



**GRUPA SIEDEM CZWARTYCH**  
KOMPUTEROWE SYSTEMY DŹWIĘKOWE

**Projekt dostosowania akustyki nowobudowanego obiektu  
tymczasowej siedziby Opery na Zamku w Szczecinie.**

**Inwestor:** Opera na Zamku

**Adres:** 70-540 Szczecin,  
ul. Korsarzy 34

**Wykonawca:** Grupa Siedem Czwartych s.c.  
ul. Królowej Jadwigi 7a  
30-202 Kraków

**Projektant:** mgr inż. Marek Bałda

**Sprawdził:** Marek Suberlak

## Zawartość

1. Cel i zakres pracy.....	3
2. Opis obiektu .....	3
3. Założenia dotyczące czasu pogłosu.....	4
4. ZASTOSOWANE ROZWIĄZANIA AKUSTYCZNE.....	10
Uwagi ogólne .....	10
Wariant 1 .....	11
Wariant 2 .....	12
5. Symulacja propagacji dźwięku w obiekcie z zastosowaną adaptacją akustyczną.....	14
Karta katalogowa ustroju akustycznego Porfles .....	18

## Dołączone Materiały na nośniku optycznym:

Przekrój podłużny z sufitem akustycznym

Rzut poziom +4m rozmieszczenie ekranów

Katalog płyt warstwowych

Rysunki szczegółowe montażu systemowych sufitów akustycznych Ecophon

## 1. Cel i zakres pracy

Przedmiotem opracowania jest analiza akustyczna obiektu Tymczasowej Siedziby Opery na Zamku w Szczecinie. Zawiera ona symulacje akustyczne danego obiektu z najbardziej istotnymi elementami składającymi się o percepcję jakości odtwarzanej muzyki. Dodatkowo zawiera wytyczne dotyczące zastosowania, rozmieszczenia, sposobu montażu elementów akustycznych, umożliwiających poprawę właściwości akustycznych Sali Widowiskowej.

Praca obejmowała:

- Wykonanie modelu obliczeniowego dla projektowanego pomieszczenia
- Wykonanie symulacji obliczeniowych dla dwóch wariantów
- Dobór materiałów i ustrojów akustycznych, oraz ich rozmieszczenie

Dokumenty powołane:

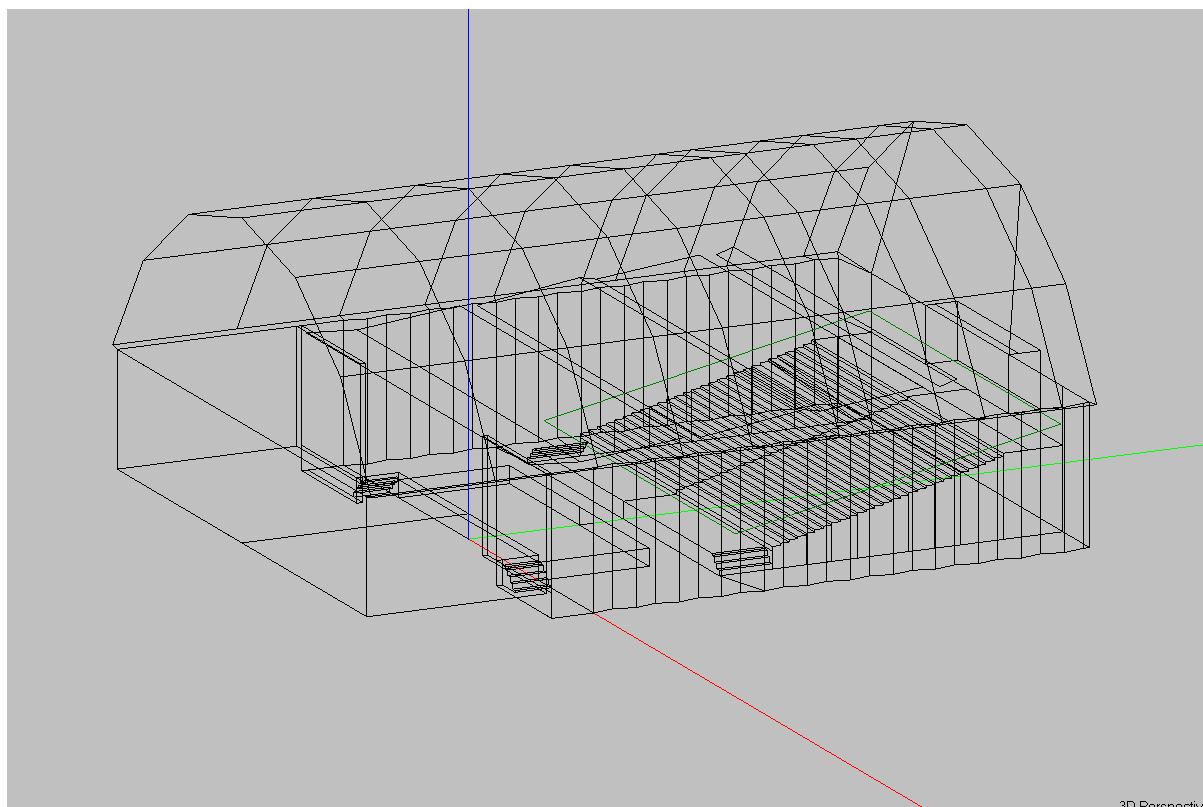
- Norma PN-87/B02151.02 „Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku w pomieszczeniach”
- Norma PN-EN ISO 3382 „pomiar czasu pogłosu pomieszczenia w powiązaniu z innymi parametrami akustycznymi”
- Wytyczne projektowe dot. Akustyki zawarte w literaturze przedmiotu

## 2. Opis obiektu

Nazwa i lokalizacja: Tymczasowa siedziba Opery na Zamku w Szczecinie, ul. Energetyków  
działka nr 5/19 obręb 1085 Szczecin Śródmieście.

Adaptacja akustyczna Opery na Zamku obejmuje:

- Scenę o powierzchni około 100 m<sup>2</sup>,
- Widownię o powierzchni 459,25 m<sup>2</sup>,
- Podest widowni na poziomie 1m o powierzchni 35,63 m<sup>2</sup>
- Orkiestron o powierzchni 99,38 m<sup>2</sup>



Rysunek 1. Model tymczasowego obiektu Opery na Zamku

### 3. Założenia dotyczące czasu pogłosu.

Zgodnie z obowiązującą normą założono, że czas pogłosu dla Sali Opery w Operze powinien wynosić w zakresie 1,3-1,6s.

W celu uzyskania właściwego czasu pogłosu, wykonano model numeryczny Sali w programie Ease 4.1. W oparciu o analizę w programie Ease 4.1 przeprowadzono symulacje czasu pogłosu, uwzględniając współczynnik pochłaniania dźwięku materiałów zastosowanych w Sali Opery dla poszczególnych częstotliwości. Współczynnik pochłaniania dla poszczególnych częstotliwości pobrano ze strony producentów lub skorzystano z biblioteki programu Ease 4.1.

