

dr inż. Leszek Dulak^{1)*}
 ORCID: 0000-0002-7313-112X
 mgr inż. Paweł Jureczko²⁾

Case study (Studium przypadku)

MATERIALY BUDOWLANE SCIENCE

materiałybudowlane.info.pl/science

Estimation of acoustic insulation between rooms on the example of a monolithic reinforced concrete ceiling on lost formwork made of trapezoidal sheet metal

Szacowanie przybliżonej izolacyjności akustycznej między pomieszczeniami na przykładzie żelbetowego stropu monolitycznego na szalunku traconym z blachy trapezowej

DOI: 10.15199/33.2025.08.14

Abstract. The article presents the results of field measurements of airborne and impact sound insulation of a reinforced concrete ceiling on a permanent formwork made of trapezoidal sheet metal. The measurement results were compared with the results of the calculations carried out using the available methods and with the standard requirements. The measurement and calculation results differ significantly. In the case of the $R'_{A,i}$ index, the difference was 5 dB and in the case of the $L'_{n,w}$ index, as much as 12 dB using formulas according to standards [1; 2]. Calculations carried out using PN-EN 15037-1:2011 [3] gave results that differ even more from the measurement result. The reason for the above situation is the lack of an appropriate calculation model that allows determining the acoustic insulation of the ceiling on the permanent formwork made of trapezoidal sheet metal, which is an unusual solution. A positive aspect of the comparison is the results of the fact that the calculation differ from the calculation result in a “safe” direction, so the use of this method at the design stage results in introducing an additional safety margin.

Keywords: airborne sound insulation; impact sound insulation; flanking transmission; office building.

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów terenowych izolacyjności od dźwięków powietrznych i uderzeniowych stropu żelbetowego na szalunku traconym z blachy trapezowej. Wyniki pomiarów porównano z wynikami obliczeń zrealizowanych za pomocą dostępnych metod oraz wymaganiami norm. Wyniki pomiarów i obliczeń znacznie się różnią od siebie. W przypadku wskaźnika $R'_{A,i}$ różnica wyniosła 5 dB, a w przypadku wskaźnika $L'_{n,w}$ aż 12 dB przy wykorzystaniu wzorów wg norm [1; 2]. Obliczenia zrealizowane za pomocą PN-EN 15037-1:2011 [3] dały wyniki jeszcze bardziej odbiegające od wyniku pomiaru. Przyczyną jest brak odpowiedniego modelu obliczeniowego pozwalającego określić izolacyjność akustyczną stropu na szalunku traconym z blachy trapezowej, który jest nietypowym rozwiązaniem. Pozytywnym aspektem przeprowadzonego porównania jest fakt, że wyniki obliczeń różnią się od wyniku pomiarów w stronę „bezpieczną”, a więc użycie tej metody na etapie projektu skutkuje wprowadzeniem dodatkowego marginesu bezpieczeństwa.

Słowa kluczowe: izolacyjność od dźwięków powietrznych; izolacyjność od dźwięków uderzeniowych; przenoszenie boczne; budynek biurowy.

Requirements concerning noise protection in buildings arise from the Construction Law [4] and constitute one of the seven basic requirements. The specification of this general postulate is implemented through the provisions in Section IX of the Technical Conditions [5] and the standards referenced in the annex to the regulation [6, 7, 8]. A key factor that has contributed to increased awareness of the necessity to meet acoustic protection requirements in recent years is the amendment to the regulation on the detailed scope and form of the building design [9], which introduced an obligation to include in the descriptive part of the technical design an analysis concerning technical and material

Wymagania dotyczące ochrony przed hałasem w budynku wynikają z Prawa budowlanego [4] i stanowią jedno z siedmiu wymagań podstawowych. Uszczegółowienie tego ogólnego postulatu realizowane jest przez zapisy w dziale IX Warunków Technicznych [5] oraz normy przywołane w załączniku do rozporządzeń [6, 7, 8]. Czynnikiem, który spowodował wzrost świadomości dotyczącej konieczności realizacji wymagań związanych z ochroną akustyczną w ostatnim okresie z pewnością okazała się nowelizacja rozporządzenia w sprawie szczegółowego zakresu i formy projektu budowlanego [9], która wprowadziła obowiązek wykonania analizy w części opisowej projektu technicznego w zakresie rozwiązań technicznych i materiałowych, mających na celu spełnienie wymagań akustycznych. Powyższe czynniki oraz rosnąca świadomość odbiorcy budynku, który płacąc coraz wyższą

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

²⁾ STRABAG Sp. z o.o.

^{*}) Correspondence address: leszek.dulak@polsl.pl

solutions aimed at meeting acoustic requirements. These factors, along with the growing awareness of building users – who, paying increasingly higher prices per square meter of usable area, expect a corresponding quality of the completed facility – make it significantly more difficult for participants in the construction process to consciously or inadvertently ignore issues related to sound insulation between rooms than it was just a few years or even months ago. This necessitates that designers master methods enabling efficient prediction of acoustic insulation between rooms in the planned building. In many cases, this is relatively straightforward. However, there are structural solutions for which laboratory test results regarding sound insulation are unavailable, and alternative calculation methods do not provide clear guidance for their application. One such structural solution is a monolithic reinforced concrete slab cast on permanent formwork made of trapezoidal sheet metal. This article attempts to calculate the single-number quantity $R'_{A,1}$ and $L'_{n,w}$ of the aforementioned slab with a floating floor. The calculation results are compared with field measurement data obtained in an office building and with the requirements defined by applicable regulations [4, 5, 7].

Terminology and Definitions

Below are the fundamental terms and definitions essential for the subject matter of this article.

Apparent sound reduction index R' [dB]:

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \log(S/A) \quad (1)$$

where:

L_1 – the average sound pressure level in the source room [dB];

L_2 – the average sound pressure level in the receiving room [dB];

S – the area of separating element [m²];

A – the equivalent sound absorption area in the receiving room [m²].

Normalized impact sound pressure level L'_n [dB]

$$L'_n = L_1 + 10 \log(A/A_0) \quad (2)$$

where:

L_1 – the average impact sound pressure level in the receiving room [dB];

A – the equivalent sound absorption area in the receiving room [m²];

A_0 – the reference equivalent sound absorption area in the receiving room in m² (for dwellings $A_0 = 10$ m²).

The above quantities, determined as a function of frequency, are typically reduced in engineering practice to single-number quantities as outlined below.

Weighted apparent sound reduction index R'_w is the approximate airborne sound insulation value determined within the standard frequency range of 100 ÷ 3150 Hz, reduced to a single-number index in accordance with the method specified in PN-EN ISO 717-1:2021-06 [10]. **Spectrum adaptation terms C and C_{tr}** are used to account for the spectral diversity of noise sources (e.g., pink noise and road traffic noise) and to evaluate the apparent sound insulation curves according to PN-EN ISO 717-1:2021-06 [10]. Both adaptation terms, separated by a semicolon, should

cenę za m² powierzchni użytkowej, oczekuje adekwatnej do niej jakości zrealizowanego obiektu, sprawiają, że świadome lub niezamierzone zignorowanie przez uczestników procesu budowlanego zagadnień związanych z dźwiękoizalacyjnością między pomieszczeniami jest obecnie dużo trudniejsza niż jeszcze kilka lat, a nawet miesięcy temu. Wiąże się to z koniecznością opanowania przez projektanta metod, pozwalających na sprawną prognozę izolacyjności akustycznej między pomieszczeniami w projektowanym budynku. Dla znacznej części przypadków jest to stosunkowo łatwe. Istnieją jednak rozwiązania konstrukcyjne, dla których brak wyników badań laboratoryjnych w zakresie dźwiękoizalacyjności, a alternatywne metody obliczeniowe nie dają jednoznacznych możliwości użycia ich. Jednym z takich rozwiązań konstrukcyjnych jest strop monolityczny żelbetowy na szalunku trapezowym z blachy trapezowej. W artykule podjęto próbę obliczenia wskaźnika oceny przybliżonej izolacyjności akustycznej właściwej $R'_{A,1}$ oraz wskaźnika ważonego przybliżonego poziomu uderzeniowego znormalizowanego $L'_{n,w}$ dla ww. stropu z podłogą pływającą. Wyniki obliczeń porównano z wynikiem pomiarów terenowych zrealizowanych w budynku biurowym oraz wymaganiami przyjętymi zgodnie z obowiązującymi przepisami [4, 5, 7].

Terminy i definicje

W celu ułatwienia zrozumienia treści artykułu przedstawimy podstawowe terminy i niezbędne definicje dotyczące jego tematyki.

Przybliżona izolacyjność akustyczna właściwa R' [dB]

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \log(S/A) \quad (1)$$

gdzie:

L_1 – poziom średniego ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu po stronie nadawczej [dB];

L_2 – poziom średniego ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu po stronie odbiorczej [dB];

S – powierzchnia przegrody [m²];

A – równoważne pole powierzchni dźwiękochłonnej pomieszczenia odbiorczego [m²].

Przybliżony poziom uderzeniowy znormalizowany L'_n [dB]

$$L'_n = L_1 + 10 \log(A/A_0) \quad (2)$$

gdzie:

L_1 – poziom uderzeniowy po stronie odbiorczej [dB];

A – równoważne pole powierzchni dźwiękochłonnej pomieszczenia odbiorczego [m²];

A_0 – równoważne pole powierzchni dźwiękochłonnej odniesienia $A_0 = 10$ m².

Wymienione wielkości, wyznaczone jako funkcja częstotliwości, sprowadzamy w praktyce inżynierskiej do wartości wskaźników jednolicebnych.

Wskaźnik ważony przybliżonej izolacyjności akustycznej właściwej R'_w jest to przybliżona izolacyjność od dźwięków powietrznych, określona w normowym przedziale częstotliwości 100 ÷ 3150 Hz, sprowadzona do wartości jednolicebowej zgodnie z metodą określoną w PN-EN ISO 717-1:2021-06 [10]. **Widmowe wskaźniki adaptacyjne C i C_{tr}** należy stosować w celu uwzględnienia różnorodności widm źródeł hałasu,

be presented in parentheses following the single-number weighted index. For example: $R'_w(C; C_{tr}) = 55 (-1; -5)$ dB. To assess compliance of a building element or partition with acoustic requirements, as defined in PN-B-02151-3:2015-10 [6], the following evaluation indices should be used:

$$R'_{A,1} = R_w + C \quad (3)$$

$$R'_{A,2} = R_w + C_{tr} \quad (4)$$

Weighted normalized impact sound pressure level $L'_{n,w}$ is the normalized impact sound pressure level in the field determined within the standard frequency range of 100 ÷ 3150 Hz, reduced to a single-number index in accordance with PN-EN ISO 717-2:2021-06 [11].

Spectrum adaptation term C_1 may be used to account for discrete low-frequency peaks generated by walking on timber or reinforced concrete floors without effective floating floor systems. If such effects are to be considered, the measurement result should be expressed as the sum of $L'_{n,w}$ and C_1 . However, national regulations do not authorize the use of C_1 when verifying compliance with impact sound insulation requirements. Therefore, comparing the combined value of $L'_{n,w}$ and C_1 with the normative maximum $L'_{n,w}$ value specified in PN-B-02151-3:2015-10 [6] should be regarded as unjustified.

Requirements

In terms of acoustic insulation requirements, regulation [5] refers to the standard PN-B-02151-3:2015-10 [7]. Table 1 presents selected required airborne sound insulation between rooms in an office building, while Table 2 shows the requirements for impact sound insulation, presented as the permissible value of the weighted normalized impact sound pressure level index, $L'_{n,w}$.

