

mgr inż. arch. Karolina Warzocha^{1*)}

ORCID: 0000-0001-8552-2315

mgr inż. arch. Bartłomiej Ziarko¹⁾

ORCID: 0000-0002-8836-5586

Minimalna kubatura sal prób muzycznych – wpływ adaptacji akustycznej

Minimal volume of music rehearsal rooms – the impact of acoustic adaptation

DOI: 10.15199/33.2023.08.11

Streszczenie. Celem badań jest wyznaczenie minimalnej wielkości sal prób dla kilkuosobowych zespołów muzycznych oraz sprawdzenie, jaki wpływ na wyniki tej analizy ma adaptacja akustyczna pomieszczenia. Przeprowadzone symulacje wykazały, że odpowiednio dobrane materiały wykończeniowe pozwalają nie tylko na uzyskanieżądanego czasu pogłosu w pełnym zakresie częstotliwościowym, ale również zmniejszają średnią wartość poziomu dźwięku w sali prób o 2,8 – 4,8 dB, a tym samym wymaganą minimalną kubaturę tych sal nawet czterokrotnie.

Słowa kluczowe: poziom dźwięku; sala prób muzycznych; materiały wykończeniowe; adaptacja akustyczna.

Abstract. The aim of the paper is to determine the minimal volume of music rehearsal rooms dedicated to small ensembles, and to verify the impact of the acoustic adaptation on the analysis results. The conducted simulations showed that properly selected finishing materials not only make it possible to achieve the desired reverberation time in the entire frequency range, but also reduce the average value of the sound level in the music rehearsal room by 2.8 – 4.8 dB; and thus reduce the required minimal volume of the rooms by up to four times.

Keywords: sound level; music rehearsal room; finishing materials; acoustic adaptation.

Zawodowi muzycy klasyczni znacznie więcej czasu spędzają w małych salach prób, ćwicząc indywidualnie lub w kilkuosobowych grupach muzycznych, niż występując w dużych salach koncertowych. Sale prób są dużo mniejsze niż sale koncertowe, a głośność instrumentu odbierana w pomieszczeniu o małej kubaturze jest znacznie wyższa niż tego samego instrumentu we wnętrzu o dużej kubaturze. Akustyka sal prób muzycznych staje się coraz częstszym tematem analiz akustycznych, które wykazują, że projektowane sale prób są zbyt małe ze względów akustycznych [1 – 3]. Liczne badania wykazały znaczne przekroczenie dopuszczalnego poziomu dziennej ekspozycji na dźwięki wśród tej grupy zawodowej [4 – 9]. Jednym ze sposobów obniżenia poziomu dźwięku, na jaki narażeni są muzycy, a tym samym poziomu dziennej ekspozycji na hałas, są poprawnie zaprojektowane sale prób muzycznych. Rozumiemy przez to odpowiednią kubaturę pomieszczenia oraz

odpowiedni dobór materiałów wykończeniowych, zapewniające uzyskanie wymaganego czasu pogłosu w pełnym zakresie częstotliwości. W artykule przyjęto czas pogłosu obliczany z dynamiką 30 dB (T_{30}). Natomiast przez czas pogłosu w pełnym zakresie częstotliwości rozumiemy czas pogłosu w środkowej częstotliwości oktaw: od 63 Hz do 8 kHz. Przegląd literatury dowiódł, że wielkość sal prób muzycznych wynika jedynie z ergonomii i że nie są uwzględniane zalecenia akustyczne. Zgodnie z normą ISO 23591: 2021 [10], średni poziom dźwięku SPL (lin) (poziom dźwięku obliczany liniowo bez uwzględnienia krzywej ważenia A lub C) w sali prób powinien mieścić się w przedziale 85 – 90 dB (lin) przy stopniu dynamiki gry *forte*. Zapewnia to odpowiednią intensywność muzyki, przy jednoczesnym bezpiecznym poziomie dźwięku dla słuchu użytkownika sali prób. Celem przeprowadzonej analizy było wyznaczenie minimalnych wielkości sal prób dla kilkuosobowych zespołów muzycznych, takich jak trio, kwartet i kwintet, które zapewniałyby średni poziom dźwięku SPL (lin) w zalecanym zakresie oraz sprawdzenie, ja-

ki wpływ na wyniki tej analizy ma przeprowadzenie adaptacji akustycznej we wnętrzu.

