

POMIARY AKUSTYCZNE

TEATR ANIMACJI,
ul. Święty Marcin 80/82 61-809 Poznań

Autorzy:	dr inż. Krzysztof Brawata	
	dr inż. Katarzyna Baruch-Mazur	
	dr inż. arch. Anna Sygulska	

Spis treści

1	Cel i zakres opracowania	3
2	Definicje.....	3
3	Pomiary parametrów akustycznych wewnątrz	5
3.1	Aula	5
3.2	Przestrzeń sceny	14
3.3	Magazyn dekoracji	14
4	Fotele	15
5	Podsumowanie	16
6	Bibliografia.....	17

1 Cel i zakres opracowania

Zakres prac obejmował:

- przeprowadzenie pomiarów akustycznych zgodnie z normą (PN-EN ISO 3382-1, 2009) wraz z wizją lokalną w sali widowiskowej Teatru Animacji w Poznaniu.
- ocenę warunków akustycznych na podstawie parametrów: czas pogłosu T_{20} , czas wczesnego zaniku EDT, klarowność dźwięku C_{50} i C_{80} , wskaźnik transmisji mowy STI oraz siła dźwięku G .

Podstawą opracowania jest zlecenie z dnia 04.06.2024 r. na usługi doradztwa technicznego, której Zamawiającym jest NMS Architektki, ul. 3 Maja 49c/2a 61-728 Poznań.

2 Definicje

Czas pogłosu T – czas zmniejszenia poziomu ciśnienia akustycznego o 60 dB po wyłączeniu źródła dźwięku wyrażony w sekundach. Jest wyznaczany z krzywej zaniku na podstawie nachylenia prostej regresji liniowej uzyskanej metodą najmniejszych kwadratów w zakresie od 5 dB do 25 dB (T_{20}) poniżej poziomu początkowego (PN-EN ISO 3382-1, 2009).

$$T_{20} = 3 \cdot (t_{-25\text{dB}} - t_{-5\text{dB}}) [\text{s}]$$

Czas wczesnego zaniku (EDT) – sześciokrotna wartość czasu, w którym następuje spadek poziomu dźwięku o 10 dB po wyłączeniu źródła sygnału stacjonarnego, wartość wyrażona w sekundach (PN-EN ISO 3382-1, 2009).

$$\text{EDT} = 6 \cdot (t_{-10\text{dB}} - t_{0\text{dB}}) [\text{s}]$$

Klarowność dźwięku C_t (ang. *Clarity*) – liczbowo określana jest jako stosunek energii docierającej do słuchacza w ciągu czasu t po dźwięku bezpośrednim, do energii pozostałej części odpowiedzi impulsowej (PN-EN ISO 3382-1, 2009)

$$C_{t_e} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{t_e} p^2(t) dt}{\int_{t_e}^{\infty} p^2(t) dt} \right) [\text{dB}]$$

gdzie:

$t_e = 7 \text{ ms}$, 50 ms lub 80 ms ,

$p(t)$ – ciśnienie akustyczne odpowiedzi impulsowej w miejscu odbioru.

Wskaźnik transmisji mowy STI (Speech Transmission Index) – parametr określający zrozumiałość mowy. Zależność pomiędzy zrozumiałością mowy a parametrem STI została podana w tabeli poniżej.

Tabela 1 Ocena zrozumiałości mowy na podstawie wskaźnika STI

STI	Zrozumiałość mowy
> 0,75	bardzo dobra
0,60 – 0,75	dobra
0,45 – 0,59	dostateczna
0,30 – 0,44	słaba
< 0,3	niedostateczna

Siła dźwięku G (ang. *Strength Index*) – miara przyrostu głośności, z jaką jest słyszane dane źródło dźwięku w pomieszczeniu, w porównaniu z głośnością w polu swobodnym w odległości 10 m od źródła (PN-EN ISO 3382-1, 2009).

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} [dB]$$

gdzie:

$p(t)$ – ciśnienie akustyczne odpowiedzi impulsowej w miejscu odbioru w pomieszczeniu,

$p_{10}(t)$ - ciśnienie akustyczne odpowiedzi impulsowej w polu swobodnym w odległości 10 m od źródła.

Dodatkowo można wyodrębnić różne rodzaje parametru G . Różnice polegają na długości czasu, w której obliczana jest energia (G_7 , G_{80} lub G_{early} , G_{late}) lub uśrednione wartości dla pasm częstotliwościowych (G_{mid})

$$G_{\text{mid}} = (G_{500\text{Hz}} + G_{1000\text{Hz}}) / 2 [dB]$$

3 Pomiary parametrów akustycznych wewnątrz

W poniższej tabeli przedstawiono opis warunków pomiarowych w auli i na scenie.

Tabela 2 Opis warunków pomiarowych.