Współczynnik pochłaniania  $\alpha$  materiałów dla poszczególnych częstotliwości wynosi odpowiednio:

L.p.	Powierzchnia- materiał	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
1.	Orkiestron- sklejka antypoślizgowa	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07	0.07
2.	Proscenium- sklejka antypoślizgowa	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07	0.07
3.	Scena- sklejka antypoślizgowa	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07	0.07
4.a	Widownia – konstrukcja Pletac	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07	0.07
4b	Widownia – fotele	0.15	0.19	0.22	0.39	0.38	0.30	0.30
4c	Widownia- wykładzina dywanowa	0.03	0.05	0.15	0.30	0.55	0.55	0.57
5.	Komunikacja- wykładzina dywanowa	0.03	0.05	0.15	0.30	0.55	0.55	0.57
6a	Ściany boczne- Płyty warstwowe PWS Pruszyński	0.08	0.09	0.38	0.19	0.1	0.1	0.1
6b	Ściany boczne- ekrany akustyczne- Płyta Kartonowo- gipsowa o gr. 9.5 z 50mm przestrzenią powietrzną	0.32	0.07	0.05	0.05	0.02	0.02	0.02
6c	Ściany boczne — Płyta ze sklejki o gr. 6mm z 50mm przestrzenią powietrzną	0.20	0.30	0.12	0.07	0.07	0.04	0.04
6d	Obudowa sceny - Płyty warstwowe PWS Pruszyński	0.08	0.09	0.38	0.19	0.1	0.1	0.1
7.	Poszycie dachu- plandeka PCV	0.07	0.15	0.15	0.15	0.15	0.11	0.10
8.	Ściana orkiestronu- Płyty Porfles gr70mm	0.09	0.24	0.51	0.60	0.75	0.78	0.81
9a	Pomieszczenie akustyka i oświetleniowca ściany boczne- panele akustyczne, 2x12,5 płyta GK, wełna, 2x12,5mm płyta GK	0.34	0.52	0.94	0.83	0.81	0.69	0.69
9b	Pomieszczenie akustyka podłoga- sklejka antypoślizgowa	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07	0.07

10.	Akustyczny sufit podwieszany- Ecophon Combison Duo E	0.38	0.60	0.90	1.00	1.00	0.90	0.90
11.	Ściany boczne kieszeni scenicznych i sceny – Płyta ze sklejki o gr. 6mm z 50mm przestrzenią powietrzną	0.20	0.30	0.12	0.07	0.07	0.04	0.04

Obliczenia czasu pogłosu zostały przeprowadzone za pomocą programu Ease 4.1 posługującego się wzorem Eyring'a:

$$RT = \frac{0,163 \times V}{4mV - S \times \ln(1 - \alpha)}$$

$$m = \frac{170}{\psi \%} \left( \frac{f}{kHz} \right)^2 \times 10^{-4}$$

gdzie:

RT – czas pogłosu w sek.

y – wilgotność

f – częstotliwość

V – Objętość pomieszczenia w m<sup>3</sup>

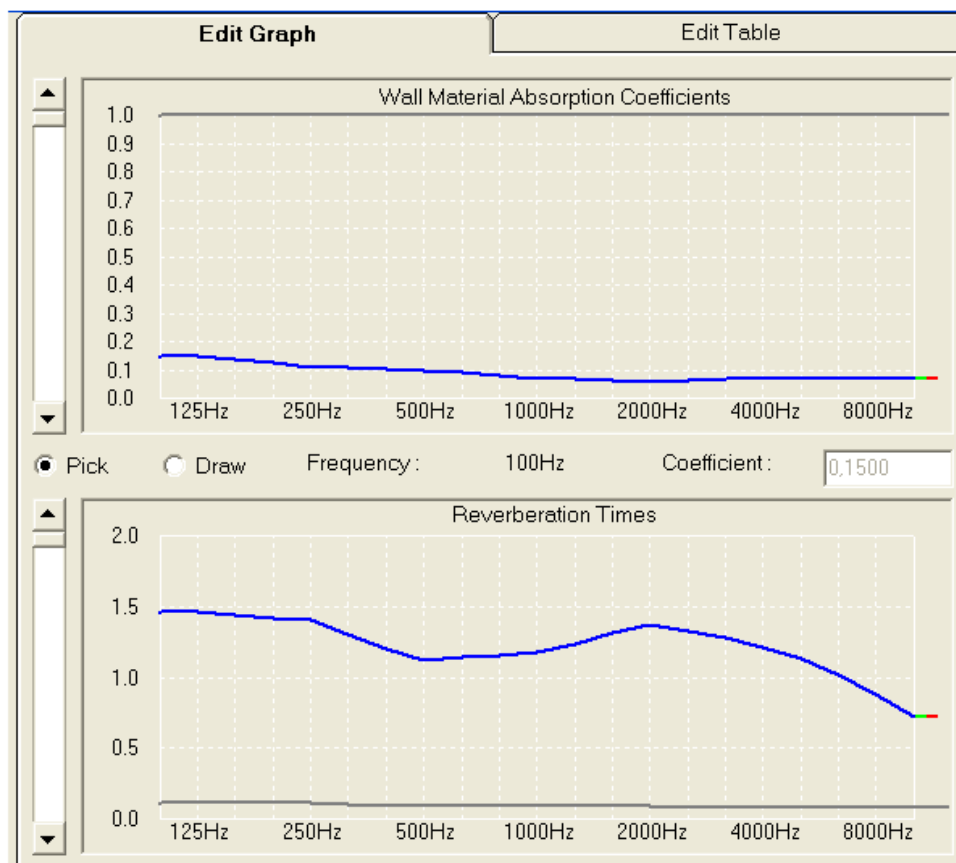
S- powierzchnia [m<sup>2</sup>]

a – i współczynnik chłonności danego materiału

Czas pogłosu w zależności od częstotliwości wynosi odpowiednio:

Freq[Hz]	RT[s]
125	1.33
250	1.31
500	1.15
1000	1.25
2000	1.30
4000	1.47
8000	0.96

Poniżej przedstawiono wykres czasu pogłosu według symulacji akustycznej w programie Ease 4.1



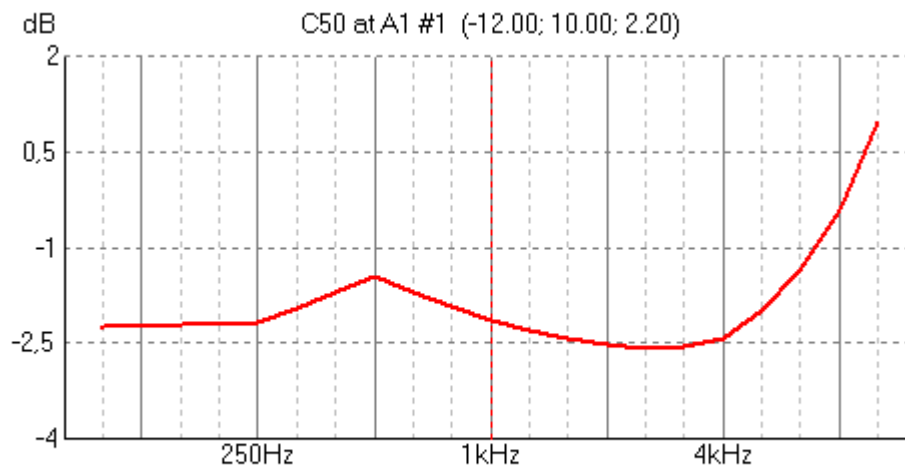
Rysunek 2. Wykres czasu pogłosu wg symulacji akustycznej

Wykres wizualizuje wyrównany poziom czasu pogłosu, będący w normie przyjętej dla Oper w zakresie 1.3-1.6s. Czas pogłosu w rzeczywistości może być nieznacznie wyższy od zasymulowanego.

