

mgr inż. Wojciech Rogala^{1*)}

ORCID: 0000-0001-7798-1191

dr inż. Elżbieta Nowicka²⁾

ORCID: 0000-0002-7993-8215

dr inż. Leszek Dulak³⁾

ORCID: 0000-0002-7313-112X

Assessment of the Acoustic Performance of Walls Made of Calcium Silicate Units Using Surface Mass-Based Models

Szacowanie izolacyjności akustycznej przegród z bloczków silikatowych na podstawie masy

DOI: 10.15199/33.2025.08.17

Abstract. The paper presents a method for estimating the single-number sound insulation indexes (R_w , $R_{A,1}$ and $R_{A,2}$) of calcium silicate block walls based on surface mass. Empirical formulas based on the mass law were developed. The results indicate the potential for developing an acoustic classification system for solid silicate blocks based on their surface mass. This approach may streamline the design process and serve as a foundation for future standardization efforts.

Keywords: sound insulation; mass law; calcium silicate blocks; building acoustics; acoustic performance estimation.

In recent years, calcium silicate masonry walls have significantly increased in popularity. Since 2009, the market share of calcium silicate units in the overall sales of wall construction materials has more than doubled [1, 2]. This growth is primarily attributed to the natural composition of the raw materials (sand, lime, and water) as well as the favorable acoustic performance of the products. Good acoustic performance of calcium silicate partitions are a direct consequence of the high bulk density, which is achieved through pressing of the raw mix during the manufacturing process. Currently, CSU (calcium silicate units) constitute approximately 70% of wall materials used in multi-family residential buildings [1], where acoustic performance criteria are particularly important. The widespread use of CSU in multi-family housing is due in part to the fact that these wall systems are among the most thoroughly tested masonry partitions in terms of airborne sound insulation. Research efforts have led to the development of optimized solutions for internal acoustic walls with a nominal thickness of 180 mm, enabling a measurable increase in usable floor area.

Currently, products designed for enhanced acoustic insulation are predominantly solid calcium silicate blocks. According to the definition provided in standard [3], these are

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób szacowania jednolitej liczby wskaźników izolacyjności akustycznej ścian (R_w , $R_{A,1}$ i $R_{A,2}$) z bloczków silikatowych na podstawie masy powierzchniowej. Opracowano wzory empiryczne bazujące na prawie masy. Wyniki analiz wskazują na możliwość opracowania klasyfikacji akustycznej bloczków silikatowych na podstawie ich masy powierzchniowej. Proponowane podejście może usprawnić proces projektowania oraz stanowić podstawę do dalszych prac normalizacyjnych.

Słowa kluczowe: izolacyjność akustyczna; prawo masy; bloczki silikatowe; akustyka budowlana; szacowanie parametrów akustycznych.

W ostatnich latach ściany z bloczków silikatowych znacznie zyskały na popularności. Udział bloczków silikatowych w całkowitej sprzedaży materiałów ściennych zwiększył się ponad dwukrotnie od 2009 r. [1, 2]. Należy zawdzięczać to przede wszystkim naturalnemu składowi surowcowemu (piasek, wapno, woda) oraz dobrym parametrom akustycznym, które wynikają z dużej gęstości wyrobów silikatowych. Obecnie silikaty stanowią ok. 70% materiałów ściennych wykorzystywanych w budownictwie wielorodzinnym [1], w których wymagania akustyczne są szczególnie istotne. Tak duży udział w budynkach wielorodzinnych jest spowodowany m.in. tym, że ściany z bloczków silikatowych to obecnie jedne z najlepiej przebadanych, pod względem izolacyjności akustycznej, przegród murowanych. Prace badawcze dotyczące izolacyjności akustycznej doprowadziły do stosowania przegród międzymieszkaniowych o grubości 18 cm, dzięki czemu można zwiększyć powierzchnię użytkową budynku.

Obecnie wyroby o zwiększonej izolacyjności akustycznej to przede wszystkim pełne bloki silikatowe. Zgodnie z definicją zawartą w normie [3], są to elementy o udziale drążeń nieprzekraczającym 5% objętości. W przypadku takich wyrobów o grubości 18, 24 i 25 cm wykonano w ostatnich latach najwięcej badań akustycznych. Kolejne badania potwierdzają, że uzyskiwane wyniki są tym lepsze, im większa jest masa powierzchniowa przegrody. Wnioski te zostały sformułowane w Niemczech, gdzie izolacyjność akustycz-

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

²⁾ Instytut Techniki Budowlanej

³⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

*) Correspondence address: wojciech.rogala@xella.com

units with a void ratio not exceeding 5% of the total volume. Acoustic testing in recent years has focused primarily on such products, particularly those with nominal thicknesses of 180, 240 and 250 mm. Successive studies have confirmed a direct correlation between the surface mass of the partition and its sound insulation performance: the greater the surface mass, the higher the sound reduction index. These findings are formulated in Germany, where airborne sound insulation is declared based on the empirical mass law – a logarithmic relationship between the specific sound insulation and the surface density of the partition. Sound reduction index is determined in accordance with DIN 4109 [4], using the following empirical formula:

$$R_{w,R} = 30,9 \cdot \log(m') - 22,2 \quad (1)$$

The designation $R_{w,R}$ in that case refers to the estimated sound reduction index derived from the mass law. An alternative definition of $R_{w,R}$ is provided in the Polish standard PN-B 02151-3 [5], where it represents the design value of the R_w sound reduction index, calculated by subtracting 2 dB from the laboratory-measured value. Similar empirical relationships are presented in ITB Instruction 448/2025 [6], which defines the “mass law” for partitions

Table 1. Mass Law Formulas based on ITB Instruction 448 [6]

Tabela 1. „Prawo masy” na podstawie instrukcji ITB 448 [6]

Type of partition/Rodzaj przegrody	Calculation formula ¹⁾ / Wzory obliczeniowe ¹⁾	Applicable range of surface mass [kg/m²]/Przedział obowiązywania m [kg/m²]
Ordinary concrete, reinforced concrete ($\gamma = 2200\text{--}2400 \text{ kg/m}^3$): Monolithic walls, precast elements without channels for electrical cables and grip holes, with sealed joints between elements and surface smoothed with cement-lime or gypsum mortar/Beton zwykły, żelbet ($\gamma = 2200\text{--}2400 \text{ kg/m}^3$): ściany monolityczne, elementy prefabrykowane bez kanałów do prowadzenia przewodów elektrycznych, bez otworów montażowych, szczelne połączenia między elementami, powierzchnie zatarte zaprawą cementowo-wapienną lub gipsową	$R_{A,1,R} = 30,9 \cdot \log(m') - 26,1 \quad (2)$	$m' \geq 100$
	$R_{A,2,R} = 30,9 \cdot \log(m') - 29,6 \quad (3)$	
	$R_{A,1,R} = 30,9 \cdot \log(m') - 24,6 \quad (4)$	
	$R_{A,1,R} = 17,9 \cdot \log(m') + 4,4 \quad (5)$	$40 < m' \leq 70$
Autoclaved aerated concrete (density $400\text{--}700 \text{ kg/m}^3$): Walls made of smooth elements and equipped with tongue and grooves, joint with thin-bed mortar or general purpose mortar (vertical joints unfilled with mortar). Walls plastered with cement-lime plaster 0,6-1,0 cm thick/Beton komórkowy (gęstość $400\text{--}700 \text{ kg/m}^3$): ściany z elementów płaskich i profilowanych (pióro-wpust), łączonych na zaprawę zwykłą lub klejową (spoiny typu pióro-wpust niezapelnione zaprawą); ściany otynkowane tynkiem cementowo-wapiennym grubości 0,6 – 1,0 cm	$R_{A,2,R} = 10,5 \cdot \log(m') + 15,0 \quad (6)$	$40 < m' \leq 80$
	$R_{w,R} = 17,9 \cdot \log(m') + 5,9 \quad (7)$	$40 < m' \leq 70$
	$R_{A,1,R} = 25,5 \cdot \log(m') - 9,1 \quad (8)$	$70 < m' \leq 250$
	$R_{A,2,R} = 25,5 \cdot \log(m') - 12,6 \quad (9)$	$80 < m' \leq 250$
	$R_{w,R} = 25,5 \cdot \log(m') - 7,6 \quad (10)$	$70 < m' \leq 250$

