

# **Projekt akustyczny**

## **Muszli koncertowej w Połańcu**

Lokalizacja: Przy ul. Królowej Jadwigi, dz. nr 6835/7  
28-230 Połaniec

Zamawiający: Miasto i Gmina Połaniec  
ul. Ruszczańska 27  
28-230 Połaniec

Projektował: mgr akustyk Piotr Zajkiewicz

Opracował: mgr akustyk Piotr Zajkiewicz

Data opracowania: luty 2014r.

## **1. Wstęp**

W dniu 4 stycznia w Połańcu odbył się przegląd obiektu pn. Muszla koncertowa. W ramach przeglądu sprawdzono stan obecny muszli i porównano jej bryłę oraz wykonanie z dostarczonymi projektami wykonawczymi. Następnie wykonano pomiary akustyczne w celu zdefiniowania ewentualnych usterek akustycznych oraz ich skalę.

## **2. Przedmiot**

Przedmiotem opracowania jest akustyczny projekt Muszli koncertowej w Połańcu

## **3. Cel i zakres**

Celem opracowania jest zdefiniowanie usterek akustycznych Muszli koncertowej i zaprojektowanie rozwiązań, które ograniczą lub wyeliminują ich występowanie podczas normalnego korzystania z muszli zgodnie z jej przeznaczeniem.

Szczegółowy zakres obejmuje:

- pomiary akustyczne wewnątrz Muszli koncertowej w celu zdefiniowania szkodliwych efektów i oceny aktualnej akustyki (pomiar poza normalizacją, wyłącznie dla potrzeb projektowych)
- projekt akustyczny Muszli koncertowej tzw. adaptacja akustyczna
- wykaz materiałów dla potrzeb wykonania adaptacji akustycznej obiektu

## **4. Podstawa opracowania**

- [1] Zlecenie firmy Multimedia24 oraz ustalenia ze Zleceniodawcą
- [2] Kopie rysunków architektonicznych Muszli koncertowej w formacie PDF, JPG, DWG
- [3] PN-EN ISO 3382-1:2009 Akustyka - Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń, Część 1: Pomieszczenia Specjalne
- [4] Akustyka architektoniczna, PWN 1976
- [5] F. Alton Everest & Ken C. Pohlmann, Master Handbook of Acoustic, Fifth Edition
- [6] Katalogi i aprobaty techniczne

## **5. Charakterystyka obiektu**

Muszla koncertowa pełni funkcję letniej sceny gromadząc mieszkańców Połania i okolic, a także turystów. Organizowane są tu liczne imprezy, wydarzenia kulturalne i widowiska oraz koncerty gwiazd. Muszla zlokalizowana jest niemal w centrum Połania przy ul. Królowej Jadwigi. Od stron północnej i wschodniej otaczają ją budynki mieszkalne. Od strony południowej graniczy z ogródkami działkowymi, natomiast od zachodu sąsiaduje z placem zabaw i skate parkiem.

Bryła muszli jest nieregularna. Jej wszystkie kluczowe elementy konstrukcyjne tj. dach, ściany boczne oraz ścianę tylną można wpisać w okrąg.

Wymiary muszli:

- szerokość do strony publiczności - 18 m
- szerokość tylnej części - 11,7 m
- długość (od tylnej ściany do końca dachu od strony publiczności) – 23 m
- wysokość w najwyższym punkcie (wewnątrz) - 8,6 m

Kubatura muszli wynosi około 1 920 m<sup>3</sup>. Obiekt oddano do użytku w 1994 roku.