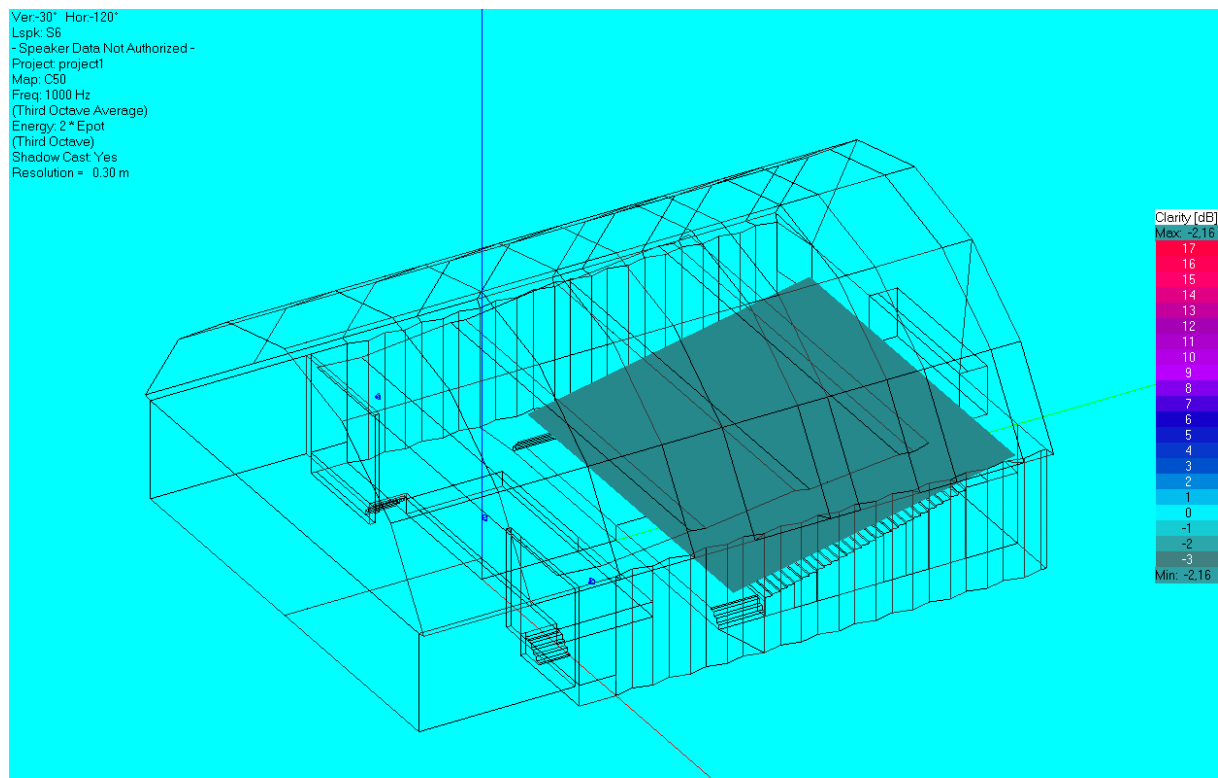
Innymi parametrami określającymi akustycznymi, odpowiedzialnymi za przejrzystość słowa lub odtwarzanej muzyki są parametry C50 (dla słowa) oraz C80 (dla muzyki).

W modelu Ease 4.1 zasymulowano spodziewany poziom C50 i C80 dla częstotliwości 1kHz.

- Symulacja parametru przejrzystości mowy C50. W dużych pomieszczeniach wartości powyżej -5dB uważane są za dobre



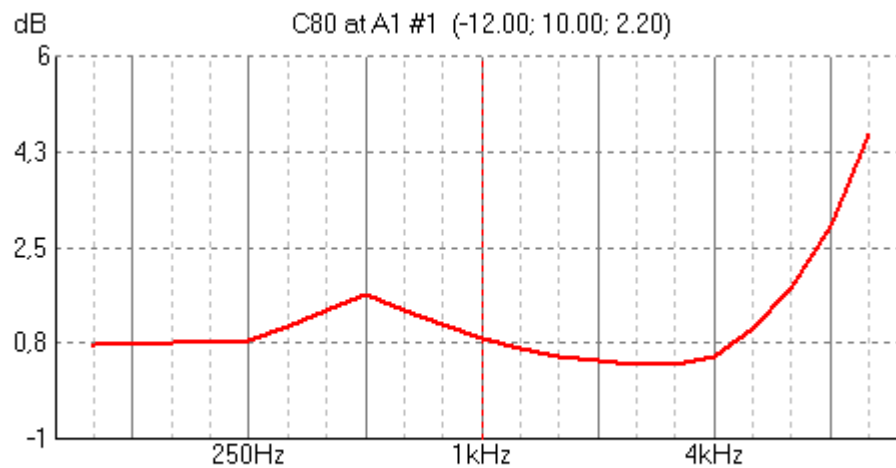
Rysunek 3. Wykres C50



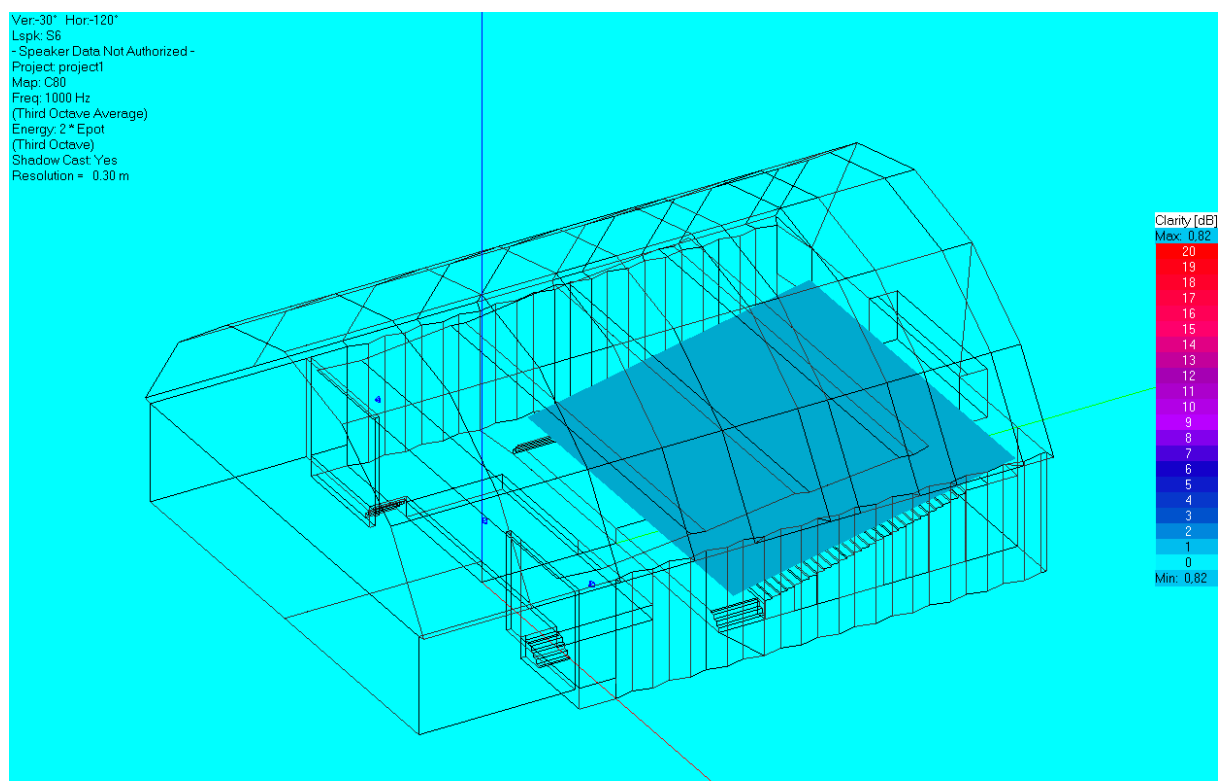
Rysunek 4. Symulacja parametru przejrzystości mowy C50



