

dr hab. inż. arch. Andrzej Kłosak, prof. PK<sup>1)\*</sup>

ORCID: 0000-0001-6326-1652

dr inż. Agata Szela<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-9058-565X

# Designing of sound-absorbing seats for Jastrzebie-Zdroj concert hall

## *Projektowanie dźwiękochłonnych foteli audytoryjnych do sali koncertowej w Jastrzębiu-Zdroju*

DOI: 10.15199/33.2024.08.10

**Abstract.** This paper discusses the design, realization and acoustical performance of a sound-absorbing auditorium chairs intended for a concert hall with 350 seats, opened in 2022 at the Music School in Jastrzębie-Zdrój. Several construction aspects were covered: the selection of foam for the seat and upholstery fabric based on measurements of air flow resistance, as well as the influence of the fabric lamination process on the acoustic properties of the seats. The construction of the chair and the acoustic parameters of the completed seats installed in the auditorium were also described. Finally, the article described how we managed to measure the absorption coefficient of occupied seats within the constraints of human contact related to the COVID-19 pandemic.

**Keywords:** auditorium chair; air-flow resistance; sound absorption.

**Streszczenie.** W artykule omówiono projekt, realizację oraz parametry akustyczne dźwiękochłonnych foteli audytoryjnych przeznaczonych do sali koncertowej na 350 miejsc, otwartej w 2022 r. w Szkole Muzycznej w Jastrzębiu-Zdroju. Omówiono kilka aspektów konstrukcyjnych: dobór pianki tapicerskiej i tkaniny obiciowej na podstawie pomiarów oporu przepływu powietrza, a także wpływ procesu laminowania tkaniny na właściwości akustyczne siedzisk. Opisano również konstrukcję fotela, parametry akustyczne gotowych foteli zainstalowanych w sali oraz sposób, w jaki udało się zmierzyć współczynnik pochłaniania zajętych miejsc w ramach ograniczeń, dotyczących kontaktu międzyludzkiego, związanych z pandemią COVID-19.

**Słowa kluczowe:** fotel audytoryjny; oporność przepływu; pochłanianie dźwięku.

When choosing auditorium chairs, designers usually pay attention to aesthetics (type of upholstery, color, tactile sensation), durability (abrasion resistance of the fabric), ergonomics (stiffness and elasticity of the foam) and the cost of the chair. Acoustic properties are generally not considered important and are known only for the most expensive products designed for the largest concert halls. Due to the budget constraints of the entire 350-seat concert hall project opening in 2022 in Jastrzębie-Zdrój, which was originally less than PLN 10 million, the cost per chair was very limited (less than PLN 800/net). This eliminated all products with known sound absorption coefficient data. The general contractor for the building negotiated with several domestic chair manufacturers and then named one of them as a supplier, even though the final chair did not yet exist. Subsequently, one of the authors of the article who is also the author of the acoustic design of the entire building and the acoustics design of the concert hall, was asked to acoustically design the target chair in cooperation with the indicated manufacturer and under the supervision of the general designer of the building – the Silesian studio SLAS Architekci – and to advise the manufacturer on the selection of appropriate materials. The process was complicated by the then ongoing COVID pandemic. The manufacturer accepted

Wybierając fotele audytorijne, projektanci zazwyczaj zwracają uwagę na estetykę (rodzaj tapicerki, kolor, wrażenia dotykowe), trwałość (odporność tkaniny na ścieranie), ergonomię (sztywność i elastyczność pianki) oraz koszt fotela. Właściwości akustyczne na ogół nie są uważane za istotne i są znane tylko w przypadku najdroższych produktów przeznaczonych do największych sal koncertowych. Ze względu na ograniczenia budżetowe całego projektu sali koncertowej na 350 miejsc, otwartej w 2022 r. w Jastrzębiu-Zdroju, który wynosił pierwotnie niecałe 10 mln zł, koszt jednego fotela był bardzo ograniczony (poniżej 800 zł/szt. netto). Wylimitowało to wszystkie produkty, w przypadku których znane są dane dotyczące współczynnika pochłaniania dźwięku. Generalny wykonawca budynku podjął negocjacje z kilkoma krajowymi producentami foteli, a następnie wskazał jednego z nich jako dostawcę, pomimo że ostateczny fotel jeszcze nie istniał. Następnie jeden z autorów artykułu będący również autorem projektu akustycznego całego budynku oraz projektu akustyki sali koncertowej, został poproszony, aby we współpracy ze wskazanym producentem i pod nadzorem generalnego projektanta budynku – śląskiej pracowni SLAS Architekci – zaprojektował akustycznie docelowy fotel oraz doradził producentowi w doborze odpowiednich materiałów. Proces ten komplikowała trwająca wtedy pandemia COVID. Producent podjął wyzwanie wyprodukowania siedzisk do sali koncertowej w Jastrzębiu-Zdroju z uwzględnieniem ich wymagań akustycz-

<sup>1)</sup> Cracow University of Technology

<sup>\*</sup> Correspondence address: andrzej.klosak@pk.edu.pl

the challenge of producing chairs for the concert hall in Jastrzębie-Zdrój, taking into account their acoustic and aesthetic requirements, and agreed to implement any material and structural changes to the designed chair indicated by the author of the acoustic design, as well as to provide the necessary samples and mockups so that acoustic measurements could be performed on them. The results of this cooperation are described in the article.

The overarching goal of the design process for the chairs for the concert hall in Jastrzębie was to adapt their sound absorption coefficients to the needs of the acoustics of the designed interior. For this purpose, both laboratory tests of airflow resistance conducted according to [1] on small samples of individual fabrics, foams and entire upholstery systems and laboratory measurements of the sound absorption coefficients of a group of chairs conducted according to [2] in a typical reverberation chamber were performed. The airflow resistance results obtained at each design stage were then analyzed both in terms of simulation of sound absorption coefficients using the methods described in [3] and simulation of the acoustic parameters of the hall interior using simulation software [4]. At the end of the construction work, reverberation time measurements were also taken before, during and after the installation of the chairs according to [5].

The problem of appropriate selection and prediction of chair absorption coefficients, as well as how to carry out acoustic measurements of the sound absorption coefficient of a group of chairs, so that the values used in the calculations give results close to real measurements in finite interiors, is extensively described in the literature. Beranek and Hidaka [6] and Kosten [7] reported averaged values of absorption coefficients for both empty and audience-occupied chairs, based on measurements from existing halls. Kath and Kuhl [8, 9], Bradley [10], Davis et al [11], and Nishihara [12] analyzed the inadequacies of standard measurement of sound absorption coefficients according to the standard method [2], because testing only a group of chairs with a small surface area (typically 12 – 20 chairs occupying 10 – 20 m<sup>2</sup>) does not allow sound absorption coefficients similar to those determined as-built for large auditorium areas as typically found in concert halls. In our opinion, the Bradley method described in detail also in [12 ÷ 14] is suitable for practical application, but due to its time-consuming nature and the large number of measurements required (typically 5 – 6 measurements of one group of chairs), it is rarely used. Most often, only the typical absorption coefficients for one of the three groups of chairs, selected according to the degree of upholstery padding of their surfaces, developed by Beranek [6], or the absorption coefficients of a specific type of chair, provided by its manufacturer, determined by the classical standard method [2], are used in design.

## Method

The chair design process began with finding a compact chair (55 cm wide) from the manufacturer's existing portfolio (Figure 1). Due to the limited volume of the concert hall in

nych oraz estetycznych i wyraził zgodę na zaimplementowanie wszelkich zmian materiałowych i konstrukcyjnych projektowanego fotela wskazanych przez autora projektu akustycznego oraz na dostarczenie niezbędnych próbek i mockupów, aby można było przeprowadzić na nich pomiary akustyczne. W artykule zostały opisane efekty tej współpracy.