¹⁾ partition surface mass without the plaster/masa powierzchniowa przegrody bez tynku

made of ordinary concrete and aerated concrete (see Table 1). These formulas are widely used by the concrete and aerated concrete industries to declare acoustic parameters of partitions [7]. However, due to the range of densities typical for calcium silicate products manufactured in Poland, this instruction cannot be directly applied to estimate the sound reduction indexes of calcium silicate walls.

Additional relationships are provided in PN-EN ISO 12354-1:2017-10 [8], which includes formulas for homogeneous masonry walls with plaster and a void ratio not exceeding 15%. However, laboratory results from the past 30 years show deviations from calculated values ranging from –4 dB to +8 dB. In the literature, similar relationships can be found not only for walls but also for ceilings [9]. Declaring sound insulation based on laboratory testing is subject to measurement uncertainty and depends

on the declaration based on the empirical mass law, i.e. logarithmic relationship between sound insulation and surface mass of the partition. Sound insulation is determined in accordance with DIN 4109 [4], using the following empirical formula:

$$R_{w,R} = 30,9 \cdot \log(m') - 22,2 \quad (1)$$

Oznaczenie $R_{w,R}$ odnosi się w tym przypadku do wartości wyznaczonej w wyniku oszacowania z prawa masy. Inną definicję parametru $R_{w,R}$ można znaleźć w polskiej normie PN-B 02151-3 [5], gdzie wartość ta oznacza projektowy wskaźnik izolacyjności akustycznej właściwej, wyznaczony przez pomniejszenie o 2 dB wartości uzyskanej w laboratorium. Podobne zależności zostały podane m.in. w Instrukcji ITB 448/2025 [6], w której określono „prawo masy” dotyczące przegród z betonu zwykłego i betonu komórkowego (tabela 1). Zależności te są wykorzystywane przez przemysł betonowy i betonów komórkowych do deklarowania parametrów akustycznych przegród [7]. Ze względu na przedział gęstości wyrobów silikatowych produkowanych w Polsce, instrukcja nie może być wykorzystana do oszacowania jednolicebowych wskaźników ścian z blozków silikatowych.

Zależność izolacyjności akustycznej od masy podaje także norma PN-EN ISO 12354-1: 2017-10 [8], która zawiera wzór umożliwiający wykonanie obliczeń dotyczących ścian jednorodnych z elementów murowych z tynkiem o objętości drążenia nieprzekraczającej 15%. Wyniki uzyskane w laboratoriach w okresie ostatnich trzydziestu lat, różnią się jednak od wyników obliczeń o – 4 dB do + 8 dB. W literaturze można znaleźć podobne zależności nie tylko dla ścian, ale także stropów [9]. Deklarowanie izolacyjności akustycznej na podstawie badań jest obciążone błędem pomiaru oraz zależne od dokładności wykonania samej próbki w laboratorium. Jednocześnie, ze względu na naturalny skład surowcowy, nie jest możliwe uzyskanie dokładnie tej samej gęstości i uziarnienia kruszywa w produkcji seryjnej. W zależności od głębokości złoża piasku jego uziarnienie nieznacznie się różni, co wpływa na wahania gęstości w produkcji seryjnej elementów murowych. Prowadzi

on the precision of sample preparation. Due to the natural variability in raw materials, particularly sand granulation depending on quarry depth, achieving consistent density in mass production is challenging. This leads to the conclusion that declaring sound insulation based on the minimum achievable density in production would be more reliable. However, this approach requires a large dataset to establish robust empirical relationships. Thanks to research collaboration among manufacturers associated in Calcium Silicates Manufacturers Association “Białe Murowanie”, it was possible to compile all available laboratory test data for solid calcium silicate masonry walls conducted in Poland in recent years. These manufacturers represent over 90% of the domestic CSU product market.

The goal of the analysis was to determine the relationship between the sound reduction index and the surface mass of the wall. The results showed that such relationships are most consistent for solid units, which exhibit a clear trend between acoustic performance and surface mass.

Materials and Methods

The analysis was based on laboratory measurements of airborne sound insulation conducted in accordance with PN-EN ISO 10140-2:2011 [10], which supersedes PN-EN 20140-3 [11]. Using PN-EN ISO 717-1 [12], the single-number sound reduction index R_w and the spectral adaptation index C and C_{tr} were determined. These values are used to calculate the specific sound insulation indices $R_{A,1}$ and $R_{A,2}$ as follows:

$$R_{A,1} = R_w + C \quad (2)$$

$$R_{A,2} = R_w + C_{tr} \quad (3)$$

These indices form the basis for compliance with the requirements of the Polish standard PN-B-02151-3 [5]. A total of 23 laboratory test reports for solid calcium silicate unit walls, conducted between 2007 and 2025, were used. The samples with densities ranging from 1640 to 2064 kg/m³ and thicknesses between 17.5 and 25 cm.

To improve the accuracy of the estimation, the reported values of R_w , C , and C_{tr} spectrum adaptation indexes were recalculated to one decimal place.

Based on existing empirical models [4 ÷ 7, 13], the following function for estimating sound insulation was formulated:

$$f(m') = A \cdot \log(m') - B \quad (4)$$

where:

m' – surface mass of the plastered sample [kg/m²];

A , B – optimization variables minimizing estimation error.

The search for variables A and B was performed using heuristic algorithms available in the “Solver” add-in in Microsoft Excel software. The best results were obtained using an evolutionary algorithm. The optimization algorithm involved searching for the minimum value of the objective function $m(A, B)$, which was formulated as the root mean square error

to do wniosku, że bardziej rzetelne byłoby podejście deklarowania izolacyjności akustycznej przy minimalnej gęstości uzyskiwanej w procesie produkcji. Wymaga to jednak dużej liczby wyników, które pozwoliłyby na sformułowanie zależności izolacyjności akustycznej od gęstości. Ze względu na współpracę naukowo-badawczą producentów zrzeszonych w Stowarzyszeniu Producentów Silikatów „Białe Murowanie” możliwe było zebranie wszystkich badań dotyczących izolacyjności akustycznej ścian z pełnych bloczków silikatowych, które przeprowadzono w ostatnich latach w laboratoriach badawczych Polsce. Obecnie do Stowarzyszenia należą producenci, produkujący ponad 90% wyrobów silikatowych dostępnych na polskim rynku.

