

inż. Marta Tarko¹⁾

ORCID: 0009-0002-8253-1210

dr inż. Rafał Żuchowski^{1)*}

ORCID: 0000-0002-0110-0500

Michał Filipecki¹⁾

Assessment of the impact of road surface milling on the acoustic climate in its vicinity

Ocena wpływu frezowania nawierzchni drogowej na klimat akustyczny w jej sąsiedztwie

DOI: 10.15199/33.2025.08.23

Abstract. Road noise emission is a significant environmental problem, particularly in urban areas. One of the factors influencing the level of emitted sound is the technical condition of the road pavement. This article presents the results of a field tests conducted on a main road with accelerated traffic (Polish road class "GP"), aimed at evaluating the impact of pavement milling on the noise levels generated by passing vehicles. Two sections were analysed, one with an unmilled pavement and the other with a milled pavement. It was found that the intact pavement is characterized by a lower noise level, with an average difference of 2,1 dB. Additionally, spatial noise distribution calculations showed an increased range of isophones in the case of the milled surface. The results confirm that the pavement condition plays a crucial role in shaping the acoustic environment and should be taken into account in the design, modernization, and maintenance of road infrastructure.

Keywords: sound level; environmental noise; road surface.

Streszczenie. Emisja hałasu drogowego stanowi istotny problem środowiskowy, szczególnie na terenach zurbanizowanych. Jednym z czynników wpływających na poziom generowanego dźwięku jest stan techniczny nawierzchni jezdni. W artykule przedstawiono wyniki badań terenowych przeprowadzonych na drodze klasy GP, mających na celu ocenę wpływu frezowania nawierzchni na poziom hałasu generowanego przez pojazdy. Analizie poddano dwa odcinki, jeden z nawierzchnią niefrezowaną oraz drugi z frezowaną. Stwierdzono, że nienaruszona nawierzchnia charakteryzuje się niższym poziomem hałasu, średnio o 2,1 dB. Ponadto, obliczenia rozkładu przestrzennego hałasu wykazały zwiększenie zasięgu izofon w przypadku nawierzchni frezowanej. Wyniki te potwierdzają, że stan nawierzchni odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu środowiska akustycznego i powinien być uwzględniany w procesach projektowania, modernizacji oraz utrzymania infrastruktury drogowej.

Słowa kluczowe: poziom dźwięku; hałas środowiskowy; nawierzchnia drogowa.

Among all sources of environmental noise, road traffic noise is the most widespread factor affecting humans and is considered a serious issue with potential health impacts. Long term exposure to this phenomenon may be associated with negative health effects, and the problem of noise pollution is increasing [1, 2]. Its level is in the range of 68 – 95 dB, while exceeding the value above 60 dB may have a harmful effect on the human body [3].

Studies show that the sources of road noise include, among others, the vehicle's drive system (engine and exhaust system), aerodynamic phenomena and the interaction of the tire with the road surface. The noise caused by the interaction of the tire with the road surface depends on the properties of the tire, but also on the parameters of the surface [4, 5]. Special asphalt mixtures have been developed to reduce the acoustic impact of road traffic. The most commonly used asphalt mixtures include stone mastic asphalt (SMA) with discontinuous grading, porous-structured mixtures with discontinuous grading such as SMA-LA and BBTM, open-graded mixtures (PA), as well as rubber-modified mixtures [6, 7]. Porous asphalt can reduce noise levels by 3 – 6 dB [8]. These solutions are effective in reducing acoustic emissions; however, structural properties of the pavement, such as

Spośród wszystkich źródeł hałasu środowiskowego, hałas drogowy jest najbardziej powszechnym czynnikiem oddziałującym na ludzi i może wpływać na ich zdrowie, tym bardziej że zanieczyszczenie hałasem wywołuje tendencję wzrostową [1, 2]. Jego poziom mieści się w zakresie 68 – 95 dB, podczas gdy przekroczenie wartości 60 dB może mieć szkodliwy wpływ na ludzki organizm [3].

Badania pokazują, że źródłem hałasu drogowego są m.in.: układ napędowy pojazdu (silnik oraz układ wydechowy); zjawiska aerodynamiczne oraz interakcja opony z nawierzchnią drogową. Hałas powodowany interakcją opony z nawierzchnią zależy od właściwości opony oraz parametrów nawierzchni [4, 5]. Powstały specjalne mieszanki mineralno-asfaltowe, które pozwalają zredukować akustyczne oddziaływanie ruchu drogowego. Najczęściej wykorzystywane są mieszanki: o nieciągłym uziarnieniu (SMA); o nieciągłym uziarnieniu i strukturze porowatej (SMA-LA, BBTM); o nieciągłym uziarnieniu i strukturze otwartej (PA) oraz mieszanki z dodatkiem gumy [6, 7]. Asfalt porowaty może obniżyć poziom hałasu o 3 – 6 dB [8]. Ponadto rozwiązania te mają również istotny wpływ na właściwości strukturalne nawierzchni, takie jak makrotekstura oraz ciągłość powierzchni. Nieciągłość nawierzchni jest jednym z głównych czynników generujących hałas, który może osiągać znaczne poziomy szczytowe [9, 10]. W trakcie remontów drogowych następuje proces frezowania nawierzchni

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

^{*)} Correspondence address: rafal.zuchowski@polsl.pl

macrotexture and surface continuity, also have a significant impact. Pavement discontinuities are one of the main factors generating noise, which can reach significant peak levels [9, 10]. During road maintenance, milling of the pavement is performed, which involves removing its surface layer. After this procedure, the remaining pavement exhibits unevenness.

Pavement milling is a commonly used method for renewing and maintaining transportation infrastructure. Although this process provides technical and operational benefits, its environmental impact – particularly concerning the acoustic climate – is gaining increasing attention. In the case of low-speed suburban roads, milling does not increase noise levels if the surface is properly finished [11]; however, studies indicate that driving at high speeds on milled sections results in higher noise emissions compared to unmilled sections [12].