Celem nadrzędnym procesu projektowania foteli do jastrzębskiej sali koncertowej było dostosowanie ich współczynników pochłaniania dźwięku do potrzeb akustyki projektowanego wnętrza. W tym celu wykonano zarówno badania laboratoryjne oporności przepływu przeprowadzone zgodnie z [1] na niewielkich próbkach poszczególnych tkanin, pianek i całych układów tapicerskich, jak i laboratoryjne pomiary współczynników pochłaniania dźwięku grupy foteli, przeprowadzone zgodnie z [2] w typowej komorze pogłosowej. Uzyskiwane na poszczególnych etapach projektowania wyniki oporności przepływu były następnie analizowane zarówno pod względem symulacji współczynników pochłaniania dźwięku z wykorzystaniem metod opisanych w [3], jak i symulacji parametrów akustycznych wnętrza sali z wykorzystaniem oprogramowania symulacyjnego [4]. Na zakończenie prac budowlanych wykonane zostały również pomiary czasu pogłosu przed, w trakcie i po zakończeniu montażu foteli zgodnie z [5].

Problem odpowiedniego doboru i prognozowania współczynników pochłaniania foteli, jak i sposobu przeprowadzenia pomiarów akustycznych współczynnika pochłaniania dźwięku grupy foteli, tak aby wartości użyte w obliczeniach dawały wyniki zbliżone do realnych pomiarów w skończonych wnętrzach, jest szeroko opisany w literaturze. Beranek i Hidaka [6] oraz Kosten [7] podawali uśrednione wartości współczynników pochłaniania w przypadku pustych, jak i zajętych przez słuchaczy foteli, opracowane na podstawie pomiarów z istniejących sal. Kath i Kuhl [8, 9], Bradley [10], Davis i inni [11] oraz Nishihara [12] analizowali niedoskonałości standardowego pomiaru współczynników pochłaniania dźwięku zgodnie z normową metodą [2], ponieważ badanie jedynie grupy foteli o niewielkiej powierzchni (typowo 12 – 20 sztuk foteli zajmujących 10 – 20 m<sup>2</sup>) nie pozwala na uzyskanie współczynników pochłaniania dźwięku zbliżonych do wyznaczonych powykonawczo w przypadku dużych obszarów widowni, jakie typowo występują w salach koncertowych. Naszym zdaniem do praktycznego zastosowania nadaje się metoda Bradleya opisana dokładniej również w [12 ÷ 14], ale ze względu na jej czasochłonność oraz dużą wymaganą liczbę pomiarów (typowo 5 – 6 pomiarów jednej grupy foteli) jest ona rzadko stosowana. Najczęściej w projektowaniu stosuje się tylko typowe współczynniki pochłaniania w przypadku jednej z trzech grup foteli, dobrane w zależności od stopnia wyścielenia ich powierzchni tapicerką, opracowane przez Beranek [6] albo też współczynniki pochłaniania konkretnego typu fotela, dostarczone przez jego producenta, wyznaczone klasyczną metodą normową [2].

## Metoda

Proces projektowania fotela rozpoczęto od znalezienia kompaktowego fotela (szerokość 55 cm) z istniejącego portfolio producenta (rysunek 1). Ze względu na ograniczoną ku-

Jastrzębie, it was necessary to design chairs with the highest possible sound absorption coefficients within the 125–250 Hz bands and without excessive absorption in the higher bands. This was necessary to compensate for the limited low-frequency absorption capacity of other materials present in the hall, which resulted from finishing large areas of the walls with smooth concrete [15]. In order to study the possible impact on the sound absorption coefficient of the seat opening angle between the backrest and the base when the chair is empty, two versions of the seat were developed (Figure 2a). Architecturally, the seat was to be finished in black-painted wood, with black „woven” upholstery (Figure 2b). The sides of the chair, the back of the backrest and the bottom of the seat are designed from solid plywood.

Deciduous plywood, 50 mm thick, was used for finishing the sides, and 12 mm thick for the rest of the elements. In the middle of the seat, between the bottom plywood and the sound-absorbing foam, an additional layer of 18 mm thick load-bearing plywood was placed. The final upholstery of both the seat and backrest („Type 1” according to Table 1) was combined with 5 mm thick laminating foam in a welding

ków przyjęto sklejkę liściastą grubości 50 mm, a w przypadku pozostałych elementów grubości 12 mm. W środku siedziska, pomiędzy sklejką spodnią a pianką dźwiękochłonną, została umieszczona dodatkowa warstwa sklejki nośnej grubości 18 mm. Ostateczna tapicerka zarówno siedziska, jak i oparcia („Typ 1” wg tabeli 1) była łączona z pianką laminującą grubości 5 mm w procesie zgrzewania, a następnie klejona do ciętej

baturę jastrzębskiej sali koncertowej należało zaprojektować fotele o możliwie wysokich współczynnikach pochłaniania dźwięków w pasmach 125 – 250 Hz i bez nadmiernego pochłaniania w wyższych pasmach. Było to konieczne, aby zrekompensować ograniczoną zdolność pochłaniania niskich częstotliwości przez inne materiały obecne w sali, co wynikało z wykończenia dużych obszarów ścian gładkim betonem [15]. W celu zbadania możliwego wpływu na współczynnik pochłaniania dźwięku kąta rozwarcia siedziska między oparciem a podstawą, gdy fotel jest pusty, opracowano dwie wersje siedziska (rysunek 2a).

Architektonicznie siedzisko miało być wykończony drewnem malowanym na czarno, z czarną „tkaną” tapicerką (rysunek 2b).

Boki fotela, tył oparcia i spód siedziska zaprojektowano z pełnej sklejki. Do wykańczania boków przyjęto sklejkę liściastą grubości 50 mm, a w przypadku pozostałych elementów grubości 12 mm. W środku siedziska, pomiędzy sklejką spodnią a pianką dźwiękochłonną, została umieszczona dodatkowa warstwa sklejki nośnej grubości 18 mm. Ostateczna tapicerka zarówno siedziska, jak i oparcia („Typ 1” wg tabeli 1) była łączona z pianką laminującą grubości 5 mm w procesie zgrzewania, a następnie klejona do ciętej



Fig. 1. Preliminary chair mockup  
Rys. 1. Wstępny mockup fotela

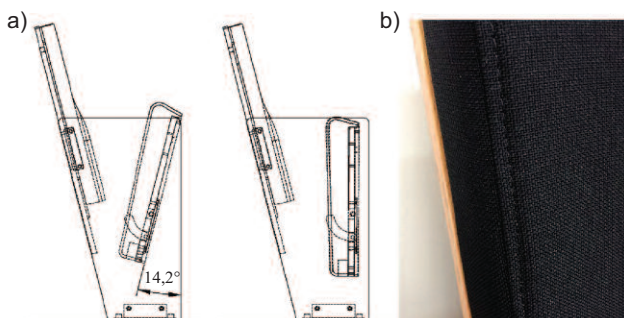


Fig. 2. Two types of seat bottom inclination angle prepared for final measurements of sound absorption of a block of 20 seats in reverberation chamber (a); fabric „Type 1” used in all seats in those measurements (air flow resistance  $R_s = 115 \text{ Pa}\times\text{s/m}$ ) (b)  
Rys. 2. Dwa rodzaje kątów nachylenia dna siedziska przygotowane do końcowych pomiarów pochłaniania dźwięku bloku 20 foteli w komorze pogłosowej (a); tkanina „Typ 1” zastosowana na wszystkich siedzeniach w jastrzębskiej sali o oporze przepływu  $R_s = 115 \text{ Pa}\times\text{s/m}$ ) (b)