Table 1. Required airborne sound insulation of internal partitions in office buildings according to PN-B-02151-3:2015-10 [7]

Tabela 1. Wymagana izolacyjność od dźwięków powietrznych przegród wewnętrznych w budynkach biurowych wg PN-B-02151-3:2015-10 [7]

Situation in the building/Sytuacja w budynku	Index value [dB]/Wartość wskaźnika [dB]
Wall without doors between office room/Ściana bez drzwi między pokojami biurowymi	$R'_{A,1} \geq 40$
Wall between conference rooms, including rooms with similar functions/Ściana między salami konferencyjnymi, w tym pomieszczeniami o podobnym przeznaczeniu	$R'_{A,1} \geq 48$
Floor between office rooms/Strop między pokojami biurowymi	$R'_{A,1} \geq 50$
Floor between conference rooms, including rooms with similar functions/Strop między salami konferencyjnymi, w tym pomieszczeniami o podobnym przeznaczeniu	$R'_{A,1} \geq 50$

Note! If the shared surface area of the partition (S) is less than 10 m², the requirement applies to the standardized sound level difference index $D_{nT,A,1}$ (instead of the apparent sound reduction index $R'_{A,1}$)/UWAGA! W przypadku, gdy wspólna powierzchnia przegrody S jest mniejsza niż 10 m², to wymaganie dotyczy wskaźnika oceny wzorcowej różnicy poziomów $D_{nT,A,1}$ (zamiast wskaźnika oceny przybliżonej izolacyjności akustycznej właściwej $R'_{A,1}$)

takich jak szum różowy i hałas drogowy oraz w celu oceny krzywych izolacyjności akustycznej właściwej zgodnie z metodą określoną w PN-EN ISO 717-1:2021-06 [10]. Dwa widmowe wskaźniki adaptacyjne, oddzielone średnikiem, należy podawać w nawiasach występujących po jednolicebowym wskaźniku ważonym, np. $R'_w(C; C_{tr}) = 55 (-1; -5)$ dB. W celu określenia spełnienia wymagań przez element lub przegrodę w budynku, zgodnie z PN-B-02151-3:2015-10 [7], należy użyć wskaźników oceny przybliżonej izolacyjności akustycznej właściwej $R'_{A,1}$ i $R'_{A,2}$ [dB]:

$$R'_{A,1} = R_w + C \quad (3)$$

$$R'_{A,2} = R_w + C_{tr} \quad (4)$$

Wskaźnik ważony przybliżonego poziomu uderzeniowego $L'_{n,w}$ jest to przybliżony poziom uderzeniowy określony w normowym przedziale częstotliwości 100 ÷ 3150 Hz, sprowadzony do wartości jednolicebowej, zgodnie z metodą określoną w normie PN-EN ISO 717-2:2021-06 [11].

Widmowy wskaźnik adaptacyjny C_1 może być stosowany w celu uwzględnienia pojedynczych pików w niskiej częstotliwości, powstających podczas chodzenia po stropach drewnianych lub żelbetowych bez skutecznej podłogi pływającej. W przypadku, gdy efekt taki ma być uwzględniony, to wynik pomiaru należy zapisać jako sumę wskaźników $L'_{n,w}$ i C_1 . W krajowych normatywach nie ma jednak zapisów upoważniających do stosowania wskaźnika C_1 podczas weryfikacji wymagań dotyczących izolacyjności od dźwięków uderzeniowych. W związku z tym porównywanie sumarycznej wartości $L'_{n,w}$ i C_1 z wymaganiem normowym wg PN-B-02151-3:2015-10 [7] w postaci maksymalnej wartości $L'_{n,w}$ należy uznać za nieuprawnione.

Wymagania

W przypadku wymagań dotyczących izolacyjności akustycznej, rozporządzenie [4] powołuje PN-B-02151-3:2015-10 [7]. W tabeli 1 przedstawiono wymaganą izolacyjność od dźwięków powietrznych między pomieszczeniami w budynku biurowym, natomiast w tabeli 2 wymaganą izolacyjność od dźwięków uderzeniowych, przedstawione w postaci dopuszczalnej wartości wskaźnika ważonego przybliżonego poziomu uderzeniowego $L'_{n,w}$.

Table 2. Required level of impact sounds transmitted to protected rooms in office buildings according to PN-B-02151-3:2015-10 [7]

Tabela 2. Dopuszczalny poziom dźwięków uderzeniowych przenikających do pomieszczeń chronionych w budynkach biurowych wg PN-B-02151-3: 2015-10 [7]

Situation in the building/Sytuacja w budynku	Index value [dB]/Wartość wskaźnika [dB]
Level of impact sounds transmitted between office rooms, conference rooms, and meeting rooms in any configuration/ Poziom dźwięków uderzeniowych przenikających między pomieszczeniami biurowymi, salami konferencyjnymi, salami spotkań w dowolnym układzie	$L'_{n,w} \leq 60$

Building characteristics

The floor in question is located in a two-storey office building constructed with a steel framework. It separates an office room on the first floor from a room on the ground floor. Photo 1 shows a view of the floor before the concrete mix was poured. The location of the transmitting room on the upper floor, where measurements were taken, is symbolically marked in yellow. Photo 2 presents a view of the office building during construction. The image shows the floor with permanent formwork made of trapezoidal sheet metal and a layer of concrete topping.



Photo 1. The ceiling before the concrete mix was laid
Fot. 1. Strop przed ułożeniem mieszanki betonowej

Charakterystyka obiektu

Przedmiotowy strop znajduje się w dwukondygnacyjnym budynku biurowym zrealizowanym w konstrukcji stalowej. Rozdziela od siebie pomieszczenie biurowe na pierwszym piętrze od pomieszczenia na parterze. Na fotografii 1 przedstawiono widok stropu przed ułożeniem mieszanki betonowej. Kolorem żółtym zaznaczono symbolicznie miejsce realizacji pomieszczenia nadawczego na piętrze, w którym wykonano pomiary. Fotografia 2 przedstawia budynek biurowy podczas realizacji. Widoczny jest strop z deskowaniem traconym w postaci blachy trapezowej oraz warstwą nadbetonu.



Photo 2. The office building under construction
Fot. 2. Budynek biurowy w trakcie realizacji

Figure 1 shows a portion of the floor plan for the first floor and ground floor, covering both the transmitting and receiving rooms. Additionally, the shared section of the floor separating the two rooms is marked in red. The types of walls enclosing the rooms are indicated by numbers: 1 and 3 external walls; 2 and 4 internal walls.

Na rysunku 1 pokazano fragment rzutu pierwszego piętra i parteru, na którym znajdują się pomieszczenia nadawcze i odbiorcze. Dodatkowo kolorem czerwonym zaznaczono wspólną część stropu rozdzielającego oba pomieszczenia, a numerami rodzaj ścian ograniczających pomieszczenia: 1 i 3 zewnętrzne; 2 i 4 wewnętrzne.

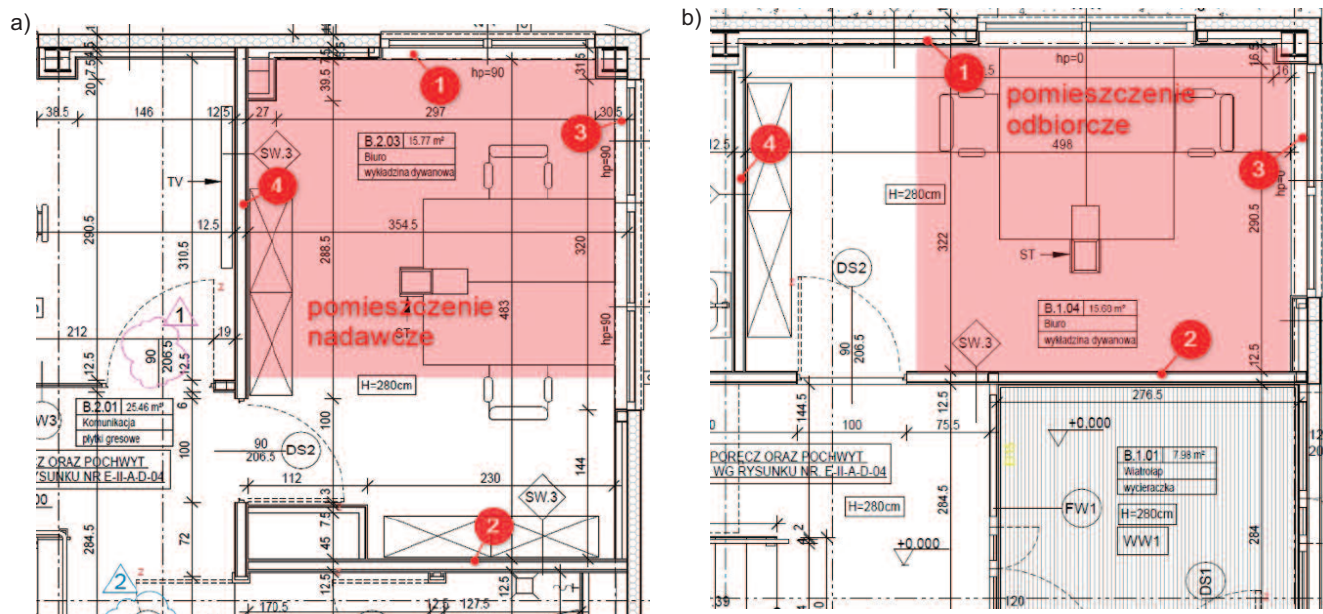


Fig. 1. Fragment of the plan of the first floor and ground floor, including the following rooms: a) receiving rooms (office B.2.03, level +4.00 m); b) source rooms (office B.1.04, level ±0.00 m) [17]

Rys. 1. Fragment rzutu pierwszego piętra i parteru obejmujący swoim zakresem pomieszczenia: a) nadawcze (biuro B.2.03, poziom +4,00 m); b) odbiorcze (biuro B.1.04, poziom ±0,00 m) [17]

The walls enclosing the rooms were constructed as follows:

- 1 and 3 external walls – built from 240 mm thick silicate blocks, with a surface mass of $m' = 350 \text{ kg/m}^2$ and airborne sound insulation $R_w(C; C_{tr}) = 52 (-1; -4) \text{ dB}$ (these walls were insulated using the ETICS system 180 mm mineral wool + 4 mm thin-layer plaster);
- 2 and 4 internal walls – lightweight frame walls constructed using cold-formed steel profiles with a thickness of 75 mm, clad with gypsum boards and filled with 75 mm mineral wool. Built using “dry construction” technology, these walls have a surface mass of $m' = 60 \text{ kg/m}^2$ and an intrinsic airborne sound insulation rating of $R_w(C; C_{tr}) = 52 (-3; -10) \text{ dB}$.

Due to the lack of detailed data, the parameters related to the walls were assumed to be standard for this type of construction. The floor separating the office rooms was designed as a monolithic reinforced concrete slab on permanent formwork made of T130 trapezoidal sheet metal. A floating floor was also designed, incorporating a resilient layer made of elastified expanded polystyrene (acoustic EPS T) with a thickness of 33/30 mm. No laboratory test results are available for the sound insulation parameters of this solution. Therefore, the following section of the article presents an attempt to calculate the intrinsic airborne sound insulation and the normalized impact sound level. The floor with the floating structure is shown in Figure 2.

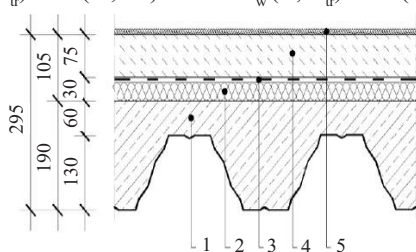


Fig. 2. Cross section of a monolithic reinforced concrete ceiling on a permanent formwork with floating floor: 1) trapezoidal sheet T130, 1.25 mm thick; 2) acoustic polystyrene EPS T 33/30, 30 mm thick ($s' = 20 \text{ MN/m}^3$); 3) PE foil, 0.2 mm thick; 4) cement screed, 75 mm thick; 5) carpet
Rys. 2. Przekrój poprzeczny przez strop monolityczny żelbetowy na szalunku trapezowym z podłogą pływającą: 1) blacha trapezowa T130 grubości 1,25 mm; 2) styropian akustyczny EPS T 33/30 grubości 30 mm ($s' = 20 \text{ MN/m}^3$); 3) folia PE grubości 0,2 mm; 4) jastrych cementowy grubości 75 mm; 5) wykładzina dywanowa

Ściany ograniczające pomieszczenia wykonane zostały jako:

- 1 i 3 zewnętrzne – murowane z bloków silikatowych grubości 240 mm, o masie powierzchniowej $m' = 350 \text{ kg/m}^2$ i izolacyjności akustycznej właściwej $R_w(C; C_{tr}) = 52 (-1; -4) \text{ dB}$, ocieplone z wykorzystaniem systemu ETICS (wełna mineralna grubości 180 mm + tynk cienkowarstwowy grubości 4 mm);
- 2 i 4 wewnętrzne – szkieletowe na ruszcie z kształtowników stalowych zimnogiętych grubości 75 mm z okładziną z płyty g-k i wypełnieniem wełną mineralną grubości 75 mm w technologii „suchej zabudowy” o masie powierzchniowej $m' = 60 \text{ kg/m}^2$ i izolacyjności akustycznej właściwej $R_w(C; C_{tr}) = 52 (-3; -10) \text{ dB}$.

