

dr inż. Marcin Wrótny^{1*)}
 ORCID: 0000-0002-9353-3396
 inż. Aleksandra Jaworska

Noise reduction solutions for railway transport

Rozwiązania ograniczające hałas w transporcie kolejowym

DOI: 10.15199/33.2025.10.11

Abstract: The aim of the article was to assess the compliance of noise levels generated by trains under real operating conditions with the permissible values specified in the TSI. Measurements of 80 train pass-bys were used to determine the equivalent sound level. The results indicate that freight trains and passenger wagons may exceed the allowable noise limits. It is advisable to consider noise mitigation measures, such as rolling stock modernization or the use of dedicated technical solutions.

Keywords: railway noise; permissible values; noise protection.

Streszczenie: Celem artykułu była ocena zgodności poziomu hałasu generowanego przez pociągi w warunkach rzeczywistych z dopuszczalnymi wartościami TSI. Pomiary 80 przejazdów pozwoliły określić równoważny poziom dźwięku. Wyniki wskazują, że w przypadku pociągów towarowych i wagonowych pasażerskich poziom hałasu może przekraczać wartości dopuszczalne. Zasadne jest rozważenie działań ograniczających emisję hałasu, takich jak modernizacja taboru czy stosowanie zabezpieczeń akustycznych.

Słowa kluczowe: hałas kolejowy; dopuszczalne wartości; ochrona przed hałasem.

Noise generated by vehicle traffic negatively affects the quality of life. Exposure to elevated sound levels may lead to deterioration of health, sleep disturbances, hearing damage, and work efficiency [1÷3]. Railway noise constitutes a global problem, as it affects more than 22 million people worldwide [4]. In response to this issue, in recent decades various strategies have been implemented aimed at minimizing its impact on the population.

In Poland, the permissible noise level is regulated by the Regulation of the Minister of the Environment, which specifies maximum values depending on the type of area and time of day. The permissible equivalent sound level indicator (L_{AeqDop} , $L_{AeqNdop}$), in the case of residential areas and recreational zones, amounts to 50÷65 dB during the daytime, while at night it is 45÷56 dB. In the case of areas in downtown zones of cities with more than 100,000 inhabitants, these values are higher and amount respectively to 68 dB and 60 dB [5]. They refer to short-term impact (one selected day) and are applied primarily in the assessment of the state of the environment. The measurement is carried out at the boundary of the plot to which the railway line operator holds legal title. It should be noted that there are also other permissible noise levels, referring to individual train passages. Due to a different measurement method, they cannot be directly compared with the mentioned indicators. In the article, the focus is placed on the second group of indicators.

In the context of legal regulations and technical standards, a key role is also played by the Technical Specifications for Interoperability (TSI), which define the requirements concerning noise emissions from railway vehicles [6]. They specify the maximum permissible sound level generated by railway passages, taking into account different types of rolling stock

Hałas generowany przez ruch pojazdów negatywnie wpływa na jakość życia. Ekspozycja na podwyższony poziom dźwięku może prowadzić do pogorszenia zdrowia, zaburzenia snu i uszkodzenia słuchu oraz efektywności pracy [1÷3]. Hałas kolejowy stanowi problem o zasięgu globalnym, ponieważ dotyczy ponad 22 mln osób na całym świecie [4]. W odpowiedzi na to zagadnienie w ostatnich dekadach wdrażano różnorodne strategie mające na celu minimalizację jego oddziaływania na ludność.

W Polsce dopuszczalny poziom hałasu reguluje Rozporządzenie Ministra Środowiska, które określa maksymalne wartości w zależności od rodzaju terenu i pory dnia. Dopuszczalny wskaźnik równoważnego poziomu dźwięku (L_{AeqDop} , $L_{AeqNdop}$), w przypadku terenów zabudowy mieszkaniowej oraz obszarów rekreacyjnych, wynosi w porze dziennej 50÷65 dB, natomiast w porze nocnej 45÷56 dB. W przypadku terenów w strefach śródmiejskich miast powyżej 100 tys. mieszkańców wartości te są większe i wynoszą odpowiednio 68 dB i 60 dB [5]. Odnoszą się one do krótkoterminowego oddziaływania (jedna wybrana doba) i są stosowane przede wszystkim w ocenie stanu środowiska. Pomiaru dokonuje się na granicy działki, do której zarządzający linią kolejową posiada tytuł prawny. Należy zaznaczyć, że istnieją również inne dopuszczalne poziomy hałasu, odnoszące się do pojedynczych przejazdów pociągów. Ze względu na odmienną metodę pomiarową nie mogą być one bezpośrednio porównywane z wymienionymi wskaźnikami. W artykule skupiono się na drugiej grupie wskaźników.

W kontekście regulacji prawnych oraz norm technicznych kluczową rolę odgrywają również Techniczne Specyfikacje Interoperacyjności (TSI), które określają wymagania dotyczące emisji hałasu przez pojazdy szynowe [6]. Definiują one maksymalny dopuszczalny poziom dźwięku generowany przez przejazdy kolejowe, uwzględniający różne typy taboru oraz warunki eksploatacyjne. Ma to na celu ujednolicenie wymagań technicznych na poziomie międzynarodowym, co wspomaga integrację

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury

^{*)} Correspondence address: m.wrotny@pollub.pl

and operational conditions. The aim is to standardize technical requirements at the international level, which supports the integration of railway systems in Europe and contributes to reducing the negative impact of noise on the society inhabiting areas adjacent to railway infrastructure [7].

The TSI distinguishes key interoperability parameters, including stationary noise, starting noise, pass-by noise, and noise inside the driver's cab. For each category of railway rolling stock, it specifies detailed functional and technical requirements that should be met in order to ensure compliance with the regulations [7].

The discussed study does not include measurements of the technical parameters of individual rolling stock units, but focuses on the assessment of whether, under real conditions, passing trains meet the permissible noise level specified in the TSI. One of the selected parameters was analyzed, i.e., the pass-by noise of the train. Table 1 presents the permissible values of the equivalent sound level generated by passing trains depending on their type. The permissible values applicable at the standardized speed of 250 km/h concern units whose maximum operational speed reaches at least this value. Such units were not present in the analyzed passages.