- Symulacja parametru przejrzystości muzyki C80. Wartości w przedziale  $\pm 2$  dB są korzystne dla muzyki klasycznej oraz chóru

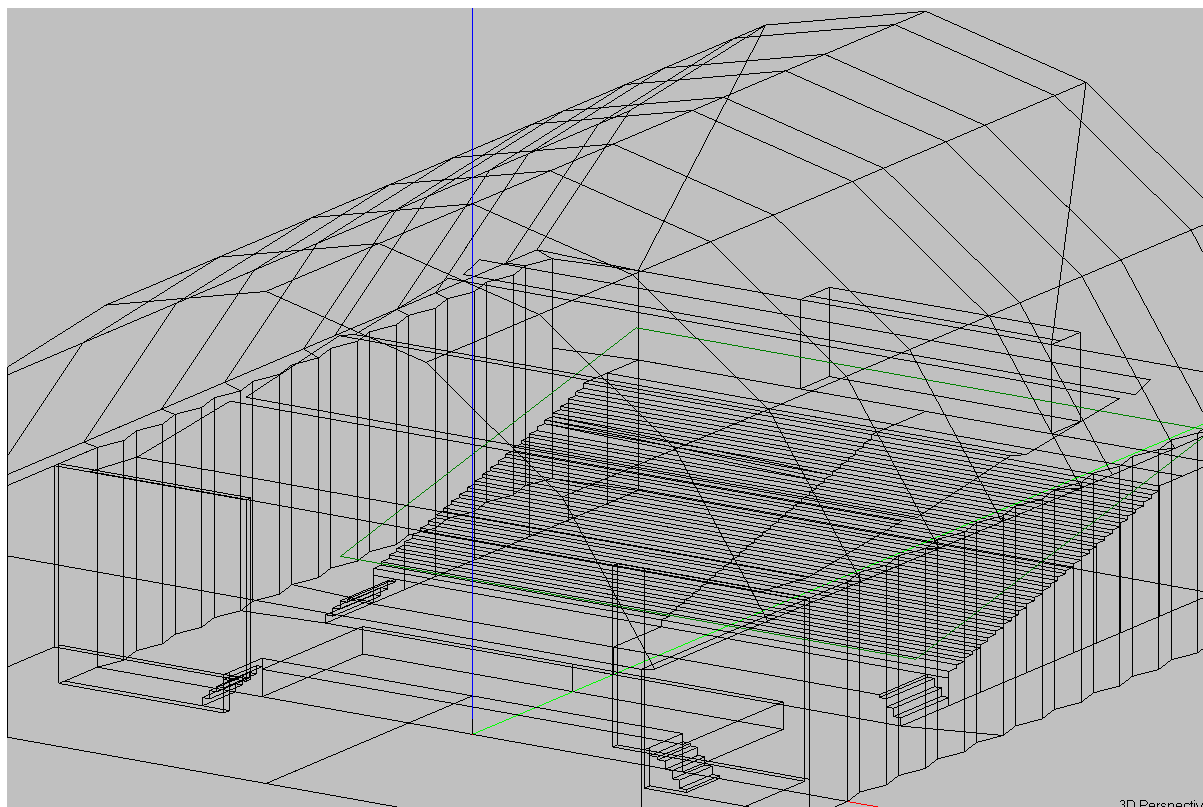


Rysunek 5. Wykres C80



Rysunek 6. Symulacja parametru przejrzystości muzyki C80

## 4. ZASTOSOWANE ROZWIĄZANIA AKUSTYCZNE



Rysunek 7. Model obliczeniowy

### *Uwagi ogólne*

Zaleca się zastosowanie podkładów gumowych w miejscach posadowienia na fundamentach konstrukcji metalowych obiektu w celu minimalizacji przenoszenia drgań konstrukcji w zakresie niskich częstotliwości. Dodatkowo wszystkie łączenia elementów konstrukcyjnych sufitów podwieszanych jak również ustrojów akustycznych należy izolować podkładami gumowymi z uwagi na przebiegającą w pobliżu trację tramwajową.

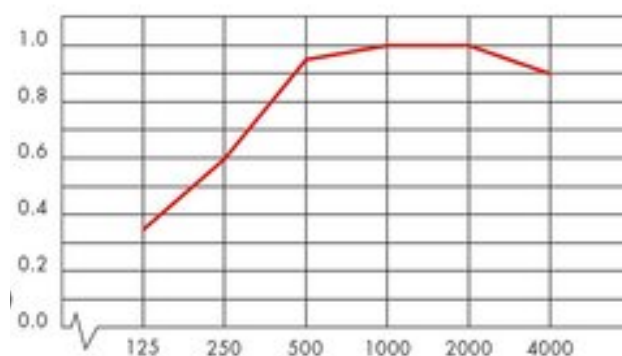
W celu uzyskania optymalnych parametrów akustycznych brano pod uwagę takie czynniki jak:

- stosunkowo niewielka gęstość i waga/m<sup>2</sup> zastosowanych materiałów akustycznych, aby nie obciążać nadmiernie elementów konstrukcji,
- niskie koszty ustrojów akustycznych, biorąc pod uwagę tymczasowość rozwiązania,
- łatwość montażu i demontażu elementów akustycznych,
- uniwersalność materiałów umożliwiającą ponowne wykorzystanie.

Zaproponowano następujące materiały akustyczne:

### *Wariant 1*

- Akustyczny sufit Ecophon Combison Duo E. Stosuje się go jako sufit podwieszany i jednocześnie jako dobrą izolację przeciwdźwiękową pomiędzy pomieszczeniami, co ma duże znaczenie w tym zastosowaniu. System składa się z płyt Ecophon Combison Duo E i konstrukcji nośnej Connect o łącznej przybliżonej masie 14 kg/m<sup>2</sup>. Poniżej przedstawiono współczynnik pochłaniania dźwięku przez sufit akustyczny.

