany z wysokością pomieszczenia

- 0 0 1 (70,3Hz) nie będzie wzbudzany
- 0 0 2 (140,5Hz) będzie lekko wzbudzany
- 0 0 3 (210,8Hz) będzie lekko wzbudzany

2.4 Odbicia dźwięku

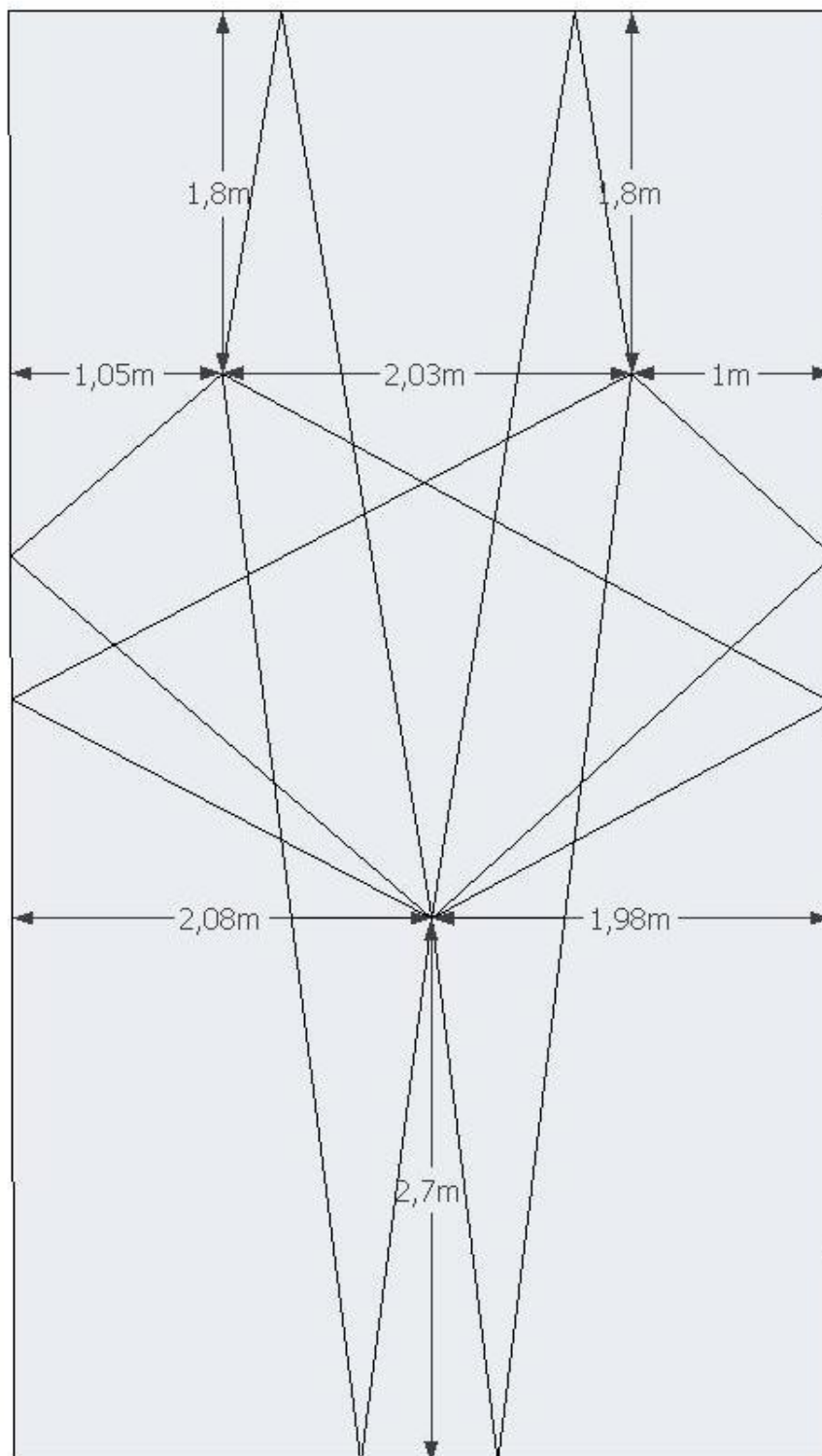
Średnie i wysokie częstotliwości zawierają najwięcej informacji dzięki którym ośrodek ucho-mózg kreuje precyzyjną scenę muzyczną z dźwięków generowanych przez system stereo. Informacje te są zawarte jedynie w falach bezpośrednich (głośnik-ucho), a wszelkie odbicia docierające w czasie 15 milisekund po dźwięku bezpośrednim zniekształcają obraz sceny muzycznej. W tym celu należy obliczyć czasy docierania fal odbitych z pierwszych odbić względem fali bezpośredniej. Obliczenia te zebrałem w poniższej tabeli:

Powierzchnia	Kolumna lewa		Kolumna prawa	
	Odległość odbicia [m]	Opóźnienie dźwięku [ms]	Odległość odbicia [m]	Opóźnienie dźwięku [ms]
Ściana przednia	6,38	10,3	6,39	10,4
Ściana lewa	4,14	3,7	5,82	8,7
Ściana prawa	5,69	8,3	4,03	3,4
Ściana tylna	8,17	15,6	8,16	15,6
Podłoga	3,4	1,6	3,4	1,6
Sufit	4,2	3,9	4,2	3,9

Tabela 2 – Opóźnienia dźwięków z pierwszych odbić

Jak widać jedynie odbicia od ściany tylnej są na tyle odległe, że nie wymaga adaptacji. W celu poprawy kreowania sceny muzycznej na wszystkich ścianach w miejscach pierwszych odbić zostaną ustawione dyfuzory. Odbicia od podłogi zostaną zniwelowane przez dywan. Odbicia od sufitu zostaną usunięte poprzez przełamanie sufitu. Dodatkowo na suficie umieszczę ustrój hybrydowy (pochłaniacz i rozpraszacz w jednym).

Rozkład odbić przedstawia poniższy rysunek:



Rysunek 6 – Graficzna prezentacja pierwszych odbić

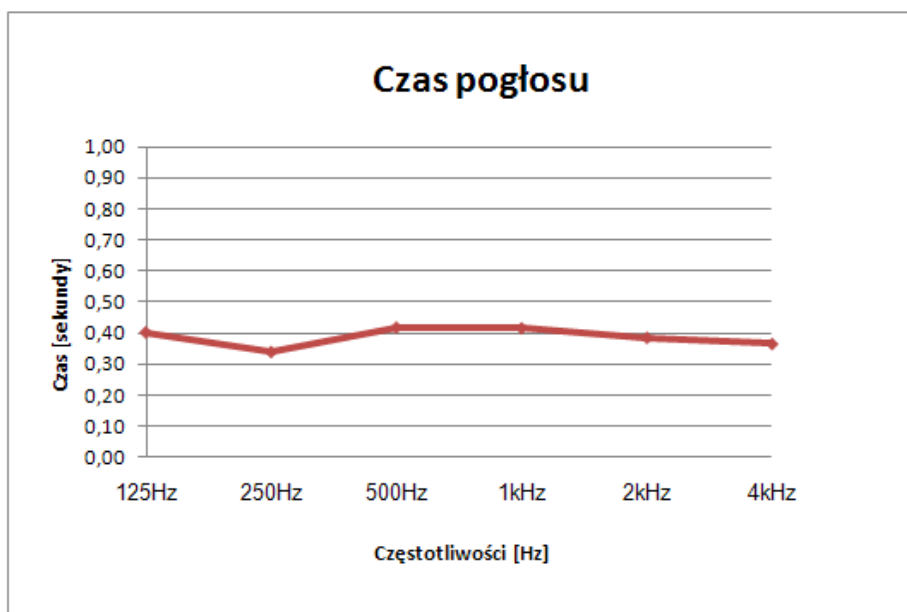
2.5 Czas pogłosu - obliczanie

Budując pomieszczenie odsłuchowe można obliczyć czas pogłosu uwzględniając wszystkie zastosowane materiały i wyposażenie wnętrza wraz z ich współczynnikami pochłaniania. Następnie dobiera się takie ustroje, aby sprawdzić wyliczony czas pogłosu do optymalnego poziomu. W celach naukowych zamieszczam przykładową tabelę z obliczonym optymalnym czasem pogłosu po dobraniu odpowiednich ustrojów akustycznych. Na podstawie obliczeń wyznaczyłem optymalny czas pogłosu, który powinien zawierać się w zakresie 0,33 – 0,43 sekundy. Wyniki obliczeń czasu pogłosu zawarłem w poniższej tabeli:

Typ powierzchni	Materiał	Powierzchnia [m ²]	125Hz		250Hz		500Hz		1kHz		2kHz		4kHz	
			α	A	α	A	α	A	α	A	α	A	α	A
sufit	boazeria	10,5	0,20	2,10	0,24	2,52	0,10	1,05	0,07	0,74	0,10	1,05	0,10	1,05
podłoga	deski	20,7	0,15	3,11	0,11	2,28	0,10	2,07	0,07	1,45	0,06	1,24	0,07	1,45
	dywan	3	0,10	0,30	0,40	1,20	0,62	1,86	0,70	2,10	0,62	1,86	0,88	2,64
	plytki	2,86	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03	0,02	0,06	0,02	0,06	0,02	0,06
ściana lewa	boazeria	17,1	0,20	3,42	0,24	4,10	0,10	1,71	0,07	1,20	0,10	1,71	0,10	1,71
	okna i drzwi	9,43	0,10	0,94	0,07	0,66	0,05	0,47	0,03	0,28	0,02	0,19	0,02	0,19
ściana prawa	boazeria	11,21	0,20	2,24	0,24	2,69	0,10	1,12	0,07	0,78	0,10	1,12	0,10	1,12
	plyta GK	13,66	0,30	4,10	0,12	1,64	0,08	1,09	0,06	0,82	0,06	0,82	0,05	0,68
	drzwi	2,86	0,14	0,40	0,10	0,29	0,08	0,23	0,08	0,23	0,08	0,23	0,08	0,23
ściana przednia	boazeria	4,53	0,20	0,91	0,24	1,09	0,10	0,45	0,07	0,32	0,10	0,45	0,10	0,45
	regał z książkami	6,93	0,11	0,76	0,26	1,80	0,37	2,56	0,46	3,19	0,52	3,60	0,48	3,33
	QRD 3D	1,44	0,15	0,22	0,10	0,14	0,14	0,20	0,22	0,32	0,06	0,09	0,12	0,17
skos przedni	boazeria	11,14	0,20	2,23	0,24	2,67	0,10	1,11	0,07	0,78	0,10	1,11	0,10	1,11
ściana tylna	boazeria	10,23	0,20	2,05	0,24	2,46	0,10	1,02	0,07	0,72	0,10	1,02	0,10	1,02
	QRD 2D	1,92	0,25	0,48	0,24	0,46	0,35	0,67	0,23	0,44	0,20	0,38	0,20	0,38
skos tylni	pochłaniacz	10,49	0,74	7,76	0,94	9,86	0,95	9,97	0,73	7,66	0,37	3,88	0,17	1,78
dodatkowe pochłaniacze	legary	8,68	0,01	0,09	0,06	0,52	0,05	0,43	0,04	0,35	0,04	0,35	0,04	0,35
	zasłony	4,4	0,15	0,66	0,25	1,10	0,30	1,32	0,28	1,23	0,35	1,54	0,40	1,76
	słuchacz		-	2,5	-	3,5	-	4,2	-	4,6	-	5	-	5
	kanapa		-	3,5	-	4,5	-	5	-	5,5	-	5,5	-	4,5
	powietrze									4		8		12
Suma		138		37,78		43,51		36,58		36,75		39,21		40,99
α_{sr}			0,27		0,32		0,27		0,27		0,28		0,30	
RT60 [s]			0,402		0,340		0,418		0,416		0,385		0,365	