The level of noise generated by railways is influenced by many factors. The key ones include [8]:

- **train speed** – as speed increases, the noise level also increases, with aerodynamic noise becoming the dominant source of sound at speeds exceeding approx. 250 km/h;
- **type of rolling stock** – different types of trains (e.g., passenger, freight, high-speed) are characterized by different noise

systemów kolejowych w Europie oraz przyczynia się do ograniczenia negatywnego oddziaływania hałasu na społeczeństwo zamieszkujące obszary sąsiadujące z infrastrukturą kolejową [7].

TSI wyróżnia kluczowe parametry interoperacyjności, obejmujące hałas stacjonarny, hałas ruszania, hałas przejazdu oraz hałas wewnątrz kabiny maszynisty. W przypadku każdej kategorii taboru kolejowego określa szczegółowe wymagania funkcjonalne i techniczne, które powinny zostać spełnione w celu zapewnienia zgodności z regulacjami [7].

Omówione badanie nie obejmuje pomiarów parametrów technicznych poszczególnych jednostek taboru, lecz skupia się na ocenie, czy w warunkach rzeczywistych przejeżdżające pociągi spełniają dopuszczalny poziom hałasu określony w TSI. Analizie poddano jeden z wybranych parametrów, tj. hałas przejazdu pociągu. W tabeli 1 przedstawiono dopuszczalne wartości równoważnego poziomu dźwięku generowanego przez przejeżdżające pociągi w zależności od ich typu. Wartości dopuszczalne obowiązujące przy znormalizowanej prędkości 250 km/h dotyczą jednostek, których maksymalna prędkość eksploatacyjna osiąga co najmniej tę wartość. Takie jednostki nie były obecne w analizowanych przejazdach.

Na poziom hałasu generowanego przez kolej wpływa wiele czynników. Do kluczowych należą [8]:

- **prędkość pociągu** – wraz ze wzrostem prędkości zwiększa się poziom hałasu, przy czym w przypadku prędkości przekraczających ok. 250 km/h dominującym źródłem dźwięku staje się hałas aerodynamiczny;
 - **rodzaj taboru kolejowego** – różne typy pociągów (np. pasażerskie, towarowe, dużych prędkości) charakteryzują się odmiennym poziomem hałasu, wynikającym z konstrukcji kół, układu napędowego oraz aerodynamiki;
 - **stan techniczny torowiska** – nierówności oraz uszkodzenia szyn mogą powodować zwiększony poziom hałasu tocznienia, a także generować dodatkowe drgania wpływające na emisję dźwięku;
 - **rodzaj nawierzchni torowej** – zastosowanie specjalnych materiałów tłumiących oraz odpowiednich technologii budowy torów może znacznie wpłynąć na redukcję hałasu;
 - **układ hamulcowy** – tradycyjne żeliwne hamulce klockowe generują wyższy poziom hałasu niż nowoczesne rozwiązania technologiczne;
 - **warunki atmosferyczne** – wilgotność powietrza, temperatura czy obecność wiatru mogą wpływać na propagację fal dźwiękowych oraz poziom hałasu odczuwalny w otoczeniu.
- W ostatnich latach wiele uwagi poświęcono rozwiązaniom technicznym mającym na celu redukcję hałasu kolejowego. Ze względu na wieloczynnikowy charakter problemu stosuje się różnorodne **metody ograniczania emisji dźwięku**, do których należą [9, 10]:
- **ekrany przeciwhałasowe** – powszechnie stosowane rozwiązanie, które ogranicza propagację fal dźwiękowych do środowiska;
 - **absorbery szynowe** – urządzenia redukujące drgania oraz jednocześnie obniżające poziom generowanego dźwięku;
 - **tłumienie drgań torowiska** – realizowane przez zastosowanie mat antywibracyjnych lub elastomerowych podkładek szynowych;

Table 1. Limit values for the pass-by noise of rail vehicles, specified in terms of equivalent sound levels [7]

Tabela 1. Dopuszczalne wartości hałasu od przejazdu pojazdu szynowego określone za pomocą równoważnego poziomu dźwięku [7]

Rolling stock category/ Kategoria taboru kolejowego	Permissible values at a speed of/ Wartości dopuszczalne hałasu [dB] przy prędkości	
	80 km/h $L_{AeqTp_dop}(80\text{ km/h})$	250 km/h $L_{AeqTp_dop}(250\text{ km/h})$
Electric locomotives and special vehicles with electric traction/ Lokomotywy elektryczne i OTM z napędem elektrycznym	84	99
Diesel locomotives and special vehicles with diesel traction/ Lokomotywy spalinowe i OTM z napędem wysokoprężnym	85	n.a./nie dotyczy
Electric multiple units (EMU)/ Elektryczne zespoły trakcyjne (EZT)	80	95
Diesel multiple unit (DMU)/ Spalinowe zespoły trakcyjne	81	96
Coaches/Wagony osobowe (W)	79	n.a./nie dotyczy
Wagons (normalised to APL = 0.225)*/ Wagony towarowe (T) (znormalizowane do APL = 0.225)*	83	n.a./nie dotyczy

*) APL: the number of axles divided by the length over the buffers [m^{-1}]/
APL: liczba osi podzielona przez długość pomiędzy zderzakami [m^{-1}]

levels, resulting from the design of wheels, the drive system, and aerodynamics;

- **technical condition of the track** – irregularities and rail damage may cause an increased level of rolling noise, as well as generate additional vibrations affecting sound emission;

- **type of track superstructure** – the use of special damping materials and appropriate track construction technologies can significantly influence noise reduction;

- **braking system** – traditional cast iron block brakes generate higher noise levels than modern technological solutions;

- **atmospheric conditions** – air humidity, temperature, or the presence of wind can influence the propagation of sound waves and the noise level perceived in the surroundings.