Podczas dokładnych obserwacji Muszli koncertowej stwierdzono, że:

- kształt muszli jest zgodny z dostarczonymi projektami wykonawczymi

- kopuła jest wykonana w tradycyjnej technologii, jest to płyta żelbetowa
- podłoga jest betonowa bez wykończenia drewnianego, które to przewidywał pierwotny projekt budowlany
- materiał z jakiego wykonano muszlę oraz podłogę sceny są silnie odbijające
- kształt muszli sprzyja wielu niekorzystnym zjawiskom akustycznym np. ogniskowaniu się dźwięku i wielokrotnym odbiciom co w efekcie powoduje pogłosowość i echo trzepoczące

## **6. Pomiary akustyczne**

Należy pamiętać, że Muszla koncertowa jest obiektem otwartym i wykonanie pomiarów w rozumieniu np. Polskich Norm nie jest możliwe. Natomiast korzystając z odpowiedniego sprzętu i doświadczenia przy podobnych pomiarach wewnątrz, można zdiagnozować mankamenty akustyczne, np. efekt echa lub niekorzystnego pogłosu dla częstotliwości oktaowych oraz miejsce w którym określony defekt osiąga wartość ekstremalną.

### **6.1. Zestawienie sprzętu pomiarowego**

- miernik poziomu dźwięku I klasy dokładności
- głośnik wszechkierunkowy
- wzmacniacz mocy
- laptop z oprogramowaniem ARTA i generatorem szumu różowego
- stacja pogody
- statywy

### **6.2. Opis pomiarów**

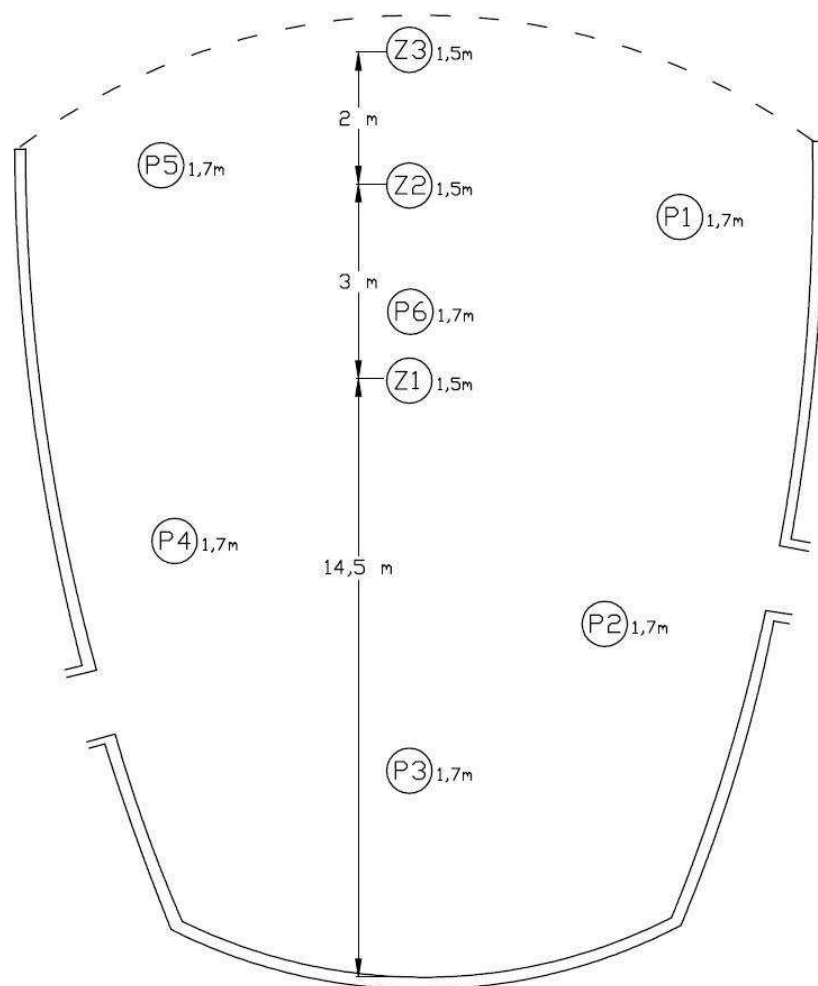
Pomiary wykonano w dniu 4 stycznia w godz. 12:45 – 14:10 przy temperaturze otoczenia 8°C. W celu zdefiniowania usterek akustycznych wewnątrz Muszli pobudzano szumem różowym oraz sygnałami typu sweep i sinus w paśmie 20 Hz – 20 kHz. Pomiary czasu pogłosu wykonano w oparciu o PN [3] metodą szumu przerywanego.