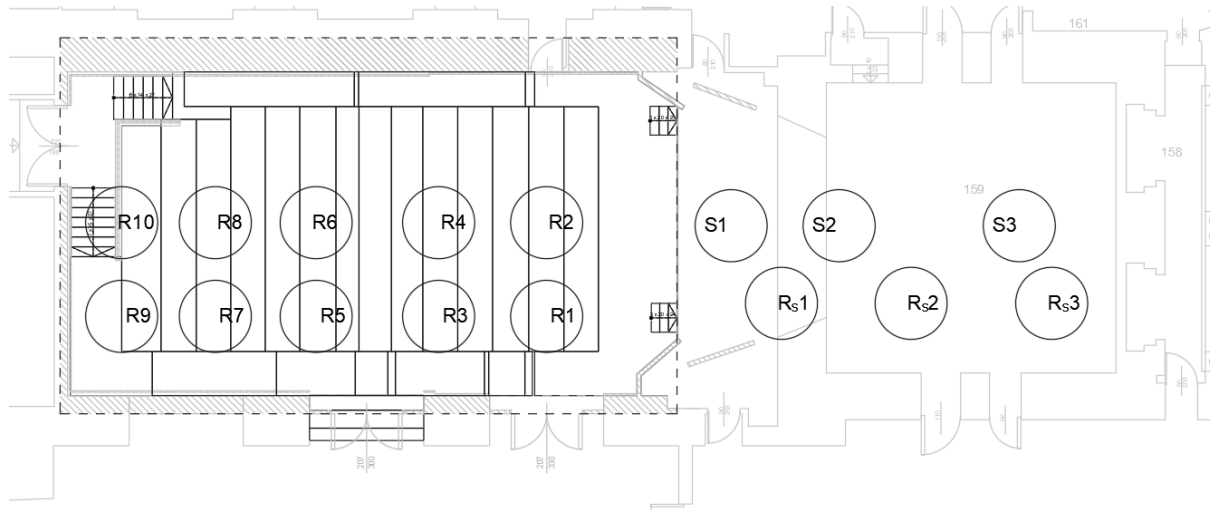
Lp.	Opis	
a	Procedura pomiarowa	Pomiary przeprowadzone zgodnie z normą (PN-EN ISO 3382-1, 2009)
b	Lokalizacja	TEATR ANIMACJI, ul. Święty Marcin 80/82 61-809 Poznań
c	Wymiary gabarytowe pomieszczenia	Ok. 8,9 x 29,0 x 5,3 m (szerokość x długość x wysokość)
d	Objętość pomieszczenia	972 + 208 m ³ (sala + scena)
e	Opis foteli	Fotele bogato tapicerowane
f	Kształt pomieszczenia	Sala z widownią z przewyżką; niewielka scena.
g	Liczba osób	3 osoby
h	Systemy do regulacji akustyki	Brak
i	Otwór sceniczny	Dwie konfiguracje: otwarty i zasłonięty kotarą
j	Wypożyczenie sceny	Brak dekoracji i okotowania
k	Temperatura i wilgotność	-
l	Aparatura pomiarowa	mikrofon pomiarowy G.R.A.S. 40AE 1/2"; przedwzmacniacz SVAN SV 17 IEPE; karta dźwiękowa Behringer UMC 202HD; źródło wszechkierunkowe zgodne z PN-EN ISO 3382-1; wzmacniacz Europower EPQ900; oprogramowanie MATLAB R2022a
m	Sygnał pomiarowy	Sinus przestrajany (ang. <i>sine sweep</i>) ważony
n	Punkty nadawcze i odbiorcze	3 pozycje źródła (S1, S2, S3) 10 pozycji mikrofonów

3.1 Aula

Obecne warunki akustyczne w sali są ocenione przez Użytkownika jako dobre. Z tego względu, z uwagi na planowane prace remontowe, Użytkownik chce utrzymać je na poziomie nie gorszym niż obecny. Na rys. 1 i rys. 2 przedstawiono zdjęcia auli w trakcie sesji pomiarowej oraz rozmieszczenie źródeł dźwięku i odbiorników.



Rys. 1 Aula w trakcie sesji pomiarowej.

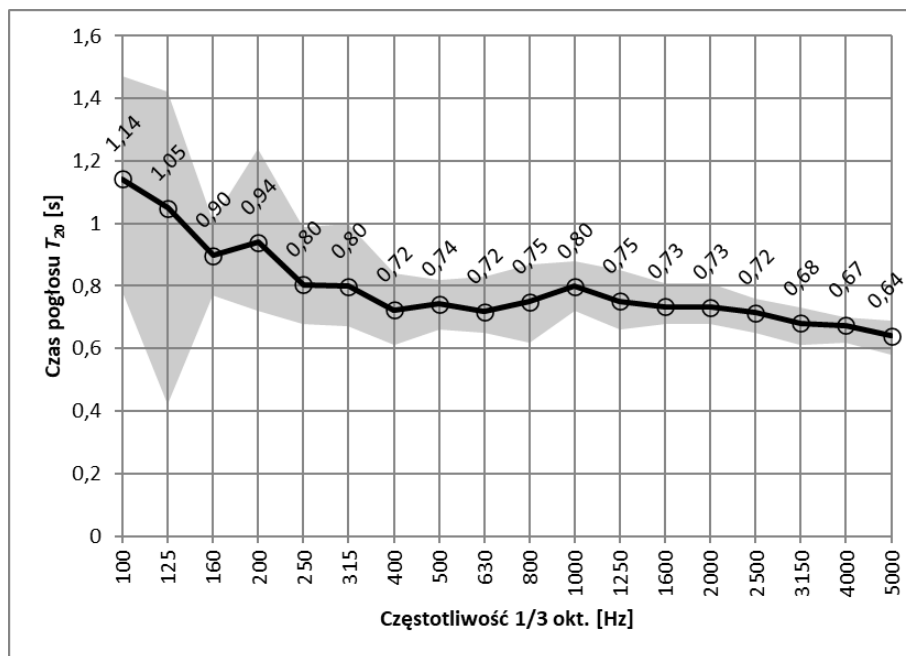


Rys. 2 Układ źródeł na scenie (S1 – S3), punktów pomiarowych na widowni (R1 – R10) i punktów pomiarowych na scenie (Rs1-Rs3) podczas pomiarów

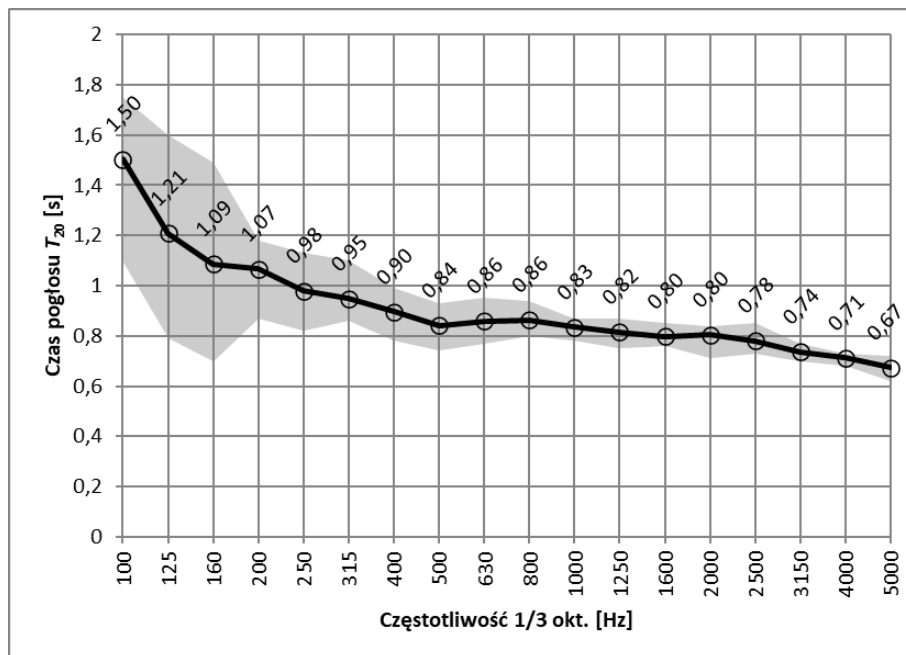
3.1.1 Czas pogłosu T_{20} i czas wczesnego zaniku EDT