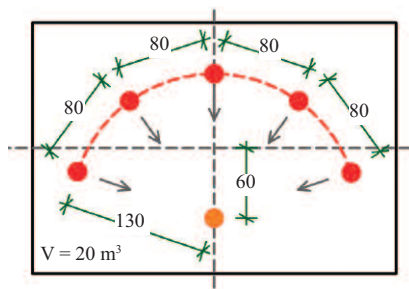
Metoda badań

Pomieszczenia oraz sylwetki użytkowników sal zamodelowano w programie Sketchup Pro 2021, a symulacje akustyczne przeprowadzono w programie Odeon wersja 17. Analizie poddano osiemnaście sal prób o kubaturze 20 – 190 m³ (co 10 m³). Poszczególne wymiary sal obliczono przy założeniu stałych ich proporcji w celu wyeliminowania wpływu kształtu pomieszczenia na akustykę wnętrza. Wybrano stosunek wymiarów wynoszący 1 : 1,2 : 1,45; który wg Meissnera [11] i Rindela [12, 13] zapewnia najkorzystniejszy rozkład modów w pomieszczeniu. Założono, że wysokość sali prób jest wielkością najmniejszą, spełniającą jednocześnie warunek: $H \geq 2,7$ m. W każdym pomieszczeniu poddanym analizie zamodelowano sylwetki muzyków oraz nauczyciela gry. Analizę przeprowadzono w przypadku następujących zespołów muzycznych: trio smyczkowe; kwartet smyczkowy; kwintet smyczkowy; kwartet dęty; kwintet dęty blaszany. Muzyków

¹⁾ Politechnika Krakowska

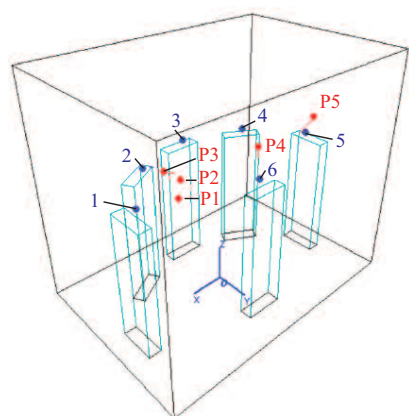
^{*)} Adres do korespondencji: karolina.warzocha@pk.edu.pl

ustawiono po łuku, zapewniając stałą odległość od nauczyciela (rysunki 1 i 2). Odległości między muzykami zmieniały się w zależności od liczebności zespołu: w przypadku tria była to odległość 120 cm; kwartetu – 100 cm, a kwintetu – 80 cm. Sylwetki użytkowników uproszczono do prostopadłościaków o powierzchni równej przeciętnej powierzchni człowieka 1,88 m² [14] oraz nadano im chłonność akustyczną charakterystyczną dla dorosłego człowieka w pozycji stojącej [15]. Instrumenty muzyczne zamodelowano jako źródło dźwięku. Wzajemne położenie muzyka i jego instrumentu wyznaczono na podstawie literatury [16] oraz autorskich wyliczeń. Założono, że wszyscy muzycy są praworęczni. Przyjęto równy rozkład funkcji częstotliwości mocy akustycznej instrumentów muzycznych i jako moc akustyczną wartości liniowe



Rys. 1. Ustawienie blaszanego kwintetu dętego i nauczyciela w sali prób o kubaturze 20 m³

Fig. 1. Positioning of a brass quintet and a teacher in a room with a volume of 20 m³



Rys. 2. Zamodelowany w programie Odeon blaszany kwintet dęty z nauczycielem w sali prób muzycznych o kubaturze 20 m³ [Odeon, wersja 17]

Fig. 2. A brass quintet and a teacher modeled in the Odeon program in a music rehearsal room with a volume of 20 m³ [Odeon, version 17].