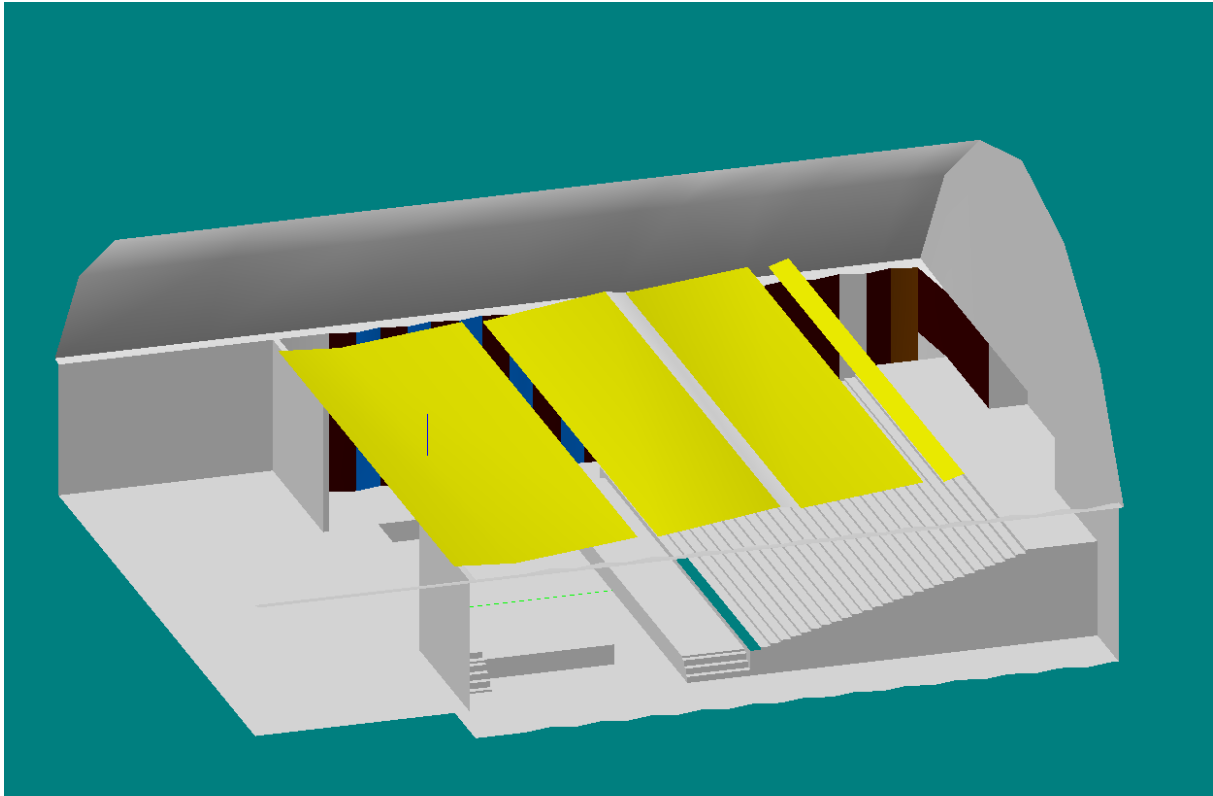


Rysunek 8. Wykres współczynnika pochłaniania sufitu Ecophon

- Na ścianach bocznych zaproponowano konstrukcję akustyczną w kształcie harmonijki, wykonany przez ekrany akustyczne wykonane z płyty kartonowo-gipsowej o grubości 9,50mm wraz z 50mm przestrzenią powietrzną. Ożebrowanie pomiędzy ścianą zewnętrzną a płytą kartonowo-gipsową powinno być wykonane z drewna izolowanego materiałem- tkaniną.
- Na ścianach bocznych zamiennie zaproponowano płytę ze sklejkę o grubości 6mm wraz z 50mm przestrzenią powietrzną. Podobnie ożebrowanie pomiędzy ścianą boczną a płytą powinno być wykonane z drewna izolowanego materiałem- tkaniną.
- Na ścianach bocznych sceny zaproponowano płytę ze sklejkę o grubości 6mm wraz z 50mm przestrzenią powietrzną.
- Jako ścianę orkiestronu zaproponowano ustroje akustyczne Porfles charakteryzujące się dużym tłumieniem fal dźwiękowych. Poniżej przedstawiono wykres wizualizujący pochłanianie fal dźwiękowych dla poszczególnych częstotliwości.

## Wariant 2

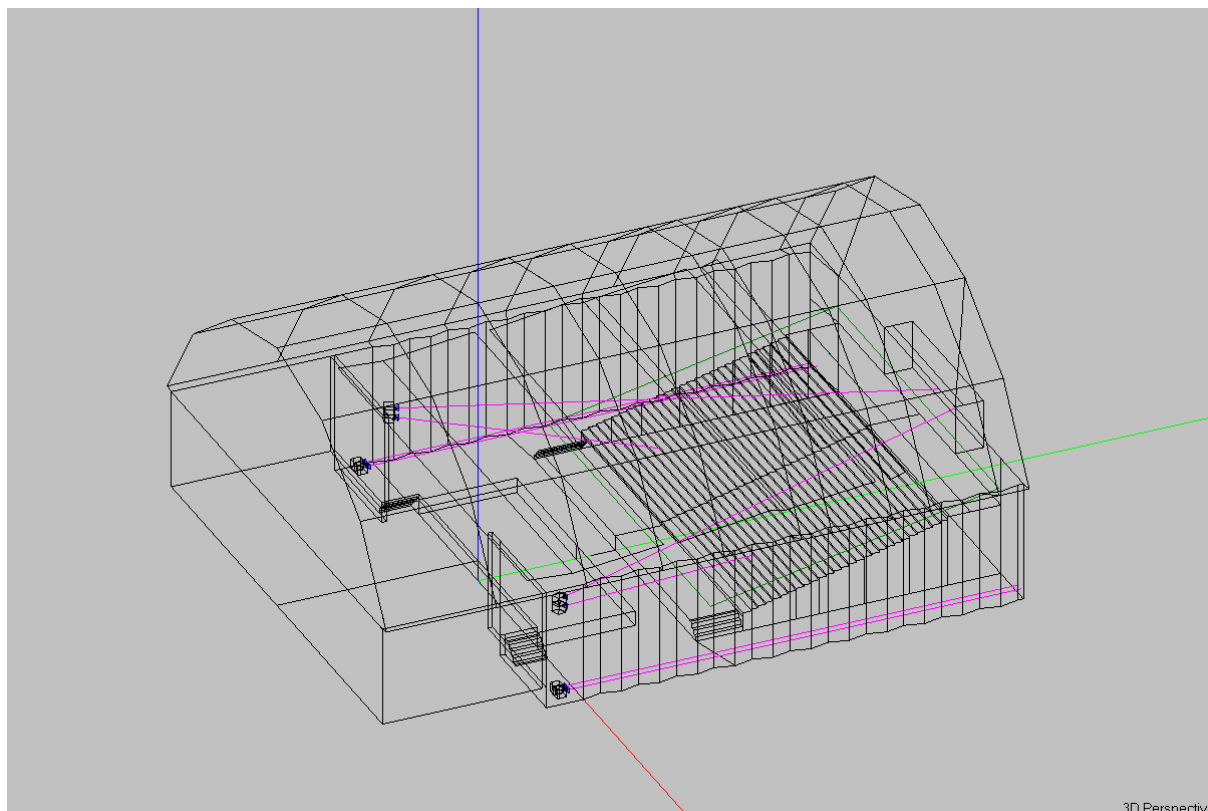
- Akustyczny sufit umożliwiający odbicie i rozproszenie dźwięku oraz w nieznacznym zakresie pochłonięcie. Sufit powinien być wykonany ze sklejk o grubości 0,95cm oraz przyklejanej na sklejkę wełnę mineralną o grubości 40mm. Sufit należy montować pod kątem według rysunku, aby fale dźwiękowe były odbijane i rozpraszane w kierunku przeciwnym do sceny.
- Na ścianach bocznych zaproponowano konstrukcję akustyczną w kształcie harmonijki, wykonanej z 2 elementów. Pierwszy z nich to wełna mineralna o grubości 2” osłonięta niepalną tkaniną umieszczona w ożebrowaniu-konstrukcji z drewna. Wełna mineralna powinna być umieszczona na ścianach bocznych w tylnej części Sali – na całej długości, oraz naprzemiennie z płytą ze sklejki na pozostałej części ścian bocznych Sali Widowiskowej. Drugi element to płyta ze sklejki o grubości 6mm wraz z 50mm przestrzenią powietrzną. Ożebrowanie pomiędzy ścianą boczną a płytą powinno być wykonane z drewna izolowanego materiałem- tkaniną. Rozmieszczenie ekranów akustycznych przedstawia rysunek poniżej. Jeśli jest taka możliwość, sugeruje się, aby tylne ściany były wypełnione również wełną mineralną o grubości 5,08.
- Na ścianach bocznych Sceny zaproponowano płytę ze sklejki o grubości 6mm wraz z 50mm przestrzenią powietrzną.
- Jako ścianę orkiestry zaproponowano ustroje akustyczne Porfiles charakteryzujące się dużym tłumieniem fal dźwiękowych. Poniżej przedstawiono wykres wizualizujący pochłanianie fal dźwiękowych dla poszczególnych częstotliwości.