Przedstawione wyniki (rys. 3 do rys. 6) pomiarów czasu pogłosu wskazują w pierwszej kolejności na zróżnicowane warunki akustyczne na scenie i w rejonie widowni. Wzrost wartości T_{20} wraz z przesuwaniem źródła w głąb sceny (z pozycji S1 do pozycji S3) wskazuje na zbyt małą chłonność akustyczną w rejonie sceny.

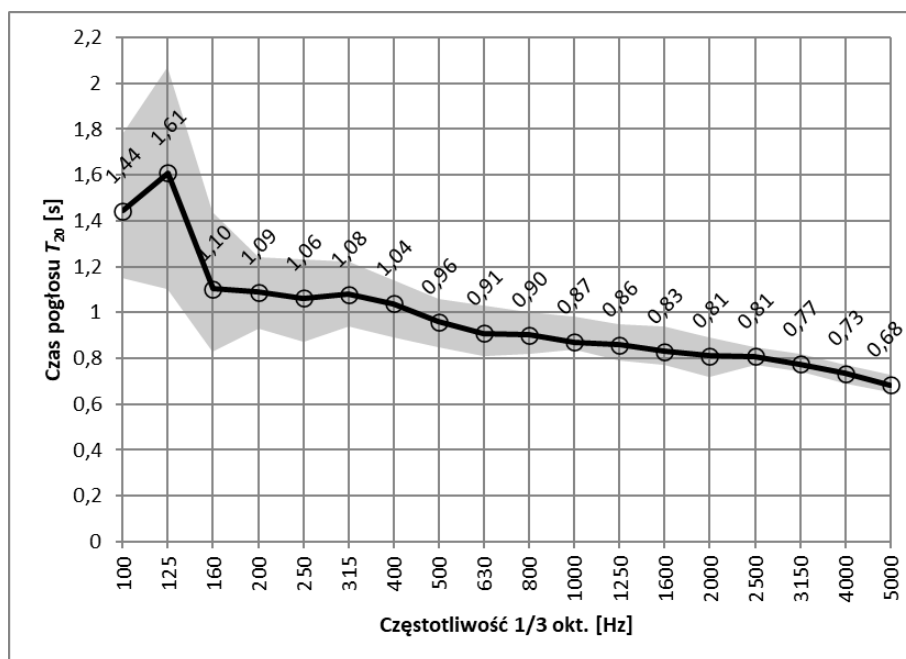
Pomiar przy zamkniętej kotarze jednoznacznie potwierdza, że przestrzeń sceny jest zbyt pogłosowa, z uwagi na wyrównanie charakterystyki częstotliwościowej czasu pogłosu.



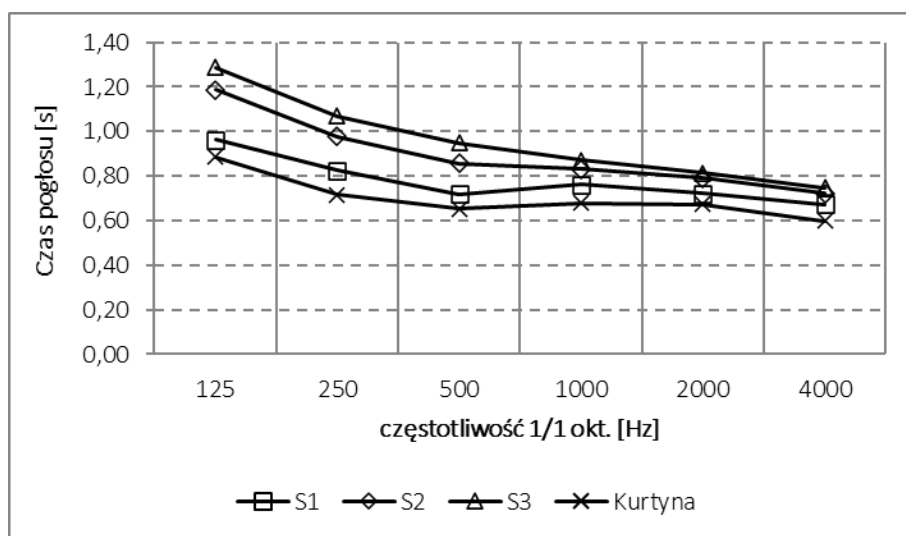
Rys. 3 Wartości średnie czasu pogłosu T_{20} w pasmach 1/3-oktawowych. Kolorem szarym oznaczono przedział zmierzonych wartości min-max. Źródło S1



Rys. 4 Wartości średnie czasu pogłosu T_{20} w pasmach 1/3-oktawowych. Kolorem szarym oznaczono przedział zmierzonych wartości min-max. Źródło S2