Table 1. Measured types of fabrics, foam and upholstery

Tabela 1. Przebadane typy tkanin, pianek i układów tapicerskich

Type of material/ Typ materiału	Designation in the article/ Oznaczenie w artykule	Description/Opis
Closed-cell foams/ Pianki zamkniętokomórkowe	PE closed-cell foams/ zamkniętokomórkowe pianki PE	foam poured into the mold, two types (white and pink)/pianki wylewane do formy, dwa typy (biała i różowa)
Open-cell foams/ Pianki otwartokomórkowe	soft foam or open-cell foam/pianka miękka lub pianka otwartokomórkowa	open-cell foam with a density of about 29 kg/m <sup>3</sup> /pianka otwartokomórkowa o gęstości ok. 29 kg/m <sup>3</sup>
Mixed open-cell foams/Pianki mieszane otwartokomórkowe	mixed foam/pianka mieszana	open-cell foam resulting from the process of cutting and secondary foaming of recycled foams, with a density of about 63 kg/m <sup>3</sup> /pianka otwartokomórkowa powstała w wyniku procesu cięcia i wtórnego spieniania pianek z recyklingu, o gęstości ok. 63 kg/m <sup>3</sup>
Fabrics/Tkaniny	„Type 1”/„Typ 1”	the fabric used in the chairs installed in the hall, sourced from the English market, made of polyester braid with a thickness of about 0.9 mm and a weight of about 320 g/m <sup>2</sup> /zastosowana w fotelach tkanina zamontowana w sali, pozyskana z rynku angielskiego, wykonana z poliestru plecionka o grubości ok. 0,9 mm i gramaturze ok. 320 g/m <sup>2</sup>
	„Type 2” or velour/ „Type 2” lub welurowa	velour (polyester) fabric with a thickness of about 0.6 mm and a weight of 135 g/m <sup>2</sup> /tkanina welurowa (poliestrowa) o grubości ok. 0,6 mm i gramaturze 135 g/m <sup>2</sup>
	„Type 3” or woven/ „Type 3” lub tkana	plaited fabric (100% PES) with a thickness of about 0.9 mm and a weight of 360 g/m <sup>2</sup> /tkanina pleciona (100% PES) o grubości ok. 0,9 mm i gramaturze 360 g/m <sup>2</sup>
Upholstery systems/ Układy tapicerskie	fabrics with a plaited appearance/ tkaniny o wyglądzie plecionki	10 types of various fabrics with a plaited appearance/10 typów różnych tkanin o wyglądzie plecionki
	„Type 1” fabric/tkanina „Typ 1” „Type 2” fabric/tkanina „Typ 2” „Type 3” fabric/tkanina „Typ 3”	laminated for soft foam or for mixed foam/laminowana do pianki miękkiej albo do pianki mieszanej



process, and then glued to the cut foam proper, made of open-cell polyurethane. „Mixed foam” 80 mm thick was used for the seat (Table 1), and „soft foam” 50 mm thick was used for the backrest (Table 1).

The next step in the chair design process was **to select the appropriate foam to line the backrest and the seat**, from among the various types of foam available [16]. Typically, chair manufacturers use closed-cell PE foam (injected into molds) because it is cheaper, easier to shape and more durable than open-cell (cut) foam. The work examined the airflow resistance and analyzed the sound absorption coefficients of both types of foam and upholstery systems with these foams.

The final step in the chair design process was the choice of upholstery fabric. As part of the work, the airflow resistance of more than ten different types of upholstery fabrics, pre-selected by the designer, was tested, and then analogous measurements of the entire upholstery system were made for the selected fabric.

**Airflow resistance measurements** were carried out using the alternating airflow method in accordance with the standard [1] on a standard commercially available test bench [17]. Unless otherwise stated in the article, the measurements of the absorption coefficient of the chair group were carried out in accordance with the standard [2] in a reverberation chamber, using the standard arrangement of sample mounting – J-type mounting with the so-called shallow well made of non-absorbing screens with a height of 90 cm around the two sides of the sample (the height of the screens being identical to the height of the chair), using two perpendicular walls of the chamber as the surroundings of the other two sides of the sample. Measurements of the sound absorption coefficient of the samples were made in an impedance tube with a diameter of 100 mm according to [18], omitting the use of a smaller tube diameter and measurements of higher frequency bands. This was due to the desire to save time and the assumption that all porous sound-absorbing materials should have similar (high) sound absorption coefficients at frequencies higher than 1600 Hz. As later measurement results have shown, this may not always be the right assumption for materials where a multi-layer lamination process is used.

The absorption coefficients of the chairs already installed in the hall were measured by measuring the reverberation time before and after installation of the chairs, and then applying the transformed Sabine formula. A detailed description of this method can be found in the literature [19 – 21]. The fabric, foam and upholstery systems described in Table 1 were examined.

## Results and analyses

The chapter describes the results obtained from measurements of the airflow resistance of upholstery fabrics, upholstery foams and entire upholstery systems cut from manufactured chair samples, and the results of measurements of the acoustic absorption coefficients of upholstery systems made in an impedance tube, as well as

pianki właściwej, wykonanej z poliuretanu w wersji otwartokomórkowej. Na siedzisko zastosowano „piankę mieszaną” grubości 80 mm (tabela 1), a na oparcie „piankę miękką” grubości 50 mm (tabela 1).

Kolejnym krokiem procesu projektowania foteli był **dobór odpowiedniej pianki do wyłożenia nią oparcia i siedziska**, spośród różnych dostępnych typów pianek [16]. Zazwyczaj producenci foteli stosują zamkniętokomórkową piankę PE (wtyskiwaną do form), ponieważ jest tańsza, łatwiejsza do kształtowania i trwalsza niż pianka otwartokomórkowa (cięta). W ramach prac przebadano oporność przepływu i przeanalizowano współczynniki pochłaniania dźwięku obu rodzajów pianek oraz układów tapicerskich z tymi piankami.

Ostatnim krokiem procesu projektowania foteli był wybór tkaniny obiciowej. W ramach prac przebadano oporność przepływu ponad dziesięć różnych rodzajów tkanin obiciowych, wstępnie wybranych przez projektanta, a następnie dla wybranej tkaniny wykonano analogiczne pomiary całego układu tapicerskiego.

**Pomiary oporności przepływu** przeprowadzono metodą przemiennego przepływu powietrza zgodnie z normą [1] na standardowym dostępnym komercyjnie stanowisku pomiarowym [17]. Jeśli w artykule nie zaznaczono inaczej, pomiary współczynnika pochłaniania grupy foteli wykonano zgodnie z normą [2] w komorze pogłosowej, stosując normowy układ montażu próbki – montaż typu J z tzw. płytką studnią wykonaną z niepochłaniających dźwięku ekranów o wysokości 90 cm wokół dwóch boków próbki (wysokość ekranów identyczna jak wysokość fotela), wykorzystując dwie prostopadłe ściany komory jako otoczenie dwóch pozostałych boków próbki. Pomiary współczynnika pochłaniania dźwięku próbek wykonano w tubie impedancyjnej o średnicy 100 mm zgodnie z [18], pomijając stosowanie mniejszej średnicy tuby i pomiary pasm o wyższej częstotliwości. Wynikało to z chęci oszczędności czasu oraz przyjętego założenia, że wszystkie porowate materiały dźwiękochłonne powinny charakteryzować się zbliżonymi (wysokimi) współczynnikami pochłaniania dźwięku w przypadku częstotliwości większej niż 1600 Hz. Jak pokazały późniejsze wyniki pomiarów, może nie zawsze być to właściwym założeniem w przypadku materiałów, w których stosowany jest proces laminacji kilku warstw.