In recent years, much attention has been devoted to technical solutions aimed at reducing railway noise. Due to the multi-factor nature of the problem, various methods of **limiting sound emissions** are applied, which include [9, 10]:

- **noise barriers** – a commonly used solution that limits the propagation of sound waves into the environment;

- **rail absorbers** – devices reducing vibrations and at the same time lowering the level of generated sound;

- **track vibration damping** – implemented by using anti-vibration mats or elastomer rail pads;

- **modernization of braking systems** – replacing traditional cast iron brakes with their composite equivalents;

- **replacement of rolling stock** – modern railway vehicles are characterized by lower noise emissions, even by 10 dB compared to older units;

- **lubricators** – reduction of friction between wheel and rail, which results in rolling noise reduction.

A review of the literature indicates the complexity of railway noise issues and the significant role of legal regulations and technological solutions in its reduction. Further research in this area should focus on the optimization of applied noise reduction methods and their effectiveness in the context of meeting the permissible noise level.

Research method

The aim of the study was to determine the equivalent sound level emitted by passing trains. Measurements were carried out in real in situ conditions, in accordance with the pass-by test procedure specified in PN-EN ISO 3095:2013–12 [11].

The measurements were conducted on railway line no. 3 in the town of Kostrzyn. The sound level was recorded at the standard distance of 7.5 m from the axis of the examined track and at the height of 1.2 m above the top surface of the rail head, which is in accordance with the standard requirements (Figure 1). This location refers to the placement of the microphone, which was connected to the sound level meter.

For the measurements, class 1 sound level meters were used, meeting the rigorous requirements regarding measurement accuracy. The estimated type B measurement uncertainty, taking into account factors such as meteorological conditions, precision of the meter used, accuracy of the calibration process, and location of the measuring device, was at the level of ± 1.1 dB. During the tests, the train speed (measured with a Bushnell meter) was also

- **modernizacja układów hamulcowych** – zastąpienie tradycyjnych hamulców żeliwnych ich odpowiednikami kompozytowymi;

- **wymiana taboru kolejowego** – nowoczesne pojazdy szybciej charakteryzują się mniejszą emisją hałasu, nawet o 10 dB w porównaniu ze starszymi jednostkami;

- **smarownice** – ograniczenie tarcia pomiędzy kołem a szyną, co skutkuje redukcją hałasu tocznienia.

Przegląd literatury wskazuje na złożoność problematyki hałasu kolejowego oraz istotną rolę regulacji prawnych i rozwiązań technologicznych w jego ograniczaniu. Dalsze badania w tym zakresie powinny koncentrować się na optymalizacji stosowanych metod redukcji hałasu oraz ich efektywności w kontekście spełniania dopuszczalnego poziomu hałasu.

Metoda badań

Celem badań było określenie **równoważnego poziomu dźwięku emitowanego przez przejeżdżające pociągi**. Wykonano pomiary w warunkach rzeczywistych in situ, zgodnie z procedurą testu pass-by, która została określona w PN-EN ISO 3095:2013-12 [11].

Pomiary przeprowadzono na linii kolejowej nr 3 w miejscowości Kostrzyn. Poziom dźwięku rejestrowano w standardowej odległości 7,5 m od osi badanego toru oraz na wysokości 1,2 m nad górną powierzchnią główki szyny, co jest zgodne z wymaganiami normowymi (rysunek 1). Lokalizacja ta odnosi się do położenia mikrofonu, który był podłączony do miernika poziomu dźwięku. Do realizacji pomiarów wykorzystano mierniki poziomu dźwięku klasy 1, spełniające rygorystyczne wymagania dotyczące dokładności pomiarowej. Oszacowana niepewność pomiarowa typu B, uwzględniająca takie czynniki, jak warunki meteorologiczne, precyzję zastosowanego miernika, dokładność procesu kalibracji oraz lokalizację urządzenia pomiarowego, była na poziomie $\pm 1,1$ dB. W trakcie badań rejestrowano również prędkość pociągu (mierzoną za pomocą miernika Bushnell) oraz określono typ taboru wizualnie i na podstawie zapisu wideo. Warunki atmosferyczne podczas pomiarów były następujące: średnia temperatura 22°C; wilgotność 60% oraz średnia prędkość wiatru 3,8 m/s.

Analizowano hałas generowany przez różne kategorie pociągów: towarowe, samobieżne pasażerskie (zarówno nowego, jak i starego typu) oraz wagonowe pasażerskie. Jednym z kluczowych parametrów wykorzystywanych do oceny uciążliwości hałasu kolejowego jest **równoważny poziom dźwięku**, który określa poziom hałasu w przedziale czasowym. Zgod-

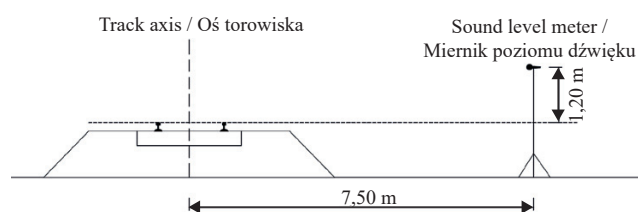


Fig. 1. Measurement Point Diagram – Location of the Sound Level Meter

Rys. 1. Schemat punktu pomiarowego – lokalizacja miernika poziomu dźwięku

recorded, and the type of rolling stock was determined visually and based on video recording. The atmospheric conditions during the measurements were as follows: average temperature 22°C; humidity 60%; and average wind speed 3.8 m/s.