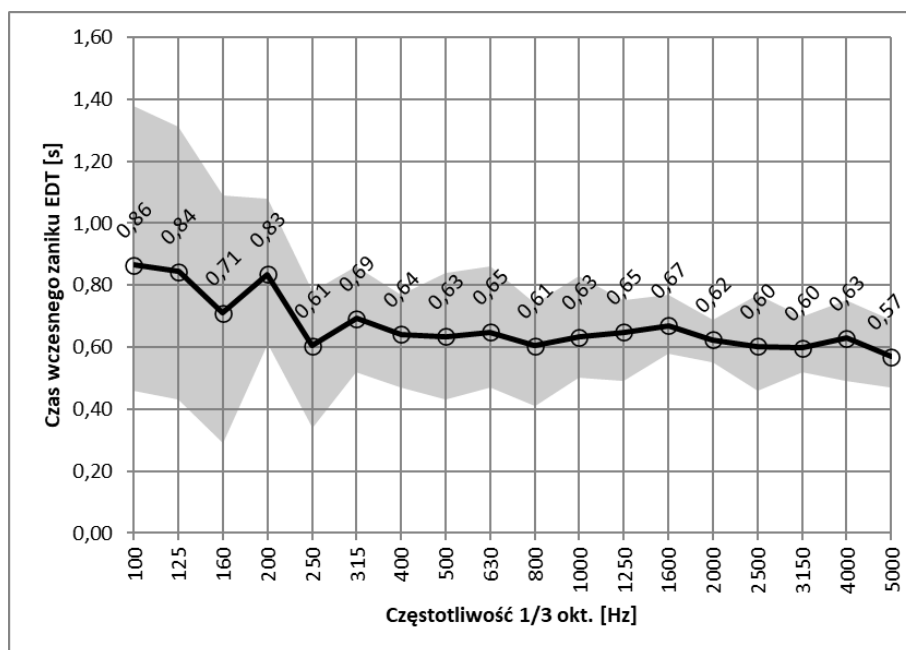


Rys. 5 Wartości średnie czasu pogłosu T_{20} w pasmach 1/3-oktawowych. Kolorem szarym oznaczono przedział zmierzonych wartości min-max. Źródło S3

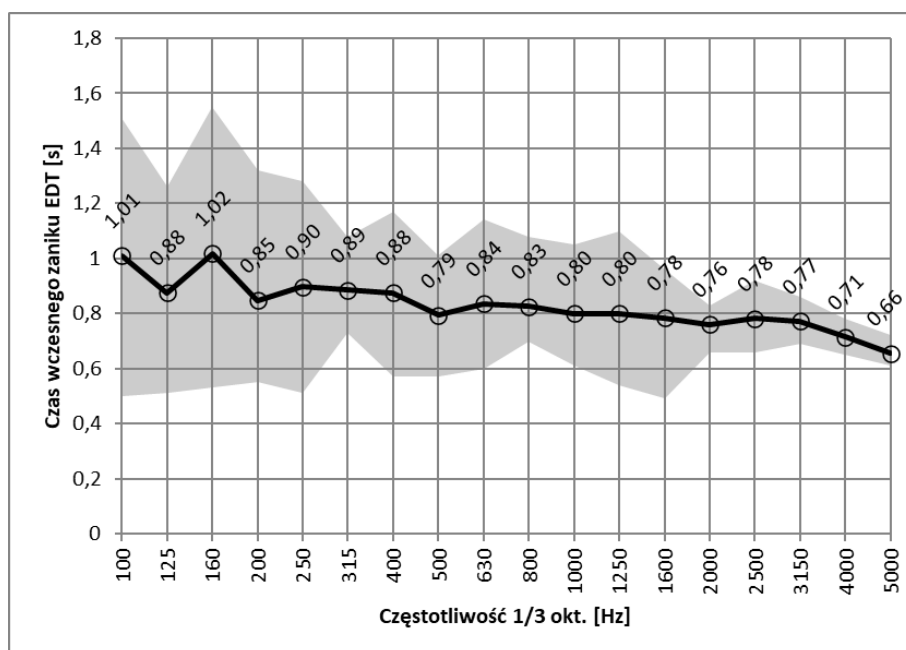


Rys. 6 Zestawienie wartości czasów pogłosu dla poszczególnych pozycji źródła dźwięku i konfiguracji otworu scenicznego. S1, S2, S3 – kotara otwarta, Kurtyna – kotara zamknięta.

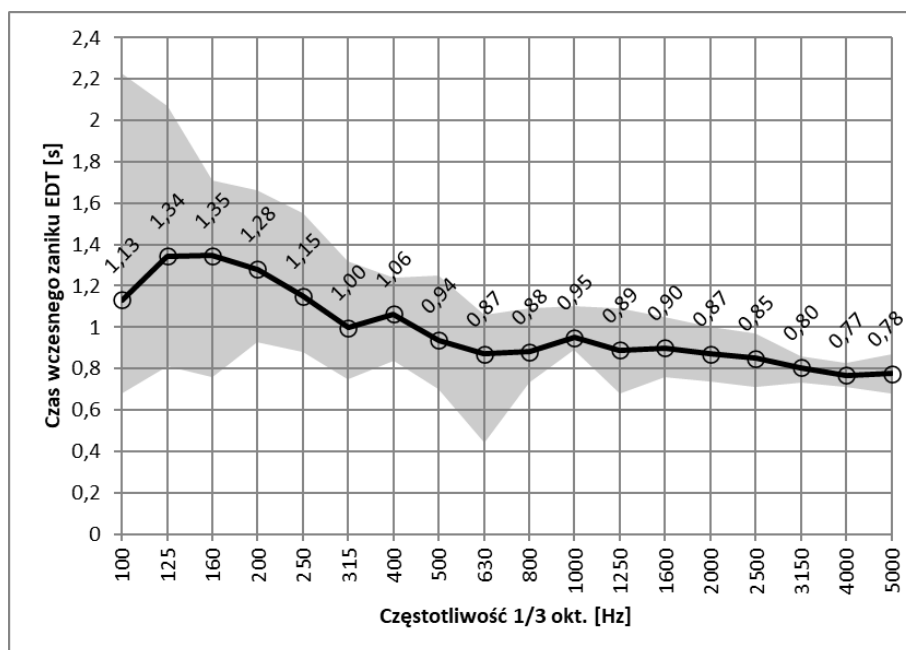
Wartości czasu wczesnego zaniku EDT (rys. 7 - rys. 9) wykazują tę samą tendencję co wartości czasu pogłosu T_{20} , potwierdzając tym samym brak równowagi w warunkach akustycznych na sali i na scenie.