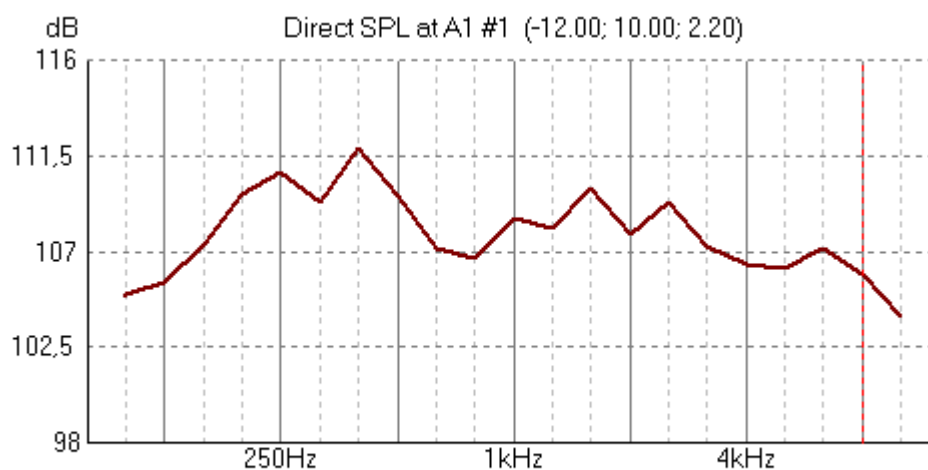
Rysunek 9. Sugerowane rozmieszczenie materiałów akustycznych - perspektywa

Sugerowane rozmieszczenie materiałów akustycznych. Kolor brązowy- wełna mineralna o grubości 5,08 (na całej tylnej długości Sali Widowiskowej oraz naprzemiennie ze sklejką 6mm). Kolor niebieski – sklejka 6mm z warstwą powietrza. Kolor żółty akustyczny ekran powieszany wykonany ze sklejką wraz z wełną mineralną o grubości 40mm.

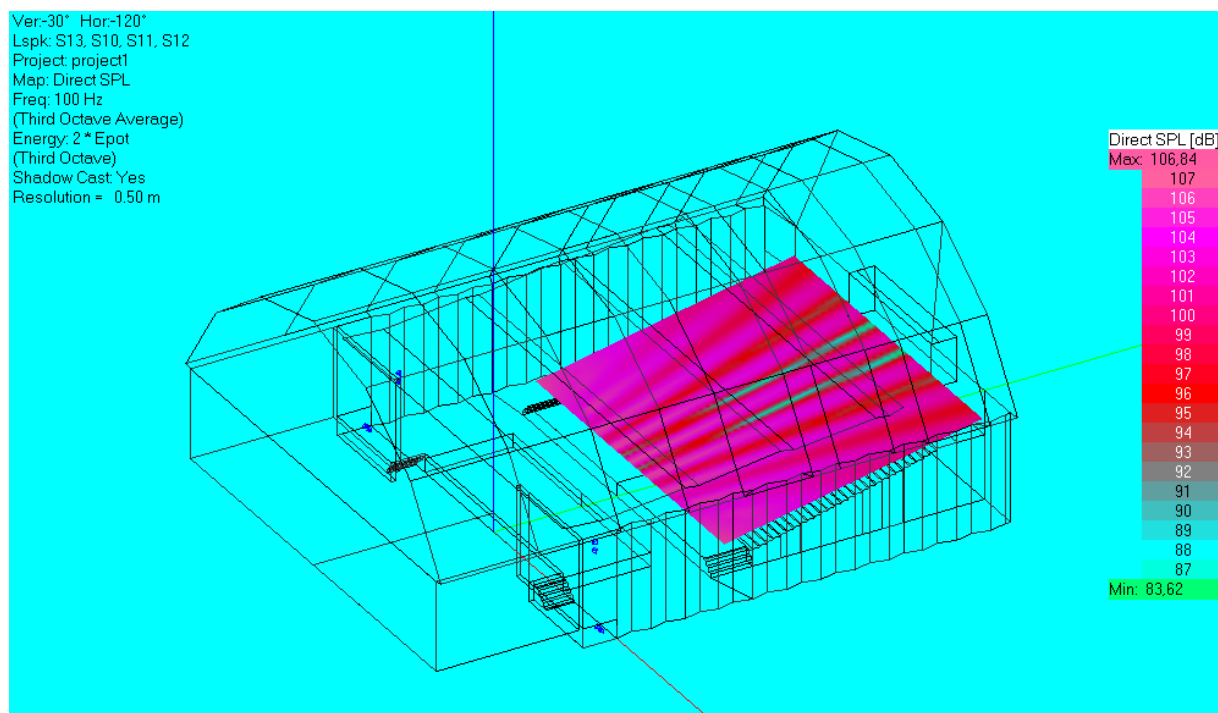
## 5. Symulacja propagacji dźwięku w obiekcie z zastosowaną adaptacją akustyczną.



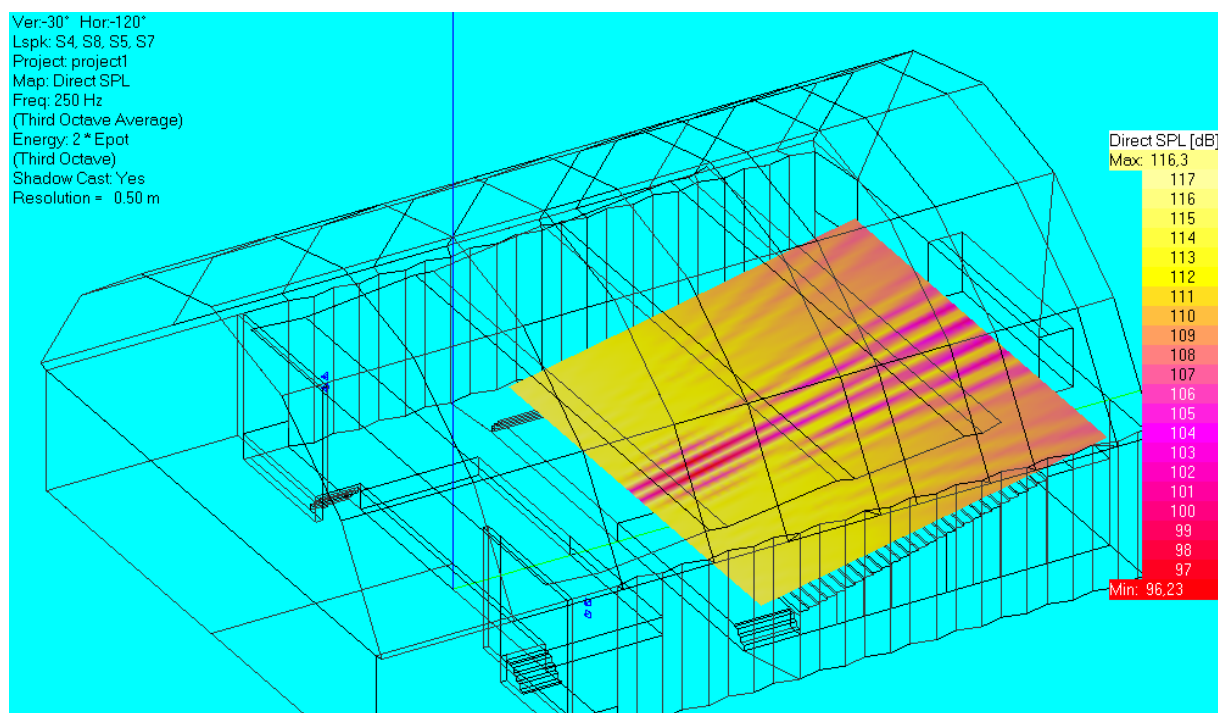
Rysunek 10. Symulacja propagacji dźwięku - model, rozmieszczenie źródeł dźwięku