Pomiary współczynników pochłaniania foteli już zamontowanych w sali wykonano, mierząc czas pogłosu przed i po montażu foteli, a następnie stosując przekształcony wzór Sabine’a. Szczegółowy opis tej metody można znaleźć w literaturze [19 – 21]. Przebadano opisane w tabeli 1 układy tkanin, pianek i tapicerek.

## Wyniki i analizy

W rozdziale opisano uzyskane wyniki pomiarów oporności przepływu powietrza tkanin obiciowych, pianek tapicerskich i całych układów tapicerskich wyciętych z wyprodukowanych próbek foteli oraz wyniki pomiarów akustycznych współczynników pochłaniania dźwięku układów tapicerskich wykonane w tubie impedancyjnej, jak również wyniki zbadanych grup foteli uzyskane w badaniach laboratoryjnych w komorze pogłosowej oraz już zamontowanych foteli w sali koncertowej.

the results of tested groups of chairs obtained in laboratory tests in a reverberation chamber and already installed chairs in the concert hall. Two types of closed-cell PE foams were measured. Both achieved high airflow resistance values for a thickness of 50 mm, respectively 1400 Pa×s/m for „pink foam” and 6300 Pa×s/m for „white foam”. In addition, two types of PE foams with an open-cell structure were measured, which obtained resistance of 300 Pa×s/m („soft foam”) and 390 Pa×s/m („mixed foam”) at a thickness of 50 mm.

Measurements of more than ten types of different upholstery fabrics, pre-selected solely on the basis of visual preference and aesthetic value (the „plaited” appearance), showed that they have an airflow resistance of 1000 ~ 2560 Pa×s/m, with fabric thicknesses of 0.6 ~ 1.2 mm. The fabric finally used in the chairs in the hall in Jastrzębie („Type 1” fabric) had an airflow resistance of 115 Pa×s/m.

Table 2 shows the results of airflow resistance measurements of two upholstery systems with „Type 1” upholstery fabric laminated to two different types of open-cell PE foams described as: „soft foam” and „mixed foam”.

Figure 3 shows the results of sound absorption coefficient measurements obtained in the impedance tube for two types of open-cell foam („soft foam” and „mixed foam”) and two different types of fabrics – velour and woven („Type 2” fabric and „Type 3” fabric), while Figure 4 shows the values of the sound absorption coefficients of the chairs determined on the basis of control reverberation time measurements before, during and after the installation of the chairs, taken in the concert hall. The results were compared with previous laboratory measurements of the sound absorption coefficient of twenty chairs, made in a reverberation chamber at the Silesian University of Technology [22], and values from the literature for three types of chair absorption levels [6]. The results of the measurements were also corrected for Bradley's P/A correction [10, 13, 14] taken from [14, Table 4] to compare the laboratory measure-

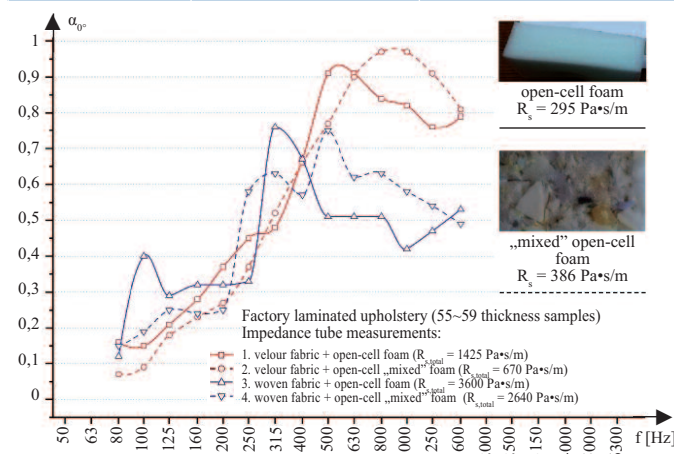
Wykonano pomiary dwóch rodzajów pianek PE o strukturze zamkniętokomórkowej. Obie uzyskały wysokie wartości oporu przepływu dla grubości 50 mm, odpowiednio 1400 Pa×s/m w przypadku „pianki różowej” oraz 6300 Pa×s/m dla „pianki białej”. Ponadto wykonano pomiary dwóch rodzajów pianek PE o strukturze otwartokomórkowej, które uzyskały przy grubości 50 mm opór 300 Pa×s/m („pianka miękka”) i 390 Pa×s/m („pianka mieszana”).

Pomiary ponad dziesięciu typów różnych tkanin obiciowych, wstępnie wybranych wyłącznie na bazie preferencji wizualnych i walorów estetycznych (wygląd „plecionki”) wykazały, że charakteryzują się one oporem przepływu 1000 ~ 2560 Pa×s/m, przy grubości tkanin 0,6 ~ 1,2 mm. Tkanina ostatecznie zastosowana w fotelach w jastrzębskiej sali (tkanina „Typ 1”) miała oporność przepływu 115 Pa×s/m.

W tabeli 2 pokazano wyniki pomiarów oporności przepływu dwóch układów tapicerskich z tkaniną obiciową „Typ 1” laminowaną do dwóch różnych rodzajów otwartokomórkowych pianek PE opisanych jako: „pianka miękka” oraz „pianka mieszana”.

**Table 2. Airflow resistance measured for ten samples (5,0 cm thick) cut out from several different seat samples for fabric „Type 1” and two types of foams**  
Tabela 2. Opór przepływu powietrza dziesięciu próbek (grubości 5 cm), wyciętych z kilku różnych próbek siedzisk foteli, w przypadku tkaniny „Typ 1” i dwóch rodzajów pianek

Value/Wartość	Airflow resistance for „Type 1” fabric/Oporność przepływu powietrza w przypadku tkaniny „Typ 1”	
	laminated to „soft foam” [Pa×s/m]/laminowanej do „pianki miękkiej” [Pa×s/m]	laminated to „mixed foam” [Pa×s/m]/laminowanej do „pianki mieszanej” [Pa×s/m]
Average (10 samples)/Średnia (10 próbek)	1277	509
Min-max	521 – 2030	442 – 612
Standard deviation/Odchylenie standardowe	575	53



**Fig. 3. Sound absorption coefficient, as measured in an impedance tube, for two types of open-cell foams (typical open-cell foam, and a „mixed” open-cell foam from „rebound” processing of different types of recycled foams), and two types of fabrics: velour 200 Pa×s/m (fabric „Type 2”) and woven 2560 Pa×s/m (fabric „Type 3”)**

Rys. 3. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku, mierzonego w tubie impedancyjnej, w przypadku dwóch rodzajów pianek otwartokomórkowych („pianka miękka” oraz „pianka mieszana”) oraz dwóch rodzajów tkanin: welurowa 200 Pa×s/m (tkanina „Typ 2”) oraz tkanina 2560 Pa×s/m (tkanina „Typ 3”)