Rys. 7 Wartości średnie czasu wczesnego zaniku EDT w pasmach 1/3-oktawowych. Kolorem szarym oznaczono przedział zmierzonych wartości min-max. Źródło S1

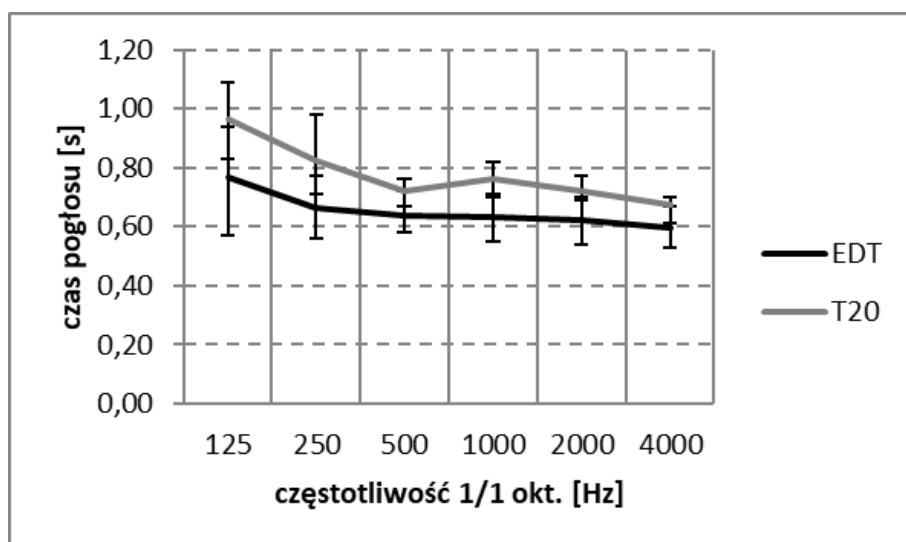


Rys. 8 Wartości średnie czasu wczesnego zaniku EDT w pasmach 1/3-oktawowych. Kolorem szarym oznaczono przedział zmierzonych wartości min-max. Źródło S2

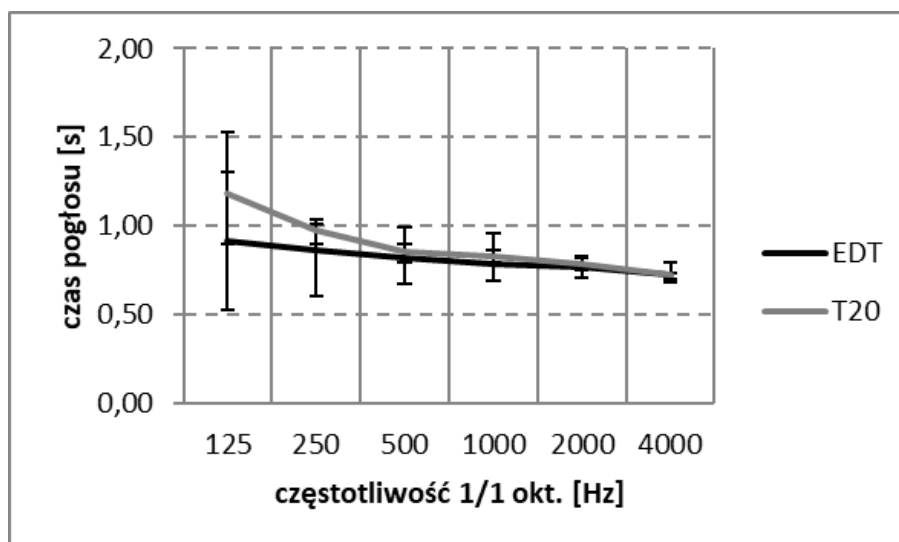


Rys. 9 Wartości średniego czasu wczesnego zaniku EDT w pasmach 1/3-oktawowych. Kolorem szarym oznaczono przedział zmierzonych wartości min-max. Źródło S3

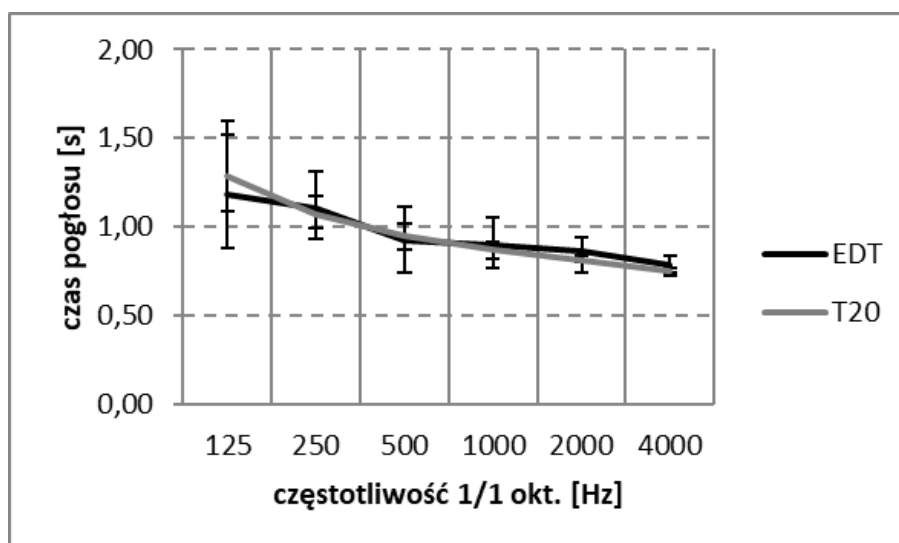
Zestawienie wartości czasu wczesnego zaniku EDT i czasu pogłosu T_{20} (rys. 10 - rys. 12) wskazuje na występowanie zjawisk związanych z pomieszczeniami sprzężonymi – sceny i sali z widownią. Wynika to z mniejszych wartości czasu wczesnego zaniku w stosunku do czasu pogłosu T_{20} .



Rys. 10 Czas wczesnego zaniku EDT i czas pogłosu T_{20} dla punktów nadawczych i odbiorczych zlokalizowanych na widowni. Słupki błędów wskazują wartości minimalne i maksymalne. Źródło S1.