Celem analiz było określenie zależności izolacyjności akustycznej ścian z bloczków silikatowych od ich masy powierzchniowej. Ustalono, że określenie tej zależności na podstawie polskich próbek będzie możliwe przede wszystkim w przypadku pełnych wyrobów, ponieważ wykazują one wyraźną zależność parametrów akustycznych od masy powierzchniowej.

Materiały i metody

Analizowano wyniki badań izolacyjności akustycznej wg PN-EN ISO 10140-2:2011 [10], która stanowi nowelizację normy PN-EN 20140-3 [11]. Na podstawie normy PN-EN ISO 717-1 [12] określono jednolicebowy wskaźnik izolacyjności akustycznej R_w oraz widmowe wskaźniki adaptacyjne C i C_{tr} . Wskaźniki R_w (C ; C_{tr}) stanowią podstawę do obliczania wskaźników oceny izolacyjności akustycznej właściwej $R_{A,1}$ i $R_{A,2}$, gdzie:

$$R_{A,1} = R_w + C \quad (2)$$

$$R_{A,2} = R_w + C_{tr} \quad (3)$$

$R_{A,1}$ i $R_{A,2}$ stanowią podstawę do wyznaczania wartości wymaganych polską normą PN-B-02151-3 [5]. Na potrzeby analizy wykorzystano łącznie raporty z badań 23 ścian z pełnych bloczków silikatowych, przeprowadzonych w latach 2007 – 2025. Raporty obejmowały próbki o gęstości 1640 – 2064 kg/m³ oraz grubości 17,5 – 25 cm.

Podane w raportach wartości jednolicebowego wskaźnika R_w oraz widmowych wskaźników adaptacyjnych C i C_{tr} są zaokrąglone do wartości całkowitych. W celu dokładniejszej analizy błędów wynikających z oszacowania podjęto decyzję o przeliczeniu wskaźników R_w , C i C_{tr} z dokładnością do jednego miejsca po przecinku.

Na podstawie dostępnych zależności izolacyjności akustycznej od masy analizowanego elementu [4 ÷ 7, 13] sformułowano funkcję zależności między wskaźnikiem izolacyjności akustycznej właściwej R_w a masą powierzchniową przegrody $f(m')$:

$$f(m') = A \cdot \log(m') - B \quad (4)$$

gdzie:

m' – masa powierzchniowa otynkowanej próbki [kg/m²];

A , B – poszukiwane zmienne, które dadzą najmniejszy błąd oszacowania.

Poszukiwanie zmiennych A i B odbywało się z wykorzystaniem algorytmów heurystycznych dostępnych w dodatku „Solver” w programie Microsoft Excel. Najlepsze rezultaty otrzymano przy wykorzystaniu algorytmu ewolucyjnego. Algorytm optymalizacyjny polegał na poszukiwaniu minimalnej wartości funkcji

$$m(A, B) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \hat{X}_i)^2}{N}} \quad (5)$$

where:

N – number of samples;

X_i – measured value;

$\hat{X}_i$ – estimated value.

Initial analysis showed no significant correlation between the spectrum adaptation indexes C , C_{tr} and the surface mass. The apparent decline in the indices with increasing surface mass visible in Figure 1 is probably caused by the number of available samples for partitions with high surface mass. Therefore, in the search for an empirical relationship between sound insulation and the surface mass of the sample it was assumed, that C and C_{tr} do not depend on the surface mass.

celu $m(A, B)$, która była sformułowana jako pierwiastek błędu średniokwadratowego:

$$m(A, B) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \hat{X}_i)^2}{N}} \quad (5)$$

gdzie:

N – liczba próbek; X_i – wartość uzyskana z badania laboratoryjnego;

$\hat{X}_i$ – wartość wynikająca z oszacowania.

Wstępne analizy wykazały, że w przeanalizowanych wynikach badań laboratoryjnych wartości widmowych wskaźników adaptacyjnych C i C_{tr} nie wykazują zależności od masy powierzchniowej próbki. Pozorny spadek wskaźników, wraz ze wzrostem masy powierzchniowej, widoczny na rysunku 1, wynika prawdopodobnie z liczby dostępnych próbek z przegród o dużej masie po-

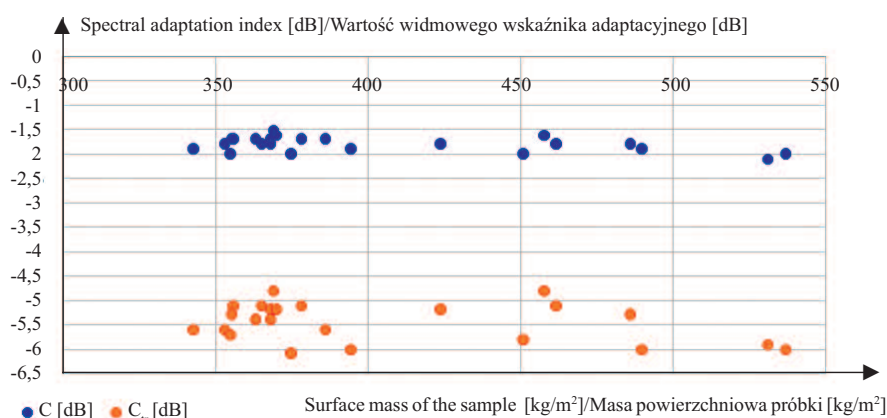


Fig. 1. The relationship between the values of the spectral adaptation indices of the tested wall samples and their surface mass

Rys. 1. Zależność między wartościami widmowych wskaźników adaptacyjnych próbek ścian poddanych badaniu a ich masą powierzchniową

This assumption required introducing four decision variables A , B , C and D . After model extension the functions for estimation the sound reduction indexes was defined as follows:

$$R_w = A \cdot \log(m') - B \quad (6)$$

$$R_{A,1} = A \cdot \log(m') - C \quad (7)$$

$$R_{A,2} = A \cdot \log(m') - D \quad (8)$$

The assumed objective function $k(A, B, C, D)$ represented the sum of the square roots of the mean squared error in estimating the indices R_w , $R_{A,1}$ and $R_{A,2}$:

$$k(A, B, C, D) = \min \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \hat{X}_i)^2}{N}} + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N}} + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Z_i - \hat{Z}_i)^2}{N}} \right) \quad (9)$$

where:

X_i, Y_i, Z_i – measured values of R_w , $R_{A,1}$ i $R_{A,2}$ for sample i ;

$\hat{X}_i, \hat{Y}_i, \hat{Z}_i$ – estimated values R_w , $R_{A,1}$ i $R_{A,2}$ for sample i , based on variables A , B , C and D .

wierzchniowej. Z tego względu do poszukiwania empirycznej zależności izolacyjności akustycznej od masy powierzchniowej próbki założono, że widmowe wskaźniki adaptacyjne nie zależą od masy powierzchniowej próbki. Wymagało to wprowadzenia czterech zmiennych decyzyjnych A , B , C i D do oszacowania jednolicebnych wskaźników izolacyjności akustycznej właściwej:

$$R_w = A \cdot \log(m') - B \quad (6)$$

$$R_{A,1} = A \cdot \log(m') - C \quad (7)$$

$$R_{A,2} = A \cdot \log(m') - D \quad (8)$$

Założona funkcja celu $k(A, B, C, D)$ stanowiła sumę pierwiastków błędu średniokwadratowego oszacowania wskaźników R_w , $R_{A,1}$ oraz $R_{A,2}$

$$k(A, B, C, D) = \min \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \hat{X}_i)^2}{N}} + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N}} + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Z_i - \hat{Z}_i)^2}{N}} \right) \quad (9)$$

gdzie:

X_i, Y_i, Z_i – wartości wskaźników R_w , $R_{A,1}$ i $R_{A,2}$ wynikające z badań laboratoryjnych dla próbki i ;

$\hat{X}_i, \hat{Y}_i, \hat{Z}_i$ – wartości odpowiednio R_w , $R_{A,1}$ i $R_{A,2}$, wynikające z badań oszacowania w przypadku zmiennych A , B , C i D dotyczących próbki i .