Ze względu na brak danych szczegółowych, parametry dotyczące ścian przyjęto jako standardowe w tego rodzaju rozwiązaniach. Strop rozdzielający pomieszczenia biurowe zaprojektowany został jako monolityczny żelbetowy na szalunku trapezowym z blachy trapezowej T130. Ponadto zaprojektowano podłogę pływającą z warstwą sprężystą w postaci elastyfikowanego polistyrenu ekspandowanego (styropianu akustycznego) EPS T o grubości 33/30 mm. W przypadku tego rozwiązania nie ma wyników badań laboratoryjnych dotyczących parametrów dźwiękoizolacyjnych, dlatego też w dalszej części artykułu przedstawiono próbę obliczenia izolacyjności akustycznej właściwej oraz poziomu uderzeniowego znormalizowanego. Strop z podłogą przedstawiono na rysunku 2.

Calculation possibilities

Sound transmission between rooms. To meet the current requirements for acoustic insulation between rooms, it is necessary to define the specifications in accordance with PN-B-02151-3:2015-10 [7]. For the purpose of this part of the task, it is sufficient to adopt the appropriate values from the tables (Table 1 and Table 2). A significantly more challenging task is determining the actual values of the acoustic indices $R'_{A,1}$ and $L'_{n,w}$. The above indices refer to conditions within the building, meaning they account not only for the direct transmission of sound between rooms (as is the case in laboratory tests), but also for indirect sound transmission. Below is the applicable calculation model based on PN-EN ISO 12354-1:2017-10 [1], concerning impact sound insulation.

In the calculations of weighted apparent sound reduction index, a simplified model based on PN-EN 12354-1:2017 [1] was used. The weighted apparent sound reduction index, expressed through the equation derived from this model, is presented below (5):

$$R'_w = -10 \lg \left[10^{-\frac{R_{Dd,w}}{10}} + \sum_{f=f_1}^n 10^{-\frac{R_{Ff,w}}{10}} + \sum_{f=f_1}^n 10^{-\frac{R_{Df,w}}{10}} + \sum_{f=f_1}^n 10^{-\frac{R_{Fd,w}}{10}} + \frac{A_0}{S_s} \sum_{j=1}^m 10^{-\frac{D_{n,j,w}}{10}} \right] \quad (5)$$

Możliwości obliczeniowe

Transmisja dźwięku między pomieszczeniami. W celu spełnienia obowiązujących wymagań dotyczących izolacyjności akustycznej między pomieszczeniami konieczne jest określenie wymagań zgodnie z PN-B-02151-3:2015-10 [7]. W celu realizacji tej części zadania wystarczy przyjąć odpowiednie wartości z tabel 1 i 2. Zdecydowanie trudniejszym zadaniem jest określenie wartości wskaźników $R'_{A,1}$ i $L'_{n,w}$, które dotyczą sytuacji w budynku, a więc z uwzględnieniem nie tylko przenoszenia bezpośredniego dźwięku między pomieszczeniami (jak ma to miejsce w badaniach laboratoryjnych), ale także przenoszenia pośredniego dźwięku.

W obliczeniach przybliżonej izolacyjności akustycznej właściwej (izolacyjności od dźwięków powietrznych) skorzystano z modelu uproszczonego wg PN-EN 12354-1:2017 [1]. Wskaźnik przybliżonej izolacyjności akustycznej właściwej zapisany za pomocą równania wynikającego z tego modelu (5):

where:

$R_{Dd,w}$ – weighted sound reduction index for airborne direct transmission [dB];

$R_{Ff,w}$, $R_{Df,w}$, $R_{Fd,w}$ – weighted flanking sound reduction index for the transmission path; F_f , D_f and F_d [dB] (sound transmission paths are illustrated in Figure 3);

$D_{n,j,w}$ – weighted normalized sound level difference for the transmission through a small technical element j ($D_{n,e}$) or an airborne transmission system ($D_{n,s}$) [dB];

S_s – the area of the separating element, measured [m²];

A_0 – the reference equivalent sound absorption area in the receiving room [m²] (for dwellings $A_0 = 10$ m²).

This model refers to the weighted apparent sound reduction index R'_w . However, according to the standard [1], it may also be used to determine the $R'_{A,1}$. If the common surface area of the partition S is less than 10 m², the requirements should be related to the value of the standardized sound level difference index $D_{nT,A,1}$. There is a relationship between the apparent sound reduction index R' and the standardized sound level difference index D_{nT} , as defined in [1]:

$$D_{nT} = R' + 10 \lg \frac{0,32 \cdot V}{S_s} \quad (6)$$

The flanking sound transmission paths D_d and F_f , D_f and F_d are illustrated in Figure 3. The diagram shows the direction of transmission vertically downward, corresponding to the situation analysed in the office building. To calculate the flanking sound reduction index $R_{Ff,w}$, $R_{Df,w}$, $R_{Fd,w}$, the following formulas were applied, as specified in [1].

$$R_{Dd,w} = R_{S,w} + \Delta R_{Dd,w} \quad (7)$$

$$R_{Ff,w} = \frac{R_{Ff,w} + R_{Ff,w}}{2} + \Delta R_{Ff,w} + K_{Ff} + 10 \lg \frac{S_s}{l_0 l_f} \quad (8)$$

$$R_{Fd,w} = \frac{R_{Fd,w} + R_{Fd,w}}{2} + \Delta R_{Fd,w} + K_{Fd} + 10 \lg \frac{S_s}{l_0 l_f} \quad (9)$$

$$R_{Df,w} = \frac{R_{Df,w} + R_{Df,w}}{2} + \Delta R_{Df,w} + K_{Df} + 10 \lg \frac{S_s}{l_0 l_f} \quad (10)$$

where:

$R_{S,w}$ – weighted flanking sound reduction index for the separating element [dB];

$R_{Ff,w}$ – weighted flanking sound reduction index for the flanking element F in source room [dB];

$R_{Ff,w}$ – weighted flanking sound reduction index for the flanking element f in receiving room;

$\Delta R_{Ff,w}$, $\Delta R_{Df,w}$, $\Delta R_{Fd,w}$ – total weighted flanking sound reduction index improvement by the additional lining on the source and/or receiving side of the separating and/or flanking element [dB];

K_{Ff} , K_{Fd} , K_{Df} – vibrations reduction index for transmission path Ff , Fd or Df [dB];

S_s – the area of separating element [m²];

l_f – the common coupling length of the junction between separating element and the flanking element [m];

l_0 – the reference coupling length; $l_0 = 1$ m.

In the calculations of the approximate normalized impact sound level, a simplified model based on PN-EN 12354-2:2017 [2] was used. The weighted normalized impact sound pressure level in the field $L'_{n,w}$, expressed through the equation derived from this model, is presented below.

$$L'_{n,w} = 10 \lg \left(10^{\frac{L_{n,d,w}}{10}} + \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{n,i,j,w}}{10}} \right) \quad (11)$$

gdzie:

$R_{Dd,w}$ – ważony wskaźnik izolacyjności akustycznej właściwej z uwzględnieniem przenoszenia bezpośredniego [dB];

$R_{Ff,w}$, $R_{Df,w}$, $R_{Fd,w}$ – ważone wskaźniki bocznej izolacyjności akustycznej właściwej [dB] w przypadku drogi przenoszenia odpowiednio: F_f , D_f i F_d (drogi przenoszenia dźwięku przedstawiono na rysunku 3);

$D_{n,j,w}$ – ważony wskaźnik znormalizowanej różnicy poziomów [dB] w przypadku małych elementów budowlanych ($D_{n,e}$) lub transmisji pośredniej przez system ($D_{n,s}$);

S_s – powierzchnia elementu rozdzielającego [m²];

A_0 – równoważne pole powierzchni dźwiękochłonnej odniesienia ($A_0 = 10$ m²).

Model uproszczony wg PN-EN 12354-1:2017 odnosi się do jednolitego ważonego wskaźnika przybliżonej izolacyjności akustycznej właściwej R'_w , ale w myśl tej normy może być również stosowany do wyznaczenia wskaźnika oceny izolacyjności akustycznej właściwej $R'_{A,1}$. W przypadku, gdy wspólna powierzchnia przegrody S jest mniejsza niż 10 m², wymagania należy odnieść do wartości wskaźnika oceny wzorcowej różnicy poziomów $D_{nT,A,1}$. Pomiedzy przybliżoną izolacyjnością akustyczną właściwą R' a wzorcową różnicą poziomów D_{nT} zachodzi zależność [1]:

$$D_{nT} = R' + 10 \lg \frac{0,32 \cdot V}{S_s} \quad (6)$$

Poszczególne drogi bocznej transmisji dźwięku D_d i F_f , D_f i F_d pokazano na rysunku 3. Przedstawia on kierunek transmisji pionowo do dół, adekwatnie do sytuacji poddanej analizie w budynku biurowym. W celu obliczenia bocznej izolacyjności akustycznej właściwej $R_{Ff,w}$, $R_{Df,w}$, $R_{Fd,w}$, zastosowano wzory z [1].

$$R_{Dd,w} = R_{S,w} + \Delta R_{Dd,w} \quad (7)$$

$$R_{Ff,w} = \frac{R_{Ff,w} + R_{Ff,w}}{2} + \Delta R_{Ff,w} + K_{Ff} + 10 \lg \frac{S_s}{l_0 l_f} \quad (8)$$

$$R_{Fd,w} = \frac{R_{Fd,w} + R_{Fd,w}}{2} + \Delta R_{Fd,w} + K_{Fd} + 10 \lg \frac{S_s}{l_0 l_f} \quad (9)$$

$$R_{Df,w} = \frac{R_{Df,w} + R_{Df,w}}{2} + \Delta R_{Df,w} + K_{Df} + 10 \lg \frac{S_s}{l_0 l_f} \quad (10)$$

gdzie:

$R_{S,w}$ – ważony wskaźnik izolacyjności akustycznej właściwej elementu rozdzielającego [dB];

$R_{Ff,w}$ – ważony wskaźnik izolacyjności akustycznej właściwej bocznej elementu F w pomieszczeniu nadawczym [dB];

$R_{Ff,w}$ – ważony wskaźnik izolacyjności akustycznej właściwej bocznej elementu f w pomieszczeniu odbiorczym [dB];

$\Delta R_{Ff,w}$, $\Delta R_{Df,w}$, $\Delta R_{Fd,w}$ – całkowity ważony wskaźnik przyrostu izolacyjności akustycznej ustroju dźwiękoizolacyjnego na elemencie rozdzielającym lub bocznym [dB];

K_{Ff} , K_{Fd} , K_{Df} – wskaźnik redukcji drgań dla drogi transmisji Ff , Fd lub Df [dB];

S_s – powierzchnia elementu rozdzielającego [m²];

l_f – długość połączenia w złączu [m];

l_0 – długość odniesienia; $l_0 = 1$ m.