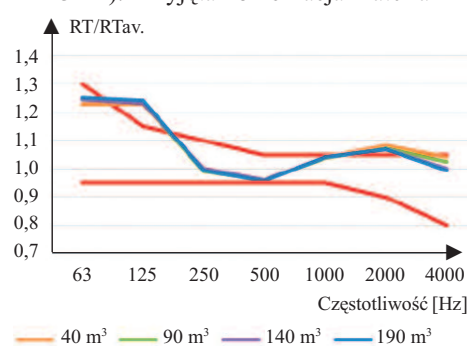
wskazane w normie ISO 23591:2021 [10]. Norma ta definiuje moc akustyczną instrumentów jako wartości jednoliczbowe, bez zróżnicowania w paśmie częstotliwości. Wykorzystano zdefiniowaną w programie Odeon kierunkowość instrumentów.

Symulacje przeprowadzono przy założeniu trzech wariantów wykończenia wnętrza (tabela 2):

- W1 – brak adaptacji akustycznej wnętrza;
- W2 – adaptacja akustyczna wnętrza dedykowana instrumentom cichym (zespoły smyczkowe);
- W3 – adaptacja akustyczna wnętrza dedykowana instrumentom głośnym (zespoły dęte).

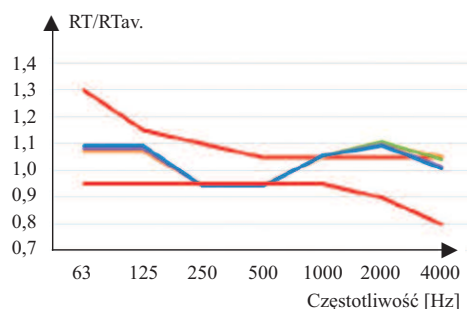
Brak adaptacji akustycznej oznaczał wykończenie wszystkich ścian oraz sufitu tynkiem cementowo-wapiennym oraz zastosowanie jako posadzki paneli drewnopochodnych. Założono, że 30% krótszej ściany stanowi przeszklenie (ściana nr 1). Adaptacje akustyczne polegały na pokryciu sufitu oraz dwóch sąsiednich ścian materiałami pochłaniającymi dźwięk w celu uzyskania czasu pogłosu w średnich częstotliwościach odpowiedniego dla instrumentów cichych (wariant W2) oraz głośnych (wariant W3) zgodnie z ISO 23591:2021 [10]. Sufit oraz dwie sąsiednie ściany nr 3 i 4, zwane akustycznymi, zostały wykończone kombinacją pełnych płyt G-K na ruszcie stalowym C50, z wypełnieniem wełną mineralną grubości 50 mm oraz płytami perforowanymi RIGITONE 12/25Q (<https://www.rigips.pl/plyty/plyty-perforowane/rigitone-1225q> – dostęp: maj 2023) na ruszcie C50, z wypełnieniem wełną mineralną 50 mm (w przypadku sufitu zastosowano ruszt C200 i wypełnienie 50 mm wełną mineralną ze względów montażowych). Wybór płyt RIGITONE 12/25Q został podyktowany względami ekonomicznymi. Dzięki wysokiemu stopniowi perforacji (23%) płyty charakteryzują się dużym współczynnikiem pochłaniania dźwięku ($\alpha = 0,9$ w przypadku płyt na ruszcie C50 z wypełnieniem w paśmie średnich częstotliwości). W efekcie trzeba ich mniej zastosować, a płyty perforowane są 3–4 razy droższe niż pełne. W przypadku adaptacji dedykowanej instrumentom głośnym konieczne okazało się pokrycie

ściany nr 2 pełnymi płytami G-K na ruszcie C50, z wypełnieniem wełną mineralną grubości 50 mm, w celu zmniejszenia czasu pogłosu w paśmie małych częstotliwości (63 – 125 Hz). Norma ISO 23591:2021 [10] dopuszcza zwiększenie czasu pogłosu w małych częstotliwościach o 30% w przypadku 63 Hz oraz o 15% przy 125 Hz. Zastosowanie dodatkowych pełnych płyt G-K, w stosunku do adaptacji akustycznej W2, gdzie ściana została pokryta jedynie tynkiem cementowo-wapiennym, pozwoliło na uzyskanie czasu pogłosu wyższego o 10% w małych częstotliwościach w porównaniu ze średnimi, co mieści się w dopuszczalnym zakresie (rysunki 3 i 4). Przyjęta kombinacja materia-