Do celów poglądowych wykonano również pomiar głośnikiem niskotonowym w wyniku którego otrzymano charakterystykę częstotliwościową Muszli koncertowej z zakresu niskich częstotliwości 20-250 Hz.

### **6.3. Wyniki pomiarów**

#### **6.3.1 Czas pogłosu**

Źródło sygnału umieszczono na wysokości 1,5 m natomiast mikrofon na wysokości 1,7 m. Miejsce lokalizacji źródła sygnału oraz punktów pomiarowych przedstawiono na rys. 1. W każdym punkcie wykonano 6 pomiarów, a wyniki uśredniono.



Rys. 1. Rozmieszczenie źródła sygnału pomiarowego Z i punktów pomiarowych P

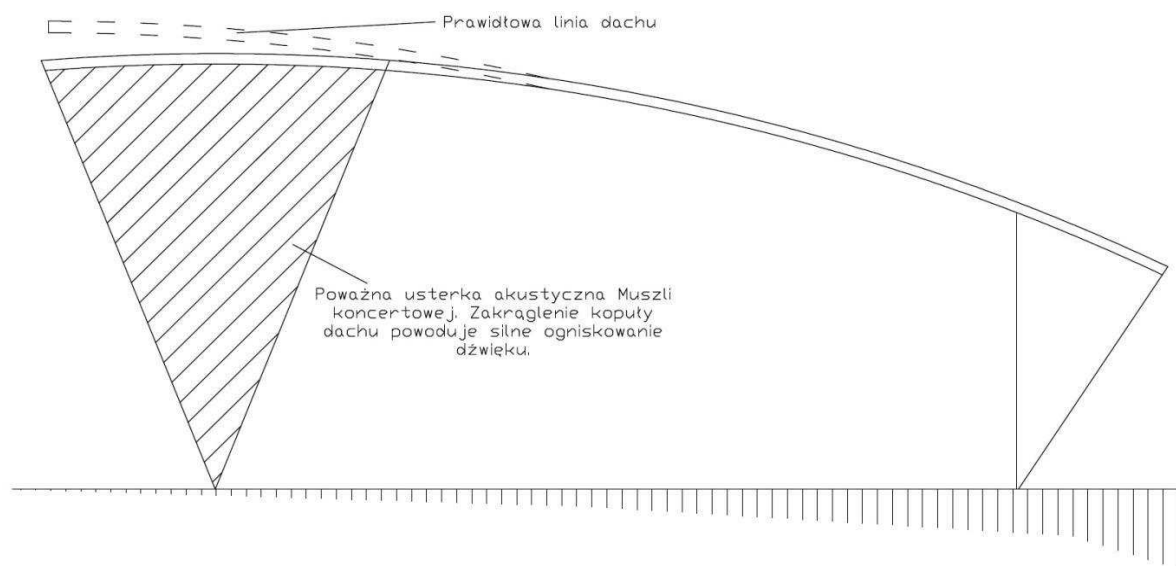
W tabeli 1 zestawiono wyniki pomiarów dla lokalizacji źródła sygnału w pkt Z2 o najmniej korzystnej akustyce.