Results

Using the evolutionary algorithm, the objective function $k(26,82; 11,65; 13,41; 17,12) = 2,99$ was obtained thus the functions for single-number indices looked as follows:

Wyniki

W wyniku zastosowania heurystycznego algorytmu ewolucyjnego uzyskano wartość funkcji celu $k(26,82; 11,65; 13,41; 17,12) = 2,99$, wobec czego równania uzyskały postać:

$$R_w = 26,82 \cdot \log(m') - 11,65 \quad (10)$$

$$R_{A,1} = 26,82 \cdot \log(m') - 13,41 \quad (11)$$

$$R_{A,2} = 26,82 \cdot \log(m') - 17,12 \quad (12)$$

The estimation errors for 23 samples are summarized in Table 2, where positive values indicate overestimation and negative value indicate underestimation of the acoustic insulation of the sample. These results were deemed insufficient due to maximum estimation errors reaching up to 3 dB.

Table 2. Estimation Errors for Sound Insulation Indices (23 Samples)

Tabela 2. Błędy oszacowania jednolicebnych wskaźników izolacyjności akustycznej z równań wyznaczonych w przypadku 23 próbek badawczych

Index/Wskaźniki	Estimation error/Błąd oszacowania			
	max	min	median/mediana	mean/średnia
R_w	2,71	-2,02	-0,08	-0,08
$R_{A,1}$	2,85	-1,98	-0,11	-0,03
$R_{A,2}$	3,25	-2,38	-0,31	-0,09

A detailed analysis revealed that discrepancies may stem from differences in sealing methods between the sample and the test chamber – some labs used mortar, others mineral wool or specialized sealing compounds. To eliminate these variables, a second iteration was conducted using 18 samples from a one laboratory (the one where the greatest number of results were available). It was assumed that these samples were characterized by the same installation and measurement conditions in the laboratory. The same objective functions as described earlier were used for further analysis. This resulted in a new objective function value of $k(25,90; 8,93; 10,73; 14,34) = 1,48$, thus significantly improving the estimation accuracy. The maximum root mean square error of $m(25,90; 8,93) = 0,55$ occurred in the R_w index, which is not directly included in the requirements of the Polish standard. The resulting dependencies of specific sound insulation on the sample surface mass are presented below:

$$R_w = 25,90 \cdot \log(m') - 8,93 \quad (13)$$

$$R_{A,1} = 25,90 \cdot \log(m') - 10,73 \quad (14)$$

$$R_{A,2} = 25,90 \cdot \log(m') - 14,34 \quad (15)$$

The estimation errors achieved during iteration 2 are summarized in Table 3.

The mean estimation error in each case was 0.00 dB and the median estimation error for the values of $R_{A,1}$ and $R_{A,2}$ did not

Table 3. Estimation Errors for Sound Insulation Indices (18 Samples)

Tabela 3. Błędy oszacowania jednolicebnych wskaźników izolacyjności akustycznej z równań wyznaczonych w przypadku 18 próbek badawczych

Index/Wskaźniki	Estimation error/Błąd oszacowania			
	max	min	median/mediana	mean/średnia
R_w	1,25	-1,10	0,07	0,00
$R_{A,1}$	0,95	-1,04	0,03	0,00
$R_{A,2}$	0,72	-0,94	0,01	0,00

$$R_w = 26,82 \cdot \log(m') - 11,65 \quad (10)$$

$$R_{A,1} = 26,82 \cdot \log(m') - 13,41 \quad (11)$$

$$R_{A,2} = 26,82 \cdot \log(m') - 17,12 \quad (12)$$

Podsumowanie błędów oszacowania przedstawia tabela 2, gdzie dodatnia wartość oznacza przeszacowanie izolacyjności akustycznej próbki, a ujemna jej niedoszacowanie. Wyniki te uznano za niewystarczające, ponieważ maksymalne błędy oszacowania w przypadku pojedynczej próbki wynosiły nawet 3 dB.

Szczegółowa analiza wyników pomiarów laboratoryjnych próbek ścian skłania do sformułowania wniosku, że wyniki pomiarów izolacyjności akustycznej właściwej mogą różnić się np. w zależności od sposobu wypełnienia szczeliny pomiędzy próbką a komorą badawczą. Niektóre laboratoria stosowały wypełnienie w postaci zaprawy, a inne używały do tego celu wełny mineralnej lub specjalistycznej masy uszczelniającej. Z tego względu do drugiej iteracji wybrano próbki pochodzące z jednego laboratorium badawczego (była to najliczniejsza grupa wyników). W ten sposób wyeliminowano wpływ dodatkowych czynników, związanych ze sposobem montażu próbki w komorze. Do dalszej analizy pozostawiono zatem 18 próbek z tego samego laboratorium badawczego. Założono, że próbki te charakteryzowały się tymi samymi warunkami montażu oraz pomiaru w laboratorium. Do dalszej analizy wykorzystano te same funkcje celu, które opisano wcześniej. W ten sposób uzyskano nową wartość funkcji celu $k(25,90; 8,93; 10,73; 14,34) = 1,48$, a więc znaczną poprawę dokładności oszacowania. Maksymalny pierwiastek błędu średniokwadratowego $m(25,90; 8,93) = 0,55$ wystąpił we wskaźniku R_w , który nie jest uwzględniony w sposób bezpośredni w wymaganiach polskiej normy. Uzyskane w ten sposób zależności izolacyjności akustycznej właściwej od masy powierzchniowej próbki są następujące:

$$R_w = 25,90 \cdot \log(m') - 8,93 \quad (13)$$

$$R_{A,1} = 25,90 \cdot \log(m') - 10,73 \quad (14)$$

$$R_{A,2} = 25,90 \cdot \log(m') - 14,34 \quad (15)$$

Podsumowanie błędów wynikających z oszacowania w iteracji 2 przedstawia tabela 3.

Średnia wartość błędu oszacowania w każdym przypadku wynosi 0,00, a mediana błędu oszacowania w przypadku wartości wskaźników jednolicebnych $R_{A,1}$ i $R_{A,2}$, nie przekracza 0,03. Żaden z oszacowanych w ten sposób jednolicebnych wskaźników oceny izolacyjności akustycznej właściwej nie charakteryzuje się odchyleniem większym niż 1 dB od całkowitej wartości wskaźnika wyznaczonego w pomiarach.

Badania laboratoryjne powinny spełniać warunki dotyczące niepewności pomiarów zgodnie z PN-EN ISO 12999-1:2021-05 [14]. W tabeli 4 zestawiono typowe wartości odchylenia standardowego σ_R w sytuacji dotyczącej pomiarów wg tej samej procedury, ale w różnych laboratoriach oraz σ_r w sytuacji dotyczącej pomiarów wg tej samej procedury realizowanej przez te same osoby, w tych samych warunkach. W kontekście wartości normowych odchylenia standardowego, wyniki otrzymane za pomocą wzorów 13 ÷ 15 charakteryzują się zadowalającą niepewnością pomiarową. Maksy-

exceed 0.03. None of the estimated indices deviated from the measured values by more than 1 dB.