Rys. 3. Stosunek czasu pogłosu w pełnym paśmie częstotliwościowym do czasu pogłosu w średnich częstotliwościach w przypadku wariantu wykończenia W3 przed dodaniem pełnych płyt G-K

Fig. 3. The ratio of the reverberation time in the full frequency band to the reverberation time in the medium frequencies for the W3 finishing variant before adding full plasterboards



Rys. 4. Stosunek czasu pogłosu w pełnym paśmie częstotliwościowym do czasu pogłosu w średnich częstotliwościach w przypadku wariantu wykończenia W3 po dodaniu pełnych płyt G-K

Fig. 4. The ratio of the reverberation time in the full frequency band to the reverberation time in the medium frequencies for the W3 finishing variant after adding full plasterboards

łów wykończeniowych zastosowanych we wnętrzu przełożyła się na zwiększenie czasu pogłosu w przypadku częstotliwości 2 kHz o 10% w porównaniu z wartością w średnim paśmie częstotliwości (przy dopuszczalnym wzroście o 5%). Próby obniżenia tego skoku przez zwiększenie udziału płyt perforowanych wiązały się jednak ze znacznym spadkiem czasu pogłosu przy częstotliwości 500 Hz i 1 kHz poza dopuszczalny zakres. Z tego powodu zdecydowaliśmy się na dopuszczenie nieco wydłużonego czasu pogłosu przy częstotliwości 2 kHz. W tabeli 1 przedstawiono wartości czasu pogłosu T_{30} [s] w środkowych częstotliwościach oktaowych, w przypadku czterech wybranych kubatur sal prób, osiągnięte dzięki adaptacji akustycznej W2 i W3.

Tabela 1. Czas pogłosu T_{30} [s] w środkowych częstotliwościach okta w przypadku wybranych kubatur sal prób przy adaptacji W2 i W3

Table 1. Reverberation time T_{30} [s] in the middle octave frequencies for selected volumes of rehearsal rooms with the adaptation of W2 and W3

Wariant adaptacji	Kubatura sali prób [m ³]	Czas pogłosu T_{30} [s] w środkowych częstotliwościach okta [Hz]								Średni czas pogłosu T_{30} przy 500 Hz i 1 kHz
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
W2	40	0,61	0,61	0,53	0,52	0,57	0,59	0,57	0,45	0,55
	90	0,79	0,79	0,69	0,68	0,74	0,76	0,72	0,54	0,71
	140	0,92	0,92	0,80	0,79	0,86	0,88	0,82	0,60	0,83
	190	1,03	1,03	0,89	0,88	0,96	0,97	0,90	0,64	0,92
W3	40	0,52	0,52	0,46	0,46	0,50	0,52	0,50	0,41	0,48
	90	0,68	0,68	0,60	0,60	0,65	0,67	0,64	0,50	0,63
	140	0,80	0,80	0,70	0,70	0,76	0,78	0,73	0,55	0,73
	190	1,00	1,00	0,88	0,88	0,96	0,97	0,90	0,64	0,92

Tabela 2. Zestawienie wariantów wykończenia wnętrz poddanych symulacjom komputerowym

Table 2. List of the interior finishing variants subjected to computer simulations