The aim of this article is to analyse the noise levels generated by vehicles traveling on milled pavement and to assess its impact on the surrounding environment. Noise measurements were conducted at two cross-sections located at equal distances from the traffic lane. The study demonstrated that milling causes a significant increase in noise levels during the contact between the vehicle tire and the milled surface compared to a typical pavement. The article also presents an analytical approach to the problem by developing a computational model, which was used to calculate the noise distribution and visualize it graphically in the form of noise maps.

Terms and definitions

The basic terms in the field of environmental acoustics used in this article are presented below. Sound pressure level is defined as ten times the base-10 logarithm of the ratio of the squared sound pressure to the squared reference pressure, which is equal to $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (the threshold of hearing at 1000 Hz).

$$L_p = 10 \cdot \log(p^2/p_0^2) \text{ [dB]} \quad (1)$$

where:

p – sound pressure value; p_0 – reference sound pressure value $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

The A-weighting corresponds to the human hearing threshold curve.

The A-weighted sound level is the sound pressure level of a noise signal adjusted according to the frequency weighting characteristic defined by the A-weighting curve.

$$L_p = 10 \cdot \log(p_A^2/p_0^2) \text{ [dB]} \quad (2)$$

where:

p_A – sound pressure value (adjusted according to the A-weighting characteristic);

p_0 – reference sound pressure value $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

The equivalent sound level of the analysed noise is defined as ten times the base-10 logarithm of the ratio of the mean square A-weighted sound pressure to the square of the reference pressure p_0 , over a specified reference time interval T :

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2}{p_0^2} dt \right] \text{ [dB]} \quad (3)$$

where:

T – observation time $T = t_2 - t_1$,

p_A – sound pressure value (adjusted according to the A-weighting characteristic); p_0 – reference sound pressure value $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

ni, czyli usunięcie jej powierzchniowej warstwy. Po takim zabiegu nawierzchnia ma nierówności.

Frezowanie nawierzchni drogowej jest powszechnie stosowaną metodą odnawiania i utrzymania infrastruktury komunikacyjnej. Proces ten przynosi korzyści techniczne i eksploatacyjne, ale jego wpływ na środowisko, szczególnie pod względem klimatu akustycznego – budzi coraz większe zainteresowanie. W przypadku dróg podmiejskich i małej prędkości, frezowanie nie zwiększa poziomu hałasu, jeśli nawierzchnia jest dobrze wykończona [11]. Badania pokazują, że jazda z dużą prędkością na odcinkach sfrezowanych wykazuje jednak większą emisję hałasu niż na odcinkach niesfrezowanych [12].

W artykule przedstawiono analizę poziomu hałasu generowanego przez poruszające się pojazdy po nawierzchni frezowanej oraz ocenę jego oddziaływania na otoczenie. Przeprowadzono pomiary hałasu w dwóch przekrojach w jednakowej odległości od pasa ruchu. Badania wykazały, że frezowanie powoduje istotny wzrost poziomu hałasu w trakcie kontaktu opony samochodowej z nawierzchnią frezowaną w porównaniu z nawierzchnią typową. W artykule uwzględniono także analityczny sposób podejścia do problemu i przygotowano model obliczeniowy, aby na jego podstawie wykonać obliczenia rozkładu hałasu i przedstawić go graficznie w postaci map.

Terminy i definicje

Poziom ciśnienia akustycznego to dziesięć logarytmów dziesiętnych ze stosunku kwadratu ciśnienia akustycznego do kwadratu ciśnienia odniesienia, wynoszącego $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (próg słyszenia dla 1000 Hz).

$$L_p = 10 \cdot \log(p^2/p_0^2) \text{ [dB]} \quad (1)$$

gdzie:

p – wartość ciśnienia akustycznego;

p_0 – wartość ciśnienia odniesienia $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Korekcja częstotliwościowa A odpowiada charakterystyce krzywej progu słyszenia człowieka.

Poziom dźwięku A jest to poziom ciśnienia akustycznego dźwięku, skorygowanego wg charakterystyki częstotliwościowej zgodnej z krzywą korekcyjną A.

$$L_p = 10 \cdot \log(p_A^2/p_0^2) \text{ [dB]} \quad (2)$$

gdzie:

p_A – wartość ciśnienia akustycznego (skorygowanego względem charakterystyki częstotliwościowej A);

p_0 – wartość ciśnienia odniesienia $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Równoważny poziom dźwięku to wartość dziesięciu logarytmów dziesiętnych ze stosunku średniego kwadratu ciśnienia akustycznego dźwięku, skorygowanego wg charakterystyki częstotliwościowej A, do kwadratu ciśnienia odniesienia p_0 , w określonym przedziale czasu odniesienia T :

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2}{p_0^2} dt \right] \text{ [dB]} \quad (3)$$

gdzie:

T – czas obserwacji $T = t_2 - t_1$;

p_A – wartość ciśnienia akustycznego (skorygowanego względem charakterystyki częstotliwościowej A);

p_0 – wartość ciśnienia odniesienia $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

The equivalent sound power level of the examined source is defined as ten times the base-10 logarithm of the ratio of the A-weighted sound power to the reference sound power, over a specified reference time interval T. The sound power level is given by the following formula:

$$L_w = 10 \cdot \log(W/W_0) \text{ [dB]} \quad (4)$$

where:

W – acoustic power of the analysed sound source;

W_0 – reference acoustic power 10^{-12} W (corresponding to the threshold of hearing at 1000 Hz).

SMA (Stone Mastic Asphalt) – a gap-graded asphalt mixture composed of a coarse crushed aggregate skeleton bound with a mastic binder.

BA WMS – asphalt concrete with a high stiffness modulus.

Characteristics of the tested object

The analysed section of the route is part of the Drogowa Trasa Średnicowa (DTŚ), i.e., voivodeship road No. 902 on the Zabrze – Gliwice segment, at km 9+447 with a milled pavement and at km 9+427 with a standard, unmilled pavement. Both cross-sections are located on a viaduct in a curved section with a radius of $R = 450$ meters. The pavement layers in these sections are identical and consist of the following components: a wearing course of SMA (4 cm), a binder course of BA WMS (8 cm), a base course of BA WMS (20 cm), a subbase of mechanically stabilized aggregate (20 cm), a frost protection layer of mechanically stabilized crushed stone (15 cm), and another frost protection layer of stabilized crushed stone (15 cm). The total thickness of the pavement structure is 82 cm. The total width of the road, on which noise measurements were conducted, is 38 meters. It is a dual carriageway separated by a green median strip. Each carriageway consists of three 3,5-meter-wide traffic lanes, a 2,5-meter-wide emergency lane, and a 3,5-meter-wide earth shoulder. The median strip is 5 meters wide and contains safety barriers and dual-sided lighting. This is a GP-class road (main road with accelerated traffic), with a traffic category of KR5. The design speed for this section is $V_p = 60$ km/h, while the operating speed is $V_m = 80$ km/h. In the analysed cross-section, the milling process was applied to improve pavement smoothness and grip.