Tabela 3 – Obliczenia czasu pogłosu

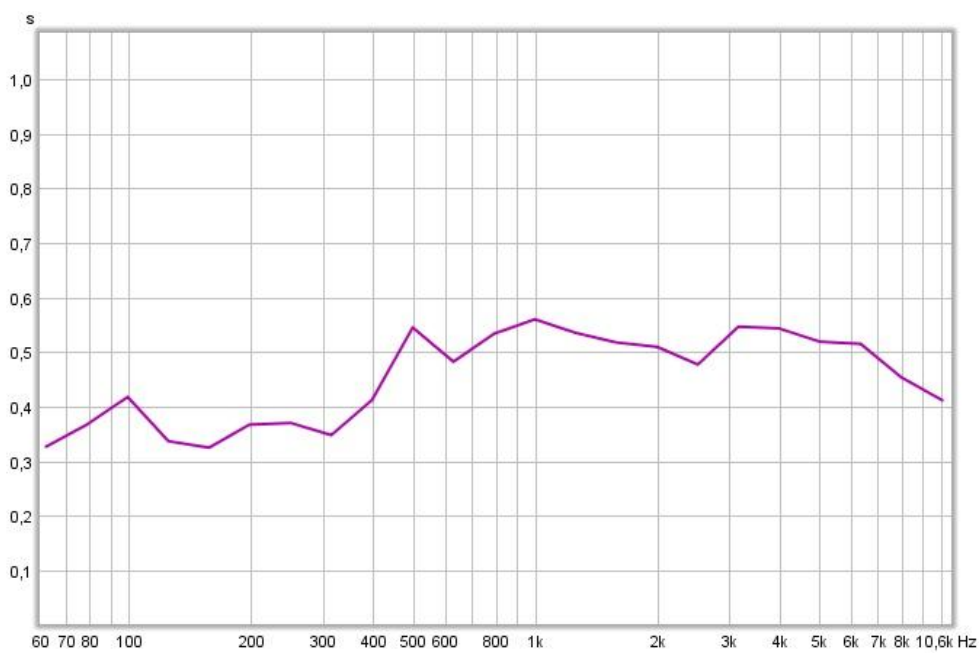
Średni czas pogłosu w paśmie 125Hz – 4kHz wynosi 0,39 sekundy i spełnia wymagania normy EBU Tech 3276 co obrazuje poniższy wykres:



Rysunek 7 – Wykres czasu pogłosu - obliczony

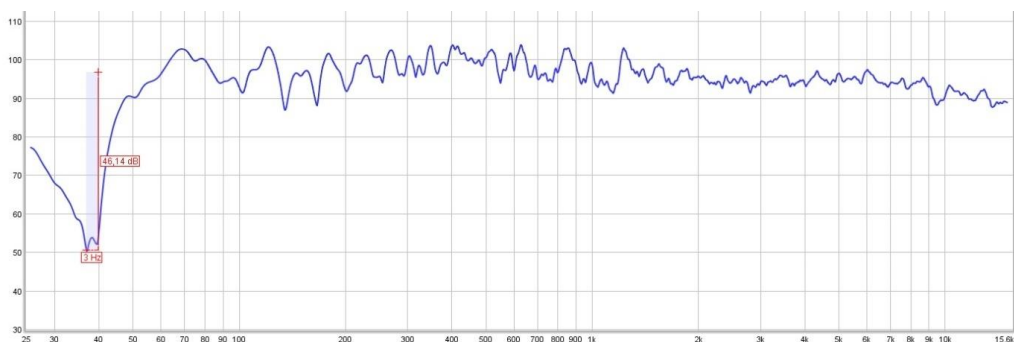
2.6 Czas pogłosu – pomiary

Posiadając gotowe pomieszczenie odsłuchowe wykonałem serię kilkunastu pomiarów akustyki. Uśredniony wynik charakterystyki czasu pogłosu prezentuje się następująco:



Rysunek 8 – Wykres czasu pogłosu (50Hz – 10kHz)

Charakterystyka częstotliwości w miejscu dobranym na podstawie własnych preferencji co do oddalenia prezentowanej sceny i pomiarów przeprowadzonych w kilkunastu miejscach prezentuje się następująco:



Rysunek 9 – Wykres charakterystyki częstotliwości (25Hz – 16kHz)