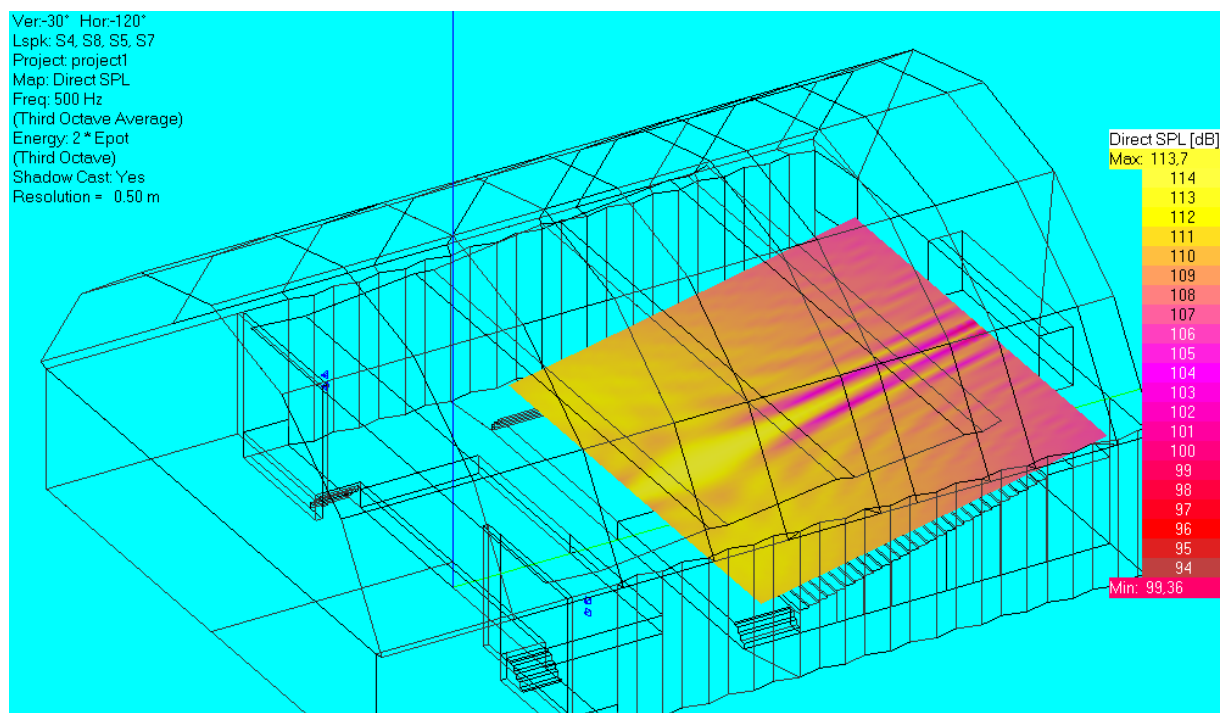
Rysunek 11. Wykres ciśnienia akustycznego w funkcji częstotliwości



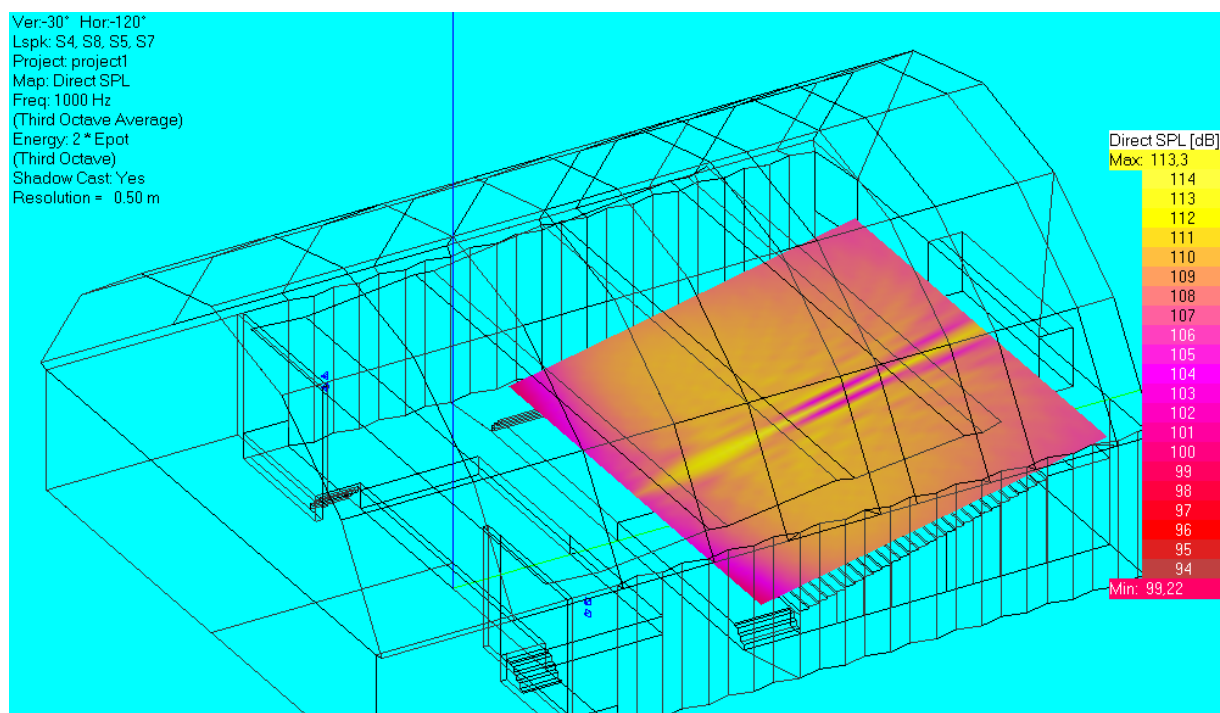
Rysunek 12. Dźwięk bezpośredni dla 100Hz