Tabela 1 Wyniki pomiarów czasu pogłosu Muszli koncertowej dla źródła sygnału Z2

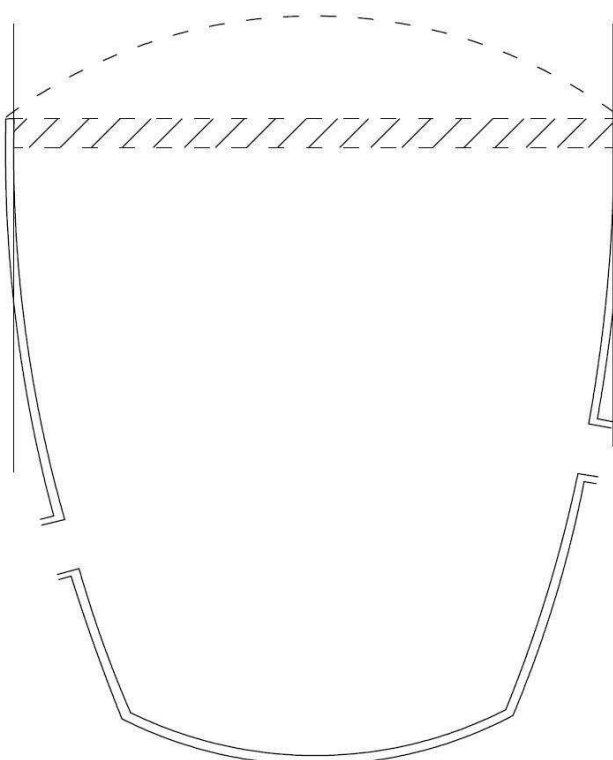
f[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
RT60 P1	5,58 s	11,43 s	12,80 s	10,14 s	6,04 s	2,73 s
RT60 P2	5,35 s	5,45 s	7,82 s	7,83 s	5,23 s	1,82 s
RT60 P3	4,71 s	4,06 s	8,33 s	7,85 s	5,34 s	1,84 s
RT60 P4	4,56 s	9,34 s	10,76 s	8,63 s	5,87 s	2,58 s
RT60 P5	6,04 s	11,86 s	12,98 s	9,76 s	6,16 s	2,52 s
RT60 P6	5,45 s	11,08 s	11,99 s	9,92 s	6,06 s	2,64 s

### 6.3.2 Lokalizacja usterek akustycznych

W celu zdefiniowania usterek akustycznych przygotowano wykonanie specjalnego pomiaru. Polegał on na przemiataniu wnętrza sygnałem sinusoidalnym równoległe z przemieszczaniem źródła sygnału. Tego typu pomiar miał na celu określenie miejsca w którym problemy z akustyką Muszli są najbardziej dokuczliwe. Wnioski z tego pomiaru zastały zawarte na rysunku 2.



Rys. 2. Wizualizacja usterki akustycznej wynikającej z niewłaściwej linii dachu



Rys. 3. Wizualizacja usterki akustycznej wynikającej z równoległości ścian na odcinku ok. 1,5 - 2 m

#### **6.4. Wnioski z pomiarów**

Pomiary akustyczne pozwalają na obiektywną ocenę wnętrza oraz na dość precyzyjną definicję wszelkich usterek akustycznych. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów możemy sformułować następujące wnioski:

- wewnątrz muszli występują efekty silnego pogłosu i echa trzepoczącego
- siła niekorzystnych zjawisk jest zależna od miejsca w którym zlokalizowane jest źródło dźwięku
- niekorzystny efekt echa rośnie wraz z oddaleniem się źródła dźwięku od tylnej części muszli w kierunku publiczności. Nasila się w odległości ok 11m od tylnej ściany i osiąga ekstremum w okolicach 17,5 metra dokładnie w osi symetrii obiektu. Bezpośrednią przyczyną tego defektu jest „niefortunny” kształt Muszli w tym miejscu. Kształt Muszli jako wycinek okręgu silnie ogniskuje dźwięk, a dodatkowo ściany muszli w tym miejscu (przy podłodze) są równoległe
- czas pogłosu w okolicach krytycznego miejsca (źródło sygnału Z2, pkt. pomiarowe P1, P4, P5, P6) znacznie przekracza 10 s w paśmie 250 Hz – 1 kHz