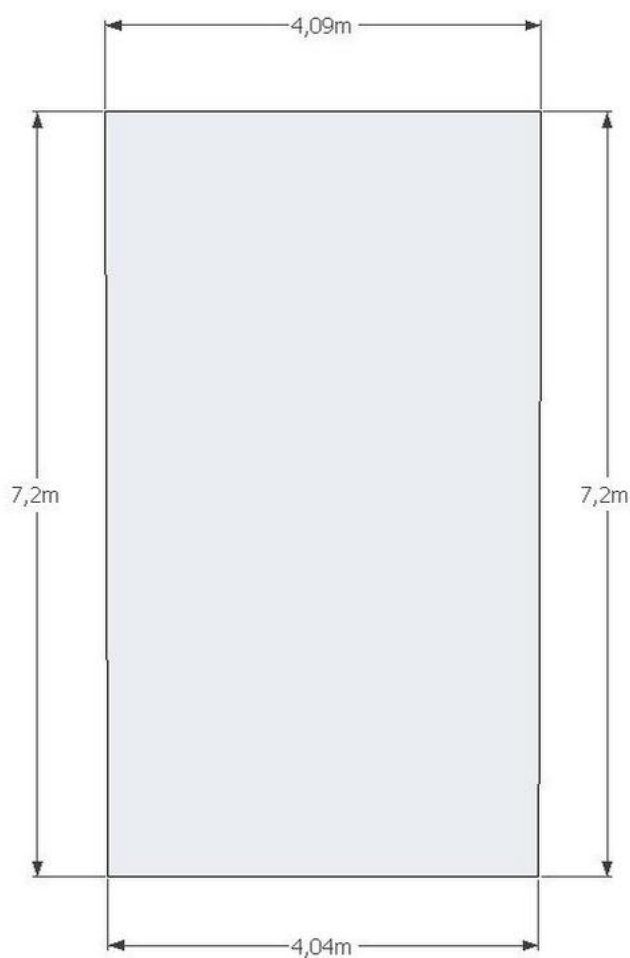
W całym paśmie powyżej 47Hz nie ma dużych wahań. Widać podbicia w okolicy 77Hz i 122Hz jednak mieści się to w paśmie +/-7dB. Jednak najgorszym jest fakt wzajemnego znoszenia się fal przez co częstotliwości około 37Hz cichsze o 46dB względem średniej głośności pozostałych częstotliwości. Jest spowodowane mocno oddalonym pierwszym rezonansem długości pomieszczenia 23,4Hz, a pierwszym rezonansem szerokości pomieszczenia 42,4Hz. Dokładnie widać to na poniższym zbliżeniu:



Rysunek 10 – Wykres charakterystyki częstotliwości (25-125Hz)

3. Adaptacja akustyczna – opis zastosowanych rozwiązań

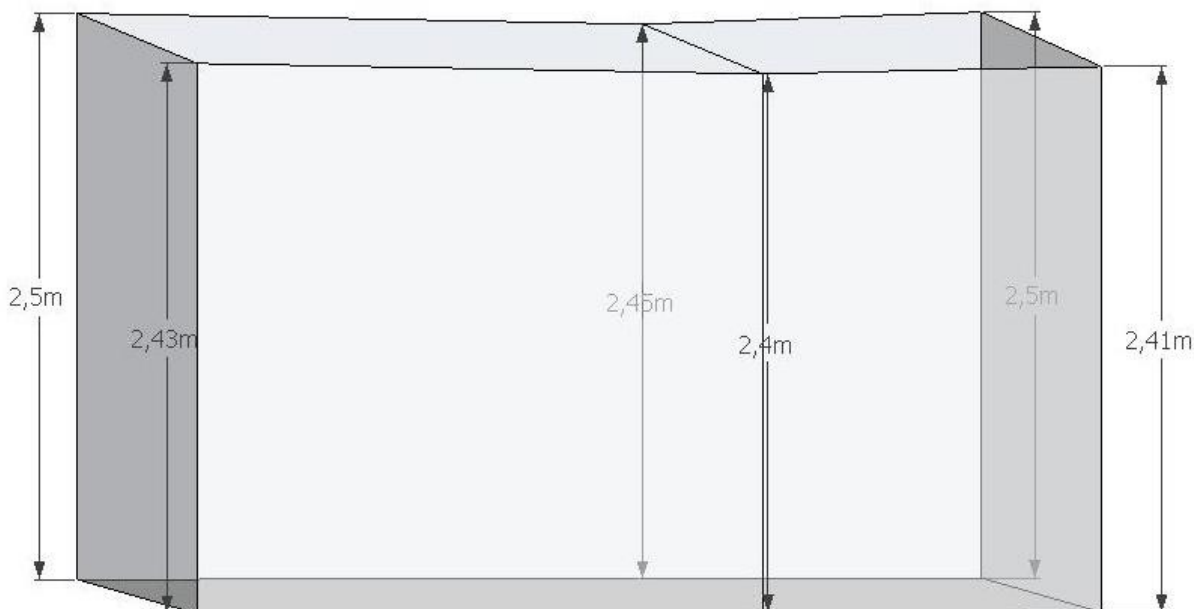
1. Ściany i sufit zostaną pokryte płytą GK o zwiększonej gęstości. Mocowane na wkręty co 35cm. Pełne deskowanie sufitu (pod płytami suchego tynku) w celu eliminacji pustek powietrza po przełamaniu płaskiej płaszczyzny sufitu. Ściany wewnątrz zostaną wypełnione materiałem pochłaniającym.
2. Uniknięcie mocnych podbić częstotliwości rezonansowych występujących głównie pomiędzy ścianami bocznymi przez lekkie ich przesunięcie. Ściana za kolumnami będzie o 5cm szersza niż ściana za słuchaczem. Obrazuje to poniższy rysunek:



Rysunek 11 – Prezentacja położenia ścian

3. Zniwelowanie wpływu odbić bezpośrednich od sufitu przez jego przełamanie. [rys.9]
4. Zniwelowanie podbić częstotliwości rezonansowych przez nierównomierne opuszczenie sufitu. Maksymalne wznoszenie wyniesie 12mm na 1m długości pomieszczenia co nie będzie zauważalne dla osób nie wtajemniczonych. Tak samo jak w przypadku ścian bocznych wpłynie to na rozmycie częstotliwości rezonansowych. Pierwsza częstotliwość rezonansowa wysokości pomieszczenia nie będzie występować przy częstotliwości 68,8Hz, tylko w paśmie

68,8 – 71,6Hz. Rozmycie częstotliwości rezonansowych będzie występowało przy wszystkich rezonansach występujących pomiędzy podłogą i sufitem, oraz rezonansach skośnych [rys.9]



Rysunek 12 – Przełamanie i wznoszenie się sufitu

5. Wykonanie strojonych pułapek basowych o wymiarach 2,4 x 0,75 x 0,5m (wys x szer x gł) umieszczonych w rogach pokoju za kolumnami. Ich przednie ścianki będą wykonane z małych dyfuzorów o paśmie rozpraszania 1300 – 9800Hz.
6. Wykonanie trzech strojonych pułapek basowych zawieszonych na przedniej ścianie o wymiarach 0,4 x 0,84 x 0,3m (wys x szer x gł). Ich przednie ścianki zostaną wykonane z identycznych dyfuzorów jak w poprzednich pułapkach.
7. W celu likwidacji pierwszych odbić od ściany za kolumnami na półkach na płyty, pomiędzy dużymi pułapkami staną trzy dyfuzory QRD19 o wymiarach 1,45 x 0,82 x 0,15m (wys x szer x gł), pasmo rozpraszania 600 – 5000Hz.
8. Dyfuzory na przedniej ścianie zostaną ustawione tak, aby razem z dyfuzorami w bocznych pułapkach basowych tworzyć jeden duży dyfuzor QRD5. Nie będzie to typowy dyfuzor z przegródkami pomiędzy każdym z dyfuzorów QRD19, ponieważ pomiędzy nimi pojawią się stojaki na płyty CD. Spowoduje on zróżnicowanie odległości pomiędzy ścianą tylną, a poszczególnymi ustrojami na ścianie przedniej powodując rozmycie częstotliwości rezonansowej. Głównie chodzi o rozmycie pierwszego modu długości pomieszczenia o częstotliwości 23,9Hz ponieważ jest mocno oddalony od pozostałych modów pomieszczenia.
9. Na ścianach bocznych w miejscach pierwszych odbić bliżej kolumn zostaną zastosowane dyfuzory QRD19 o wymiarach 1,25 x 0,82 x 0,15m (wys x szer x gł), pasmo rozpraszania 600 – 5000Hz. W celu lepszego oddziaływania będą stały na podstawkach o wysokości 30cm.

10. W miejscach pierwszych odbić prawej kolumny od lewej ściany i lewej kolumny od prawej ściany również zostaną zastosowane dyfuzory QRD19. Jednak ze względu na konieczność dostępu do okna i wymagane zachowanie symetrii zostaną ustawione na podłodze.
11. W celu likwidacji pierwszych odbić i polepszenia rozkładu fal akustycznych w pomieszczeniu, na ścianie za słuchaczem zostaną zastosowane cztery dyfuzory QRD13. Dwa o wymiarach 1,3 x 0,56 x 0,26 (wys x szer x gł) oraz dwa o wysokości 1,6m.