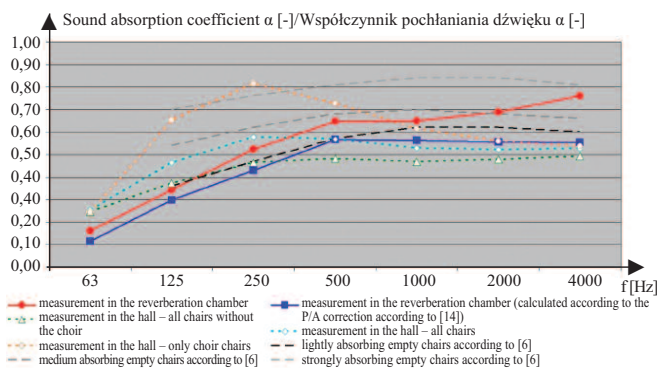
Na rysunku 3 przedstawiono wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku uzyskanych w tubie impedancyjnej w przypadku dwóch rodzajów pianek otwartokomórkowych („pianka miękka” oraz „pianka mieszana”) oraz dwóch różnych rodzajów tkanin – welurowej i tkanej (tkanina „Typ 2” oraz tkanina „Typ 3”), natomiast na rysunku 4 wartości współczynników pochłaniania dźwięku foteli wyznaczone na podstawie kontrolnych pomiarów czasu pogłosu przed, w trakcie i po zakończeniu montażu foteli, wykonanych w sali koncertowej. Wyniki te porównano z wcześniejszymi pomiarami laboratoryjnymi współczynnika pochłaniania dźwięku dwudziestu foteli, wykonanymi w komorze pogłosowej na Politechnice Śląskiej [22] oraz wartościami z literatury dotyczącymi trzech typów poziomu chłonności foteli [6]. Wyniki pomiarów skorygowano również o poprawkę P/A Bradleya [10, 13, 14] zaczerpniętą z [14, tabela 4], aby porównać pomiary laboratoryjne ze współczynnikami pochłaniania dźwięku podanymi przez Beranka [6, 12].

ments with the sound absorption coefficients reported by Beranek [6, 12].

## Conclusions

The first conclusion after testing is that none of the pre-selected more than ten types of fabrics provided information on airflow resistance in their technical sheets. Meanwhile, in the case of fabrics from reputable foreign manufacturers, such as those from Denmark, Germany and England, the technical materials include both the results of measurements of airflow resistance and sound absorption coefficient in the reverberation chamber. The latter are often available with two arrangements of corrugations – flat-suspended fabric and corrugated fabric (excess fabric width of 100% over the width of the sample). If the acoustic design of the hall indicates either of these two parameters describing the fabric, in Poland it is most often not possible to obtain their values for products offered by general contractors. Only the use of a specialized measuring station [17], which is available, for example, in the Department of Building Design and Building Physics at the Cracow University of Technology, makes it possible to test the airflow resistance of such samples in accordance with ISO 9053 [1]. Such measurements, however, represent an additional cost to the contractor, and as can be seen from the tests performed, the ten upholstery fabrics selected and tested in succession achieved airflow resistance values too high to be used on well-absorbing chairs. The final fabric chosen (imported from the UK, and therefore much more expensive than previously chosen), had already been examined by us, so it only required aesthetic and price approval. Consideration should be given to how to persuade manufacturers to have the airflow resistance parameter declared by them, which would greatly facilitate the selection of this group of materials as sound-absorbing elements for interiors.

As part of the measurements carried out, the airflow resistance of two different – from the one finally used – types of fabric used on the upholstered elements was examined. The first was characterized by an airflow resistance of 200 Pa×s/m (the „Type 2” fabric), and the second, the aesthetically preferred plaited fabric, 2560 Pa×s/m (the „Type 3” fabric). Such a large difference in airflow resistance shows how much influence the choice of fabric can have on the final sound-absorbing properties of the entire upholstery system. Practice shows that manufacturers often use the results of measurements of a group of chairs obtained for a particular fabric, whose airflow resistance parameters are not defined anywhere, and do not inform the architect that changing the



**Fig. 4. Sound absorption of empty chairs measured in reverberation chamber [22] and in hall. For calculation of sound absorption based on in-hall measurements a strip of 0,5 m around audience blocks was included**

*Rys. 4. Współczynnik pochłaniania dźwięku pustych foteli (bez widzów) zmierzony w komorze pogłosowej [22] oraz we wnętrzu sali koncertowej. Wartości współczynnika pochłaniania dźwięku wyznaczone z pomiarów w sali uwzględniają powierzchnię pasa 0,5 m wokół obszarów widowni*

dwóch układów pofałdowania – tkaniny płasko zawieszanej oraz tkaniny pofałdowanej (naddatek szerokości materiału 100% w stosunku do szerokości próbki). Jeśli w projekcie akustycznym pomieszczenia wskazano któryś z tych dwóch parametrów opisujących tkaninę, w Polsce najczęściej nie ma możliwości uzyskania ich wartości w przypadku produktów oferowanych przez generalnych wykonawców. Dopiero zastosowanie specjalistycznego stanowiska pomiarowego [17], w jakie wyposażona jest np. Katedra Fizyki Budowli i Budownictwa Ogólnego Politechniki Krakowskiej, umożliwia zbadanie oporności przepływu powietrza takich próbek zgodnie z normą ISO 9053 [1]. Takie pomiary to jednak dodatkowy koszt dla wykonawcy, a jak widać z wykonanych badań, dziesięć kolejno wybieranych i badanych tkanin obiciowych uzyskało wartości oporności przepływu zbyt wysokie, aby móc je zastosować na fotele dobrze pochłaniające. Ostatecznie wybrana tkanina (sprowadzona z Wielkiej Brytanii, a zatem dużo droższa niż poprzednio wybierane), była już wcześniej przez nas badana, dlatego wymagała jedynie akceptacji estetycznej i cenowej. Należy rozważyć, w jaki sposób przekonać producentów, aby parametr oporności przepływu powietrza był przez nich deklarowany, co bardzo ułatwiłoby dobór tej grupy materiałów, jako elementów dźwiękochłonnych do wnętrz.

W ramach przeprowadzonych pomiarów zbadano oporność przepływu dwóch różnych – od ostatecznie zastosowanej – typów tkanin wykorzystanych na elementach tapicerowanych. Pierwsza charakteryzowała się opornością przepływu 200 Pa×s/m (tkanina „Typ 2”), a druga, preferowana pod względem estetyki tkanina pleciona, 2560 Pa×s/m (tkanina „Typ 3”). Tak duża różnica oporności przepływu pokazuje, jak ogromny wpływ może mieć dobór tkaniny na ostateczne właściwości dźwiękochłonne całego układu tapicerskiego. Praktyka pokazuje, że producenci często posługują się wynikami pomiarów grupy foteli uzyskanymi w przypadku konkretnej tkaniny, której parametry oporności przepływu nie są nigdzie zdefiniowane i nie informują architekta, że zmiana tkaniny na inną może diametralnie zmienić parametry całego fotela.

## Wnioski

Pierwszy wniosek po przeprowadzeniu badań jest taki, że żadna z wstępnie wybranych ponad dziesięć rodzajów tkanin nie zawierała informacji o oporności przepływu powietrza w swoich kartach technicznych. Tymczasem w przypadku tkanin renomowanych zagranicznych producentów, np. z Danii, Niemiec czy Anglii, w materiałach technicznych znajdują się zarówno wyniki pomiarów oporności przepływu, jak i współczynnika pochłaniania dźwięku w komorze pogłosowej. Te ostatnie często są dostępne w przypadku



fabric to another can dramatically change the parameters of the entire chair.

The research confirmed that closed-cell upholstery foams should not be used as infill for components with high sound absorption requirements. The airflow resistance values obtained for closed-cell PE foams are usually very high, and can far exceed the contractual upper limit of 2000 ~ 3000 Pa×s/m, which translates to about 40 ~ 60 kPa×s/m<sup>2</sup> for a typical foam thickness of about 50 mm. Above this value of airflow resistance, the weighted sound absorption coefficient  $\alpha_w$  of a product made of such foam begins to decrease noticeably, and yet there will be further layers attached to the foam, which will further increase the total airflow resistance of the entire upholstery system.