Noise generated by different categories of trains was analyzed: freight, self-propelled passenger (both new and old type), and passenger wagon trains. One of the key parameters used for assessing the nuisance of railway noise is the equivalent sound level, which defines the noise level within a time interval. According to PN-EN ISO 1996:2006 [12], it can be determined based on the following equation:

$$L_{Aeq,T} = 10 \lg \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right] [\text{dB}] \quad (1)$$

where:

T – observation time [s];

$p_A(t)$ – instantaneous sound pressure, adjusted with the A-frequency weighting during time T [Pa];

p_0 – reference sound pressure value, ($p_0 = 20 \mu\text{Pa} = 20 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$)

In order to standardize the influence of train speed on the noise level to the reference value of 80 km/h, a correction factor is applied, enabling the comparison of measurement results regardless of the actual train passage speed. The value of the corrected sound level is calculated on the basis of the following equation [7]:

$$L_{AeqTp(80 \frac{\text{km}}{\text{h}})} = L_{AeqTp(V)} - 30 \cdot \log \left(\frac{V}{80 \frac{\text{km}}{\text{h}}} \right) [\text{dB}] \quad (2)$$

where:

$L_{AeqTp(80 \text{ km/h})}$ – equivalent sound level during a train pass-by at a speed of 80 km/h [dB];

$L_{AeqTp(V)}$ – equivalent sound level during a train pass-by at the actual speed [dB];

V – actual train speed [km/h].

The application of formula (2) facilitates the comparison of results in the case of different categories of trains, regardless of their actual passage speed during the measurements.

Analysis of research results

Analysis of the relationship between sound level and train speed. In the first stage of the study, the relationships between the level of generated noise and the speed of train passage were determined. The recorded speed ranged from 60÷120 km/h, which made it possible to analyze the influence of this parameter on sound emission. A total of 80 measurements were carried out, covering the passage of railway rolling stock of various categories. In order to enable the comparison of results, the data were grouped according to train types. Table 2 presents the key values obtained during the measurements, and Figure 2 shows the relationship between noise level and passage speed, taking into account the division into particular groups of rolling stock.

The analysis of the results confirmed that an increase in train speed is associated with an increase in sound level. However, differences are noticeable both in the level of generated noise

nie z PN-EN ISO 1996:2006 [12], może być on wyznaczony na podstawie następującego równania:

$$L_{Aeq,T} = 10 \lg \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right] [\text{dB}] \quad (1)$$

gdzie:

T – czas obserwacji [s];

$p_A(t)$ – chwilowe ciśnienie akustyczne, zmodyfikowane charakterystyką częstotliwościową A w czasie T [Pa];

p_0 – wartość akustycznego ciśnienia odniesienia, ($p_0 = 20 \mu\text{Pa} = 20 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$)

W celu ujednolicenia wpływu prędkości pociągów na poziom hałasu do wartości odniesienia 80 km/h, stosuje się współczynnik korekcyjny, umożliwiający porównanie wyników pomiarów niezależnie od rzeczywistej prędkości przejazdu pociągu. Wartość skorygowanego poziomu dźwięku oblicza się na podstawie równania [7]:

$$L_{AeqTp(80 \frac{\text{km}}{\text{h}})} = L_{AeqTp(V)} - 30 \cdot \log \left(\frac{V}{80 \frac{\text{km}}{\text{h}}} \right) [\text{dB}] \quad (2)$$

gdzie:

$L_{AeqTp(80 \text{ km/h})}$ – równoważny poziom dźwięku podczas przejazdu pociągu przy prędkości 80 km/h [dB];

$L_{AeqTp(V)}$ – równoważny poziom dźwięku podczas przejazdu pociągu przy prędkości rzeczywistej [dB];

V – prędkość rzeczywista pociągu [km/h].

Zastosowanie wzoru (2) ułatwia porównywanie wyników w przypadku różnych kategorii pociągów, niezależnie od ich rzeczywistej prędkości przejazdu podczas pomiarów.

Analiza wyników badań

Analiza zależności pomiędzy poziomem dźwięku a prędkością pociągu. W pierwszym etapie badań określano zależności pomiędzy poziomem generowanego hałasu a prędkością przejazdu pociągów. Rejestrowana prędkość wynosiła 60÷120 km/h, co umożliwiło wykonanie analizy wpływu tego parametru na emisję dźwięku. Łącznie przeprowadzono 80 pomiarów, obejmujących przejazd taboru kolejowego różnej kategorii. Aby umożliwić porównanie wyników, dane pogrupowano wg typów pociągów. W tabeli 2 zestawiono kluczowe wartości uzyskane podczas pomiarów, a na rysunku 2 przedstawiono zależność poziomu hałasu od prędkości przejazdu z uwzględnieniem podziału na poszczególne grupy taboru kolejowego.

Analiza wyników potwierdziła, że zwiększenie prędkości pociągu wiąże się ze wzrostem poziomu dźwięku. Zauważalne są jednak różnice zarówno w poziomie generowanego hałasu, jak i tempie jego wzrostu w zależności od rodzaju taboru. Wartości współczynnika determinacji R^2 , opisującego stopień dopasowania modelu regresji do danych, wykazują różnorodność pomiędzy grupami pociągów. Największe zróżnicowanie wartości poziomu hałasu oraz mniejsze współczynniki determinacji odnotowano w przypadku pociągów towarowych i wagonowych, co może wynikać z ich zróżnicowanego stanu technicznego oraz różnic w konstrukcji składu. Z kolei samobieżne pociągi pasażerskie wykazują mniejsze rozbieżności, co skutkuje większą

Table 2. Results of key parameters obtained during field measurements
Tabela 2. Wyniki kluczowych parametrów uzyskanych podczas pomiarów terenowych

Train type/ Rodzaj pociągu	Sample size/ Liczebność próby n no. of trains/ liczba pociągów	Train speed/Prędkość			Equivalent noise level/ Równoważny poziom hałasu			Adopted permissible value at 80 km/h/ Przyjęta wartość dopuszczalna przy 80 km/h L_{AeqTp_dop} [dB]
		V_{min}	V_{max}	V_{sr}	L_{Aeq_min}	L_{Aeq_max}	L_{Aeq_sr}	
New-type self-propelled passenger trains/ Samobieżne wagony pasażerskie nowego typu	32	87	121	104	80,6	84,6	83,2	80,0
Old-type self-propelled passenger trains/ Samobieżne wagony pasażerskie starego typu	9	87	124	108	85,4	87,8	87,0	80,0
Passenger wagon (hauled coaches)/ Pasażerskie wagonowe (wagony ciągnięte)	21	82	110	100	90,1	96,7	94,1	79,0
Freight trains/Towarowe	18	62	78	72	85,0	90,0	87,9	83,0