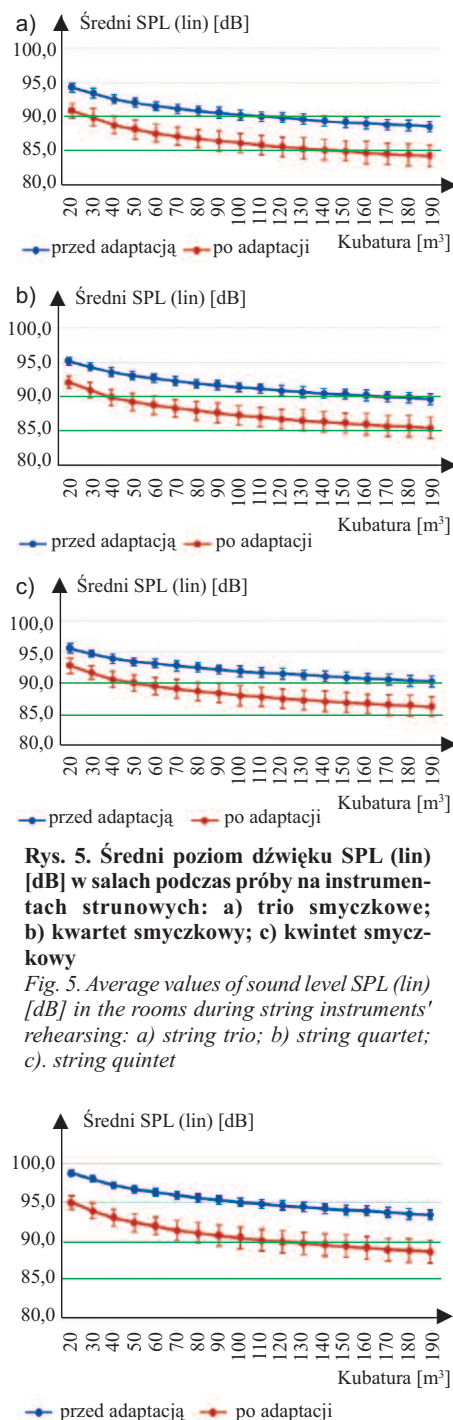
Elementy sali prób	Przed adaptacją akustyczną (W1)	Adaptacja akustyczna w przypadku instrumentów cichych (W2)	Adaptacja akustyczna w przypadku instrumentów głośniejszych (W3)
Podłoga	panele	panele	panele
Ściana 1 (z oknem)	tynek + 30% przeszklenia	tynek + 30% przeszklenia	tynek + 30% przeszklenia
Ściana 2	tynek cementowo-wapienny	tynek cem.-wap.	plyta pełna G-K
Ściana 3 (akustyczna)	tynek cementowo-wapienny	plyty G-K + 20% płyt perforowanych	plyty G-K + 30% płyt perforowanych
Ściana 4 (akustyczna)	tynek cementowo-wapienny	plyty G-K + 20% płyt perforowanych	plyty G-K + 30% płyt perforowanych
Sufit	tynek cementowo-wapienny	plyty G-K + 25% płyt perforowanych	plyty G-K + 20% płyt perforowanych

Posadzka oraz ściana nr 1 (z przeszkleniem) pozostały bez zmian w każdym wariantcie wykończenia wnętrza (tabela 2).

Analiza wyników i wnioski

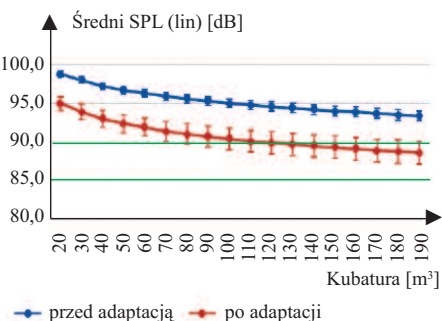
Wyniki przeprowadzonych symulacji komputerowych, w przypadku każdego zespołu oddzielnie, przedstawiono na rysunkach 5 – 7. Zalecany zakres średniego poziomu dźwięku SPL (lin) w salach prób wg ISO 23591:2021 [10] zaznaczono poziomymi zielonymi liniami. Widoczny jest spadek wartości średniego poziomu dźwięku w pomieszczeniu SPL (lin) wraz ze wzrostem kubatury sali prób oraz różnice między średnimi wartościami SPL (lin) w pomieszczeniu przed i po adaptacji akustycznej. Przeprowadzenie adap-

tacji akustycznej dedykowanej instrumentom cichym pozwala na obniżenie średniej wartości SPL (lin) o 2,8 – 4,3 dB (tabela 3), natomiast w przypadku adaptacji dla instrumentów głośniejszych spadek ten jest większy i wynosi