Assessing the values of airflow resistance through the fabric and foam system, we expected the total airflow resistance to be approximately the sum of the resistance of the individual layers and to be 500 – 600 Pa×s/m for both types of open-cell foams, thus providing a high value of the sound absorption coefficient ( $\alpha_w = 1.0$  calculated for a 50 mm thick sample). In fact, this was confirmed in laboratory measurements in an impedance tube with a set of fabric and foam laid loosely on top of each other. However, the manufacturer decided to fix the fabric using a hot lamination process with a “lamination foam” about 4 mm thick. The lamination foam itself has an airflow resistance of about 410 Pa×s/m, which is much higher than 50 mm of upholstery foam. Laminating foam is used to bond the fabric and upholstery foam, which, according to the manufacturer, has a significant impact on the durability of the product. According to the information received, in one of the new well-known concert halls the upholstery of the chairs was made without such foam (perhaps for acoustic reasons), which was already evident in the appearance of the chairs after about five years of use.

The negative effect of the fabric-to-foam lamination process was observed when determining the sound absorption coefficient of two pre-selected types of upholstery in an impedance tube (Figure 3). The results presented (Figure 3) show a significant reduction in the sound absorption coefficient from about 500 Hz upward, and this is particularly evident for the heavier fabric (the „Type 3” fabric), which requires more heat for lamination, compared to the lighter velour fabric (the „Type 2” fabric). The measurements also showed that the value of the absorption coefficient as a function of frequency for velour fabric (Type „2”) laminated with a higher density foam („mixed foam”) is more similar to the sound absorption coefficients calculated from its airflow resistance than when the same fabric is laminated to a lighter foam („soft foam”). Small samples (25 x 25 cm) were used for the initial tests, so we hoped that in the final chair manufacturing process the effect of the lamination process on airflow resistance would be less significant. However, as shown in Table 1, airflow resistance measurements of ten samples (with „Type 1” fabric), cut from several finished full-size seat cushions, again indicated a significant impact of the lamination process on the results.

Badania potwierdziły, że zamkniętokomórkowe pianki tapicerskie nie powinny być stosowane jako wypełnienie elementów o dużych wymaganiach dotyczących pochłaniania dźwięku. Wartości odporności przepływu uzyskane w przypadku zamkniętokomórkowych pianek PE są zwykle bardzo duże, mogą znacznie przekraczać umowną górną granicę wynoszącą 2000 ~ 3000 Pa×s/m, co przy typowej grubości pianki ok. 50 mm przekłada się na ok. 40 ~ 60 kPa×s/m<sup>2</sup>. Powyżej tej wartości oporności przepływu, ważony współczynnik pochłaniania dźwięku  $\alpha_w$  produktu z takiej pianki zaczyna wyraźnie maleć, a przecież na piance zamocowane będą jeszcze kolejne warstwy, które dodatkowo zwiększą sumaryczny opór przepływu całego układu tapicerskiego.

Oceniając wartości oporności przepływu powietrza przez układ tkaniny i pianki, oczekiwaliśmy, że całkowity opór przepływu powietrza będzie w przybliżeniu sumą oporu poszczególnych warstw i wyniesie 500 – 600 Pa×s/m w przypadku obu rodzajów pianek otwartokomórkowych, zapewniając tym samym wysoką wartość współczynnika pochłaniania dźwięku ( $\alpha_w = 1,0$  obliczone w przypadku próbki o grubości 50 mm). Zostało to zresztą potwierdzone w pomiarach laboratoryjnych w tubie impedancyjnej w przypadku zestawu tkaniny i pianki ułożonych luźno na sobie. Producent zdecydował się jednak na mocowanie tkaniny w procesie laminowania na gorąco z użyciem „pianki laminacyjnej” grubości ok. 4 mm. Sama pianka laminacyjna charakteryzuje się opornością przepływu na poziomie ok. 410 Pa×s/m, czyli znacznie więcej niż 50 mm pianki tapicerskiej. Pianka laminacyjna służy do łączenia tkaniny i pianki tapicerskiej, co zgodnie z informacjami uzyskanymi od producenta ma istotny wpływ na trwałość produktu. Z uzyskanych informacji wynika, że w jednej z nowych znanych sal koncertowych tapicerka foteli została wykonana bez takiej pianki (być może z powodów akustycznych), co już po ok. pięciu latach użytkowania było widoczne w wyglądzie tych foteli.

Negatywny wpływ procesu laminacji tkaniny do pianki zaobserwowano podczas wyznaczania współczynnika pochłaniania dźwięku dwóch wstępnie wybranych rodzajów tapicerki w tubie impedancyjnej (rysunek 3). Przedstawione wyniki (rysunek 3) pokazują znaczne zmniejszenie współczynnika pochłaniania dźwięku od ok. 500 Hz wzwyż i jest to szczególnie widoczne w przypadku cięższej tkaniny (tkanina „Typ 3”), wymagającej więcej ciepła do laminowania, w porównaniu z lżejszą tkaniną welurową (tkanina „Typ 2”). Pomiar wykazały również, że wartość współczynnika pochłaniania w funkcji częstotliwości w przypadku tkaniny welurowej (Typ „2”) laminowanej pianką o wyższej gęstości („pianką mieszaną”) jest bardziej zbliżona do współczynników pochłaniania dźwięku obliczonych na podstawie jej oporu przepływu niż w przypadku laminowania tej samej tkaniny do lżejszej pianki („pianka miękka”). Do początkowych testów zostały wykorzystane małe próbki (25 x 25 cm), dlatego mieliśmy nadzieję, że w końcowym procesie produkcji foteli wpływ procesu laminacji na opór przepływu będzie mniej istotny. Jak wynika z tabeli 1, pomiary oporności przepływu dziesięciu próbek (z tkaniną „Typ 1”), wyciętych z kilku gotowych pełnowymiarowych poduszek siedzeń, wskazywały jednak ponownie na istotny wpływ procesu laminacji na uzyskane wyniki.

**The lamination process increases the airflow resistance of the entire upholstery system** by creating something like a membrane between the laminated layers. The lack of control over the repeatability of this process (perhaps uneven lamination temperature and varying pressure?) leads to a large scatter in airflow resistance results depending on where the sample is cut. This raised questions about whether the sound absorption coefficient of the finished chairs would be unpredictable. Additional measurements of the sound absorption coefficient of the finished twenty chairs were commissioned for verification. The measurements were carried out in the reverberation chamber of the Silesian University of Technology in two variants of the backrest (with „soft foam” and „mixed foam”) in order to determine the influence of production quality and the lamination process on the final values of the absorption coefficient of a larger number of chairs. These results are described more extensively in [11]. Tests were performed on two types of backrests, as it was observed that the denser foam („mixed foam”) was much less affected by lamination than the more flexible, lower-density foam („soft foam”). Thus, consideration was given to replacing the lower-density foam, usually preferred for backrests for reasons of spectator comfort, with the denser foam typically used for seats, but ultimately there was no such need. Hard foams are preferred for seats due to durability requirements, while softer and more flexible ones are usually necessary to achieve comfortable back support while sitting.

The results described lead to the conclusion that, from an acoustic point of view, „mixed foam” is a safer option for use where a lamination process will be used, since it allows for a smaller scatter of obtained airflow resistance values than foams of lower density. As observed from measurements in the concert hall (Figure 4), the sound absorption of choir chairs (installed on a balcony with a slope of  $\sim 33^\circ$ ) is greater at low frequencies than the sound absorption of other chairs located on the much flatter first floor ( $\sim 19^\circ$ ) and in flat side galleries. For this reason, when predicting the reverberation time (RT) of a group of chairs placed on a flat surface using sound absorption coefficients obtained from measurements made in a reverberation chamber according to [2], this should be kept in mind where steeper areas of the auditorium are involved. The sound field in concert halls is not perfectly dispersed, so placing the absorbing area of chairs at an acute angle, especially high up in the hall, can reduce the reverberation time inside the hall more than calculations would suggest. Such an action introduces a large amount of absorption in the upper volume of the hall, which could otherwise serve as a „reverberation reservoir” to achieve longer reverberation time values [23].