This process involves mechanically removing the asphalt surface using a road milling machine. In this case, a large milling machine was used, and the milling was full-width, as the entire width of the cross-section was milled. Milling machines are classified as small (used for sidewalks and hard-to-reach areas), medium, and large, which are used on national roads and highways. The main parameters of milling are milling depth, milling width, and efficiency, measured in m^2/day . The analysis site and the location of the measurement points are shown in Photo 1.

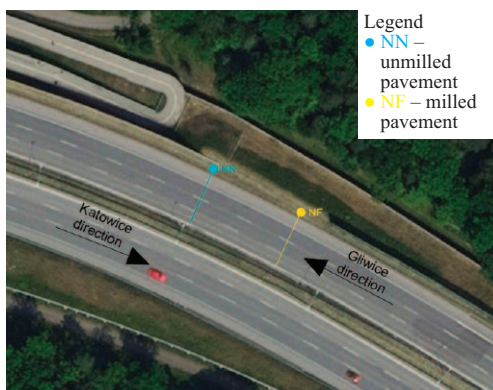


Photo 1. Fragment of the analysed road and the adopted measurement cross-sections

Fot. 1. Fragmentu analizowanej drogi i przyjętych przekrojów pomiarowych

Równoważny poziom mocy akustycznej badanego źródła, to wartość dziesięciu logarytmów dziesiętnych ze stosunku mocy akustycznej dźwięku, skorygowanego wg charakterystyki częstotliwościowej A, do ciśnienia mocy akustycznej odniesienia, w określonym przedziale czasu odniesienia T. Poziom mocy akustycznej jest to wielkość określona wzorem:

$$L_w = 10 \cdot \log(W/W_0) \text{ [dB]} \quad (4)$$

gdzie:

W – moc akustyczna badanego źródła dźwięku;

W_0 – moc odniesienia 10^{-12} W (odpowiada progowi słyszenia dla 1000 Hz).

SMA – mieszanka mineralno-asfaltowa o nieciągłym uziarnieniu, składająca się z grubego łamanego szkieletu kruszywowego, związanego zaprawą mastyksową.

BA WMS – beton asfaltowy o wysokim module sztywności.

Charakterystyka badanego obiektu

Badany odcinek trasy należy do Drogowej Trasy Średnicowej (DTŚ), czyli drogi wojewódzkiej nr 902 na odcinku Zabrze – Gliwice; w km 9+447 nawierzchni jest frezowana, a w km 9+427 standardowa niefrezowana. Oba przekroje znajdują się na wiadukcie, na odcinku krzywoliniowym o promieniu $R = 450$ m. Warstwy konstrukcyjne nie różnią się w tych przekrojach; oba składają się z kolejno następujących elementów: warstwa ścierna SMA (4 cm); warstwa wiążąca BA WMS (8 cm); podbudowa zasadnicza BA WMS (20 cm); podbudowa pomocnicza z kruszywa stabilizowanego mechanicznie (20 cm); warstwa mrozochronna z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie (15 cm); warstwa mrozochronna z kruszywa łamanego stabilizowanego (15 cm). Sumaryczna grubość konstrukcji nawierzchni to 82 cm. Całkowita szerokość drogi, na której badany był hałas, wynosi 38 m. Jest to droga dwujezdniowa rozdzielona pasem zieleni. Jezdnia składa się z trzech pasów ruchu po 3,5 m, pasa awaryjnego 2,5 m oraz pobocza gruntowego o szerokości 3,5 m. Pas zieleni ma szerokość 5 m, na którym znajdują się bariery ochronne oraz dwustronne oświetlenie. Jest to droga o kategorii ruchu KR5 klasy GP (główna ruchu przyspieszonego); prędkość projektowa drogi $V_p = 60$ km/h, a prędkość miarodajna na tym odcinku $V_m = 80$ km/h. Na badanym przekroju drogi został zastosowany proces frezowania w celu uzyskania lepszej równości oraz przyczepności. Polega on na mechanicznym usuwaniu nawierzchni asfaltowej przy użyciu frezarki drogowej. W tym przypadku została zastosowana frezarka duża i było to frezowanie pełnopowierzchniowe, gdyż frez został wykonany na całej szerokości przekroju. Frezarki mogą być małe (stosowane do pracy na chodnikach i trudno dostępnych miejscach), średnie oraz duże, które stosuje się na drogach krajowych oraz autostradach. Głównymi parametrami frezowania są głębokość i szerokość frezu oraz wydajność mierzona w $m^2/dzień$. Na fotografii 1 przedstawiono miejsce analizy i lokalizację punktów pomiarowych.

Test results

Field tests were conducted in accordance with [13] using the following equipment: two analysers equipped with preamplifiers, measurement microphones, and windshields, as well as an application to manage the measurement process. Meteorological parameters were monitored using a DAVIS weather station and vehicle speeds were measured using a handheld radar. Before and immediately after the measurements, the measurement tracks were checked with an acoustic calibrator. The location of the measurement point in the cross-section of the milled roadway is shown in Photo 1a and the location in the cross-section of the unmilled roadway is shown in Photo 1b. The results of the obtained sound levels in the third octave frequency range from 50 Hz to 5000 Hz and the value of the equivalent sound level L_{Aeq} in the selected pavement cross-sections are presented in Table 1 and in the Figure 1 and 2.