W obliczeniach przybliżonego znormalizowanego poziomu uderzeniowego (izolacyjności od dźwięków uderzeniowych) skorzystano z modelu uproszczonego wg PN-EN 12354-2:2017 [2]. Wskaźnik ważony przybliżonego znormalizowanego poziomu uderzeniowego $L'_{n,w}$ zapisany za pomocą równania wynikającego z tego modelu:

$$L'_{n,w} = 10 \lg \left(10^{\frac{L_{n,d,w}}{10}} + \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{n,i,j,w}}{10}} \right) \quad (11)$$

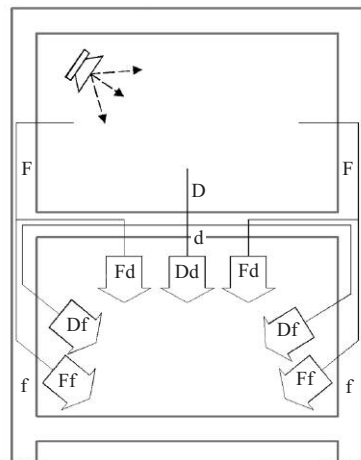


Fig. 3. Definition of sound transmission paths between to rooms [1]; airborne sound insulation model

Rys. 3. Schemat przenoszenia dźwięków drogami materiałowymi między pomieszczeniami [1]; model dotyczy izolacyjności od dźwięków powietrznych

where:

$L'_{n,w}$ – weighted normalized impact sound pressure level in the field [dB];

$L_{n,d,w}$ – weighted normalized impact sound pressure level due to impact direct transmission D_d [dB];

$L_{n,ij,w}$ – weighted normalized impact sound pressure level due to impact flanking transmission D_f [dB];

n – number of elements.

The specific sound transmission paths: direct transmission D_d and flanking transmission D_f are shown in Figure 4. The diagram illustrates the downward vertical transmission direction between rooms located one above the other. The weighted normalized impact sound pressure level due to impact direct transmission $L_{n,d,w}$ as well as the weighted normalized impact sound pressure level due to impact flanking transmission $L_{n,ij,w}$ shall be calculated in accordance with the formulas presented below [11].

$$L_{n,d,w} = L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w - \Delta L_{d,w} \quad (12)$$

$$L_{n,ij,w} = L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w + \frac{R_{i,w} - R_{j,w}}{2} - \Delta R_{j,w} - K_{ij} - \left(10 \cdot \lg \frac{S_i}{l_0 \cdot l_{ij}} \right) \quad (13)$$

where:

$L_{n,eq,0,w}$ – the equivalent weighted normalized impact sound pressure level of the bare floor [dB];

ΔL_w – weighted reduction of impact sound pressure level by a floor covering [dB];

$\Delta L_{d,w}$ – weighted reduction of impact sound pressure level of an additional layer on the receiving side of the separating element [dB];

n – flanking partition number;

$R_{i,w}$ – weighted sound reduction index of the floor [dB];

$R_{j,w}$ – weighted sound reduction index of flanking partition (walls) [dB];

$\Delta R_{j,w}$ – weighted sound reduction index improvement of an additional layer on the receiving side of the flanking element (j) [dB];

K_{ij} – the vibration reduction index for path ij [dB], (according to Annex E, standard [1]);

S_i – the area of separating element [m²];

l_{ij} – the common coupling length of the junction between separating element and the flanking element [m];

l_0 – the reference coupling length; $l_0 = 1$ m.

Calculations according to formulas 5 ÷ 11 should be performed by substituting, as the sound insulation parameters of the partitions, the single-number indices determined from laboratory tests of reference specimens of these partitions, reduced to design values:

$$R_{A,i,R} = R_{A,i} - 2 \quad (14)$$

$$L_{n,w,R} = L_{n,w} - 2 \quad (15)$$

where:

$R_{A,i}$ – weighted sound reduction index [dB];

$R_{A,i,R}$ – design weighted sound reduction index [dB];

$L_{n,w}$ – weighted normalized impact sound pressure level [dB];

$L_{n,w,R}$ – design weighted normalized impact sound pressure level [dB].

Acoustic insulation parameters of the floor. In situations where laboratory test results for the acoustic insulation of partitions used in the designed building are unavailable, it is possible to calculate the sound insulation indices using

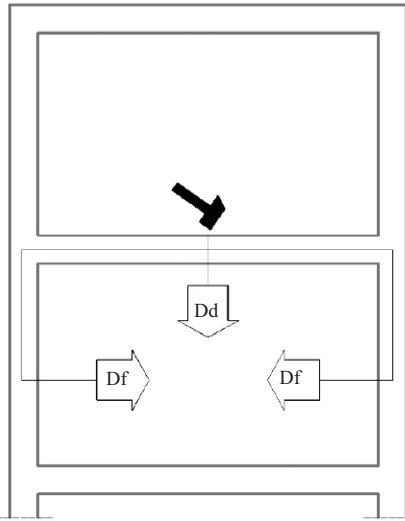


Fig. 4. Definition of sound transmission paths between to rooms [2]; impact sound insulation model

Rys. 4. Schemat przenoszenia dźwięków drogami materiałowymi między pomieszczeniami [2]; model dotyczący izolacyjności od dźwięków uderzeniowych

gdzie:

$L'_{n,w}$ – wskaźnik ważony przybliżonego poziomu uderzeniowego znormalizowanego [dB];

$L_{n,d,w}$ – wskaźnik ważony poziomu uderzeniowego dla drogi bezpośredniej D_d [dB];

$L_{n,ij,w}$ – wskaźnik ważony poziomu uderzeniowego dla dróg pośrednich D_f [dB];

n – liczba przegród bocznych (ściany bocznej).

Poszczególne drogi przenoszenia dźwięku: bezpośrednią D_d oraz boczne D_f pokazano na rysunku 4, który przedstawia kierunek transmisji pionowo do dół w przypadku pomieszczeń znajdujących się nad sobą. Wskaźnik ważony poziomu uderzeniowego drogi bezpośredniej $L_{n,d,w}$ oraz wskaźnik ważony poziomu uderzeniowego dróg pośrednich $L_{n,ij,w}$ należy obliczać zgodnie z wzorami [11].

$$L_{n,d,w} = L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w - \Delta L_{d,w} \quad (12)$$

$$L_{n,ij,w} = L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w + \frac{R_{i,w} - R_{j,w}}{2} - \Delta R_{j,w} - K_{ij} - \left(10 \cdot \lg \frac{S_i}{l_0 \cdot l_{ij}} \right) \quad (13)$$

gdzie:

$L_{n,eq,0,w}$ – równoważny wskaźnik ważony poziomu uderzeniowego znormalizowanego dla stropu bez dodatkowych warstw [dB];

ΔL_w – ważony wskaźnik zmniejszenia poziomu uderzeniowego przez podłogę [dB];

$\Delta L_{d,w}$ – ważony wskaźnik zmniejszenia poziomu uderzeniowego przez dodatkowe warstwy sufitowe [dB];

n – numer przegrody bocznej (ściany bocznej);

$R_{i,w}$ – ważony wskaźnik izolacyjności akustycznej właściwej stropu [dB];

$R_{j,w}$ – ważony wskaźnik izolacyjności akustycznej właściwej przegród bocznych (ścian) [dB];

$\Delta R_{j,w}$ – całkowity wskaźnik przyrostu izolacyjności akustycznej dodatkowego ustroju dźwiękoizolacyjnego na elemencie bocznym [dB];

K_{ij} – wskaźnik redukcji drgań w przypadku drogi transmisji ij [dB], wg załącznika E, normy [1];

S_i – powierzchnia elementu rozdzielającego [m²];

l_{ij} – długość połączenia w złączu między stropem i a ścianą j [m];

l_0 – długość odniesienia; $l_0 = 1$ m.

Obliczenia wg wzorów 5 ÷ 11 należy wykonać, podstawiając, jako parametry dźwiękoizolacyjne przegród, wartości wskaźników jednolicebnych, wyznaczone w badaniach laboratoryjnych wzorców tych przegród, zredukowane do wartości projektowych:

$$R_{A,i,R} = R_{A,i} - 2 \quad (14)$$

$$L_{n,w,R} = L_{n,w} - 2 \quad (15)$$

gdzie:

$R_{A,i}$ – wskaźnik oceny izolacyjności akustycznej właściwej [dB];

$R_{A,i,R}$ – wskaźnik projektowy oceny izolacyjności akustycznej właściwej [dB];

$L_{n,w}$ – wskaźnik ważony poziomu uderzeniowego znormalizowanego [dB];

$L_{n,w,R}$ – wskaźnik projektowy poziomu uderzeniowego znormalizowanego [dB].

Parametry dźwiękoizolacyjne stropu. W sytuacji, kiedy nie ma wyników badań laboratoryjnych izolacyjności akustycznej przegród występujących w projektowanym budynku, możliwe jest obliczenie wartości wskaźników dźwiękoizolacyjnych

empirical formulas provided in standards [1] and [2]. Such a situation applies to the monolithic reinforced concrete slab in question, constructed on permanent formwork made of trapezoidal sheet metal. Available calculation models were verified by comparing the results obtained through their application with laboratory test data [12]. The verification was carried out for floor slabs with sound insulation indices confirmed by laboratory testing [13]. As a result of this verification, both in terms of airborne and impact sound insulation, it was found that the methodology based on PN-EN 15037-1:2011 [3] provides the greatest “safety margin.” On the other hand, the formulas from PN-EN ISO 12354-1:2017-10 [1] and PN-EN ISO 12354-2:2017-10 [2] yield results more closely aligned with laboratory measurements. These conclusions refer to ribbed floor slabs, which appear to be structurally most similar to the slab in question. **We present both calculation models related to the determination of the acoustic insulation of the slab without additional layers (the so-called bare slab).**

Formulas according to PN-EN 15037-1:2011 [3]. Based on PN-EN 15037-1:2011 [3], the airborne sound insulation, expressed by the weighted sound reduction index R_w , for ribbed floor slabs can be estimated using the following formula:

$$R_w = 40 \log(M_R) - 56 + \frac{3}{8} \left(\frac{M_R}{h_t} \right) \quad (16)$$

where:

M_R – the mas of the floor [kg/m^2];

h_t – the depth of the floor (without taking into account the floor finishing or the floating slab).

To account for the spectrum of residential noise, the R_w index must be corrected by incorporating the values of the spectrum adaptation terms C and C_{tr} :

$$R_{A,1} = R_w + C \quad (17)$$

$$R_{A,2} = R_w + C_{tr} \quad (18)$$

where:

$R_{A,1}$ i $R_{A,2}$ – sound reduction indexes [dB].

Since the standard PN-EN 15037-1:2011 [3] does not provide information on this subject, the values of the spectrum adaptation terms C and C_{tr} used for the analysis were determined based on PN-EN 12354-1 [1]. The equivalent weighted normalized impact sound pressure level of the bare floor $L_{n,eq,0,w}$ should be calculated using the formulas below:

- floor with solid concrete blocks:

$$L_{n,eq,0,w} = 165 - 35 \log(M_R) \quad (19)$$

- floors with concrete hollow blocks, ceramic blocks, expanded polystyrene blocks, etc.:

$$L_{n,eq,0,w} = 170 - 35 \log(M_{ep}) \quad (20)$$

where:

M_R – the mas of the floor [kg/m^2];

M_{ep} – the equivalent mas of the floor [kg/m^2].

$$M_{ep} = M_R - M_r \quad (21)$$

$$M_r = 80 \cdot (h/H) \text{ for concrete and clay blocks} \quad (22)$$

na podstawie wzorów empirycznych z norm [1] i [2]. Z sytuacją taką mamy do czynienia w przypadku przedmiotowego żelbetonowego stropu monolitycznego na szalunku traconym z blachy trapezowej. Dostępne modele obliczeniowe zweryfikowano przez porównanie wyników obliczeniowych uzyskanych przy ich zastosowaniu z wynikami z badań laboratoryjnych [12]. Przeprowadzono weryfikację stropów posiadających wartości wskaźników dźwiękoizolacyjnych, potwierdzone badaniami laboratoryjnymi [13]. W wyniku weryfikacji zarówno izolacyjności od dźwięków powietrznych, jak i uderzeniowych stwierdzono, że metoda wg PN-EN 15037-1:2011 [3] zapewnia największy „zapas bezpieczeństwa”. Z kolei wzory wg norm PN-EN ISO 12354-1:2017-10 [1] i PN-EN ISO 12354-2:2017-10 [2] dają wyniki bardziej zbliżone do wartości uzyskanych w badaniach laboratoryjnych. Wnioski te dotyczą stropów gęstożebrowych, które mają najbardziej zbliżoną konstrukcję do badanego stropu. **Przedstawimy oba modele obliczeniowe dotyczące określenia izolacyjności akustycznej stropu bez dodatkowych warstw, tzw. gołego stropu.**

Wzory wg PN-EN 15037-1:2011 [3]. Na podstawie tej normy, izolacyjność od dźwięków powietrznych, wyrażoną za pomocą jednolitego ważonego wskaźnika izolacyjności akustycznej właściwej R_w , można oszacować w przypadku stropów gęstożebrowych za pomocą wzoru:

$$R_w = 40 \log(M_R) - 56 + \frac{3}{8} \left(\frac{M_R}{h_t} \right) \quad (16)$$

gdzie:

M_R – masa powierzchniowa stropu [kg/m^2];

h_t – wysokość stropu [cm] (nie uwzględnia się podłóg pływających).