During the design of new concert hall chairs, continuous acoustic monitoring is crucial, including control measurements of the airflow resistance of the materials used to control the sound absorption coefficients of the final product. A typical problem, for example, is changing the upholstery fabric of the chairs from that for which the acoustic measurements of the chairs were made in

**Proces laminowania zwiększa oporność przepływu powietrza całego układu tapicerskiego** przez wytworzenie czegoś na kształt membrany pomiędzy laminowanymi warstwami. Brak kontroli powtarzalności tego procesu (być może nierównomierna temperatura laminowania i zmienny nacisk?) prowadzi do dużego rozrzutu wyników oporności przepływu w zależności od miejsca wycięcia próbki. Wzbudziło to wątpliwości, czy współczynnik pochłaniania dźwięku gotowych siedzeń będzie nieprzewidywalny. W celu sprawdzenia zleczone zostały dodatkowe pomiary współczynnika pochłaniania dźwięku gotowych dwudziestu foteli. Pomiary wykonano w komorze pogłosowej Politechniki Śląskiej w dwóch wariantach oparcia (z „pianką miękką” oraz „pianką mieszaną”) w celu określenia wpływu jakości produkcji oraz procesu laminowania na ostateczne wartości współczynnika pochłaniania większej liczby foteli. Szerzej wyniki te opisano w [11]. Wykonano badania dwóch rodzajów oparc, ponieważ zaobserwowano, że gęstsza pianka („pianka mieszana”) była dużo mniej podatna na wpływ laminacji niż pianka bardziej elastyczna o mniejszej gęstości („pianka miękka”). Rozważano więc zastąpienie pianki o mniejszej gęstości, zwykle preferowanej na oparcia ze względu na komfort widzów, pianką bardziej gęstą, która jest stosowana typowo na siedziska, ale ostatecznie nie było takiej potrzeby. Twarde pianki są preferowane w przypadku siedzisk ze względu na wymagania dotyczące trwałości, podczas gdy miękkie i bardziej elastyczne są zwykle niezbędne, aby uzyskać wygodne podparcie pleców podczas siedzenia.

Opisane wyniki skłaniają do wniosku, że z akustycznego punktu widzenia „pianka mieszana” stanowi bezpieczniejszą opcję do stosowania tam, gdzie wykorzystywany będzie proces laminacji, gdyż pozwala na mniejszy rozrzut uzyskanych wartości oporności przepływu niż pianki o mniejszej gęstości. Jak zaobserwowano na podstawie pomiarów w sali koncertowej (rysunek 4), pochłanianie dźwięku siedzisk chóru (zainstalowanych na balkonie o nachyleniu  $\sim 33^\circ$ ) jest większe w przypadku niskich częstotliwości niż pochłanianie dźwięku innych siedzisk znajdujących się na znacznie bardziej płaskim parterze ( $\sim 19^\circ$ ) oraz płaskich galeriach bocznych. Z tego powodu podczas prognozowania czasu pogłosu (RT) grupy siedzeń umieszczonych na płaskiej powierzchni z wykorzystaniem współczynników pochłaniania dźwięku uzyskanych z pomiarów wykonywanych w komorze pogłosowej wg [2], należy mieć to na uwadze tam, gdzie występują bardziej strome obszary widowni. Pole dźwiękowe w salach koncertowych nie jest idealnie rozproszone, dlatego umieszczenie pochłaniającego obszaru foteli pod kątem ostrym, szczególnie wysoko w sali, może skrócić czas pogłosu w jej wnętrzu bardziej, niż wynikałoby z obliczeń. Takie działanie wprowadza dużą chłonność w górnej kubaturze sali, która w przeciwnym razie mogłaby posłużyć jako „rezewuar pogłosu” w celu uzyskania dłuższych wartości czasu pogłosu [23].

Podczas projektowania nowych foteli w salach koncertowych kluczowy jest ciągły nadzór akustyczny, w tym kontrolne pomiary oporności przepływu wykorzystywanych materiałów, w celu kontroli współczynników pochłaniania dźwięku produktu końcowego. Typowym problemem jest np. zmiana



the laboratory (usually many years earlier), without informing the designer of the impact of such a change on the sound-absorbing properties.

Finally, we want to share one more experience. During the construction of the concert hall in Jastrzębie-Zdrój, when it came time to take measurements of the chairs in the reverberation chamber, we found ourselves

in the middle of the COVID 19 pandemic. This was April 2021. Chair surveys are performed both without spectators and with spectators, which is typically accomplished by seating 20 randomly selected people in chairs during the measurement. Unfortunately, during this period it was not possible to obtain permission for twenty people to be in the reverberation chamber at the same time due to the restrictions during the pandemic. However, wanting to take the measurements and simulate the effect of seated audience absorption, we used twenty polypropylene dummies [as described in 24], each weighing about 5 kg, and dressed them in typical clothing (photo), since clothing provides the main acoustic absorption for a seated audience [12, 24].



**Our „pandemic proof” audience during sound absorption measurements**

*Badania współczynnika pochłaniania foteli w wersji z widzami w „czasach pandemii”*

*Photo: A. Kłosak*

*Fot.: A. Kłosak*

na tkaniny obiciowej foteli w stosunku do tej, w przypadku której były wykonywane pomiary akustyczne foteli w laboratorium (zwykle wiele lat wcześniej), bez informowania projektanta o wpływie takiej zamiany na właściwości dźwiękochłonne.

Na koniec chcemy się podzielić jeszcze jednym doświadczeniem. W czasie budowy sali koncertowej w Jastrzębiu-Zdroju, gdy przyszedł czas wykonać pomiary foteli w komorze pogłosowej,

znaleźliśmy się w środku pandemii COVID 19. Był to kwiecień 2021 r. Badania foteli wykonuje się zarówno w wersji bez widzów, jak i z widzami, co typowo udaje się zrealizować, sadząc podczas pomiaru 20 losowo wybranych osób na fotelach. Niestety w tym okresie nie udało się uzyskać zezwolenia na jednoczesne przebywanie dwudziestu osób w komorze pogłosowej z powodu ograniczeń w czasie pandemii. Chcąc jednak wykonać pomiary i zasymulować wpływ pochłaniania siedzącej publiczności, wykorzystaliśmy dwadzieścia manekinów z polipropylenu [jak opisano w 24], każdy ważący ok. 5 kg i ubraliśmy je w typową odzież (fotografia), gdyż ubrania zapewniają główną chłonność akustyczną siedzącej widowni [12, 24].

### Summary

The measurements, analysis and experience gained in the design of the chairs for the new concert hall of the Music School in Jastrzębie-Zdrój have led to some general conclusions that may be useful to both manufacturers and acoustics designers. As studies have shown, closed-cell (poured) foams are characterized by high airflow resistance ( $1400 \sim 6300 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}$  at a thickness of 50 mm), while open-cell (cut) foams achieve much lower values ( $300 \sim 390 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}$  at a thickness of 50 mm). The scatter of the results of the airflow resistance of the tested fabrics is very large ( $115 \sim 2560 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}$ ), so the type of fabric will have a definite impact on the sound absorption properties of the entire chair.

The study also shows that the process of laminating fabric to foam increases the airflow resistance of the entire system and significantly affects the sound absorption coefficient of the upholstered components – in our case, this effect can be seen mainly above the 500 Hz band. This is acceptable in the concert hall in question in Jastrzębie-Zdrój, but can cause problems in other interiors, especially if the fabric is laminated to low-density foams.

The sound absorption coefficient, of a group of chairs placed flat on the floor, determined by measurements in a reverberation chamber, may be underestimated when these chairs are placed on a steeply sloping auditorium in the target hall.