Rys. 11 Czas wczesnego zaniku EDT i czas pogłosu T_{20} dla punktów nadawczych i odbiorczych zlokalizowanych na widowni. Słupki błędów wskazują wartości minimalne i maksymalne. Źródło S2.

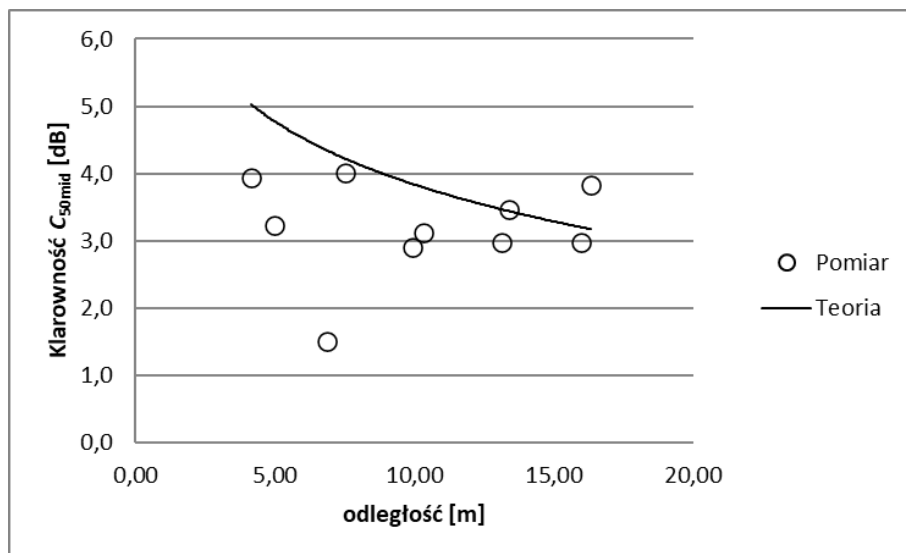


Rys. 12 Czas wczesnego zaniku EDT i czas pogłosu T_{20} dla punktów nadawczych i odbiorczych zlokalizowanych na widowni. Słupki błędów wskazują wartości minimalne i maksymalne. Źródło S3.

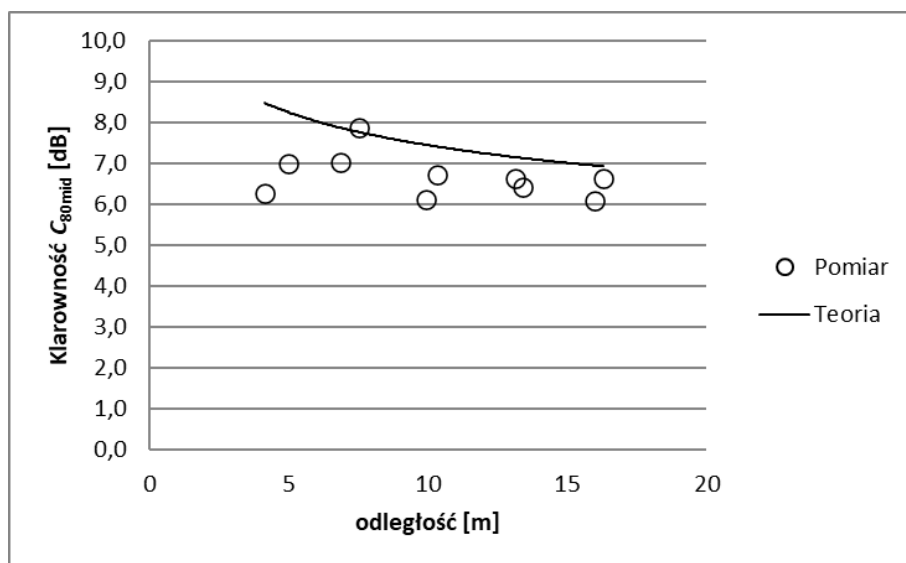
3.1.2 Klarowność dźwięku C_{50} i C_{80}

Na rys. 13 i rys. 14 przedstawiono wartości klarowności dźwięku w funkcji odległości źródło – odbiornik dla pozycji źródła S1 oraz zestawiono je z wartościami teoretycznymi wyznaczonymi na podstawie teorii Barrona (Barron i Lee, 1988). W przypadku klarowności C_{50} wartości na obszarze sali są mniejsze niż wartości teoretyczne, co oznacza przewagę energii późnej do wczesnej (do 50 ms od dotarcia dźwięku bezpośredniego) głównie ze względu na ograniczoną liczbę odbić od sufitu (niekorzystnie ukształtowany profil sufitu). Podobna sytuacja zachodzi dla

klarowności C_{80} . Wartości obydwu parametrów są wysokie, co sprzyja pracy z systemem elektroakustycznym.



Rys. 13 Klarowność dźwięku C_{50} dla źródła dźwięku na scenie pozycja S1 i punktów odbiorczych na widowni. Wartości zmierzone i predykcja z wykorzystaniem modelu Barrona (Barron i Lee, 1988).



Rys. 14 Klarowność dźwięku C_{80} dla źródła dźwięku na scenie pozycja S1 i punktów odbiorczych na widowni. Wartości zmierzone i predykcja z wykorzystaniem modelu Barrona (Barron i Lee, 1988).