The total equivalent sound level L_{Aeq} for the unmilled pavement was 78,2 dB, while for the milled pavement was 80,3 dB. This indicates that the noise level increased by 2,1 dB after the milling process. During the study, the traffic structure was also recorded in order to determine the number of vehicles traveling on the analysed road section and to classify them by category. The traffic was divided into the following vehicle groups: motorcycles, passenger cars (including minibuses), delivery vehicles up to 3,5 tonnes, heavy goods vehicles without trailers, heavy goods vehicles with trailers (including semi-trailer trucks), and buses. The measurement results are presented in Table 2. The average vehicle speeds are shown in Table 3.

Wyniki badań

Badania terenowe przeprowadzono zgodnie z [13] z wykorzystaniem dwóch analizatorów wyposażonych w przedwzmacniacze, mikrofony pomiarowe i osłony przeciwwietrzne oraz aplikację, za pomocą której zarządzano procesem pomiarowym. Parametry meteorologiczne monitorowano za pomocą stacji pogodowej DAVIS, a prędkość pojazdów mierzono ręcznym radarem. Przed pomiarami oraz bezpośrednio po nich tory pomiarowe zostały sprawdzone kalibratorem akustycznym. Na fotografii 2a przedstawiono lokalizację punktu pomiarowego w przekroju jezdni frezowanej, a na fotografii 2b w przekroju jezdni niefrezowanej. Wyniki uzyskanych poziomów dźwięku w zakresie częstotliwości trzecjowych od 50 Hz do 5000 Hz oraz wartość równoważnego poziomu dźwięku L_{Aeq} w wytypowanych przekrojach nawierzchni przedstawiono w tabeli 1 oraz na rysunkach 1 i 2.

Sumaryczny równoważny poziom dźwięku L_{Aeq} w przypadku nawierzchni niefrezowanej wynosił 78,2 dB, natomiast nawierzchni frezowanej 80,3 dB. Oznacza to, że po zabiegu frezowania poziom hałasu zwiększył się o 2,1 dB. Podczas badań przeprowadzono również rejestrację struktury ruchu drogowego, która miała na celu określenie liczby pojazdów, poruszających się po analizowanym odcinku drogi oraz ich podział na kategorie. Ruch drogowy został sklasyfikowany z uwzględnieniem następujących grup pojazdów: motocykle; samochody osobowe (wraz z mikrobusami); samochody dostawcze do 3,5 tony; samochody ciężarowe bez przyczep; samochody ciężarowe z przyczepami (oraz ciągniki siodłowe); autobusy. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 2, a średnią prędkość pojazdów w tabeli 3.

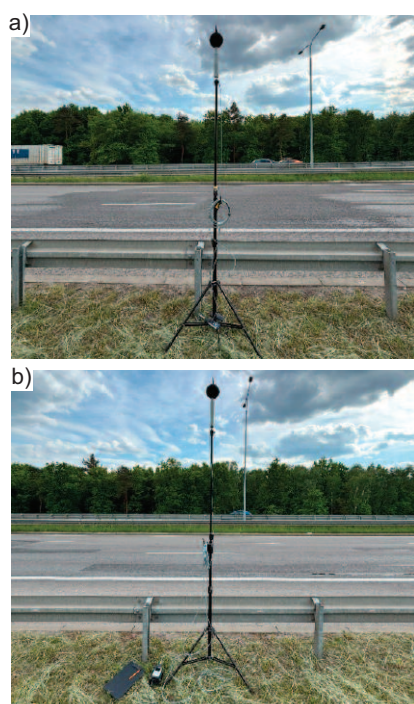


Photo 2. Location of measuring instruments in the cross-section of the: a) milled pavement; b) unmilled pavement

Fot. 2. Lokalizacja przyrządów pomiarowych w przekroju nawierzchni: a) frezowanej; b) niefrezowanej

Table 1. Measurement results of noise levels as a function of frequency

Tabela 1. Wyniki pomiaru poziomów hałasu w funkcji częstotliwości

Frequency [Hz]/ Częstotliwość [Hz]	Average sound level for the/ Wartość średnia poziomu dźwięku – nawierzchnia		Difference ΔL_A [dB]/ Różnica ΔL_A [dB]
	unmilled pavement L_{ANN} [dB]/ niefrezowana L_{ANN} [dB]	milled pavement L_{ANF} [dB]/ frezowana L_{ANF} [dB]	
50	70,3	70,3	0,0
63	70,8	71,2	0,4
80	67,8	69,2	1,4
100	67,5	70,3	2,8
125	66,8	69,0	2,2
160	65,0	68,0	3,0
200	65,8	69,6	3,8
250	65,5	69,9	4,4
315	64,7	68,5	3,8
400	65,7	68,7	3,0
500	66,6	70,3	3,7
630	69,7	72,6	2,9
800	71,3	74,3	3,0
1000	71,9	74,4	2,5
1250	70,3	71,3	1,0
1600	68,7	69,3	0,6
2000	65,6	66,3	0,7
2500	61,2	62,5	1,3
3150	57,3	59,4	2,1
4000	54,2	58,5	4,3
5000	51,3	58,2	6,9
L_{Aeq}	78,2	80,3	2,1

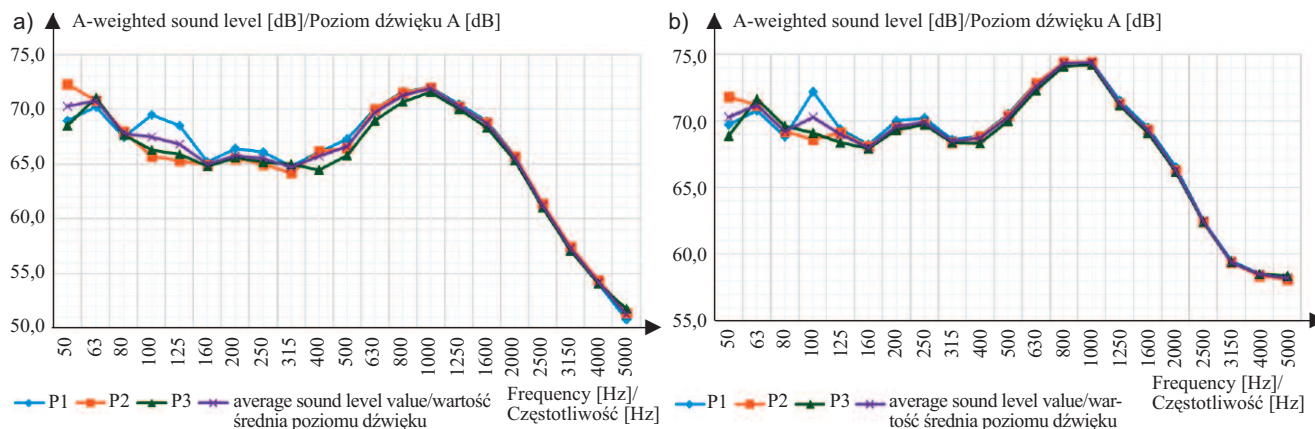


Fig. 1. A-weighted sound level: a) unmill pavement; b) milled pavement [dB]