#### **7. Adaptacja akustyczna**

Muszla koncertowa jest obiektem znanym akustyce od kilku wieków. Podstawową funkcję jaką pełniła, a mówimy o czasach kiedy nie istniała aparatura nagłaśniająca, było ogniskowanie i wzmacnianie dźwięku na widowni. Jej kształty na przestrzeni lat ulegały ewolucji, czy modyfikacji jednak miały wiele cech wspólnych, a te najlepsze cechowało przede wszystkim:

- kształt przypominającym muszlę
- brak równoległych wewnętrznych elementów konstrukcyjnych
- mała głębokość w stosunku do całkowitej objętości

##### **7.1. Założenia projektowe**

Projekt adaptacji akustycznej wnętrza Muszli koncertowej będzie zapewniał:

- neutralizację elementów silnie ogniskujących dźwięk wewnątrz Muszli
- ograniczenie lub eliminację echa i nadmierną pogłosowość wnętrza tak, aby czas pogłosu nie wpływał negatywnie na normalne korzystanie z obiektu zarówno przez artystów jak i publiczność.
- odprowadzić w kierunku publiczności możliwie jak najwięcej energii akustycznej, co oznacza, że większość pierwszych odbić od wszystkich naturalnych źródeł dźwięku jakie będą funkcjonowały na scenie Muszli, będzie skierowana poza jej wnętrze.

##### **7.2. Projekt adaptacji akustycznej**

Projekt adaptacji akustycznej Muszli koncertowej będzie się składał z 3 podstawowych rozwiązań:

1. Neutralizacja elementów ogniskujących dźwięk na scenie poprzez zastosowanie ekranów akustycznych i elementów pochłaniających nad sceną Muszli.

Ekrany akustyczne muszą być wykonane z elementów silnie odbijających dźwięk takich jak np. płyta z poliwęglanu, czy akrylu o grubości 6 - 10mm, czy sklejka liściasta o grubości od 25 do 45mm. Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie ekranu zespolonego jako jedna zwarta konstrukcja, który może być wykonany z płyt, paneli lub desek np. z drzewa egzotycznego. Elementy ekranu czy sufit powinny być podwieszone bezpośrednio do Muszli na stelażu stalowym. Przestrzeń nad elementami ekranującymi należy wypełnić panelami