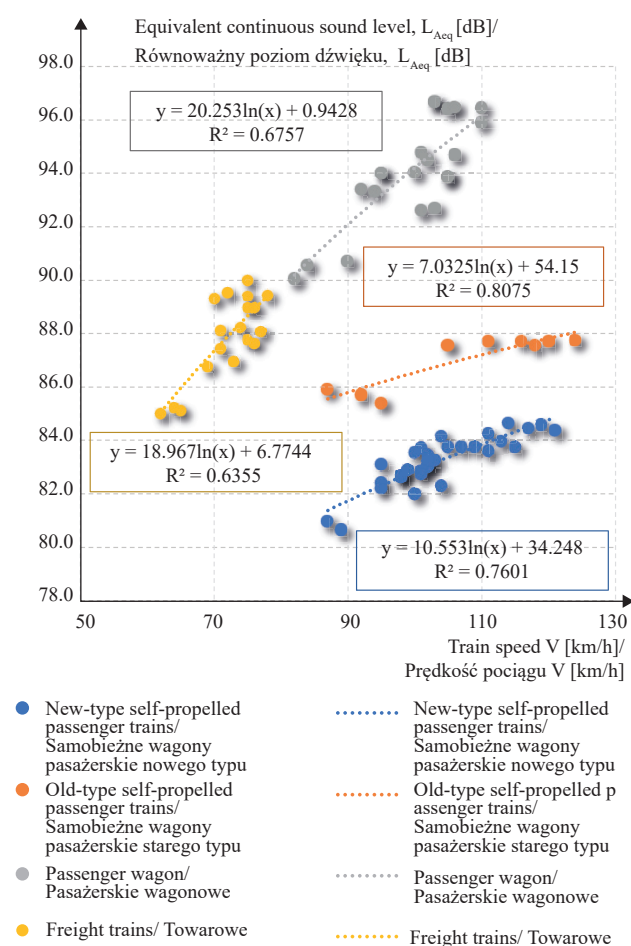


Fig. 2. Relation between equivalent sound level and train speed, taking into account the division into rail vehicle types

Rys. 2. Zależność pomiędzy równoważnym poziomem dźwięku a prędkością pociągu z uwzględnieniem podziału na rodzaj pojazdu szynowego

wartością współczynnika R^2 , wskazującą na większą jednorodność tej grupy pojazdów pod względem emisji hałasu.

Analiza poziomu hałasu przy prędkości odniesienia 80 km/h. Wartość dopuszczalnego poziomu hałasu określonego w Technicznej Specyfikacji Interoperacyjności (TSI) odnosi się do określonej prędkości. W celu umożliwienia porównania wyników poszczególnych grup z wartościami dopuszczalnymi, dokonano normalizacji poziomu hałasu do prędkości odniesienia wynoszącej 80 km/h, zgodnie z wzorem (2). Na rysunku 3 przedstawiono wyniki przeliczone na prędkość odniesienia, wraz z oznaczeniem wartości dopuszczalnej w przypadku poszczególnych grup pociągów.

Analiza wyników wykazała, że **najwyższy poziom hałasu generują wagonowe pociągi pasażerskie**, w przypadku których średnia wartość emisji dźwięku wyniosła ponad 91,0 dB. Niewiele mniejsze wartości zaobserwowano w przypadku pociągów towarowych, których średni poziom hałasu przekroczył 89,0 dB. W grupie samobieżnych pociągów pasażerskich wystąpiły istotne różnice pomiędzy pojazdami starego i nowego typu – w przypadku starszych jednostek wartość średnia wynosiła ok. 83,0 dB, natomiast nowszych modeli nie przekroczyła 80,0 dB. Wyniki te wskazują, że jedynie samobieżne pociągi pasażerskie nowego typu spełniają wymagania TSI w większości przypadków, podczas gdy starsze modele przekraczają dopuszczalne wartości o ok. 3,0 dB. Największe różnice wartości odnotowano w przypadku pociągów wagonowych pasażerskich i towarowych: wartości emisji dźwięku są większe odpowiednio o 12,0 i 6,0 dB w odniesieniu do wartości dopuszczalnych określonych w TSI.

Rozwiązania umożliwiające obniżenie generowanego poziomu dźwięku. Ze względu na przekroczenie wartości dopuszczalnych możliwe jest wdrażanie środków ograniczających emisję hałasu. Jednym z rozwiązań jest **stosowanie absorberów szynowych**, które pozwalają na redukcję hałasu średnio o 4,1 dB [13]. Skuteczność tego rozwiązania oceniono na podstawie pomiarów poziomu dźwięku w dwóch punktach: referencyjnym,

and in the rate of its increase, depending on the type of rolling stock. The values of the determination coefficient R^2 , describing the degree of fit of the regression model to the data, show diversity between train groups. The greatest variation in noise level values and lower determination coefficients were recorded in the case of freight and passenger wagon trains, which may result from their varied technical condition and differences in trainset construction. On the other hand, self-propelled passenger trains show smaller discrepancies, which results in a higher value of the R^2 coefficient, indicating greater homogeneity of this group of vehicles in terms of noise emission.

Analysis of noise level at the reference speed of 80 km/h.

The permissible noise level value specified in the Technical Specification for Interoperability (TSI) refers to a defined speed. In order to enable the comparison of the results of individual groups with the permissible values, the noise level was normalized to the reference speed of 80 km/h, in accordance with formula (2). Figure 3 presents the results converted to the reference speed, along with the indication of the permissible value in the case of individual train groups.