Laboratory tests should comply with the requirements regarding measurement uncertainty as specified in the PN-EN ISO 12999-1:2021-05 standard [14]. Table 4 presents typical values of standard deviation σ_R for measurements conducted using the same procedure across different laboratories, and σ_r for measurements performed by the same personnel under identical conditions. In the context of normative standard deviation values, the results obtained using formulas 13 ÷ 15 exhibit satisfactory measurement uncertainty. The maximum estimation error of 1.25 dB for the R_w index is comparable to the typical inter-laboratory standard deviation $\sigma_R = 1,2$. Furthermore, the maximum estimation errors for $R_{A,1}$ and $R_{A,2}$, equal to 0.95 dB and 0.72 dB respectively, are significantly lower than the typical inter-laboratory standard deviations of 1.3 dB and 1.5 dB.

The relationships between sound insulation and surface mass available in existing literature only allow for the determination of single-number indices. In design practice, it is sometimes necessary to obtain specific sound insulation values as a function of frequency to determine the effectiveness of a specific partition against noise from a specific device (e.g., an air handling unit). With the test results for samples in the third-octave bands available, equations were subsequently developed not only to determine single-number indices but also for sound insulation for subsequent mid-frequency frequencies of the third-octave bands. To determine the relationship between acoustic insulation and the surface mass of the sample across successive frequency bands, the following function was used:

$$f(m') = A \cdot \log(m') - B \quad (16)$$

An evolutionary heuristic algorithm was employed to identify the optimal objective function that minimizes the root mean square error in estimating acoustic insulation at specific frequencies within third-octave bands ranging from 100 Hz to 3150 Hz, as presented in Table 5. Selected relationships between sound insulation values and surface mass for specific frequencies are presented below, illustrating the cases with the highest estimation errors (Figures 2a and 2b) and the most accurate approximations (Figures 3a and 3b).

The results of acoustic insulation estimations based on wall surface mass that yielded the most accurate fits are presented in Figure 4. Conversely, the results for walls with specific surface mass values that produced the least accurate fits are shown in Figure 5.

Table 4. Typical values of standard deviation σ_R and σ_r according to standard [14]
Tabela 4. Typowe wartości odchylenia standardowego σ_R i σ_r wg normy [14]

Index/ Wskaźniki	Standard deviation/ Odchylenie standardowe	
	σ_R	σ_r
R_w	1,2	0,4
$R_{A,1}$	1,3	0,5
$R_{A,2}$	1,5	0,7

małny popełniony błąd oszacowania, uzyskany w przypadku wartości $R_{A,1}$ i $R_{A,2}$, i wynoszący odpowiednio 0,95 i 0,72 dB, jest zdecydowanie mniejszy od typowej wartości odchylenia σ_R uzyskiwanej w pomiarach międzylaboratoryjnych, wynoszącej 1,3 oraz 1,5 dB.

Dostępne w literaturze zależności izolacyjności akustycznej od masy powierzchniowej pozwalają na określenie jedynie jednolicebnych wskaźników. W praktyce projektowej zdarza się, że konieczne jest uzyskanie wartości izolacyjności akustycznej właściwej w funkcji częstotliwości w celu określenia skuteczności konkretnej przegrody, izolującej przed hałasem pochodzącym z określonego urządzenia (np. centrali wentylacyjnej). Dysponując wynikami badań próbek w pasmach tercjowych, określono w dalszym etapie równania nie tylko do wyznaczania jednolicebnych wskaźników, ale także izolacyjności akustycznej w przypadku kolejnych częstotliwości środkowych pasm 1/3 oktawy. Do ustalenia zależności pomiędzy izolacyjnością akustyczną i masą powierzchniową próbki w kolejnych pasmach częstotliwości zastosowano funkcję:

$$f(m') = A \cdot \log(m') - B \quad (16)$$

Table 5. Estimation of Frequency-Dependent Sound Insulation as a Function of Wall Surface Mass in Third-Octave Bands

Tabela 5. Oszacowanie izolacyjności akustycznej właściwej w kolejnych pasmach tercjowych jako funkcji masy powierzchniowej ściany

Frequency/ Częstotliwość [Hz]	Derived Relationship Between Sound Insulation and Surface Mass [dB]/Wyznaczona zależność izolacyjności akustycznej od masy powierzchniowej próbki [dB]	Root Mean Square Error/Pierwiastek błędu średniokwadratowego
100	$f(m') = 19,31 \cdot \log(m') - 7,50$ (17)	1,88
125	$f(m') = 31,88 \cdot \log(m') - 41,81$ (18)	1,68
160	$f(m') = 16,74 \cdot \log(m') - 0,00$ (19)	1,15
200	$f(m') = 18,63 \cdot \log(m') - 1,89$ (20)	1,22
250	$f(m') = 32,36 \cdot \log(m') - 36,51$ (21)	0,91
315	$f(m') = 31,78 \cdot \log(m') - 32,60$ (22)	1,06
400	$f(m') = 29,54 \cdot \log(m') - 24,38$ (23)	0,77
500	$f(m') = 30,31 \cdot \log(m') - 24,23$ (24)	0,87
630	$f(m') = 33,31 \cdot \log(m') - 30,70$ (25)	0,84
800	$f(m') = 23,66 \cdot \log(m') - 4,05$ (26)	0,76
1000	$f(m') = 27,24 \cdot \log(m') - 10,89$ (27)	0,75
1250	$f(m') = 27,56 \cdot \log(m') - 10,02$ (28)	0,90
1600	$f(m') = 25,06 \cdot \log(m') - 2,07$ (29)	0,99
2000	$f(m') = 24,46 \cdot \log(m') - 0,00$ (30)	1,19
2500	$f(m') = 24,77 \cdot \log(m') - 0,00$ (31)	1,44
3150	$f(m') = 25,23 \cdot \log(m') - 0,00$ (32)	2,44

Wykorzystując heurystyczny algorytm ewolucyjny, poszukiwano funkcji celu, która da minimalny błąd średniokwadratowy do oszacowania izolacyjności akustycznej w danej częstotliwości w pasmach tercjowych z zakresu 100 – 3150 Hz, jak zaprezentowano w tabeli 5. Wybrane zależności między wartością izolacyjności akustycznej i masą powierzchniową w przypadku wybranych częstotliwości, dających najgorsze przybliżenia przedstawiono na rysunkach 2a i 2b oraz najlepsze przybliżenia na rysunkach 3a i 3b.

Wyniki oszacowania izolacyjności akustycznej przegrody o masie powierzchniowej, w przypadku której uzyskano „najlepsze dopasowanie”, przedstawiono na rysunku 4, a „najgorsze dopasowanie” na rysunku 5.