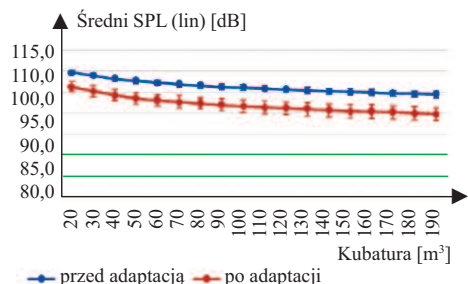
Rys. 5. Średni poziom dźwięku SPL (lin) [dB] w salach podczas próby na instrumentach strunowych: a) trio smyczkowe; b) kwartet smyczkowy; c) kwintet smyczkowy

Fig. 5. Average values of sound level SPL (lin) [dB] in the rooms during string instruments' rehearsing: a) string trio; b) string quartet; c) string quintet



Rys. 6. Średni poziom dźwięku SPL (lin) [dB] w salach podczas próby kwintetu na instrumentach dętych drewnianych

Fig. 6. Average values of sound level SPL (lin) [dB] in the rooms during woodwind instruments' rehearsing



Rys. 7. Średni poziom dźwięku SPL (lin) [dB] w salach podczas próby kwintetu na instrumentach dętych blaszanych

Fig. 7. Average values of sound level SPL (lin) [dB] in the rooms during brass instruments' rehearsing

3,4 – 4,8 dB (tabela 3). Oba zakresy spadku średniego poziomu dźwięku SPL (lin) w pomieszczeniu są bardzo odczuwalne przez użytkowników sal prób.

Na podstawie uzyskanych wyników symulacji komputerowych wyznaczono minimalną kubaturę sal prób muzycznych w przypadku każdego analizowanego zespołu muzycznego. Jako minimalną kubaturę sali prób uznano taką, przy której średnia wartość SPL (lin) wynosi 90 dB (lin) lub mniej. Wyniki zestawiono w tabeli 3, przy różnych wariantach wykończenia wnętrza. Pozwoliło to na porównanie minimalnej kubatury w przypadku braku adaptacji akustycznej oraz po jej wykonaniu. Wyniki uzyskane w przypadku zespołów smyczkowych wskazują, że zastosowanie odpowiednich materiałów wykończeniowych pozwala na zmniejszenie minimalnej kubatury sali prób prawie czterokrotnie. Wpływ adaptacji akustycznej dedykowanej instrumentom dętym jest również widoczny, ale nie można określić jego wielkości, ponieważ wymagana minimalna kubatura przed adaptacją akustyczną wykracza poza przyjęty zakres

badan (powyżej 190 m³). Szczególna sytuacja dotyczy sali prób dla kwintetu dętego blaszanego, w przypadku którego nawet przeprowadzenie adaptacji akustycznej nie pozwala na wyznaczenie minimalnej kubatury w przyjętym zakresie badań. Biorąc pod uwagę, że kubatura 190 m³ przekłada się na salę o powierzchni 54,3 m² (przy założeniu H = 3,5 m), dalsze jej zwiększanie, w celu obniżenia średniej wartości SPL (lin) do 90 dB (lin) lub mniej, może okazać się nieekonomiczne. Tym samym sugerujemy dopuszczenie większych średnich wartości SPL (lin) w salach prób przeznaczonych dla tak głośnych zespołów muzycznych, jak kwintety dęte blaszane, niż wynikałoby to z zapisów normy ISO 23591:2021 [10].

Ostatnie symulacje przeprowadzone dla zespołów dętych nie wykazały wpływu dodatkowych pełnych płyt G-K na ścianie nr 2 na średni poziom dźwięku SPL (lin) w pomieszczeniu. Zabieg ten był jednak konieczny w celu uzyskania jak najbardziej równego czasu pogłosu w całym paśmie częstotliwościowym.

Podsumowanie

Przeprowadzone symulacje komputerowe pozwoliły na wyznaczenie minimalnej kubatury sal prób dla małych zespołów muzycznych różniących się składem instrumentalnym. Uwzględnienie różnych wariantów wykończenia wnętrza pozwoliło na podkreślenie roli przeprowadzonej adaptacji akustycznej, nie tylko w celu uzyskania odpowiedniego czasu pogłosu dla danego typu instrumentów, ale również w celu obniżenia średniej wartości poziomu dźwięku SPL (lin) w pomieszczeniu, a tym samym znacznego zmniejszenia

szczenia minimalnej wymaganej kubatury sal dla poszczególnych zespołów muzycznych.