Uchwyt do mocowania ekranów z poliwęglanu

Ekran z poliwęglanu

Ścianki wystylające

Ścianki wydzielnice pomieszczenia

40

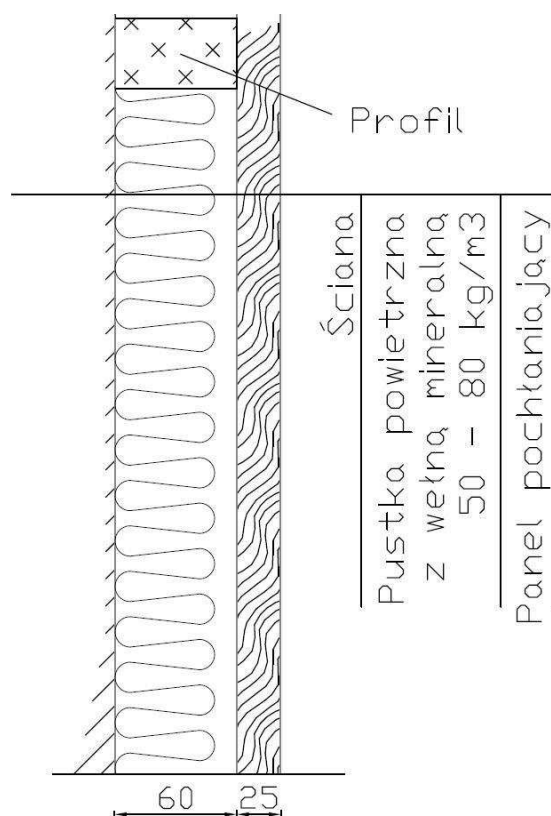
150

18

305

300

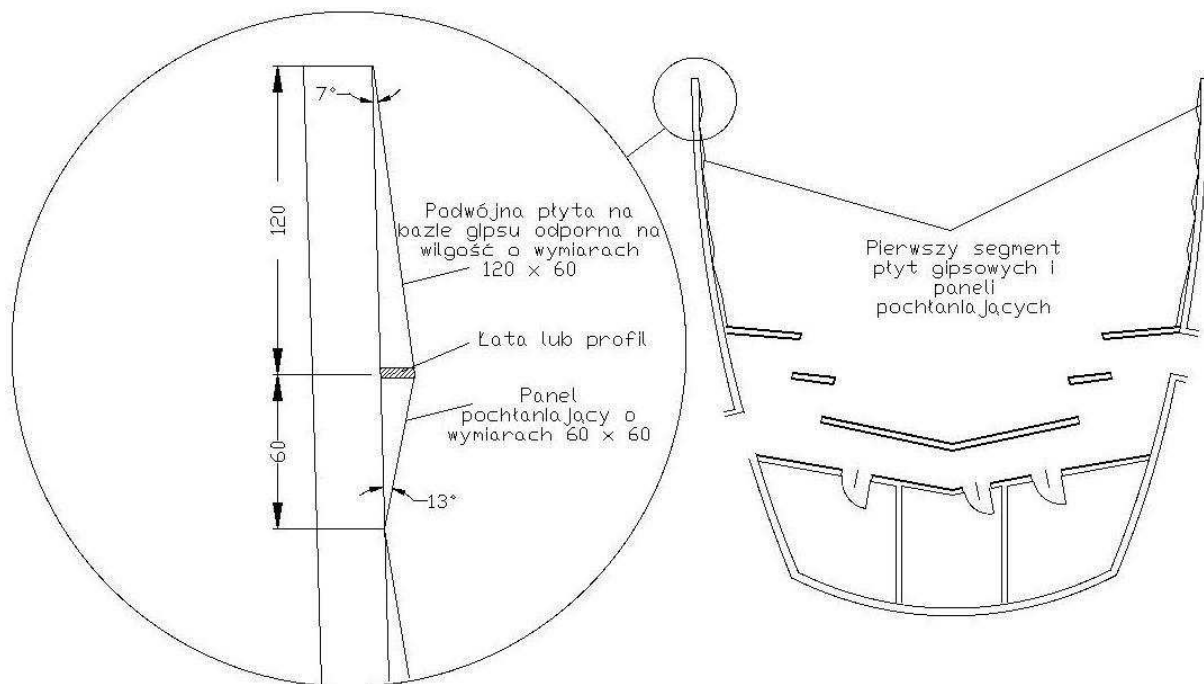
7



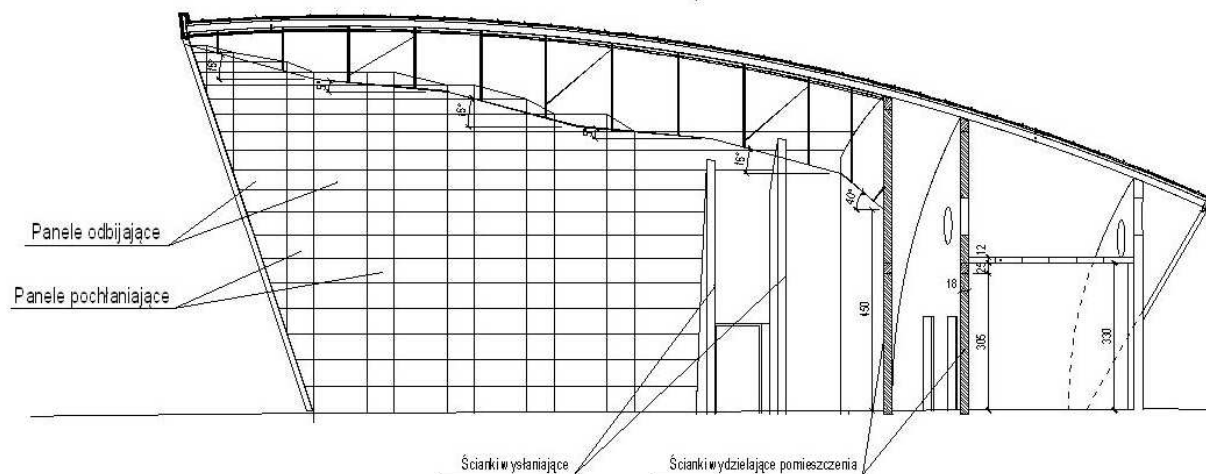
Rys. 6. Panele pochłaniające układane w części muszli nad ekranami odbijającymi