The analysis of the results showed that the highest noise level is generated by passenger wagon trains, in the case of which the average value of sound emission exceeded 91.0 dB. Slightly lower values were observed for freight trains, whose average noise level exceeded 89.0 dB. In the group of self-propelled passenger trains, significant differences occurred between old- and new-type vehicles, in the case of older units, the average value amounted to approx. 83.0 dB, while for newer models it did not exceed 80.0 dB. These results indicate that only new-type self-propelled passenger trains meet the TSI requirements in most cases, while older models exceed the permissible values by approx. 3.0 dB. The greatest differences in values were recorded in the case of passenger wagon and freight trains: the sound emission values are higher by 12.0 and 6.0 dB, respectively, in relation to the permissible values specified in the TSI.

Solutions enabling the reduction of the generated sound level. Due to the exceeding of permissible values, it is possible to implement measures limiting noise emissions. One of the solutions is the use of rail absorbers, which allow for a reduction of noise by an average of 4.1 dB [13]. The effectiveness of this solution was assessed on the basis of sound level measurements at two points: a reference point without protections, and a point with applied rail absorbers. The difference in noise levels generated by individual trains made it possible to determine the value of the achieved reduction. Figure 4 presents the impact of this solution on the value of sound emission. Rail absorbers would allow compliance with normative noise values in the case of self-propelled passenger trains. The effectiveness for freight and passenger wagon trains, however, turns out to be insufficient. It should be noted that this type of solution fulfills its function locally, only in the places of its application.

In order to reduce the noise level along the entire length of the railway network to the TSI requirements, it is necessary to implement more comprehensive measures. One of the most effective solutions is the modernization of braking systems by replacing traditional cast iron brake blocks with their composite equivalents, the so-called silent brakes. They protect the

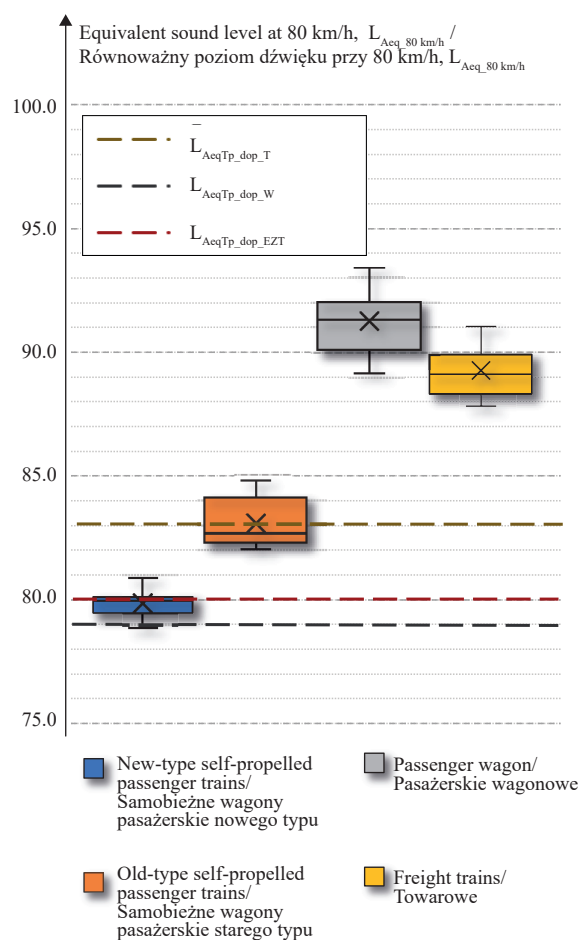


Fig. 3. Equivalent sound level during train passage, standardized to a reference speed of 80 km/h, taking into account the division into individual types of rail vehicles

Rys. 3. Równoważny poziom dźwięku w trakcie przejazdu pociągu znormalizowany do prędkości odniesienia 80 km/h, uwzględniając podział na poszczególne typy pojazdów szynowych

pozbawionym zabezpieczeń, oraz w punkcie z zastosowanymi absorberami szynowymi. Różnica poziomów hałasu generowanego przez poszczególne pociągi pozwoliła na określenie wartości uzyskanej redukcji. Na rysunku 4 przedstawiono wpływ tego rozwiązania na wartość emisji dźwięku. Absorbery szynowe pozwoliłyby na spełnienie normatywnych wartości hałasu w przypadku samobieżnych pociągów pasażerskich. Efektywność pociągów towarowych i wagonowych okazuje się niewystarczająca. Należy zauważyć, że tego typu rozwiązanie spełnia swoją funkcję lokalnie, jedynie w miejscach jego zastosowania.

W celu ograniczenia poziomu hałasu na całej długości sieci kolejowej do wymagań TSI konieczne jest wdrożenie bardziej kompleksowych działań. Jednym z najskuteczniejszych rozwiązań jest **modernizacja układów hamulcowych przez wymianę tradycyjnych żeliwnych klocków hamulcowych na ich kompozytowe odpowiedniki, tzw. hamulce ciche**. Chronią one powierzchnie toczone kół podczas hamowania, co znacznie redukuje ich chropowatość, a tym samym hałas toczenia w porównaniu z kołami hamowanymi wkładkami żeliwnymi. Z dostępnej literatury wynika, że zastosowanie tego rozwiązania pozwala na redukcję hałasu co najmniej o 12,0 dB, co

rolling surfaces of wheels during braking, which significantly reduces their roughness, and thus the rolling noise, compared to wheels braked with cast iron inserts. According to the available literature, the application of this solution allows for a noise reduction of at least 12.0 dB, which in many cases makes it possible to meet the normative values of sound emissions [14, 15]. In Poland, this solution is being systematically introduced.

An alternative, but much more costly approach, is the modernization or replacement of rolling stock with more modern units, characterized by lower noise emissions. Contemporary train designs take into account aerodynamic solutions and materials with good sound-damping properties.

Discussion and conclusions

The conducted studies concerning noise generated by trains allowed for the analysis of sound levels depending on the type of rolling stock and the passage speed. The obtained results clearly indicate an increase in noise level with increasing speed, which is consistent with common knowledge. The values obtained for different types of trains show significant differences, which result from the constructional features of the rolling stock, including the type of drive and the technical condition of the vehicles.