Literatura

[1] Kahle E, Wulfrank T, Jurkiewicz Y, Brulez J. Music rehearsal rooms: loudness levels and quantity of absorption as a function of use. Forum Acusticum – Kraków 2014.

[2] Osman R. Designing small practice rooms for sound quality. Proceeding of 20th International Congress on Acoustics (ICA), Sydney 2010.

[3] Rindel JH. New Norwegian standard on the acoustics of rooms for music rehearsal and performance. Forum Acusticum – Kraków 2014.

[4] Jansen EJ, Helleman HW, Dreschler WA, De Laat JA. Noise induced hearing loss and other hearing complaints among musicians of symphony orchestras. International Archives of Occupational and Environmental Health 2009; 82 (2): 153 – 164.

[5] Pawlaczyk-Luszczyńska M, Zamojska M, Dudarewicz A, Zaborowski K. Noise – induced hearing loss in professional orchestral musicians. Archives of Acoustics 2013; 38 (2): 223 – 234.

[6] Phillips SL, Henrich VC, Mace S. Prevalence of noise – induced hearing loss in student musicians. International Journal of Audiology 2010; 49 (4).

[7] Pietrzak AP. Ocena ekspozycji muzyków na dźwięk z wykorzystaniem dwukanałowej dozymetrii hałasowej. Wydział Elektroniki i Techniki Informacyjnych, Politechnika Warszawska 2021; praca doktorska.

[8] Schmidt JH, Pedersen ER, Paarup HM, Christensen-Dalsgaard J, Andersen T, Poulsen T, Baelum J. Hearing loss in relation to sound exposure of professional symphony orchestra musicians. Ear and Hearing 2014; 35 (4): 448 – 460.

[9] Stadio A, Dipietro L, Ricci G, Della Volpe A, Minni A, Greco A, DeVincentis M, Ralli M. Hearing loss, tinnitus, hyperacusis and displacis in professional musicians: a systematic review. International Journal of Environment Research and Public Health 2018; vol. 15 (10): 2120.

[10] ISO 23591:2021; Acoustic quality criteria for music rehearsal rooms and spaces.

[11] Meissner M. A Novel Method for Determining Optimum Dimension Ratios for Small Rectangular Rooms. Archives of Acoustics 2018; vol. 43 (2): 217 – 225.

[12] Rindel JH. Searching the musical rehearsal room. BNAM-2020, Oslo, Norwegia.

[13] Rindel JH. Preferred Dimension Ratios of Small Rectangular Rooms. JASA Express Letters 1 (2) 2021; 021601: 1 – 6.

[14] Kusy M. Statystyczny Polak – studium przypadku na podstawie wyników badań ankietowych. StatSoft Polska 2013.

[15] Beranek LL. Acoustics. Acoustical Society of America, New York 1954.

[16] Wenmaekers R, Hak C. A sound level distribution model for symphony orchestras: possibilities and limitations. Psychomusicology: Music, Mind, and Brain 2015; <http://dx.doi.org/10.1037/pmu0000069>.

Pzjęto do druku: 31.07.2023 r.

Tabela 3. Minimalna kubatura sal prób małych zespołów muzycznych

Table 3. Minimal volume of music rehearsal rooms for small ensembles

Zespoły muzyczne	Minimalna kubatura sali prób [m³]		Spadek średniej wartości SPL (lin) po adaptacji akustycznej
	przed adaptacją akustyczną (W1)	po adaptacji akustycznej (W2/W3)	
Trio smyczkowe	110	30	(-3,4 dB) – (-4,3 dB)
Kwartet smyczkowy	170	40	(-3,1 dB) – (-4,2 dB)
Kwintet smyczkowy	≥ 190	50	(-2,8 dB) – (-4,1 dB)
Kwartet dęty	≥ 190	120	(-3,8 dB) – (-4,8 dB)
Kwintet dęty blaszany	≥ 190	≥ 190	(-3,4 dB) – (-4,7 dB)