### Podsumowanie

Pomiary, analizy i doświadczenia uzyskane w ramach projektowania foteli do nowej sali koncertowej Szkoły Muzycznej w Jastrzębiu-Zdroju pozwoliły na sformułowanie kilku ogólnych wniosków, które mogą być przydatne zarówno dla producentów, jak i projektantów akustyki. Jak wykazały przeprowadzone badania, pianki zamkniętokomórkowe (wylewane) charakteryzują się dużym oporem przepływu ( $1400 \sim 6300 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}$  przy grubości 50 mm), podczas gdy pianki otwartokomórkowe (cięte) osiągają zdecydowanie mniejsze wartości ( $300 \sim 390 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}$  przy grubości 50 mm). Rozrzut wyników oporności przepływu badanych tkanin jest bardzo duży ( $115 \sim 2560 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}$ ), a zatem rodzaj tkaniny będzie miał zdecydowany wpływ na właściwości dźwiękochłonne całego fotela.

Z przeprowadzonych badań wynika również, że proces laminowania tkaniny do pianki zwiększa opór przepływu powietrza całego układu oraz istotnie wpływa na współczynnik pochłaniania dźwięku tapicerowanych elementów – w naszym przypadku ten efekt wydać głównie powyżej pasma 500 Hz. Jest to akceptowalne w omawianej sali koncertowej w Jastrzębiu-Zdroju, ale może powodować problemy w innych wnętrzach, szczególnie jeśli tkanina jest laminowana do pianek o małej gęstości.

Współczynnik pochłaniania dźwięku, grupy krzesel ustawionych płasko na podłodze, wyznaczony w pomiarach w komorze pogłosowej, może być niedoszacowany w przypadku umieszczenia tych foteli na stromo nachylonej widowni w docelowej sali.

We would like to thank the chair manufacturer for its cooperation and for making a number of the mockups necessary for the research described in the article. We would also like to thank the management of the Music School and the staff of the hall's general contractor for allowing unrestricted access to the building, the Silesian University of Technology, and especially Dr. Leszek Dulak for the opportunity to take measurements of the chairs in the reverberation chamber, and archAKUSTIK, the general designer of the acoustics of the concert hall in Jastrzębie, for funding the rental of dummies for testing and the opportunity to use the data from the measurements.

Received: 26.06.2024  
Revised: 01.08.2024  
Published: 21.08.2024

Dziękujemy wykonawcy foteli za współpracę oraz wykonanie szeregu mockupów niezbędnych do przeprowadzenia badań opisanych w artykule. Dziękujemy również dyrekcji szkoły muzycznej oraz pracownikom generalnego wykonawcy sali za umożliwienie nieograniczonego dostępu do budynku, Politechnice Śląskiej, a przede wszystkim dr. inż. Leszkowi Dulakowi za możliwość wykonania pomiarów foteli w komorze pogłosowej oraz firmie archAKUSTIK, generalnemu projektantowi akustyki jastrzębskiej sali koncertowej, za sfinansowanie wynajmu manekinów do badań oraz możliwość wykorzystania danych z pomiarów.

Wpłynął do redakcji: 26.06.2024 r.  
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 01.08.2024 r.  
Opublikowano: 21.08.2024 r.

## Literature

- [1] PN-EN ISO 9053-2:2021-04 Akustyka – Określanie oporności przepływu powietrza – Część 2: Metoda przemiennego przepływu powietrza. PKN.
- [2] PN-EN ISO 354:2005 Akustyka – Pomiar pochłaniania dźwięku w komorze pogłosowej. PKN.
- [3] Vigran TE. Manual for NorFlag, Version 4.0. Trondheim. 2018.
- [4] Christensen CL, Rindel JH. ODEON Room Acoustics Software, User's Manual, Version 17. Lyngby 2021.
- [5] PN-EN ISO 3382-1:2009. Akustyka – Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń – Część 1: Pomieszczenia specjalne. PKN.
- [6] Beranek LL, Hidaka T. Sound absorption in concert halls by seats, occupied and unoccupied, and by the hall's interior surfaces. *J Acoust Soc Am.* 1998; <https://doi.org/10.1121/1.423957>.
- [7] Kosten CW. New Method for the Calculation of the Reverberation Time of Halls for Public Assembly. *Acustica.* 1965; 16: 325 – 330.
- [8] Kath U, Kuhl W. Messungen zur Schallabsorption von Personen auf Ungepolsterten Stuhlen. *Acustica.* 1964; 14: 50 – 55.
- [9] Kath U, Kuhl W. Messungen zur Schallabsorption von Polsterstühlen mit und ohne Personen. *Acustica.* 1965; 15: 127 – 131.
- [10] Bradley JS. Predicting theater chair absorption from reverberation chamber measurements. *J Acoust Soc Am.* 1992; 91: 1514–1524 <https://doi.org/10.1121/1.402483>.
- [11] Davies WJ, Orłowski RJ, Lam YW. Measuring auditorium seat absorption. *J Acoust Soc Am.* 1994; 96, pp. 879 – 888 <https://doi.org/10.1121/1.410263>.
- [12] Nishihara N, Hidaka T, Beranek L. Mechanism of sound absorption by seated audience in halls. *J Acoust Soc Am.* 2001; 110: 2398 – 411. [10.1121/1.1409970](https://doi.org/10.1121/1.1409970).
- [13] Choi YJ, Bradley JS, Jeong DU. Effects of edge screens on the absorption of blocks of theatre chairs. *Applied Acoustics.* 2012; vol. 73, no. 5, pp. 470 – 477, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.11.007>.
- [14] Bradley JS, Choi YJ, Jeong DU. Understanding chair absorption characteristics using the perimeter-to-area method. *Applied Acoustics.* 2013; 74 (9), 1060 – 1068. DOI: 10.1016/j.apacoust.2013.03.009.
- [15] Klosak AK, Gade AC. Architectural concrete in auditorium design of a 350 seats concert hall: acoustic design and performance. Proceedings of the 10th Convention of the European Acoustics Association, Forum Acusticum. 2023, Torino, Italy, <https://www.doi.org/10.61782/fa.2023.1219>.
- [16] Mills NJ. Polymer Foams Handbook, Butterworth-Heinemann. 2007, ISBN 9780750680691, <https://doi.org/10.1016/B978-075068069-1/50009-X>.
- [17] Norsonic Nor1517A. Instruction Manual. Im1517\_1Ed2R1En, Edition December 2012.
- [18] EN ISO 10534-2:1998. Acoustics – Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes – Part 2: Transfer-Function Method, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1998.
- [19] Beranek LL. Music, Acoustics, and Architecture. 1962; Wiley, New York.
- [20] Beranek LL. Audience and chair absorption in large halls. *J. Acoust. Soc. Am.* 1969; 45, 13 – 19.
- [21] Beranek LL. Concert and Opera Halls: How They Sound. Acoustical Society of America, Woodbury, NY, 1996.
- [22] Klosak AK, Gade AC, Ziarko B, Dulak L. Development of „budget” auditorium seats – challenges in design concert hall auditorium seats during pandemic. Proceedings of the 10th Convention of the European Acoustics Association, Forum Acusticum. 2023, Torino, Italy.
- [23] Klosak AK, Gade AC. The Penderecki concert hall in Radom, Poland: acoustic design and performance” in Proc. of IOA 8th international conference on Auditorium Acoustics (Dublin, Ireland) vol. 33 (2011).
- [24] Wenmaekers RHC, Hak CCJM, Hornikx MCJ. How orchestra members influence stage acoustic parameters on five different concert hall stages and orchestra pits. *J Acoust Soc Am.* 2016; vol. 140 (6), pp. 4437 – 4448 <https://doi.org/10.1121/1.4971763>.