The highest noise levels were recorded in the case of passenger wagon trains (over 91.0 dB) and freight trains (above 89.0 dB), which exceeds the permissible values specified in the TSI. It should be emphasized, however, that the measurements were carried out under real conditions, with the participation of vehicles of varied technical condition, which may not meet the requirements set for the reference rolling stock in the TSI. Modern self-propelled passenger trains, on the other hand, were characterized by a noise level not exceeding 80.0 dB, which falls within the applicable limits.

The results of the study indicate that, in order to reduce railway noise, it is necessary to undertake a comprehensive modernization of rolling stock and apply appropriate acoustic solutions. The results showed that rail absorbers, enabling noise re-

w wielu przypadkach umożliwia spełnienie normatywnych wartości emisji dźwięku [14, 15]. W Polsce rozwiązanie to jest wprowadzane systematycznie.

Alternatywnym, lecz znacznie bardziej kosztownym podejściem, jest **modernizacja bądź wymiana taboru na nowocześniejszy**, charakteryzujący się mniejszą emisją hałasu. Współczesne konstrukcje pociągów uwzględniają rozwiązania aerodynamiczne oraz materiały o dobrych właściwościach tłumiących dźwięk.

Dyskusja i wnioski

Wykonane badania dotyczące hałasu generowanego przez pociągi pozwoliły na analizę poziomu dźwięku w zależności od rodzaju taboru oraz prędkości przejazdu. Uzyskane wyniki wskazują jednoznacznie na wzrost poziomu hałasu wraz ze wzrostem prędkości, co jest zgodne z powszechną wiedzą. Wartości uzyskane w przypadku różnych typów pociągów wy-

kazują istotne różnice, które wynikają z cech konstrukcyjnych taboru, w tym rodzaju napędu oraz stanu technicznego pojazdów.

Najwyższe poziomy hałas odnotowano w przypadku pasażerskich pociągów wagonowych (ponad 91,0 dB) oraz składów towarowych (powyżej 89,0 dB), co stanowi przekroczenie wartości dopuszczalnych określonych w TSI. Należy jednak podkreślić, że pomiary przeprowadzono w warunkach rzeczywistych, z udziałem pojazdów o zróżnicowanym stanie technicznym, które mogą nie spełniać wymagań stawianych taborowi referencyjnemu w TSI. Nowoczesne pociągi pasażerskie z napędem własnym charakteryzowały się natomiast poziomem hałasu nieprzekraczającym 80,0 dB, co mieści się w obowiązujących limitach.

Wyniki badań wskazują, że **w celu ograniczenia hałasu kolejowego konieczne jest podjęcie kompleksowej modernizacji taboru** oraz zastosowanie odpowiednich rozwiązań akustycznych. Wyniki wskazały, że absorbery szynowe umożliwiające redukcję hałasu na poziomie średnio 4,1 dB są niewystarczającym rozwiązaniem do spełnienia wymagań TSI w przypadku pociągów towarowych i wagonowych. Sku-

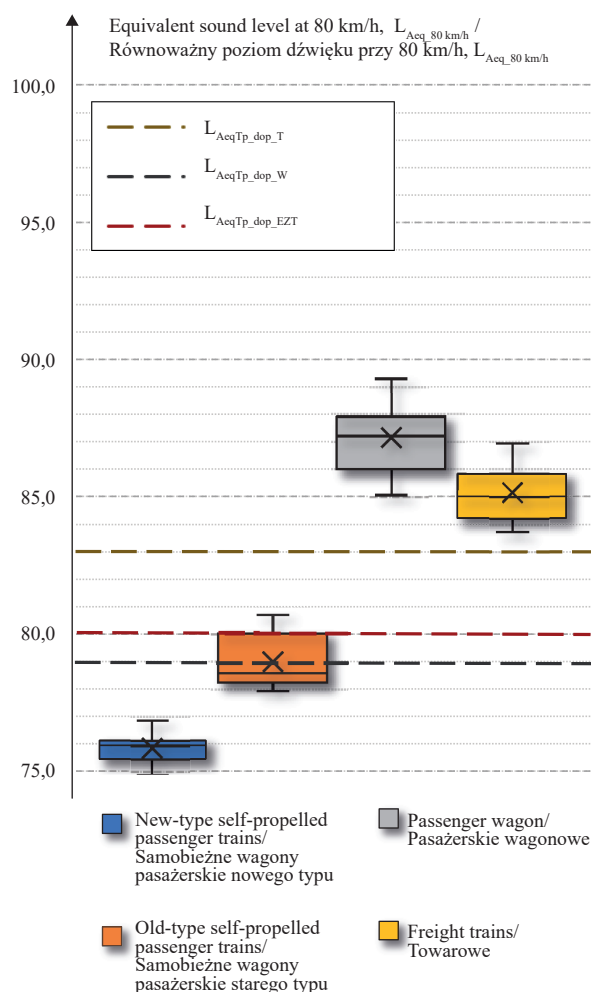


Fig. 4. Equivalent sound level during train passage, standardized to a reference speed of 80 km/h, taking into account the division into individual types of rail vehicles after the application of a sound level reducing solution in the form of rail absorbers

Rys. 4. Równoważny poziom dźwięku w trakcie przejazdu pociągu znormalizowany do prędkości odniesienia 80 km/h z uwzględnieniem podziału na poszczególne typy pojazdów szynowych po zastosowaniu rozwiązania ograniczającego poziom dźwięku w postaci absorberów szynowych

duction at an average level of 4.1 dB, are an insufficient solution to meet the TSI requirements in the case of freight and passenger wagon trains. The effectiveness of this solution is limited to the place of its application.

One of the alternative methods of reducing noise generated by freight trains is the use of composite brake blocks, which, according to the literature, can minimize the noise level by up to 12.0 dB. The implementation of this solution allows for achieving compliance with the applicable acoustic standards, while at the same time constituting an important step towards reducing the impact of railway noise on the environment. In Poland, this technology is being gradually implemented, and in 2021 more than 25% of railway vehicles were already equipped with composite brake inserts.