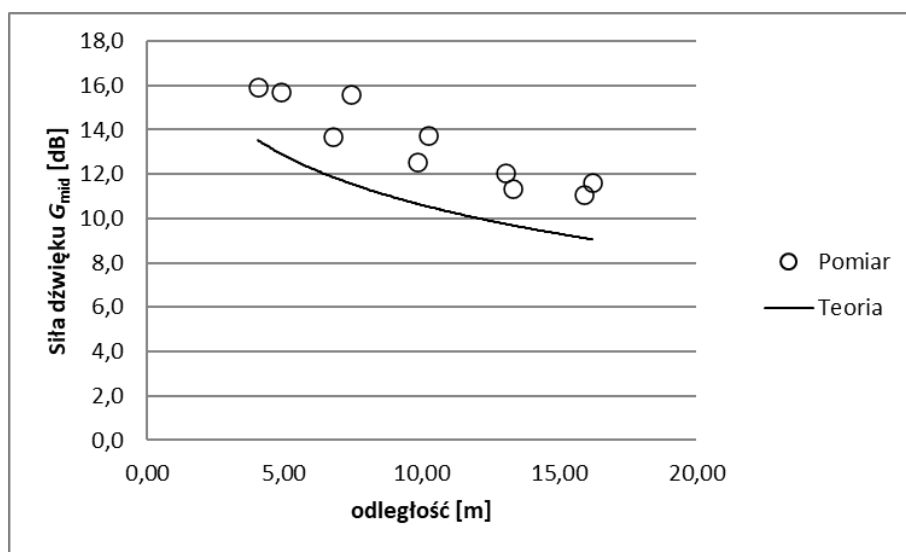
3.1.3 Wskaźnik transmisji mowy STI

Średnia wartość wskaźnika transmisji mowy STI dla pozycji źródła S1 i punktów odbiorczych zlokalizowanych na widowni wynosi 0,69, dla pozycji S2 – 0,65, a dla pozycji S3 – 0,63. Minimalna wartość wyniosła 0,60 co oznacza, że w całej sali zrozumiałość mowy jest dobra (bez uwzględnienia stosunku poziomu dźwięku do tła akustycznego). Przy uwzględnieniu poziomu tła akustycznego i poziomu źródła zgodnego z (PN-B-02151-4, 2015) wskaźnik STI uzyskał odpowiednio wartości: 0,62; 0,56; 0,52; a wartość minimalna wyniosła 0,49. Poziom tła przyjęto

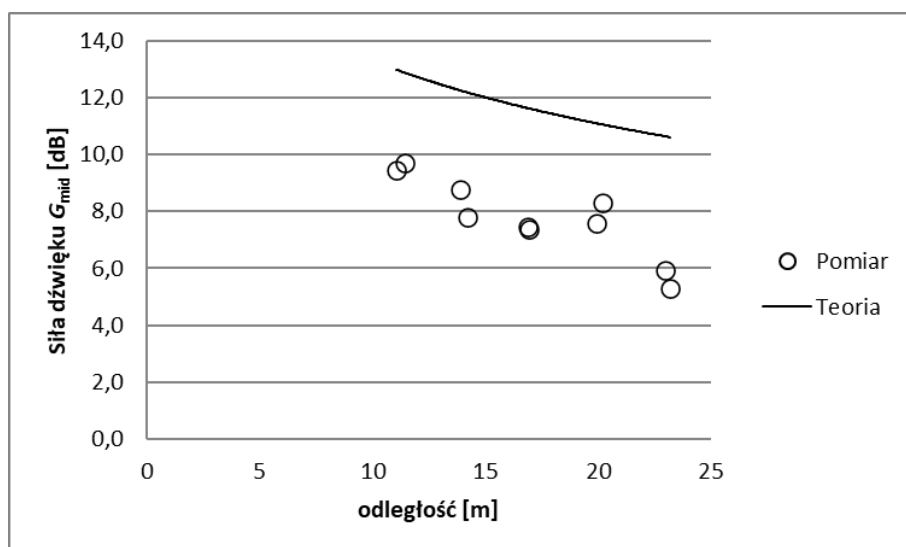
jako krzywą NR25 ($L_{Aeq} = 40$ dB). Podsumowując, zrozumiałość mowy w sali należy ocenić jako dobrą i dostateczną.

3.1.4 Siła dźwięku G

Dla źródła dźwięku znajdującego się na proscenium wartości siły dźwięku G są wysokie, co wynika najprawdopodobniej dużej liczby odbić dźwięku w rejonie proscenium. Znacznie niższe wartości uzyskano dla źródła znajdującego się w głębi sceny (zwłaszcza pozycja źródła S3 – patrz rys. 16), co wynika z małego otworu scenicznego i niedostatecznej liczby odbić dochodzących na widownię.



Rys. 15 Siła dźwięku G dla źródła dźwięku na scenie pozycja S1 i punktów odbiorczych na widowni. Wartości zmierzone i predykcja z wykorzystaniem modelu Barrona (Barron i Lee, 1988).

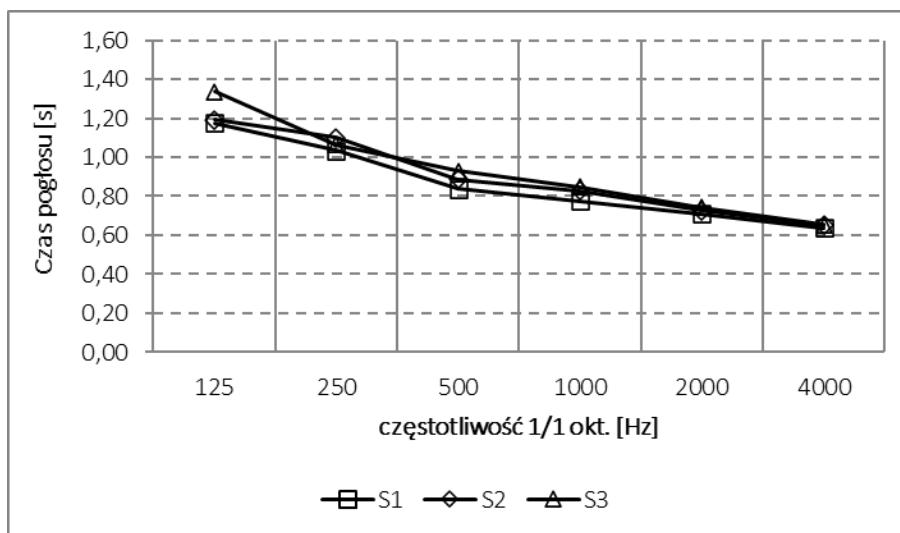


Rys. 16 Siła dźwięku G dla źródła dźwięku na scenie pozycja S3 i punktów odbiorczych na widowni. Wartości zmierzone i predykcja z wykorzystaniem modelu Barrona (Barron i Lee, 1988).