W celu uwzględnienia widma hałasu bytowego należy przeprowadzić korektę wskaźnika R_w przez uwzględnienie wartości widmowych wskaźników adaptacyjnych C i C_{tr} :

$$R_{A,1} = R_w + C \quad (17)$$

$$R_{A,2} = R_w + C_{tr} \quad (18)$$

gdzie:

$R_{A,1}$ i $R_{A,2}$ – wskaźniki oceny izolacyjności akustycznej właściwej [dB].

W związku z tym, że w normie PN-EN 15037-1:2011 [3] nie ma informacji na ten temat, wartości wskaźników C i C_{tr} na potrzeby analizy określono na podstawie PN-EN 12354-1 [1]. Równoważny ważony wskaźnik znormalizowanego poziomu uderzeniowego w przypadku stropu bez dodatkowych warstw $L_{n,eq,0,w}$ należy obliczać wg wzorów:

- strop z pełnymi blokami betonowymi:

$$L_{n,eq,0,w} = 165 - 35 \log(M_R) \quad (19)$$

- strop z pustakami betonowymi, ceramicznymi, styropianowymi itp.:

$$L_{n,eq,0,w} = 170 - 35 \log(M_{ep}) \quad (20)$$

gdzie:

M_R – masa powierzchniowa stropu [kg/m^2];

M_{ep} – równoważna masa stropu [kg/m^2].

$$M_{ep} = M_R - M_r \quad (21)$$

$$M_r = 80 \cdot (h/H) \text{ w przypadku pustaków betonowych lub ceramicznych} \quad (22)$$

$M_r = 15$ for polystyrene blocks (23)

where:

h – height of the hollow blocks [cm];

H – total height of the floor [cm] ($H = h_f$).

Formulas according to PN-EN 12354-1:2017-10 [1]. Based on PN-EN 15037-1:2011 [3], the airborne sound insulation, expressed by the weighted sound reduction index R_w , for ribbed floor slabs can be estimated using the following formula:

$$R_w = 37,5 \lg m' - 42 \quad (24)$$

Values of the spectrum adaptation terms C and C_{tr} should be adopted as follows:

$$C = (-1) \div (-2) \quad (25)$$

$$C_{tr} = 16 - 9 \cdot \log(m'/m'_0),$$

$$\text{limited by } 7 \leq C_{tr} \leq -1 \text{ [dB]} \quad (26)$$

where:

m' – the mass of the floor [kg/m^2];

m'_0 – the mass of the floor, used as the reference value [1 kg/m^2].

Formulas according to PN-EN 12354-2:2017-10 [2]. The equivalent weighted normalized impact sound pressure level $L_{n,eq,0,w}$ of homogeneous floor construction should be calculated using the formulas below (27). According to the provisions of standard [11], ribbed (beam-and-block) floors are also classified as homogeneous floors.

$$L_{n,eq,0,w} = 164 - 35 \cdot \log(m') \quad (27)$$

Acoustic insulation parameters of the floating slab. Formulas 16 ÷ 27 allow for the determination of **single-number indices** related to the sound insulation of the floor **without additional layers**, i.e., the so-called bare floor. For design purposes, it is necessary to assess the **impact of additional layers** (e.g., a **floating slab**) on the overall acoustic insulation of the floor as a **complete partition** separating rooms. In this context, the following formulas may be used [1] i [2].

Formulas according to PN-EN 12354-1:2017-10 [1]. Weighted sound reduction index improvement $\Delta R_{A,1}$ for a floating slab on a separating floor according to PN-EN 12354-1:2017 [1]. In the case of additional layers attached directly to a homogeneous structural element separating rooms (without the use of mechanical fasteners), the airborne sound insulation may be increased or decreased depending on the resonance frequency of the system. The weighted sound reduction index improvement by a lining, expressed by the equation derived from this model, is presented in Table 3.

Resonance frequency shall be determined in accordance with the formula below:

Table 3. Weighted sound reduction index improvement by a lining, depending on the resonance frequency [1]

Tabela 3. Przyrost ważonego wskaźnika izolacyjności akustycznej właściwej spowodowany obecnością dodatkowego ustroju, w zależności od częstotliwości rezonansowej wg [1]

Resonance frequency of the lining/Częstotliwość rezonansowa dodatkowych warstw f_0 [Hz]	ΔR_w [dB]
$30 \leq f_0 \leq 160$	$74,4 - 20 \lg(f_0) - R_w/2$
200	-1
250	-3
315	-5
400	-7
500	-9
$630 \div 1600$	-10
$1600 \leq f_0 \leq 5000$	-5

For the resonance frequency below 200 Hz, the minimum value of ΔR_w is 0 dB; R_w denotes the weighted sound reduction index of the bare wall or floor [dB]/Przy częstotliwości poniżej 200 Hz, minimalna wartość ΔR_w wynosi 0 [dB]; R_w dotyczy wskaźnika ściany bazowej lub stropu [dB]

$M_r = 15$ w przypadku pustaków z tworzyw sztucznych (23)

gdzie:

h – wysokość pustaka (bloku) [cm];

H – całkowita wysokość stropu [cm] ($H = h_f$).

Wzory wg PN-EN 12354-1:2017-10 [1]. Wartość jednoliczbowego ważonego wskaźnika izolacyjności akustycznej właściwej R_w , w przypadku jednorodnych przegród pojedynczych, można oszacować za pomocą wzoru:

$$R_w = 37,5 \lg m' - 42 \quad (24)$$

Wartości wskaźnika widmowego C , C_{tr} należy przyjmować:

$$C = (-1) \div (-2) \quad (25)$$

$$C_{tr} = 16 - 9 \cdot \log(m'/m'_0),$$

$$\text{przy czym } 7 \leq C_{tr} \leq -1 \text{ [dB]} \quad (26)$$

gdzie:

m' – masa powierzchniowa stropu [kg/m^2];

m'_0 – masa powierzchniowa stropu, stosowana jako wartość odniesienia [1 kg/m^2].

Wzory wg PN-EN 12354-2:2017-10 [2]. Izolacyjność od dźwięków uderzeniowych, wyrażoną za pomocą równoważnego ważonego wskaźnika znormalizowanego poziomu uderzeniowego, w przypadku stropu jednorodnego bez dodatkowych warstw $L_{n,eq,0,w}$ można oszacować za pomocą wzoru (27). W rozumieniu zapisów normy [11] stropy gęstożebrowe zaliczane są również do stropów jednorodnych.

$$L_{n,eq,0,w} = 164 - 35 \cdot \log(m') \quad (27)$$

Parametry dźwiękoizolacyjne podłogi. Wzory 16 ÷ 27 pozwalają określić jednoliczbowe wskaźniki dotyczące izolacyjności **stropu bez dodatkowych warstw, tzw. gołego stropu. Do celów projektu konieczne jest określenie wpływu dodatkowych warstw (np. podłogi pływającej) na izolacyjność akustyczną stropu** jako całości przegrody oddzielającej pomieszczenia. Do tego celu można wykorzystać wzory wg norm [1] i [2].

Wzory wg PN-EN 12354-1:2017-10 [1]. Wskaźnik oceny poprawy izolacyjności akustycznej $\Delta R_{A,1}$ podłogi pływającej na stropie rozdzielającym wg PN-EN 12354-1:2017 [1]. W przypadku warstw dodatkowych, przymocowanych bezpośrednio do jednorodnego elementu konstrukcyjnego, rozdzielającego pomieszczenia (bez użycia łączników mechanicznych), izolacyjność akustyczna może być zwiększona lub zmniejszona w zależności od częstotliwości rezonansowej układu. Wskaźnik izolacyjności akustycznej właściwej zapisany za pomocą równania wynikającego z tego modelu przedstawiono w tabeli 3.

Częstotliwość rezonansową [Hz] należy określić zgodnie z wzorem:

$$f_0 = \frac{1000}{2\pi} \cdot \sqrt{s' \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad (28)$$

where:

s' – dynamic stiffness of the insulation layer accordance with EN-29052-1 [MN/m³];

m'_1 – mas per unit area of the basic structural element [kg/m²];

m'_2 – mas per unit area of the additional layer [kg/m²].

In the case of two or more resilient layers, the resultant dynamic stiffness in MN/m³ of the total surface area shall be determined using the following formula:

$$s'_{tot} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{s'_i} \right)^{-1} \quad (29)$$

where:

s'_i – dynamic stiffness of the insulation layer accordance with EN-29052-1 [MN/m³].

Formulas according to PN-EN 12354-2:2017-10 [2].

Reduction of impact sound pressure level ΔL by floating slab on the floor, it is possible to determine using weighted reduction of impact sound pressure level ΔL_w . According to PN-EN 12354-2:2017-10 [2], in the case of floating floors with a loading layer made of cement or anhydrite screed, the value of the weighted reduction of impact sound pressure level ΔL_w in decibels can be determined using the following equation:

$$\Delta L_w = 13,0 \cdot \lg(m') - 14,2 \cdot \lg(s') + 20,8 \quad (30)$$

where:

s' – dynamic stiffness of the insulation layer accordance with EN-29052-1 [MN/m³];

m' – mas per unit area of the basic structural element [kg/m²].

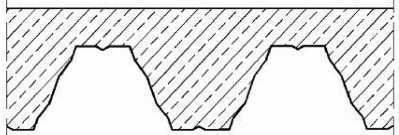
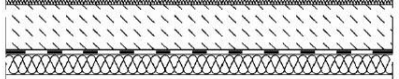
Table 4 summarizes the single-number quantities of sound insulation indices presented above, along with the standards that include provisions allowing their determination based on calculations.

Calculation results

Table 5 presents the results of single-number index calculations for the floor slab and the floating floor, which – due to the lack of laboratory test results – were used in subsequent calculations of airborne and impact sound insulation between rooms.

Table 4. Single-number quantities and standards that allow their determination

Tabela 4. Jednoliczbowe wskaźniki dźwiękoizolacyjne oraz normy umożliwiające ich określenie

Floor slab or its components/ Strop lub jego elementy	Type of calculated single-number quantity and methodology [dB]/Rodzaj obliczanego wskaźnika oraz metoda [dB]
	Values for the floor without additional layers:/wartość dotycząca stropu bez dodatkowych warstw: $R_w(C; C_{tr})$ wg PN-EN 12354-1:2017-10 [1], PN-EN 15037-1:2011 [3]; $L_{n,eq,0,w}$ (PN-EN 12354-2:2017-10 [2], PN-EN 15037-1:2011 [3])
	Values for additional layers:/wartość w przypadku dodatkowych warstw: ΔR_w wg PN-EN 12354-1:2017-10 [1], ΔL_w wg PN-EN 12354-2:2017-10 [2]

$$f_0 = \frac{1000}{2\pi} \cdot \sqrt{s' \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad (28)$$

gdzie:

s' – sztywność dynamiczna warstwy izolacyjnej zgodnie z EN-29052-1 [MN/m³];

m'_1 – masa powierzchniowa podstawowego elementu konstrukcyjnego [kg/m²];

m'_2 – masa powierzchniowa dodatkowej warstwy [kg/m²].