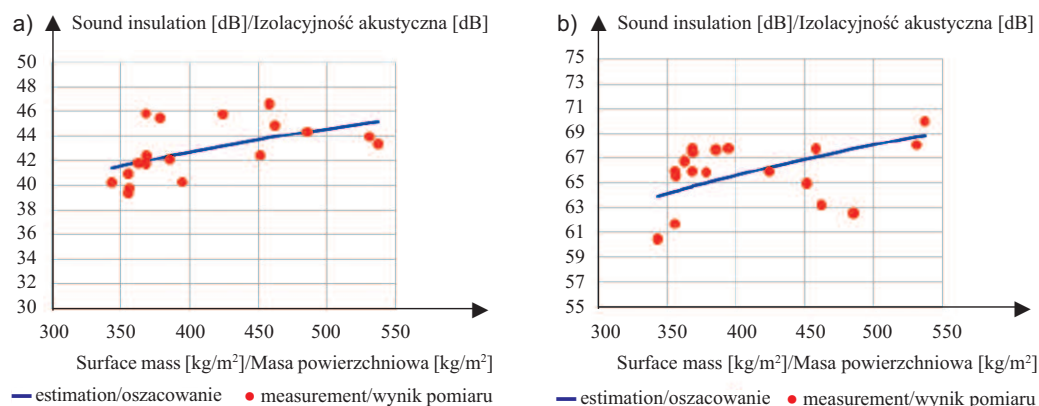


Fig. 2. Relationship between normalized sound insulation values R and surface mass for frequencies of: a) 100 Hz; b) 3150 Hz, for which the highest estimation errors were observed

Rys. 2. Zależność między wartością izolacyjności akustycznej właściwej R i masą powierzchniową w przypadku częstotliwości: a) 100 Hz; b) 3150 Hz, przy których otrzymano największą wartość błędu oszacowania

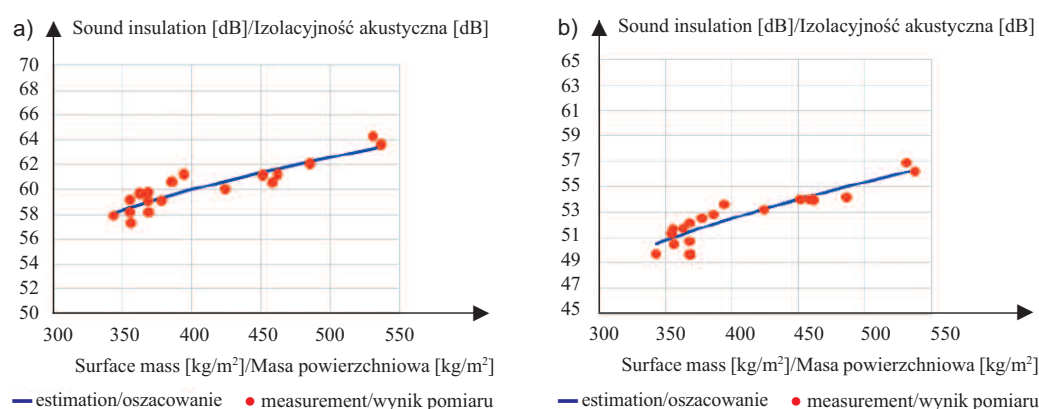


Fig. 3. Relationship between normalized sound insulation values R and surface mass for frequencies of: a) 100 Hz; b) 400 Hz, for which the lowest estimation errors were observed

Rys. 3. Zależność między wartością izolacyjności akustycznej właściwej R i masą powierzchniową w przypadku częstotliwości: a) 1000 Hz; b) 400 Hz, przy których otrzymano najmniejszą wartość błędu oszacowania

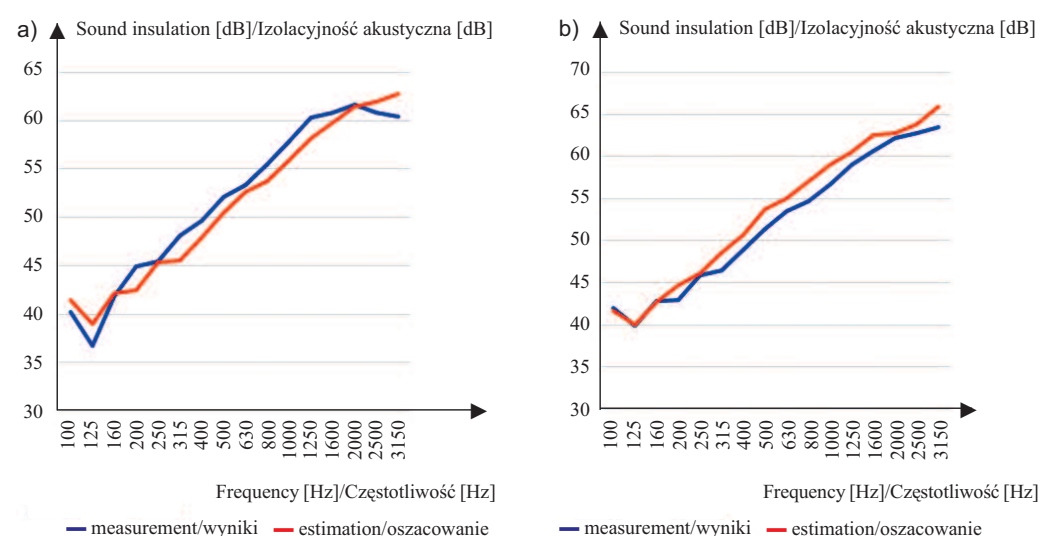


Fig. 4. Estimation results for walls with specific surface mass values: a) 343 kg/m^2 ; b) 368 kg/m^2 that yielded the most accurate fit

Rys. 4. Wyniki oszacowania izolacyjności akustycznej ścian o masie powierzchniowej: a) 343 kg/m^2 ; b) 368 kg/m^2 , w przypadku których uzyskano „najlepsze dopasowanie”

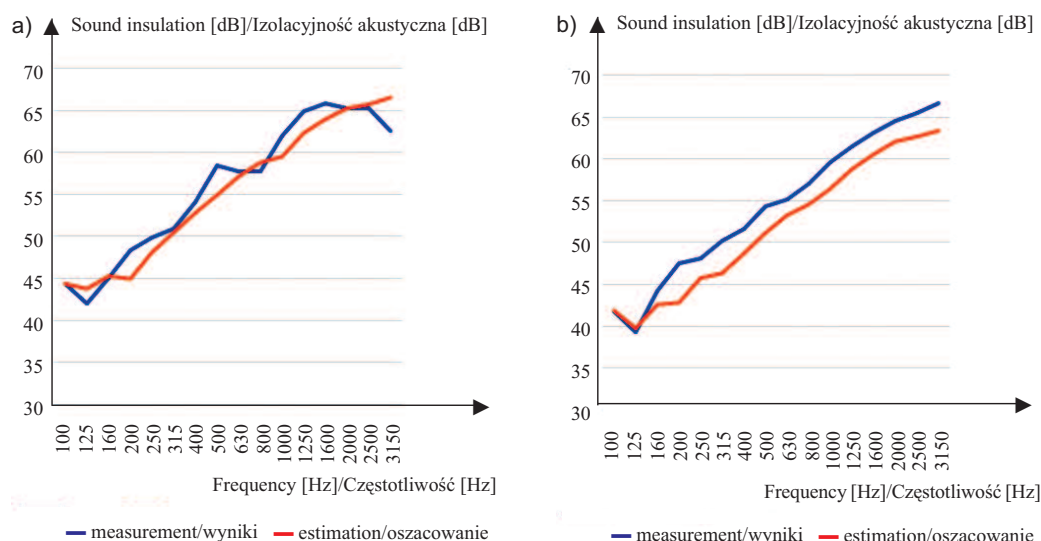


Fig. 5. Estimation results for walls with specific surface mass values: a) 363 kg/m²; b) 488 kg/m² that yielded the least accurate fit