A comprehensive modernization of rolling stock, involving the introduction of modern units with reduced sound emission levels, seems justified. Although the complete elimination of railway noise is not possible, the use of rolling stock that meets current acoustic standards can significantly contribute to its reduction and to the improvement of the acoustic climate in the vicinity of railway lines. However, this process is long-term in nature and involves the necessity of incurring significant investment expenditures.

The results of the conducted studies indicate the need for undertaking systematic actions aimed at reducing railway noise. An extension of the analyses is planned to include the assessment of the long-term effectiveness of individual noise reduction methods.

teczność tego rozwiązania jest ograniczona do miejsca jego zastosowania.

Jednym z alternatywnych sposobów ograniczania hałasu generowanego przez pociągi towarowe jest zastosowanie kompozytowych klocków hamulcowych, które zgodnie z literaturą, mogą zminimalizować poziom hałasu nawet o 12,0 dB. Wdrożenie tego rozwiązania pozwala na osiągnięcie zgodności z obowiązującymi normami akustycznymi, stanowiąc jednocześnie ważny krok w kierunku zmniejszenia wpływu hałasu kolejowego na środowisko. W Polsce technologia ta jest stopniowo implementowana, a w 2021 r. ponad 25% pojazdów szynowych było już wyposażonych w kompozytowe wstawki hamulcowe.

Zasadna wydaje się kompleksowa modernizacja taboru, obejmująca wprowadzanie nowoczesnych jednostek o obniżonym poziomie emisji dźwięku. Całkowite wyeliminowanie hałasu kolejowego nie jest wprawdzie możliwe, ale stosowanie taboru spełniającego aktualne normy akustyczne może znacznie przyczynić się do jego ograniczenia i poprawy klimatu akustycznego w otoczeniu linii kolejowych. Proces ten ma jednak charakter długofalowy i wiąże się z koniecznością poniesienia znacznych nakładów inwestycyjnych.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na potrzebę podejmowania systematycznych działań zmierzających do redukcji hałasu kolejowego. Zaplanowano rozszerzenie analiz o ocenę długoterminowej skuteczności poszczególnych metod redukcji hałasu.

Badania zostały sfinansowane w ramach MikroGrantu w ramach projektu „Internationalization of the Doctoral School of Lublin University of Technology – IDEAS of LUT” finansowanego przez Narodową Agencję Wymiany Akademickiej z programu STER – Umiejdzynarodowienie Szkół Doktorskich dla doktorantów Szkoły Doktorskiej w Politechnice Lubelskiej.

Received: 16.06.2025
Revised: 28.07.2025
Published: 23.10.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 14.04.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 03.06.2025 r.
Opublikowano: 23.10.2025 r.

Literature

- [1] World Health Organization, *Burden of Disease from Environmental Noise*, 2011.
- [2] Wrótny M, Bohatkiewicz J. “Impact of railway noise on people based on strategic acoustic maps” *Sustainability*, vol. 12, no. 14, p. 5637, 2020; <https://doi.org/10.3390/su12145637>.
- [3] Wrótny M, Bohatkiewicz J. “Traffic noise and inhabitant health—a comparison of road and rail noise,” *Sustainability*, vol. 13, no. 13, 2021, <https://doi.org/10.3390/su13137340>.
- [4] European Environment Agency, *Environmental Noise in Europe – 2020*, no. 22/2019, 2020.
- [5] Ministerstwo Środowiska, *Obwieszczenie Ministra Środowiska z 15 października 2013 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku*, Dz. U. z 2012 r., poz. 1109, 2013.
- [6] Komisja Europejska, *Rozporządzenie Komisji (UE) Nr 1304/2014 z 26 listopada 2014 r. w sprawie technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Tabor kolejowy – hałas”, zmieniające decyzję 2008/232/WE i uchylające decyzję 2011/229/UE*, no. 1304, 2014.
- [7] Komisja Europejska, *Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) 2023/1694 z 10 sierpnia 2023 r. zmieniające rozporządzenia Komisji: (UE) nr 321/2013, nr 1299/2014, nr 1300/2014, nr 1301/2014, nr 1302/2014, nr 1304/2014 oraz rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2019/77*, 2023.

- [8] Thompson D. *Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control*. Elsevier, 2008.
- [9] Łakuś S, Ahac M. “Rail traffic noise and vibration mitigation measures in urban areas” *Tehnički Vjesnik*, vol. 19, no. 2, pp. 427–435, 2012.
- [10] Brzeziński K, Kraśkiewicz C, Oleksiewicz W, Płudowska-Zagrajek M, Wasilewski K. “Tłumiki torowe i przyszynowe jako innowacyjne rozwiązania dla ochrony ludzi i środowiska” *Zeszyty Naukowe SITK RP, Oddział w Krakowie*, vol. 1, no. 115, 2018.
- [11] *PN-EN ISO 3095:2013-12 – Pomiar hałasu emitowanego przez pojazdy szynowe*, Warszawa, 2013.
- [12] *PN-ISO 1996:2006 Akustyka – Opis, pomiary i ocena hałasu środowiskowego. Część 1: Wielkości podstawowe i procedury*, 2006.
- [13] Wrótny M, Bohatkiewicz J. “Skuteczność wybranych zabezpieczeń akustycznych stosowanych na liniach kolejowych w Polsce” *Materiały Budowlane*, 2023; 1(8): 41–44, DOI: 10.15199/33.2023.08.08.
- [14] Meunier N, Létourneaux F, D. B. Ag. and D. B. Systemtechnik, “The UIC-project Noise Impact of Composite Brake Blocks (Nicobb) – Field tests,” *Proceedings of the 2009 International Conference on Noise and Vibration*, pp. 926–928, 2009.
- [15] Oertli J. “The STAIRRS project, work package 1: A cost-effectiveness analysis of railway noise reduction on a European scale,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 267, no. 3, pp. 431–437, 2003; [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00705-3](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00705-3)