Rysunek 13. Dźwięk bezpośredni dla 250Hz

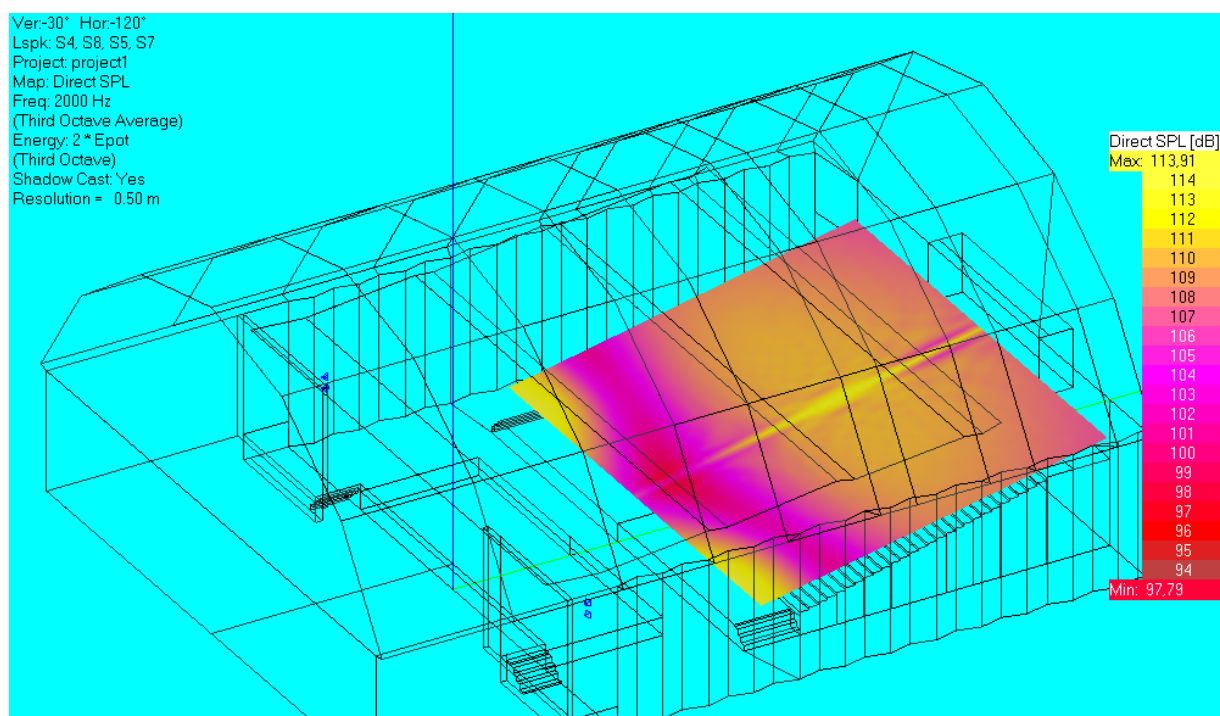


Rysunek 14. Dźwięk bezpośredni dla 500Hz

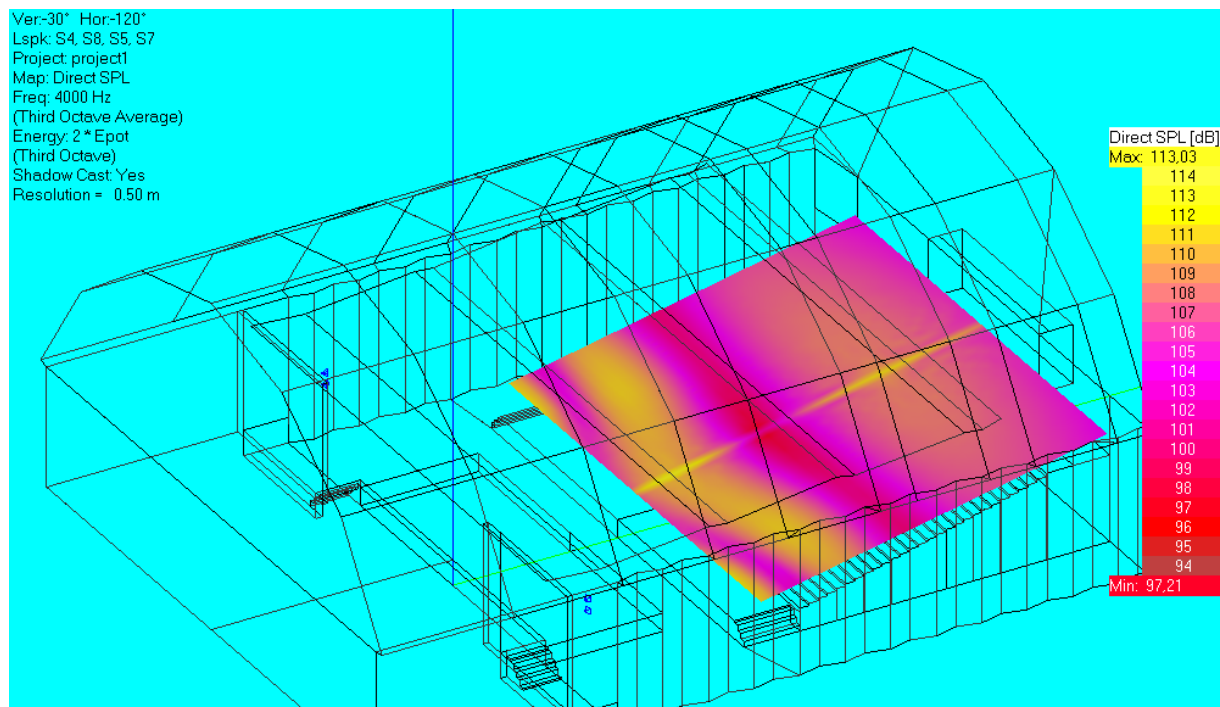


Rysunek 15. Dźwięk bezpośredni dla 1000Hz





Rysunek 16. Dźwięk bezpośredni dla 2000Hz

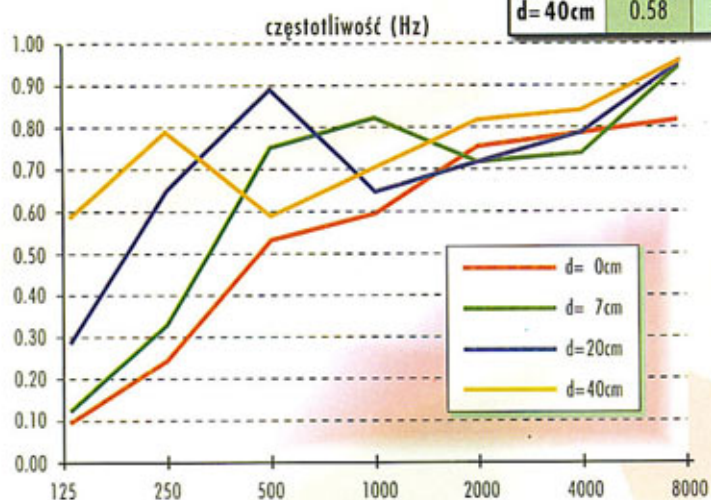


Rysunek 17. Dźwięk bezpośredni dla 4000Hz

## Karta katalogowa ustroju akustycznego Porfles

### współczynnik pochłaniania dźwięku płyt PORFLES

f(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
d= 0cm	0.09	0.24	0.51	0.60	0.75	0.78	0.81
d= 7cm	0.11	0.33	0.75	0.81	0.72	0.73	0.93
d= 20cm	0.28	0.65	0.88	0.67	0.72	0.79	0.93
d= 40cm	0.58	0.78	0.59	0.70	0.81	0.83	0.95



### współczynnik pochłaniania dźwięku płyt PORFLES z włókniną POROSO 1000 pod płytą

f(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
d= 0cm	0.17	0.43	0.85	0.92	0.95	0.92	0.92
d= 7cm	0.26	0.65	1.02	0.93	0.88	0.89	0.93
d= 20cm	0.46	0.85	1.02	0.90	0.96	0.91	0.90
d= 40cm	0.67	0.85	0.84	0.89	0.96	0.94	0.95