Rys. 5. Wyniki oszacowania izolacyjności akustycznej ścian o masie powierzchniowej: a) 363 kg/m²; b) 486 kg/m², w przypadku których uzyskano „najgorsze dopasowanie”

Discussion and conclusions

The first iteration of estimating sound reduction indexes based on surface mass was conducted using results from 23 wall samples tested in various laboratories under differing measurement conditions. The outcomes of this analysis were not satisfactory, prompting a second iteration limited to samples tested under consistent conditions. The revised analysis yielded significantly lower standard deviations compared to the initial iteration. The substantial sample size (18 analyzed specimens) enabled the derivation of results with maximum estimation errors of 0.95 dB for $R_{A,1}$ and 0.72 dB for $R_{A,2}$, both of which are lower than the typical inter-laboratory standard deviations σ_R of 1.3 dB and 1.5 dB, respectively.

In light of these findings, it appears that the use of formulas (14) and (15) may provide more accurate results than laboratory testing conducted under varying conditions and sample preparation methods.

Based on the derived formulas 17 ÷ 32 (table 5), it is possible to determine the acoustic insulation of a partition in third-octave frequency bands ranging from 100 to 3150 Hz. As a result of this estimation, the relationship between the sound insulation of a partition with a given surface mass and frequency can be obtained – previously determined exclusively through laboratory testing in accordance with standard [10]. The root mean square error of such estimations is less than 1.25 dB within the frequency range of 160 – 2000 Hz, which is comparable to the measurement uncertainty values specified in [14].

The proposed formulas (17 ÷ 32) may serve as a complement to the single-number indices derived through estimation and can be used, for example, in the design of acoustic insulation for partitions enclosing equipment with a defined noise spectrum.

The empirical formulas developed for estimating normalized sound insulation indices may serve also as a basis for

Dyskusja i wnioski

Pierwsza iteracja dotycząca wyznaczania jednolicebnych wskaźników na podstawie masy powierzchniowej bazowała na wynikach 23 ścian uzyskanych w różnych laboratoriach, z zastosowaniem różnych warunków pomiaru. Wyniki analiz nie były satysfakcjonujące, dlatego też analizy powtórzone, ograniczając je do próbek charakteryzujących się jednakowymi warunkami pomiaru. Uzyskane wyniki charakteryzowały się znacznie mniejszym odchyleniem standardowym niż w przypadku pierwszej iteracji. Duża liczba przeanalizowanych próbek (18), pozwoliła uzyskać wyniki charakteryzujące się maksymalnym błędem oszacowania wartości $R_{A,1}$ i $R_{A,2}$ wynoszącym odpowiednio 0,95 i 0,72 dB. Jest to wartość mniejsza od typowych wartości odchylenia σ_R uzyskiwanych w pomiarach międzylaboratoryjnych, wynoszących odpowiednio 1,3 oraz 1,5 dB.

W świetle przedstawionych danych wydaje się, że oszacowanie za pomocą opracowanych wzorów 14 i 15, może prowadzić do uzyskania bardziej dokładnych wyników, niż w przypadku badań prowadzonych w różnych laboratoriach z zastosowaniem odmiennych sposobów wykonania i montażu próbek.

Na podstawie wyznaczonych wzorów 17 ÷ 32 (tabela 5) możliwe jest określenie izolacyjności akustycznej przegrody w pasmach tercjowych dla częstotliwości z przedziału 100 – 3150 Hz. W wyniku oszacowania możliwe jest zatem uzyskanie zależności izolacyjności akustycznej przegrody o danej masie powierzchniowej od częstotliwości, którą do tej pory określano na podstawie badania laboratoryjnego zgodnie z normą [10]. Pierwiastek średniokwadratowy błędu takiego oszacowania jest mniejszy niż 1,25 w przedziale częstotliwości 160 – 2000 Hz, i jest porównywalna do wartości niepewności pomiaru wg [14].

Zaproponowane wzory 17 ÷ 32 mogą stanowić uzupełnienie wyznaczonych za pomocą oszacowania jednolicebnych wskaźników i zostać wykorzystane np. do projektowania izolacyjności akustycznej przegród wydzielających urządzenia o danym widmie hałasu.

establishing an acoustic classification system for calcium silicate products. This would provide a reliable data source for design purposes.

PN-EN 771-2 standard [15] defines density classes in its informative annex. These are presented in Table 6. Applying the same classes for acoustic assessment appears insufficient, as differences in normalized sound insulation indices may exceed 1 dB. Therefore, a more reasonable approach would be to adopt classification intervals differing by 100 kg/m³.

The single-number sound insulation indices R_w , $R_{A,1}$ and $R_{A,2}$, derived using formulas (13 ÷ 15), are proposed as a basis for acoustic classification of solid calcium silicate wall elements. These are presented in Tables 7 ÷ 9.

Table 6. Density classes according to EN 771-2
Tabela 6. Klasy gęstości na podstawie EN 771-2

Density class/ Klasa gęstości	Dry density [kg/m ³]/Gęstość w stanie suchym [kg/m ³]	
	min	max
1,8	1610	1800
2,0	1810	2000
2,2	2010	2200

Wzory empiryczne służące do wyznaczania jednoczłonowych wskaźników oceny izolacyjności akustycznej właściwej mogą posłużyć także do opracowania klasyfikacji akustycznej wyrobów silikatowych, dzięki czemu można byłoby uzyskać wiarygodne źródło danych do projektowania. Norma PN-EN 771-2 [15] definiuje w załączniku informacyjnym klasy gęstości wyrobów (tabela 6). Przyjęcie takich samych klas do oceny akustycznej wydaje się niewystarczające. Wartości wskaźników oceny izolacyjności akustycznej właściwej będą się różnić o więcej niż 1 dB. Z tego względu rozsądną propozycją wydaje się przyjęcie klas odpowiadających przedziałom gęstości różniących się o 100 kg/m³.

Wyznaczone za pomocą zależności 13 ÷ 15 jednoczłonowe wskaźniki izolacyjności akustycznej R_w , $R_{A,1}$ i $R_{A,2}$, które stanowią propozycję klasyfikacji akustycznej silikatowych przegród budowlanych, przedstawiono w tabelach 7 ÷ 9. Do oszacowania masy powierzchniowej próbki założono średnie gęstości w stanie suchym, realne do uzyskania w warunkach

Table 7. Sound reduction index R_w for solid CSU walls both plastered with gypsum plaster 10 mm
Tabela 7. Izolacyjność akustyczna R_w ścian z pełnych elementów silikatowych, obustronnie otynkowanej tynkiem gipsowym 10 mm

Dry density [kg/m ³]/ Gęstość w stanie suchym [kg/m ³]	CSU thickness [cm]/Grubość bloczków silikatowych [cm]					
	12	15	17,5	18	24	25
1650	52	54	56	56	59	60
1750	53	55	56	57	60	60
1850	53	55	57	57	60	61
1950	54	56	58	58	61	61
2050	54	57	58	58	62	62
2150	55	57	59	59	62	62