W przypadku dwóch lub więcej warstw sprężystych, wypadkową sztywność dynamiczną [MN/m³] powierzchni całkowitej należy wyznaczyć z wzoru:

$$s'_{tot} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{s'_i} \right)^{-1} \quad (29)$$

gdzie:

s'_i – sztywność dynamiczna warstwy sprężystej i zgodnie z EN-29052-1 [MN/m³].

Wzory wg PN-EN 12354-2:2017-10 [2].

Zmniejszenie poziomu uderzeniowego ΔL przez podłogę pływającą na stropie można określić za pomocą wskaźnika ważonego zmniejszenia poziomu uderzeniowego ΔL_w . Zgodnie z PN-EN 12354-2:2017-10 [2], w przypadku podłóg pływających z warstwą dociążającą z jastrychu cementowego lub anhydrytowego, wartość wskaźnika ΔL_w [dB] można określić za pomocą równania:

$$\Delta L_w = 13,0 \cdot \lg(m') - 14,2 \cdot \lg(s') + 20,8 \quad (30)$$

gdzie:

s' – sztywność dynamiczna warstwy izolacyjnej zgodnie z EN-29052-1 [MN/m³];

m' – masa powierzchniowa warstwy jastrychu [kg/m²].

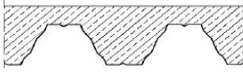
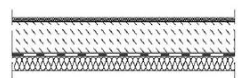
W tabeli 4 zestawiono dźwiękoizolacyjne wskaźniki jednoliczbowe oraz normy, które zawierają zapisy umożliwiające ich określenie na podstawie obliczeń.

Wyniki obliczeń

W tabeli 5 przedstawiono wyniki obliczeń wskaźników jednoliczbowych, dotyczących stropu oraz podłogi pływającej, które ze względu na brak wyników badań laboratoryjnych zastosowano w dalszych obliczeniach izolacyjności akustycznej między pomieszczeniami.

Table 5. Calculated single-number quantities for the ceiling and floating floor

Tabela 5. Obliczone jednolicezbowe wskaźniki dźwiękoizolacyjne dotyczące stropu i podłogi

Floor slab or its components/ Strop lub jego elementy	Type of calculated single-number quantity and methodology [dB]/Rodzaj obliczanego wskaźnika oraz metoda [dB]	
	Values for the bare floor slab (without additional layers):/wartości w przypadku stropu bez dodatkowych warstw:	
	wg PN-EN 15037-1:2011 [3]	wg PN-EN 12354-1:2017 [1] wg PN-EN 12354-2:2017-10 [2]
	$R_w(C; C_{tr}) = 49,2 (-1; -6,3)$ dB $L_{n,eq,0,w} = 83,9$ dB	$R_w(C; C_{tr}) = 51,0 (-1; -6,3)$ dB $L_{n,eq,0,w} = 77,2$ dB
	values for the floating floor:/wartości w przypadku podłogi pływającej:	
	$\Delta R_w = 11,2$ dB ⁽¹⁾ $\Delta L_w = 26,4$ dB ⁽²⁾	$\Delta R_w = 10,2$ dB ⁽¹⁾ $\Delta L_w = 26,4$ dB ⁽²⁾

(1) ΔR_w value determined without considering the effect of the carpet flooring. The impact on the result is considered negligible/wartość ΔR_w wyznaczona bez uwzględnienia wpływu wykładziny dywanowej; wpływ na wynik należy uznać za pomijalny; (2) ΔL_w value determined without considering the effect of the carpet flooring. The impact on the result is considered significant/wartość ΔL_w wyznaczona bez uwzględnienia wpływu wykładziny dywanowej; wpływ na wynik należy uznać za istotny.

Based on the calculation results in Table 5, the combined index values for the floor slab with the floating floor are presented below. Based on calculations performed in accordance with PN-EN 15037-1:2011 [14]:

$$R_w + \Delta R_w = 49,2 + 11,2 = 60,4 \text{ dB};$$

$$R_w(C; C_{tr}) = 60,4 (-1; -6,3) \text{ dB} \rightarrow R_{A,1} = 59,4 \text{ dB} \rightarrow R_{A,1,R} = 57,4 \text{ dB};$$

$$L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w = 83,9 - 26,4 = 57,5 \text{ dB} \rightarrow L_{n,w,R} = 59,5 \text{ dB}.$$

Based on calculations performed in accordance with PN-EN 12354-1:2017-10 [1] and PN-EN 12354-2:2017-10 [2]:

$$R_w + \Delta R_w = 51,0 + 10,2 = 61,2 \text{ dB};$$

$$R_w(C; C_{tr}) = 61,2 (-1; -6,3) \text{ dB} \rightarrow R_{A,1} = 60,2 \text{ dB} \rightarrow R_{A,1,R} = 58,2 \text{ dB};$$

$$L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w = 77,2 - 26,4 = 50,8 \text{ dB} \rightarrow L_{n,w,R} = 52,8 \text{ dB}$$

Based on the above data and the wall parameters and using formulas 5 ÷ 13, calculations of airborne sound insulation between rooms were performed. Table 6 presents the results of calculations for weighted flanking sound reduction index $R_{Ff,A,1}$, $R_{Df,A,1}$, $R_{Fd,A,1}$ (Figure 3), and weighted apparent sound reduction index R_w with spectrum adaptation C_{tr} ($R'_{A,1}$) between office rooms. The results refer to calculations carried out in accordance with the model defined in PN-EN 12354-1:2017-10 [1] and PN-EN 15037-1:2011 [3].

Table 7 presents the results of calculations for the weighted impact sound pressure level index $L_{n,ij,w}$ (for flanking paths D_f – Figure 4), $L_{n,d,w}$ (for the direct path D_d – Figure 4), and the weighted normalized impact sound pressure level index $L'_{n,w}$ between office rooms. The results refer to calculations carried

Na podstawie obliczeń z tabeli 5 przedstawiono wartości wskaźników w przypadku stropu z podłogą pływającą łącznie. Z obliczeń wykonanych wg PN-EN 15037-1:2011 [14] wynika, że:

$$R_w + \Delta R_w = 49,2 + 11,2 = 60,4 \text{ dB};$$

$$R_w(C; C_{tr}) = 60,4 (-1; -6,3) \text{ dB} \rightarrow R_{A,1} = 59,4 \text{ dB} \rightarrow R_{A,1,R} = 57,4 \text{ dB};$$

$$L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w = 83,9 - 26,4 = 57,5 \text{ dB} \rightarrow L_{n,w,R} = 59,5 \text{ dB}.$$

Na podstawie obliczeń wykonanych wg PN-EN 12354-1:2017-10 [1] i PN-EN 12354-2:2017-10 [2] otrzymano:

$$R_w + \Delta R_w = 51,0 + 10,2 = 61,2 \text{ dB};$$

$$R_w(C; C_{tr}) = 61,2 (-1; -6,3) \text{ dB} \rightarrow R_{A,1} = 60,2 \text{ dB} \rightarrow R_{A,1,R} = 58,2 \text{ dB};$$

$$L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w = 77,2 - 26,4 = 50,8 \text{ dB} \rightarrow L_{n,w,R} = 52,8 \text{ dB}$$

Wykorzystując te dane oraz parametry ścian i wzory 5 ÷ 13, wykonano obliczenia izolacyjności akustycznej między pomieszczeniami. W tabeli 6 przedstawiono wyniki obliczeń wartości wskaźnika jednolicezbowego bocznej izolacyjności akustycznej właściwej $R_{Ff,A,1}$, $R_{Df,A,1}$, $R_{Fd,A,1}$ (rysunek 3) oraz wskaźnika oceny przybliżonej izolacyjności akustycznej właściwej $R'_{A,1}$ między pomieszczeniami biurowymi. Wyniki dotyczą obliczeń zrealizowanych zgodnie z modelem wg PN-EN 12354-1:2017-10 [1] oraz PN-EN 15037-1:2011 [3].

Tabela 7 zawiera wyniki obliczeń wartości wskaźnika ważonego poziomu uderzeniowego $L_{n,ij,w}$ (dróg pośrednich D_f – rysunek 4), $L_{n,d,w}$ (drogi bezpośredniej D_d – rysunek 4) oraz wskaźnika ważonego przybliżonego poziomu uderzeniowego znormalizowanego $L'_{n,w}$ między pomieszczeniami

Table 6. The calculated weighted flanking reduction indices $R_{Ff,A,1}$, $R_{Df,A,1}$, $R_{Fd,A,1}$ and $R'_{A,1}$ the weighted apparent sound reduction index R_w with spectrum adaptation C_{tr}

Tabela 6. Obliczone wartości wskaźnika oceny bocznej izolacyjności akustycznej właściwej $R_{Ff,A,1}$, $R_{Df,A,1}$, $R_{Fd,A,1}$ oraz wskaźnika oceny przybliżonej izolacyjności akustycznej właściwej $R'_{A,1}$

Calculation method/Metoda obliczeń wg	Weighted flanking reduction indexes $R_{Ff,A,1}$, $R_{Df,A,1}$, $R_{Fd,A,1}$ weighted apparent sound reduction index R_w with spectrum adaptation C_{tr} ($R'_{A,1}$) [dB] Wartości wskaźnika oceny bocznej izolacyjności akustycznej właściwej $R_{Ff,A,1}$, $R_{Df,A,1}$, $R_{Fd,A,1}$ oraz wskaźnika oceny przybliżonej izolacyjności akustycznej właściwej $R'_{A,1}$ [dB]													
	Dd	1d	2d	3d	4d	D1	11	D2	22	D3	33	D4	44	$R'_{A,1}$
EN-12354-1	58,3	65,4	65,4	76,2	76,2	65,4	60,9	65,4	60,9	76,2	78,5	76,2	78,5	53,6
EN 15037-1	57,4	65,0	65,0	75,7	75,7	65,0	60,9	65,0	60,9	75,7	78,5	75,7	78,5	53,1

Table 7. Comparison of the calculated normalized impact sound pressure level due flanking transmission $L_{n,ij,w}$ for paths D_f and normalized impact sound pressure level due direct transmission $L_{n,d,w}$ for the paths D_d and the weighted normalized impact sound pressure level in the field $L'_{n,w}$

Tabela 7. Porównanie obliczonych wartości wskaźnika ważonego poziomu uderzeniowego $L_{n,ij,w}$ dróg pośrednich D_f drogi bezpośredniej D_d oraz wskaźnika ważonego przybliżonego poziomu uderzeniowego znormalizowanego $L'_{n,w}$

Calculation method/Metoda obliczeń	Normalized impact sound pressure level $L_{n,ij,w}$ (due flanking transmission D_f , $L_{n,d,w}$ (due direct transmission D_d) and the weighted normalized impact sound pressure level in the field $L'_{n,w}$ [dB]/Wartości wskaźnika ważonego poziomu uderzeniowego $L_{n,ij,w}$ (dla dróg pośrednich D_f), $L_{n,d,w}$ (dla drogi bezpośredniej D_d) oraz wskaźnika ważonego przybliżonego poziomu uderzeniowego znormalizowanego $L'_{n,w}$ [dB]					
	Dd	D1	D2	D3	D4	$L'_{n,w}$
EN-12354-2	52,8	41,5	41,5	29,8	29,8	53,5
EN 15037-1	59,6	47,4	47,4	35,7	35,7	60,1

out in accordance with the model defined in **PN-EN 12354-1:2017-10** [1], **PN-EN 12354-2:2017-10** [2], and **PN-EN 15037-1:2011** [3].

Measurement results

Field measurements were carried out using the methodology specified in standards [14, 15], referenced in Annex 1 to Regulation [5]. Additionally, the current standard [16] was taken into account during the tests, although it has not yet been officially cited in the annex to the regulation. Measurements were performed using a measurement setup consisting of the following components: tapping machine, omnidirectional loudspeaker, power amplifier with built-in noise generator, two sound level meters and acoustic calibrator. Measurements were conducted for a single room configuration separated by a floor slab:

- source room (office B.2.03, level +4.00 m);
- receiving room (office B.1.04, level ±0.00 m).