Rys. 1. Poziom dźwięku A: a) nawierzchnia niefrezowana; b) nawierzchnia frezowana [dB]

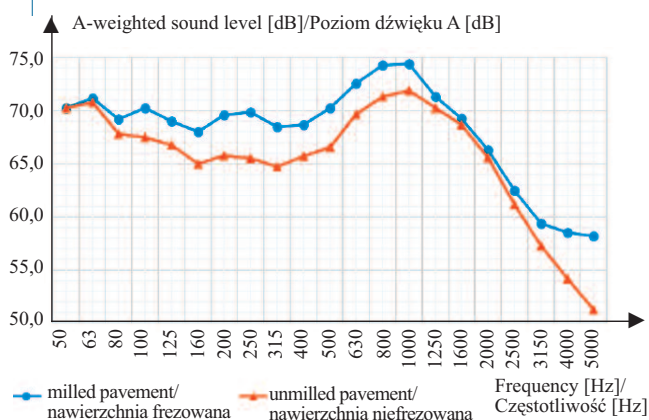


Fig. 2. Comparison of average A-weighted sound levels [dB] as a function of frequency for unmill and milled pavement

Rys. 2. Porównanie uśrednionych poziomów dźwięku A [dB] w funkcji częstotliwości w przypadku nawierzchni niefrezowanej i frezowanej

Table 2. Number of vehicles by traffic direction and vehicle type recorded during measurements

Tabela 2. Liczba pojazdów wg kierunku ruchu i kategorii pojazdu uzyskana podczas pomiarów

Vehicle type/ Rodzaj pojazdu	Daily traffic direction/ Ruch dobowy – kierunek:	
	Gliwice	Katowice
Motorcycles/Motocykle	57	143
Passenger cars, mini-buses/ Samochody osobowe, mikrobusy	24571	24286
Delivery vehicles up to 3,5 T/ Samochody dostawcze 3,5 T	1143	171
Heavy goods vehicles without trailers/ Samochody ciężarowe bez przyczep	257	1229
Heavy goods vehicles without trailers semi-trailer trucks/ Samochody ciężarowe z przyczepą; ciągniki siodłowe	1114	29
Buses/Autobusy	114	229

Table 3. Average vehicle speed in the entire traffic stream

Tabela 3. Średnia prędkość pojazdów w całym potoku ruchu

Vehicle type/ Rodzaj pojazdu	Average vehicle speed [km/h]/ Średnia prędkość pojazdów [km/h]
Light vehicles/ Pojazdy lekkie	83
Heavy vehicles/ Pojazdy ciężkie	78

Acoustic modelling of the road and its vicinity

The impact on the acoustic climate in the vicinity of the analysed road system was assessed using simulation based calculations. These were carried out with the aid of a digital terrain model obtained from the resources of the Head Office of Geodesy and Cartography (GUGiK). The developed elevation model consisted of a digital terrain surface (elevation points and edge lines), reflective surfaces (hardened), and absorbing surfaces (unpaved), as well as key surface and structural elements relevant to noise propagation, in particular: roads, existing buildings, tall vegetation, and railway embankments.

All components prepared for analysis formed a coherent surface covering the entire area under consideration. The noise calculations were conducted using the NMPB method, due to the absence of a national methodology in Poland for assessing the acoustic environment. This necessitated the use of the French national calculation method „NMPB-Routes – 96 (SETRA-CERTU-LCPC-CSTB)”, as defined in the „Arrêté du 5 mai 1995 relatif au bruit des infrastructures routières, Journal Officiel du 10 mai 1995, art. 6 and further specified in the French standard „XPS 31-133” – this approach is compliant

Modelowanie akustyczne drogi i jej sąsiedztwa

Oddziaływanie na klimat akustyczny sąsiedztwa analizowanego układu drogowego opracowano na podstawie obliczeń symulacyjnych, wykorzystując w tym celu istniejący numeryczny model terenu pozyskany z zasobów GUGiK. Opracowany model wysokościowy składał się z modelu powierzchni terenu (punkty wysokościowe i linie krawędziowe), powierzchni odbijających (utwardzone) i pochłaniających (nieutwardzone) oraz elementów powierzchniowych i kubaturowych, istotnych w przypadku propagacji hałasu: drogi; istniejące budynki; zieleni wysoka; nasyp kolejowy.

Przygotowane do analizy poszczególne składowe numerycznego modelu terenu tworzą zwartą płaszczyznę i pokrywają w całości obszar przyjęty do analizy. Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano metodę NMPB, ze względu na brak krajowej metody służącej do analizy klimatu akustycznego. Wymagało to od realizujących obliczenia skorzystania z francuskiej krajowej metody obliczeń NMPB-Routes – 96 (SETRA-CERTU-LCPC-CSTB), opisaną w „Arrêté du 5 mai 1995 relatif au bruit des infrastructures routières, Journal Officiel du 10 mai 1995, art. 6” i francuskiej normy „XPS 31-133” – zgodnej

with Annex II of Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 on the assessment and management of environmental noise [Dz.U.EU. L Nr 189, str. 12]. As input data, the method uses emission values provided in the „Guide du bruit des transports terrestres, fascicule prévision des niveaux sonores, CETUR 1980”. These emission levels take into account various traffic conditions, including free-flow travel as well as acceleration and braking phases [14]. The sound emission is calculated based on the following formula:

$$E = (L_w - 10 \cdot \log V - 50) \quad (5)$$

where: V – vehicle speed.