Table 8. Sound reduction index $R_{A,1}$ for solid CSU walls both side plastered with gypsum plaster 10 mm
Tabela 8. Izolacyjność akustyczna $R_{A,1}$ ścian z pełnych elementów silikatowych obustronnie otynkowanej tynkiem gipsowym 10 mm

Dry density [kg/m ³]/ Gęstość w stanie suchym [kg/m ³]	CSU thickness [cm]/Grubość bloczków silikatowych [cm]					
	12	15	17,5	18	24	25
1650	50	52	54	54	57	58
1750	51	53	55	55	58	58
1850	51	54	55	56	59	59
1950	52	54	56	56	59	60
2050	52	55	56	57	60	60
2150	53	55	57	57	60	61

Table 9. Sound reduction index $R_{A,2}$ for solid CSU walls both side plastered with gypsum plaster 10 mm
Tabela 9. Izolacyjność akustyczna $R_{A,2}$ ścian z pełnych elementów silikatowych obustronnie otynkowanej tynkiem gipsowym 10 mm

Dry density [kg/m ³]/ Gęstość w stanie suchym [kg/m ³]	CSU thickness [cm]/Grubość bloczków silikatowych [cm]					
	12	15	17,5	18	24	25
1650	47	49	50	51	54	54
1750	47	49	51	51	54	55
1850	48	50	52	52	55	55
1950	48	51	52	53	56	56
2050	49	51	53	53	56	57
2150	49	52	53	54	57	57

For estimating surface mass, average dry densities achievable in production conditions for solid elements (Group 1S) were assumed. A moisture content of 2% was considered, corresponding to stabilized product density, along with a 10 mm thick gypsum plaster on both sides (density: 1300 kg/m³), representing typical finishing in residential buildings. Polish regulations indirectly rely on the indices $R_{A,1}$ and $R_{A,2}$ [5, 16]. None of the values presented in Tables 8 and 9 differ from laboratory test results by more than 1 dB, supporting the feasibility of using this classification method for design purposes.

The proposed acoustic classification, based on theoretical calculations, could contribute to a shift in research direction. Instead of repeatedly testing identical products in various laboratories to “search” for maximum values, manufacturers could focus on solving real-world problems and investigating the impact of specific design solutions on acoustic insulation performance (e.g., the effect of grooving or joint construction).

Received: 24.02.2025

Revised: 08.04.2025

Published: 21.08.2025

produkcyjnych elementów pełnych (grupa 1S). Do określenia masy powierzchniowej założono wilgotność 2%, co odpowiada ustabilizowanej gęstości wyrobów, oraz obustronny tynk gipsowy 10 mm o gęstości 1300 kg/m³, jako tynk, który odpowiada typowemu wykończeniu przegród silikatowych w budynkach mieszkalnych. Wymagania określone polskimi przepisami bazują pośrednio na wskaźnikach $R_{A,1}$ i $R_{A,2}$ [5, 16]. Żaden z jednolicebnych wskaźników $R_{A,1}$, $R_{A,2}$ przedstawionych w tabelach 8 i 9, nie różni się od wartości z raportów badawczych o więcej niż 1 dB, co wydaje się potwierdzać możliwość wykorzystania tego sposobu klasyfikacji akustycznej ścian murowanych z bloków silikatowych pełnych do celów projektowych.

Zaproponowana klasyfikacja akustyczna bazująca na obliczeniach teoretycznych mogłaby przyczynić się do zmiany kierunku prac badawczych. Zamiast powielania badań tych samych wyrobów w różnych laboratoriach, w celu „poszukiwania” maksymalnych wartości, producenci mogliby skoncentrować się na rozwiązywaniu rzeczywistych problemów i poszukiwaniu odpowiedzi na pytania dotyczące wpływu konkretnych rozwiązań na izolacyjność akustyczną (np. wpływu bruzdowania lub konstrukcji złączy).

Artykuł wpłynął do redakcji: 24.02.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 08.04.2025 r.

Opublikowano: 21.08.2025 r.

Literature

- [1] Główny Urząd Statystyczny, Produkcja wyrobów przemysłowych w 2021, 2022, 2023 i 2024 roku, Warszawa, [online]. Dostęp: 20.06.2025. <https://stat.gov.pl>.
- [2] Rynek silikatowy w perspektywie dziesięcioletniej, Inżynier Budownictwa, [online]. Dostęp: 20.06.2025. <https://inzynierbudownictwa.pl/rynek-silikatowy-w-perspektywie-dziesiecioletniej>.
- [3] PN-EN 1996-1-2: 2010, Eurokod 6: Projektowanie konstrukcji murowych – Część 1-2: Reguły ogólne – Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2010.
- [4] DIN 4109-2:2018-01, Schallschutz im Hochbau – Teil 2: Rechenverfahren, Berlin: Beuth Verlag, 2018.
- [5] PN-B-02151-3: 2015-10, Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem w budynkach – Część 3: Wymagania dotyczące izolacyjności akustycznej przegród w budynkach i elementów budowlanych, PKN, Warszawa, 2015.
- [6] Nowotny Ł., Nurzyński J., Szudrowicz B., Tomczyk P. Właściwości dźwiękoizolacyjne ścian, dachów, okien i drzwi oraz nawiewników powietrza zewnętrznego, Instrukcja ITB nr 448/2025, Warszawa: ITB, 2025.
- [7] Szudrowicz B. Ocena izolacyjności akustycznej elementów murowych z betonu komórkowego Ytong oraz dane wejściowe do nowelizacji AT-15-2700/97, praca nr NA-1153/A/00, ITB, Warszawa, 2000.
- [8] PN-EN ISO 12354-1:2017-10 Akustyka budowlana – Określenie właściwości akustycznych budynków na podstawie właściwości elementów – Część 1: Izolacyjność od dźwięków powietrznych między pomieszczeniami, PKN, Warszawa, 2017.

- [9] Dulak L. Możliwości obliczeniowe izolacyjności akustycznej stropów, Materiały Budowlane. 2017 (8): 34–38.
- [10] PN-EN ISO 10140-2:2021-10, Akustyka – Pomiar laboratoryjny izolacyjności akustycznej elementów budowlanych – Część 2: Pomiar izolacyjności od dźwięków powietrznych, PKN, Warszawa, 2021.
- [11] PN-EN 20140-3:1999, Akustyka – Pomiar izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych – Pomiar laboratoryjny izolacyjności od dźwięków powietrznych elementów budowlanych, PKN, Warszawa, 1999.
- [12] PN-EN ISO 717-1:2013-08, Akustyka – Ocena izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych – Część 1: Izolacyjność od dźwięków powietrznych, PKN, Warszawa, 2013.
- [13] Dulak L. Izolacyjność od dźwięków powietrznych i dźwięków uderzeniowych. Regulacje prawne, obliczenia i rozwiązania konstrukcyjne na przykładzie ścian z silikatów, [online]. Dostęp: 20.06.2025. <https://www.izolacje.com.pl>.
- [14] PN-EN ISO 12999-1:2021-05 Akustyka – Wyznaczanie i stosowanie niepewności pomiarów w akustyce budowlanej – Część 1: Izolacyjność akustyczna, PKN, Warszawa, 2021.
- [15] PN-EN 771-2+A1:2015-10, Wymagania dotyczące elementów murowych – Część 2: Elementy murowe silikatowe, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2015.
- [16] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz. U. 2022 poz. 1225 z późn. zm.