2. Ograniczenie efektu echa poprzez częściowe zastosowanie elementów pochłaniających oraz odbijających dźwięk umieszczonych na ścianach Muszli w części pod ekranami odbijającymi. Elementy odbijające należy wykonać z podwójnej płyty gipsowej o grubości 12,5 mm odpornej na wilgoć (Załącznik 3). Format płyty może być dowolny. W projekcie zastosowano rozwiązanie z wykorzystaniem płyt o formacie 120 cm x 60 cm.. Elementy pochłaniające należy wykonać z paneli dźwiękochłonnych o formacie 60 cm x 60 cm (Załącznik 4). Zastosowanie omawianych elementów pokazano na rys. 7 i 8.
  
3. Skierowanie energii akustycznej naturalnych źródeł dźwięku znajdujących się na scenie zostanie uzyskane dzięki umieszczeniu elementów odbijających dźwięk pod odpowiednim kątem. Elementy odbijające należy umieścić pod kątem  $5^{\circ}$  -  $8^{\circ}$ , natomiast pochłaniające [60 x 60] pod kątem  $10^{\circ}$  –  $15^{\circ}$  [rys. 7 i 8].





Rys. 7. Rozwiązanie układu paneli odbijających i pochłaniających dźwięk na ścianach muszli w części pod ekranami (sufitem) akustycznymi



Rys. 8. Rozwiązanie układu paneli odbijających i pochłaniających dźwięk na ścianach muszli w części pod ekranami (sufitem) akustycznymi – widok w przekroju

Można zastosować rozwiązanie alternatywne - zamiast podwójnej warstwy płyt można zastosować dowolną konstrukcję z elementów silnie odbijających dźwięk lub litą konstrukcją żelbetową. Natomiast zamiast elementów pochłaniających można zastosować dyfuzory Schroedera 1D lub odpowiednie rozrzeźbienie tej części konstrukcji, wykonane z litej warstwy żelbetowej. Rozwiązania opcjonalne wymagają oddzielnego projektu.

Ścianki wystaniające oraz ścianki wydzielające pomieszczenia (rys. 5) powinny zostać pokryte od strony widowni tynkiem silikonowym (Załącznik 5) a od strony pomieszczeń powinny zostać pokryte tynkiem akustycznym (Załącznik 6).

## **8. Podsumowanie**

W celu wyeliminowania usterek akustycznych wskazane byłoby wykonanie podłogi w zadaszonej części sceny zgodnie z pierwotnym projektem budowlanym. Jednakże z uwagi na ograniczenia finansowe dopuszcza się rozwiązanie w systemie elastycznym izolacyjno – nawierzchniowym (tj. posadzkę epoksydowo – poliuretanową z wypełnieniem piaskiem kwarcowym).

Zaproponowane rozwiązania oparto o materiały, które posiadają odpowiednie certyfikaty i atesty oraz nadają się do użytkowania w środowisku zewnętrznym zadaszonym.

Zaleca się, aby podczas realizacji był prowadzony nadzór specjalisty z zakresu akustyki wnętrz nad częścią wykonawczą projektu akustycznego, szczególnie w przypadku zastosowania rozwiązania innego niż referencyjne.