As defined in standard XPS 31-133, and according to the specifications in the „Guide du bruit 1980”, the sound power level L_w and sound emission E are calculated based on the sound pressure level L_p and the vehicle speed V using the following formula:

$$L_w = L_p + 25,5 \quad (6)$$

„Guide du bruit 1980” includes nomograms presenting the one-hour equivalent continuous sound level L_{Aeq} in [dB] (A), specifying separately the emission levels for light vehicles (sound emission E_{lv}) and heavy vehicles (sound emission E_{hv}) per hour (Figure 3). For both categories E is a function of vehicle speed, traffic flow, and road gradient. [14]

The A-weighted sound power level L_{AWi} of an elementary source is calculated using the following expression:

$$L_{AWi} = [(E_{VL} + 10 \cdot \log Q_{VL}) \oplus (E_{PL} + 10 \cdot \log Q_{PL}) + 20 + 10 \cdot \log(I_j) + R_{(j)}] \text{ [dB]} \quad (7)$$

where:

$\oplus$ – defines the symbol for summing sound levels;

E_{VL} – sound level specified for light vehicles;

E_{PL} – sound level specified for heavy vehicles;

Q_{VL} – hourly flow of light vehicles for a given time interval;

Q_{PL} – hourly flow of heavy vehicles for the same time interval;

I_j – length of the linear source segment representing an individual point source;

$R_{(j)}$ – road traffic noise spectrum A, based on the European standard EN 1793-3:1997.

For the purposes of the acoustic analysis, the SoundPLAN 8.2 software package by SoundPLAN LLC was used. In addition to its standard computational capabilities, this software includes a dedicated module for modelling and visualizing the distribution of the acoustic field in the form of noise maps, fully compliant with the aforementioned Directive. The version applied for the analysis performs calculations according to the French NMPB-Routes-96 method as well as the internationally recognized ISO 9613-2 standard, which

z Załącznikiem II do Dyrektywy 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady Europy z 25 czerwca 2002 r., odnoszącej się do oceny i zarządzania poziomem hałasu w środowisku [Dz.U. EU. L nr 189, str. 12]. Jako dane wejściowe metoda wykorzystuje wartości emisji z „Guide du bruit des transports terrestres, fascicule prévision des niveaux sonores, CETUR 1980”. Emisje te uwzględniają różne stany ruchu zarówno przy jeździe swobodnej, jak i w trakcie przyspieszania czy wyhamowania ruchu [14]. Emisja dźwięku obliczana jest na podstawie wzoru:

$$E = (L_w - 10 \cdot \log V - 50) \quad (5)$$

gdzie: V – prędkość pojazdu.

Poziom mocy akustycznej L_w i emisja dźwięku E użyte w normie XPS 31-133, zgodnie z wyszczególnieniami zawartymi w „Guide du bruit 1980” są obliczane w zależności od poziomu ciśnienia akustycznego L_p i prędkości pojazdu V za pomocą wzoru:

$$L_w = L_p + 25,5 \quad (6)$$

„Guide du bruit 1980” zawiera nomogramy przedstawiające wartość jednogodzinnego poziomu dźwięku L_{Aeq} [dB]; widmo hałasu drogowego A określa osobno emisję w przypadku pojazdów lekkich (emisja dźwięku E_{lv}) i pojazdów ciężkich (emisja dźwięku E_{hv}) na godzinę (rysunek 3). W obu kategoriach pojazdów, E jest funkcją prędkości, natężenia ruchu i pochylenia jezdni [14].

Poziom mocy akustycznej L_{AWi} źródła elementarnego obliczany jest na podstawie zależności:

$$L_{AWi} = [(E_{VL} + 10 \cdot \log Q_{VL}) \oplus (E_{PL} + 10 \cdot \log Q_{PL}) + 20 + 10 \cdot \log(I_j) + R_{(j)}] \text{ [dB]} \quad (7)$$

gdzie:

$\oplus$ – symbol dodawania poziomów dźwięku;

E_{VL} – poziom dźwięku określony w przypadku pojazdów lekkich;

E_{PL} – poziom dźwięku określony w przypadku pojazdów ciężkich;

Q_{VL} – godzinowy przepływ pojazdów lekkich w danym przedziale czasu;

Q_{PL} – godzinowy przepływ pojazdów ciężkich w danym przedziale czasu;

I_j – długość odcinka źródła liniowego, reprezentująca pojedyncze źródło punktowe;

$R_{(j)}$ – widmo hałasu drogowego A określone zgodnie z normą europejską EN 1793-3:1997.

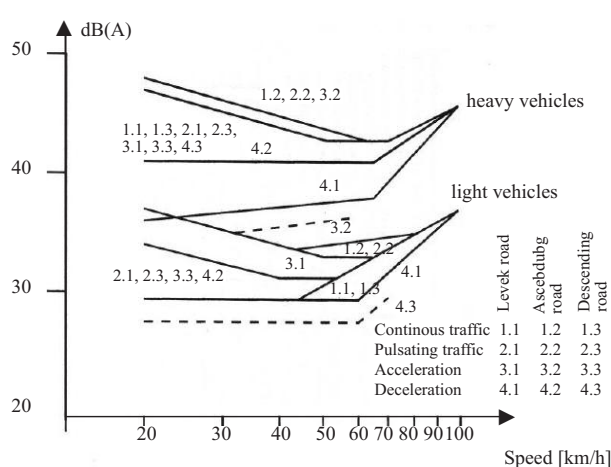


Fig. 3. Nomogram for determining the input sound power level A according to NMPB [14]

Rys. 3. Nomogram do określania wejściowego poziomu mocy akustycznej A wg NMPB [14]

Na potrzeby wykonywanych obliczeń akustycznych skorzystano z pakietu obliczeniowego SoundPlan 8.2. Oprogramowanie to, poza standardowym modelem obliczeniowym, ma moduł przystosowany do obliczeń i prezentacji rozkładu pola akustycznego w postaci map hałasu, spełniający wymagania Dyrektywy 2002/49/WE. Wykorzystana do obliczeń aktualna wersja oprogramowania umożliwia obliczenia zgodnie z metodą zalecaną przez ISO 9613-2 oraz NMPB Routes – 96 – metodą francuską, uwzględniającą wpływ warunków meteorolo-

take into account the influence of meteorological conditions on noise propagation. The algorithm used to determine the propagation paths between the source and receiver assumes a linear noise source model.