3.2 Przestrzeń sceny

3.2.1 Czas pogłosu T20

Na poniższym wykresie przedstawiono wartości czasu pogłosu dla punktów zlokalizowanych w przestrzeni sceny. Analiza uzyskanych wyników wskazuje, że wartości czasu pogłosu dla punktów odbiorczych zlokalizowanych w rejonie sceny są wyższe od wartości w rejonie widowni.



Rys. 17 Czas pogłosu dla punktów odbiorczych zlokalizowanych w przestrzeni sceny.

3.3 Magazyn dekoracji

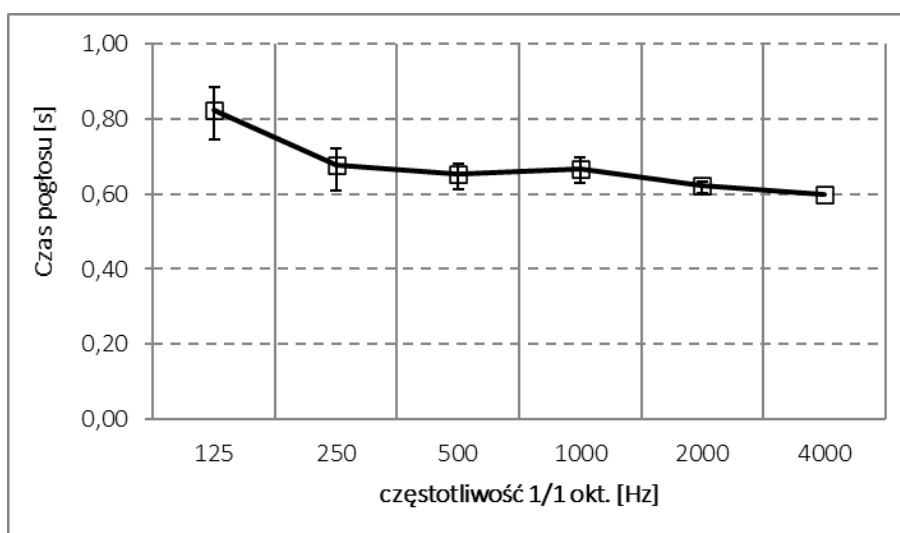
Na rys. 18 przedstawiono zdjęcie magazynu w trakcie sesji pomiarowej - znajdowało się w nim dużo elementów scenograficznych. Pomiar przeprowadzono dla jednego punktu nadawczego i dwóch punktów odbiorczych.

3.3.1 Czas pogłosu T20



Rys. 18 Widok magazynu podczas pomiarów.

Analiza wartości czasu pogłosu (rys. 19) wskazuje, że uzyskane wartości są niższe niż na sali, stąd otwarte drzwi do tej przestrzeni nie powinny generować negatywnych zjawisk związanych z pomieszczeniami sprzężonymi tj. występowaniem krzywej zaniku o podwójnym nachyleniu czy znacznym wzrostem wartości czasu pogłosu. W przypadku częstego występowania sytuacji braku magazynowania elementów w pomieszczeniu, wskazane jest wprowadzenie elementów pochłaniających dźwięk w celu utrzymania czasu pogłosu na niskim poziomie.



Rys. 19 Czas pogłosu zmierzony w magazynie

4 Fotele

W ramach pomiarów przeprowadzono również pomiar oporności przepływu powietrza tkaniny tapicerskiej wykorzystanej na fotelach audytoryjnych. Dostarczona próbka miała

wymiary ok. 17,5 cm x 21,5 cm i grubość 1,85 mm. Zmierzona wartość jednostkowej oporności przepływu powietrza wyniosła 150 [Pa*s/m].



Rys. 20 Widok badanej próbki.

W celu utrzymania warunków akustycznych w sali na obecnym poziomie przy wymianie foteli zaleca się aby materiał tapicerski charakteryzował się podobną wartością jednostkowej oporności przepływu powietrza oraz grubość gąbki była zbliżona do obecnych grubości fotela.

5 Podsumowanie

Przeprowadzone pomiary parametrów akustycznych wnętrza wskazują na konieczność wprowadzenia zmian we wnętrzu na etapie przygotowywania projektu przebudowy. Poniżej przedstawiono zagadnienia, które należy wziąć pod uwagę:

1. zmianę ukształtowania elementów refleksyjnych - zwłaszcza w obszarze proscenium i sceny;
2. wprowadzenie zmian w konstrukcji okładzin ściennych w celu uzyskania niemniejszych wartości czasu pogłosu wraz z uzyskaniem bardziej rozproszonego pola akustycznego;
3. zbilansowanie chłonności akustycznej w przestrzeni sceny i widowni - w celu uzyskania spójnych warunków akustycznych;
4. wprowadzenie materiałów pochłaniających dźwięk w przestrzeni magazynu dekoracji,
5. otwarcie przedniej ściany reżyserki audio w celu zapewnienia korzystnych warunków pracy dla realizatorów,
6. poprawę równomierności nagłośnienia widowni (aktualny system montażu głośników na ściankach proscenium uniemożliwia poprawne nagłośnienie połowy widowni znajdującej się w pobliżu sceny, stąd zaleca się zmianę położenie głośników i montaż istniejących głośników do sufitu w strefie proscenium).

6 Bibliografia

- Barron, M. i Lee, L.-J. (1988). Energy relations in concert auditoriums. I. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84(2), strony 618-628.
- Beranek, L. L. (1996). *How they sound: Concert and opera halls*. New York: Acoustical Society of America.
- Everest, A. (2001). *The master handbook of acoustics*. New York: McGraw-Hill.
- Kulowski, A. (2007). *Akustyka architektoniczna*. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
- PN-B-02151-4. (2015). *Akustyka budowlana - Ochrona przed hałasem pomieszczeń w budynkach - Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach oraz wytyczne prowadzenia badań*.
- PN-EN ISO 3382-1. (2009). *Akustyka – Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń – Część 1: Pomieszczenia specjalne*.
- Sadowski, J. (1971). *Akustyka w urbanistyce, architekturze i budownictwie*. Warszawa: Arkady.
- Wenger. (2008). *Planning guide for performance space*.