Panel pochłaniający – wymagane właściwości i parametry techniczne:

1. 1-warstwowa płyta akustyczna z wełny drzewnej wiązanej magnezytem, wielkość włókna ok. 2 mm, skuteczna akustycznie i zalecana do budownictwa ekologicznego,
2. Pokrycie preparatem antypleśniowym,
3. Format w mm: 1200 x 600,
4. Grubość w mm: 25,
5. Ciężar w kg/m<sup>2</sup>: 12.4,
6. Wartość współczynnika pochłaniania dźwięku  $\alpha_w$ : do 0.90,
7. Płyta wykonana zgodnie z normą EN 13168,
8. Charakterystyka ogniowa zgodnie z normą EN 13501-1: B - s1, d0 ,
9. Kolor: biały, zbliżony do RAL 9010.

Panel odbijający – płyta z poliwęglanu – wymagane właściwości i parametry techniczne:

- |  |                  |
|--|------------------|
| 1. Poliwęglan lity z warstwą ochronną UV,              |                  |
| 2. Format w mm:  | max. 2050 x 3050 |
| 3. Grubość w mm:                                       | 8                |
| 4. Charakterystyka ogniowa zgodnie z normą DIN 4102:   | B2,              |
| 5. Charakterystyka ogniowa zgodnie z normą EN 13501-1: | B - s1, d0 ,     |
| 6. Kolor:  | bezbarwny.       |

Panel odbijający – wymagane właściwości i parametry techniczne:

1. Do stosowania w środowiskach z bardzo wysoką zawartością wilgoci w powietrzu,
2. Bardzo duża odporność na uderzenia,
3. Rdzeń płyty wzbogacony środkami zmniejszającymi wchłanianie wody oraz eliminującymi powstawanie pleśni,
4. Powłoka zewnętrzna wykonana z materiału na bazie włókna szklanego,
5. Format w mm: 1200 x 600,
6. Grubość w mm: 12.5,
7. Reakcja na ogień EN 13501-1: A2-s1.d0,
8. Wytrzymałość na zginanie pr EN 15283-1, obciążenie niszczące: kierunek wzdłużny > 600 N, kierunek poprzeczny > 280 N,
9. Deklaracja zgodności CE,
10. Atest higieniczny PZH.

Panel pochłaniający – wymagane właściwości i parametry techniczne:

1. 1-warstwowa płyta akustyczna z wełny drzewnej wiązanej magnezytem, wielkość włókna ok. 2 mm, skuteczna akustycznie i zalecana do budownictwa ekologicznego,
2. Pokrycie preparatem antypleśniowym,
3. Format w mm: 600 x 600,
4. Grubość w mm: 35,
5. Ciężar w kg/m<sup>2</sup>: 16.3,
6. Wartość współczynnika pochłaniania dźwięku  $\alpha_w$ : do 0.90,
7. Płyta wykonana zgodnie z normą EN 13168,
8. Charakterystyka ogniowa zgodnie z normą EN 13501-1: B - s1, d0 ,
9. Kolor: biały, zbliżony do RAL 9010.

Tynk silikonowy – wymagane właściwości i parametry techniczne:

1. Wysoka elastyczność i odporność na uderzenia,
2. Wysoka odporność na czynniki atmosferyczne,
3. Wysoka odporność na rozwój grzybów, alg i pleśni,
4. Odporność na deszcz: 24 – 48 godzin,
5. Baza: wodna dyspersja żywic silikonowych i żywic akrylowych z wypełniaczami mineralnymi i pigmentami.

Tynk akustyczny (pochłaniający) – wymagane właściwości i parametry techniczne:

- |  |                 |
|--|-----------------|
| 1. Tynk:   | mineralny       |
| 2. Grubość warstwy tynku w mm:                             | 20,             |
| 3. Wartość współczynnika pochłaniania dźwięku $\alpha_w$ : | 0.60,           |
| 4. Klasa reakcji na ogień:                                 | A1 (niepalny) , |
| 5. Odporność na wilgoć:                                    | 90% RH,         |
| 6. Kolor:  | biały.          |