The basis for the calculations consisted of the following factors influencing the generation and propagation of noise from road traffic in the environment:

- parameters of the road system (road geometry, longitudinal slope);
- traffic volume (number of vehicles traveling on homogeneous sections of the planned and existing road network, determined based on average daily traffic forecast data);
- percentage share of heavy vehicles in the traffic stream;
- average speed of moving vehicles;
- type of ground and vegetation surrounding the road;
- existing buildings in the vicinity;
- existing noise protection measures, such as acoustic barriers.

Calculation results

Once the model was developed, calibration was performed using data collected during field measurements. The model was calibrated for two pavement conditions: unmilled pavement, resulting in a calculated sound level $L_{Aeq} = 78,2$ dB, and milled pavement, resulting in $L_{Aeq} = 80,3$ dB. These results confirm that the model was properly calibrated. After calibration, the noise distribution near the analysed road section was calculated using a regular grid with a resolution of 10 x 10 meters, at a height of 4,0 meters above ground level. The resulting noise propagation maps are presented in Figure 4a for unmilled pavement and in Figure 4b for milled pavement. To simulate the acoustic effect of pavement milling, a correction factor of **2,1 dB** was applied in the model to account for the change in surface type.

The conducted calculations confirm the values obtained through field measurements. Analysis of the presented noise maps indicates that milling of the road surface contributes to an increase in noise levels in its immediate vicinity. For the unmilled pavement, the noise range is as follows: for the 65 dB isophone – 87 meters, and for the 61 dB isophone –

gicznych na propagację hałasu. Algorytm poszukiwania tras propagacji fali akustycznej pomiędzy źródłem a odbiorcą bazuje na założeniu liniowego źródła hałasu.

Podstawę obliczeń stanowiły następujące czynniki, które mają wpływ na powstanie i rozprzestrzenianie się w terenie hałasu z eksploatacji dróg:

- parametry układu komunikacyjnego (geometria drogi, pochYLENIE niwelety);
- natężenie ruchu (liczba pojazdów poruszających się na odcinkach jednorodnych projektowanego i istniejącego układu drogowego, wyznaczona na podstawie ruchu średniodobowego z prognoz ruchowych);
- procentowy udział pojazdów ciężkich w potoku ruchu;
- średnia prędkość poruszających się pojazdów;
- rodzaj podłoża i zieleni występującej w otoczeniu drogi;
- istniejąca zabudowa;
- istniejące zabezpieczenia akustyczne, np. ekrany akustyczne.

Wyniki obliczeń

Po wykonaniu modelu przystąpiono do jego kalibracji, wykorzystując w tym celu informacje zebrane podczas przeprowadzonych pomiarów. Model skalibrowano odpowiednio do nawierzchni niefrezowanej, uzyskując obliczeniową wartość poziomu dźwięku $L_{Aeq} = 78,2$ dB oraz do nawierzchni frezowanej $L_{Aeq} = 80,3$ dB. Wynika z tego, że model został poprawnie skalibrowany. Następnie wykonano obliczenia rozkładu hałasu w sąsiedztwie analizowanej drogi, w regularnej siatce obliczeniowej o boku 10 x 10 m na wysokości 4,0 m nad terenem, otrzymując mapy zasięgu hałasu, które przedstawiono na rysunku 4a w przypadku nawierzchni niefrezowanej oraz na rysunku 4b nawierzchni poddanej procesowi frezowania. W celu uzyskania efektu frezowania nawierzchni w modelu wprowadzono poprawkę ze względu na rodzaj nawierzchni drogowej wynoszącą **2,1dB**.

Przeprowadzone obliczenia potwierdzają wartości uzyskane pomiarowo, a z analizy przedstawionych map hałasu wynika, że poddanie nawierzchni drogowej procesowi frezowania przyczynia się do wzrostu poziomu hałasu w jej bezpośrednim sąsiedztwie. Zasięg hałasu w przypadku nawierzchni

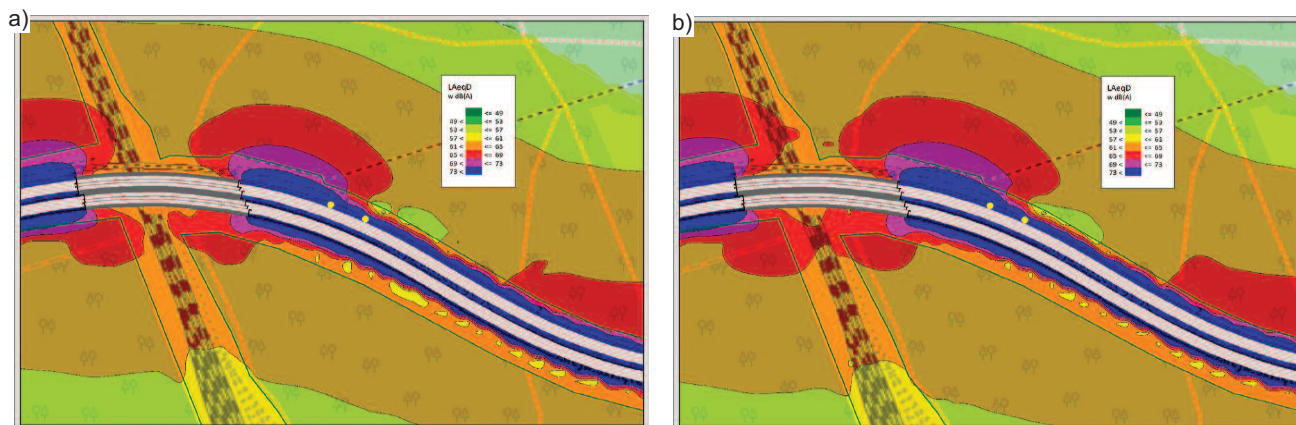


Fig. 4. Noise propagation map from DTŚ during the operation of the: a) unmilled pavement; b) milled pavement

Rys. 4. Mapa zasięgów hałasu od DTŚ podczas eksploatacji nawierzchni: a) niefrezowanej; b) po zabiegu frezowania

155 meters, after milling, the noise propagation range increases for the 65 dB isophone by 9 meters up to 96 meters, and for the 61 dB isophone by 12 meters up to 167 meters.