The measurement direction (vertically downward) was adopted in accordance with the most probable path of unwanted sound transmission between rooms. Figure 5 shows a cross-section of the rooms separated by the floor slab, for which airborne sound insulation measurements were performed. The measurement direction is indicated with an arrow. Photo 3 shows the source room during the airborne sound insulation test.

Figure 6 presents the results of field measurements. To concisely illustrate the findings, the graph shows both airborne and impact sound insulation results. The chart displays values of the approximate apparent sound reduction index R' and the normalized impact sound pressure level in the field $L'_{n,w}$, plotted as a function of frequency in 1/3-octave bands. Based on the graph, it can be concluded that the results obtained for the floor slab separating the rooms on different levels exhibit

biurowymi. Wyniki dotyczą obliczeń zrealizowanych zgodnie z modelem wg normy **PN-EN 12354-1:2017-10** [1], **PN-EN 12354-2:2017-10** [2] oraz **PN-EN 15037-1:2011** [3].

Wyniki pomiarów terenowych

Pomiary terenowe zrealizowano z wykorzystaniem metody zawartej w normach [14, 15], przywołanych w załączniku nr 1 do rozporządzenia [5]. Dodatkowo, realizując badania, uwzględniono zapisy z normy [16], pomimo że nie została ona jeszcze powołana w załączniku do rozporządzenia. Pomiary przeprowadzono za pomocą układu pomiarowego, składającego się z następujących elementów: stukacz młotkowy; kolumna głośnikowa o dookólnej charakterystyce promieniowania; wzmacniacz mocy z wbudowanym generatorem szumu; 2 x miernik poziomu dźwięku; kalibrator akustyczny. Pomiary dotyczyły jednego układu pomieszczeń rozdzielonych stropem:

- nadawcze (biuro B. 2.03, poziom +4,00 m);
- odbiorcze (biuro B. 1.04, poziom ±0,00 m).

Kierunek pomiaru (pionowo w dół) przyjęto adekwatnie do najbardziej prawdopodobnego kierunku transmisji niepożądanych dźwięków między pomieszczeniami. Na rysunku 5 pokazano przekrój przez pomieszczenia rozdzielone stropem, w przypadku których zrealizowano pomiary izolacyjności akustycznej. Strzałką zaznaczono kierunek pomiaru. Fotografia 3 przedstawia pomieszczenie nadawcze w trakcie realizacji pomiaru izolacyjności akustycznej.

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki pomiarów terenowych zarówno dotyczące izolacyjności od dźwięków powietrznych, jak i uderzeniowych. Wartości przybliżonej izolacyjności akustycznej właściwej R' oraz przybliżonego poziomu uderzeniowego znormalizowanego $L'_{n,w}$ przedstawiono w funkcji częstotliwości w pasmach szerokości 1/3 oktawy. Na podstawie rysunku 6 stwierdzono, że wyniki uzyskane w przypadku stropu rozdzielającego pokoje na piętrze charakteryzują się

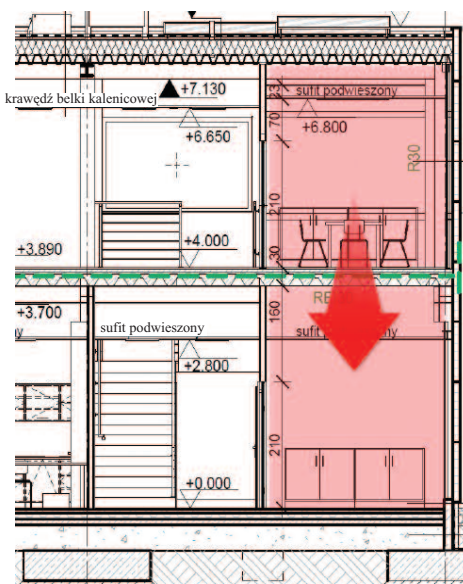


Fig. 5. Cross-section of the rooms separated by a ceiling for which sound insulation measurements were taken; the arrow indicates the direction of measurement [17]

Rys. 5. Przekrój przez pomieszczenia rozdzielone stropem, w przypadku których zrealizowano pomiary izolacyjności akustycznej; strzałką zaznaczono kierunek pomiaru [17]

a “predictable” acoustic behaviour across the entire frequency range – that is, no adverse phenomena of “localized” deterioration in sound insulation are observed in any frequency band. In the case of the approximate normalized impact sound pressure level $L'_{n,w}$, an additional beneficial effect was provided by the carpet flooring, which was applied as the top layer in the office room. It should be noted that the positive influence of the carpet is limited to the mid and high frequency ranges [18]. As expected, the approximate apparent sound reduction index R' shows a slight decrease in measured values at the 250 Hz centre frequency band. This is associated with the coincidence frequency, although the drop is not significant.

The above observations regarding the “good” sound insulation parameters are confirmed by the single-number index values presented in Figure 7 and Table 8. The field measurement results were compared with calculation results obtained using the methodology defined in PN-EN 15037-1:2011 [3], PN-EN 12354-1:2017-10 [1], and PN-EN 12354-2:2017-10 [2], and evaluated against the requirements of standard PN-B-02151-3:2015-10 [7] concerning the acoustic insulation of floor slabs in office buildings. Based on this comparison, it must be concluded that none of the calculation models allow for accurate estimation of the slab’s acoustic insulation. The discrepancy between measured and calculated results is



Photo 3. The source room (office room B.2.03) during the measurement of sound insulation
Fot. 3. Pomieszczenie nadawcze (pokój biurowy B.2.03, poziom +4,00 m) podczas pomiaru izolacyjności akustycznej

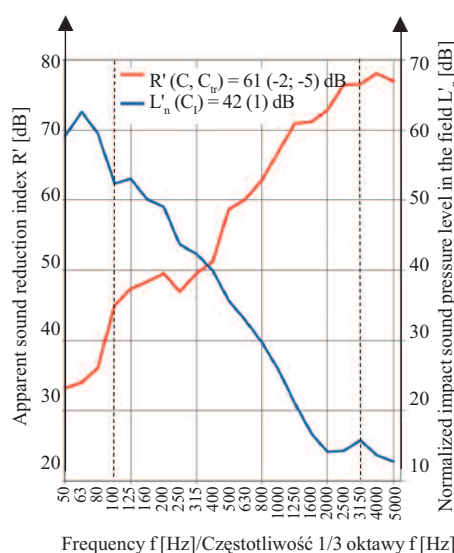


Fig. 6. Results of the field measurements of sound insulation for office rooms separated by a ceiling

Rys. 6. Wyniki pomiarów terenowych przybliżonej izolacyjności akustycznej pomieszczeń biurowych rozdzielonych stropem

„przewidywalną” charakterystyką w całym zakresie częstotliwości (tzn. nie występują niekorzystne zjawiska „lokalnego” pogorszenia izolacyjności akustycznej w którymkolwiek paśmie częstotliwości). W przypadku przybliżonego znormalizowanego poziomu uderzeniowego $L'_{n,w}$ dodatkowy korzystny wpływ miała wykładzina dywanowa, która zastosowana została jako warstwa wierzchnia w pokoju biurowym. Należy zaznaczyć, że korzystny wpływ wykładziny dywanowej ograniczony jest do zakresu średniej i wysokiej częstotliwości [18]. W przypadku przybliżonej izolacyjności akustycznej właściwej R' , jak należało się spodziewać, występuje obniżenie zmierzonych wartości w paśmie o częstotliwości środkowej 250 Hz. Jest to związane z częstotliwością koincydencji, a sam spadek nie jest duży.

„Dobre” parametry dźwiękoizolacyjne potwierdzają uzyskane wartości wskaźników jednoliczbowych przedstawione na rysunku 7 i w tabeli 8. Wyniki pomiarów terenowych zestawiono z wynikami obliczeń, wykonanymi zgodnie z metodą wg PN-EN 15037-1:2011 [3], PN-EN 12354-1:2017-10 [1] i PN-EN 12354-2:2017-10 [2] oraz porównano z wymaganiami normy PN-B-02151-3:2015-10 [7] dotyczący izolacyjności akustycznej stropów w budynkach biurowych. Na podstawie tego porównania stwierdzono, że żaden z modeli obliczeniowych nie pozwala na dokładne oszacowanie izolacyjności stropu. Przyczyną rozbieżności pomię-

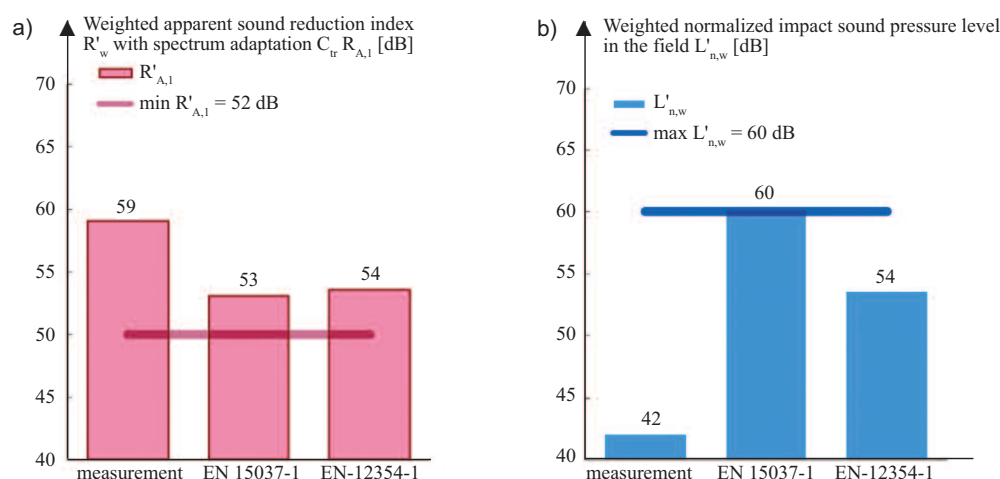


Fig. 7. Single-number quantities for the ceiling based on field measurements and calculations compared with requirements

Rys. 7. Jednoliczbowe wskaźniki oceny izolacyjności akustycznej na podstawie pomiarów i obliczeń porównane z wymaganiami

primarily due to the atypical construction of the monolithic slab formed on a lost formwork made of trapezoidal sheet metal. The applied formulas (16 ÷ 27), which refer to homogeneous slabs, do not yield results with sufficiently low error margins to be used uncritically for predicting the acoustic insulation of such systems. Previous comparisons involving ribbed floor slabs have shown significantly better agreement between calculation results based on PN-EN 12354-1:2017-10 [1] and PN-EN 12354-2:2017-10 [2] and field measurements [12]. In those cases, the differences in $R'_{A,1}$ and $L'_{n,w}$ values did not exceed 1.0 dB, whereas for the slab in question, the difference between the measured and calculated $R'_{A,1}$ index is 5 dB (Figure 7a), and for the $L'_{n,w}$ index, as much as 12 dB (Figure 7b). Naturally, in the case of the field measurements presented in this article, one must account for uncertainties in estimating the influence of the floating floor and errors related to flanking transmission estimation. However, previous studies on the accuracy of the simplified model indicate that the impact of these factors does not exceed 1.0 dB [19]. Research on the reduction of impact sound levels by carpet flooring on a floating floor with acoustic polystyrene indicates an increase in the $L'_{n,w}$ index by 2 dB [18]. These findings lead to the conclusion that **the main reason for the underestimation of both airborne and impact sound insulation of the reinforced concrete slab on trapezoidal sheet metal formwork is its unconventional structure and superior sound reduction performance compared to what is predicted by the empirical mass law, which relies solely on surface mass**. Calculations performed using the PN-EN 15037-1:2011 [3] method yielded results that deviated even further from the measured values ($R'_{A,1} = 53$ dB and $L'_{n,w} = 60$ dB – Figures 7a and 7b, respectively). It should be noted that the tested slab met the normative requirements of $R'_{A,1} = 50$ dB and $L'_{n,w} = 60$ dB with a substantial margin – 9 dB and 18 dB, respectively (Figures 7a and 7b).