Summary

This article presents the results of field measurements concerning the noise levels generated by vehicles traveling on a GP-class road (main road with accelerated traffic), depending on the pavement condition. A comparison was made between a section with an unmilled pavement and one with a milled pavement. It was demonstrated that the intact (unmilled) pavement generates lower noise levels, on average by 2,1 dB. The calculated noise distribution confirmed that the milled pavement section produces higher noise levels compared to the unmilled section. The propagation range of the 65 dB isophone increased by 9 meters, and that of the 61 dB isophone by 12 meters.

The obtained results confirm the significant influence of pavement condition and surface texture on road traffic noise emissions. These findings can have a substantial impact on planning processes related to road design, modernization, and maintenance, particularly in areas exposed to excessive traffic noise.

We would like to thank Saint Gobain, Svantek sound and vibration, Alfa Bond Kohlauer.

Received: 14.04.2025

Revised: 26.05.2025

Published: 21.08.2025

ni niefrezowanej wynosi: w przypadku izofony 65 dB – 87 m, a izofony 61 dB – 155 m, natomiast po frezowaniu nawierzchni zwiększa się w przypadku izofony 65 dB o 9 m do 96 m, a izofony 61 dB o 12 m do 167 m.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów terenowych dotyczących poziomu hałasu generowanego przez pojazdy poruszające się po drodze klasy GP (droga główna ruchu przyspieszonego), w zależności od stanu powierzchni jezdni. Porównano odcinek drogi z nawierzchnią niefrezowaną oraz odcinek z nawierzchnią frezowaną. Wykazano, że nawierzchnia nienaruszona odznacza się niższym poziomem hałasu, średnio o 2,1 dB. Obliczenia rozkładu hałasu udowodniły, że odcinek drogi z nawierzchnią frezowaną generuje wyższy poziom hałasu w porównaniu z odcinkiem niefrezowanym. Zasięg hałasu w przypadku izofony 65 dB został zwiększony o 9 m, a w przypadku izofony 61 dB o 12 m.

Uzyskane wyniki potwierdzają istotny wpływ stanu technicznego i tekstury nawierzchni na emisję hałasu drogowego. Mogą one wpłynąć na proces projektowania, modernizacji i utrzymania dróg, szczególnie na obszarach narażonych na nadmierne oddziaływanie hałasu komunikacyjnego.

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

Artykuł wpłynął do redakcji: 14.04.2025 r.

Otrzymało poprawiony po recenzjach: 26.05.2025 r.

Opublikowano: 21.08.2025 r.

Literature

- [1] Babisch W et al. Exposure modifiers of the relationships of transportation noise with high blood pressure and noise annoyance. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2012. DOI: 10.1121/1.4764881.
- [2] Öhrström E, Skånberg A, Svensson H, Gidlöf-Gunnarsson A. Effects of road traffic noise and the benefit of access to quietness. *Journal of Sound and Vibration*. 2006. DOI: 10.1016/j.jsv. 2005.11.034.
- [3] Ambroszko W, Miksiewicz K. Analiza hałasu w ruchu drogowym w wybranej miejscowości i ocena jego wpływu na bezpieczeństwo ruchu. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*. 2018. DOI: 10.24136/atest. 2018.351.
- [4] Sandberg U, Ejsmont JA. Tyre/road noise: reference book, 1. ed. Kisa, Sweden: INFORMEX Ejsmont& Sandberg Handelsbolag, 2002.
- [5] Praticò FG. Roads and Loudness: a More Comprehensive Approach. *Road Materials and Pavement Design*. 2001. DOI: 10.1080/14680629.2001.9689908.
- [6] Zaleska-Dobkowska K, Kowalski KJ, Krol J, Radziszewski P, Sarnowski M. Nawierzchnie obniżające hałas drogowy – doświadczenia krajowe i kierunki rozwoju. *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura*. 2018; vol. 17, no. 4.
- [7] Vaitkus A, Čygas D, Vorobjovas V, Andriejauskas T. Traffic/Road Noise Mitigation under Modified Asphalt Pavements. *Transportation Research Procedia*. 2016. DOI: 10.1016/j. trpro.2016.05.446.

- [8] Xu G, Li K, Li C, Wang H, Leng Z, Chen X. Noise reduction performance and maintenance time of porous asphalt pavement. *Construction and Building Materials*. 2024. DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2024.138913.
- [9] Kindt P, Berckmans D, De Coninck F, Sas P, W. Desmet W. Experimental analysis of the structure-borne tyre/road noise due to road discontinuities. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009. DOI: 10.1016/j. ymssp. 2009.04.005.
- [10] Del Pizzo LG, Teti L, Moro A, Bianco F, Fredianelli L, Licitra G. Influence of texture on tyre road noise spectra in rubberized pavements. *Applied Acoustics*. 2020. DOI: 10.1016/j. apacoust. 2019.107080.
- [11] Gange M, Phillips R. Change in traffic noise levels after road pavement maintenance using diamond grinding or milling, presented at the Annual Conference of the Australian Acoustical Society 2013, *Acoustics 2013: Science, Technology and Amenity*, 2013, pp. 232–237.
- [12] Gao L, de Fortier Smit A, Prozzi JA, Buddhavarapu P, Murphy M, Song L. Milled pavement texturing to optimize skid improvements. *Construction and Building Materials*. 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2015.10.077.
- [13] Rozporządzenie Ministra Środowiska z 20 grudnia 2011 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów poziomów substancji lub energii w środowisku przez zarządzającego drogą, linią kolejową, linią tramwajową, lotniskiem, portem [Dz.U. 2011 nr 288, poz. 1697].
- [14] Lebedowska B. Hałas wokół autostrad. *Metody prognozowania. Monografia*. Politechnika Łódzka 1998.