Summary

The article presents the results of calculations and field measurements of airborne and impact sound insulation of a floor slab between office rooms. For the examined monolithic reinforced concrete slab constructed on lost formwork made of trapezoidal sheet metal, no laboratory test data regarding sound insulation are available. Therefore, an attempt was made to calculate the weighted apparent sound reduction index R_w with spectrum adaptation C_{tr} (designated as $R'_{A,1}$) and the weighted normalized impact sound pressure level $L'_{n,w}$ for the slab using existing methods dedicated to homogeneous and ribbed floor slabs. Based on the comparison of calculation and measurement results, it must be concluded that the existing calculation formulas according to PN-EN 15037-1:2011 [3]

Table 8. Calculated single-number quantities $R'_{A,1}$ and $L'_{n,w}$
Tabela 8. Obliczone jednolicebnowe wskaźniki oceny przybliżonej izolacyjności akustycznej $R'_{A,1}$ oraz $L'_{n,w}$

Weighted apparent sound reduction index R_w with spectrum adaptation C_{tr} , $R'_{A,1}$ and weighted normalized impact sound pressure level in the field $L'_{n,w}$ [dB] for the floor slab between office rooms/Wartości wskaźnika oceny przybliżonej izolacyjności akustycznej właściwej $R'_{A,1}$ oraz wskaźnika ważonego przybliżonego poziomu uderzeniowego znormalizowanego $L'_{n,w}$ [dB] stropu między pokojami biurowymi	$R'_{A,1}$	$L'_{n,w}$
Field measurement/Pomiar terenowy	59,0	42,0
Calculation according to EN 15037-1/ Obliczenia wg EN 15037-1	53,1	60,1
Calculation according to EN-12354-1/ Obliczenia wg EN-12354-1	53,6	53,5

dzy wynikami obliczeń i pomiarów jest nietypowa budowa stropu monolitycznego na szalunku traconym z blachy trapezowej. Zastosowane wzory obliczeniowe 16 ÷ 27, dotyczące stropów jednorodnych, nie dają wyników z odpowiednio małym błędem, aby mogły być bezkrytycznie stosowane w prognozowaniu izolacyjności akustycznej rozwiązań typu przedmiotowy strop. Wcześniejsze porównania dotyczące stropów gęstożebrowych wskazują na zdecydowanie lepszą zbieżność wyników obliczeń wg PN-EN 12354-1:2017-10 [1] i PN-EN 12354-2:2017-10 [2] z wynikami pomiarów zawartymi w [12]. Różnice wartości wskaźników $R'_{A,1}$ oraz $L'_{n,w}$ nie przekraczały 1,0 dB, podczas gdy w przypadku przedmiotowego stropu różnica pomiędzy wartością wskaźnika $R'_{A,1}$ z pomiaru i obliczeń wynosi 5 dB (rysunek 7a), a w przypadku wskaźnika $L'_{n,w}$ aż 12 dB (rysunek 7b). W przypadku pomiarów terenowych, stanowiących treść artykułu, należy liczyć się z niedokładnością szacowania wpływu podłogi pływającej, a także błędem związanym z szacowaniem przenoszenia bocznego. Dotychczasowe badania dotyczące dokładności modelu uproszczonego wskazują jednak na niewielki wpływ tych obliczeń nieprzekraczający 1,0 dB [19]. Badania zmniejszenia poziomu uderzeniowego przez wykładzinę dywanową na stropie z podłoga pływającą ze styropianem akustycznym wskazują na wzrost wartości wskaźnika $L'_{n,w}$ o 2 dB [18]. Te przesłanki skłaniają do wniosku, że **główną przyczyną niedoszacowania izolacyjności akustycznej zarówno od dźwięków powietrznych, jak i uderzeniowych stropu żelbetowego na szalunku traconym z blachy trapezowej jest jego nietypowa konstrukcja i lepsza redukcja dźwięków, niż wynika to z empirycznego prawa masy**, które bazuje wyłącznie na masie powierzchniowej. Obliczenia za pomocą metody wg PN-EN 15037-1:2011 [3] dały wyniki jeszcze bardziej odbiegające od wartości pomiarowych (odpowiednio $R'_{A,1} = 53$ dB i $L'_{n,w} = 60$ dB – rysunek 7a i rysunek 7b). Należy zaznaczyć, że badany strop spełnił wymagania normowe $R'_{A,1} \geq 50$ dB oraz $L'_{n,w} \leq 60$ dB z bardzo dużym zapasem, wynoszącym odpowiednio 9 i 18 dB (rysunek 7a i rysunek 7b).

Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń oraz pomiarów terenowych izolacyjności od dźwięków powietrznych i uderzeniowych stropu między pokojami biurowymi. W przypadku przedmiotowego monolitycznego stropu żelbetowego na szalunku traconym z blachy trapezowej nie ma wyników badań laboratoryjnych dotyczących dźwiękoizolacyjności, dlatego też podjęto próbę obliczenia wskaźnika oceny izolacyjności akustycznej właściwej $R'_{A,1}$ oraz wskaźnika ważonego poziomu uderzeniowego znormalizowanego $L'_{n,w}$ tego stropu za pomocą istniejących metod, które dedykowane są stropom jednorodnym i gęstożebrowym. Na podstawie

and PN-EN 12354-1:2017-10 [1] and PN-EN 12354-2:2017-10 [2] do not allow for determining the acoustic insulation parameters of the slab with the same accuracy as for typical slab types. The difference between the $R_{A,1}$ index obtained from measurement and calculation was 5 dB (Figure 6a), while for the $L'_{n,w}$ index, the discrepancy reached 12 dB (Figure 6b) when using the formulas from standards [1] and [2]. Calculations performed using the PN-EN 15037-1:2011 [3] method yielded results that deviated even further from the measured values. A positive aspect worth noting is that the calculation error results in an underestimation of the slab's acoustic insulation, which may serve as a safety margin during project implementation.

In light of the lack of other calculation methods, performing calculations using the model presented in standards [1] and [2] appears to be an acceptable solution, and the underestimation of sound insulation parameters can be accounted for by the designer or treated as an additional safety buffer. The authors acknowledge that the above conclusions refer to a single case and require validation on other buildings constructed using similar technology. Nevertheless, the results described may serve as useful guidance for designers facing the challenge of estimating the sound insulation of slabs with similar construction during the design phase.

Thank you for supporting the group Saint Gobain, Svantek sound and vibration, Alfa Bond Kohlauer.

Received: 14.04.2025

Revised: 09.06.2025

Published: 21.08.2025

porównania wyników obliczeń i pomiarów stwierdzono, że istniejące wzory obliczeniowe wg PN-EN 15037-1:2011 [3] oraz wg PN-EN 12354-1:2017-10 [1] i PN-EN 12354-2:2017-10 [2] nie pozwalają na określenie parametrów dźwiękoizolacyjnych stropu z dokładnością analogiczną do typowych stropów. Różnica pomiędzy wartością wskaźnika $R'_{A,1}$ określoną za pomocą pomiaru i obliczeń wg wzorów z norm [10, 11] wyniosła 5 dB (rysunek 6a), a w przypadku wskaźnika $L'_{n,w}$ aż 12 dB (rysunek 6b). Obliczenia za pomocą metody wg normy PN-EN 15037-1:2011 [3] dały wyniki jeszcze bardziej odbiegające od wartości pomiarowych. Pozytywnym aspektem, na który należy zwrócić uwagę, jest fakt, że błąd obliczeniowy powoduje niedoszacowanie izolacyjności akustycznej stropu, co może stanowić bezpieczną rezerwę w przypadku realizacji projektu.

W świetle braku innych metod obliczeniowych, wykonanie obliczeń za pomocą przedstawionego modelu z norm [1] i [2] wydaje się być dopuszczalnym rozwiązaniem, a niedoszacowanie parametrów dźwiękoizolacyjnych może zostać uwzględnione przez projektanta lub stanowić dodatkowy zapas bezpieczeństwa. Mamy świadomość, że wnioski te dotyczą zaledwie jednego przypadku i wymagają potwierdzenia. Niezależnie od tego opisane wyniki mogą stanowić pomoc dla projektantów w przypadku konieczności zmierzenia się na etapie projektu z wyzwaniem oszacowania dźwiękoizolacyjności stropu o podobnej konstrukcji.

Dziękujemy za wsparcie grupie Saint Gobain, Svantek sound and vibration, Alfa Bond Kohlauer.

Artykuł wpłynął do redakcji: 14.04.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 09.06.2025 r.

Opublikowano: 21.08.2025 r.

Literature

- [1] PN-EN 12354-1:2017-10 Akustyka budowlana – Określenie właściwości akustycznych budynków na podstawie właściwości elementów – Część 1: Izolacyjność od dźwięków powietrznych między pomieszczeniami.
- [2] PN-EN 12354-2:2017-10 Akustyka budowlana – Określenie właściwości akustycznych budynków na podstawie właściwości elementów – Część 2: Izolacyjność od dźwięków uderzeniowych między pomieszczeniami.
- [3] PN-EN 15037-1:2011 Prefabrykaty z betonu – Belkowo-pustakowe systemy stropowe – Część 1: Belki.
- [4] Ustawa z 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane (Dz. U. 1994 nr 89 poz. 414 ze zmianami).
- [5] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [Dz.U. nr 75, poz. 690] ze zmianami.
- [6] PN-B-02151-2:2018-01 Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem w budynkach – Część 2: Wymagania dotyczące dopuszczalnego poziomu dźwięku w pomieszczeniach.
- [7] 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.
- [8] PN-B-02151-4:2015-06 Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem w budynkach – Część 4: Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach oraz wytyczne prowadzenia badań.
- [9] Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii z 27 października 2023 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowego zakresu i formy projektu budowlanego (Dz.U. 2023 poz. 2405).
- [10] PN-EN ISO 717-1:2021-06 Akustyka – Ocena izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych – Część 1: Izolacyjność od dźwięków powietrznych.

- [11] PN-EN ISO 717-2:2021-06 Akustyka – Ocena izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych – Część 2: Izolacyjność od dźwięków uderzeniowych.
- [12] Dulak L. Możliwości obliczeniowe izolacyjności akustycznej stropów. Materiały Budowlane. 2017. DOI: 10.15199/33.2017.08.45.
- [13] Szudrowicz B, Żuchowicz-Wodnikowska B, Tomczyk P. Właściwości dźwiękoizolacyjne przegród budowlanych i ich elementów. Instrukcje, wytyczne, poradniki, nr 369. Warszawa 2002.
- [14] PN-EN ISO 16283-1:2014-05 Akustyka – Pomiary terenowe izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych – Część 1: Izolacyjność od dźwięków powietrznych.
- [15] PN-EN ISO 140-7:2000 Akustyka – Pomiar izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych – Pomiary terenowe izolacyjności od dźwięków uderzeniowych stropów.
- [16] PN-EN ISO 16283-2:2021-02 Akustyka – Pomiary terenowe izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych – Część 2: Izolacyjność od dźwięków uderzeniowych.
- [17] Projekt Architektoniczno-Budowlany. Przebudowa, zmiana sposobu użytkowania części budynku magazynowego na warsztatowy i rozbudowa o halę warsztatową naprawy sprzętu budowlanego oraz budowa budynku biurowo-socjalnego wraz z zagospodarowaniem terenu i infrastrukturą towarzyszącą. AB-Projekt Architektoniczne Biuro Projektów.
- [18] Dulak L. Czynniki kształtujące propagację dźwięków generowanych przez źródła wewnętrzne w obiektach budowlanych. Praca doktorska. Politechnika Śląska. Gliwice 2004.
- [19] Dulak L. Uproszczony model przenoszenia dźwięku drogami materiałowymi według PE-EN 12354-1:2002 w kontekście terenowych badań izolacyjności akustycznej, W: 53rd Open Seminar on Acoustics: OSA'2006.