

KAROL PIETRZAK¹⁾
ZBIGNIEW TOKARSKI²⁾
KAROL J. KOWALSKI³⁾

ASSESSMENT OF THE TRAFFIC NOISE REDUCTION WHEN USING TRAMWAY SCREENING

OCENA EFEKTYWNOŚCI OGRANICZENIA HAŁASU KOMUNIKACYJNEGO PRZEZ EKROWANIE LINII TRAMWAJOWEJ

STRESZCZENIE. Celem przeprowadzonych badań była ocena efektywności zastosowanych rozwiązań ograniczenia hałasu komunikacyjnego na przykładzie linii tramwajowej w Bydgoszczy (największej nowobudowanej linii tramwajowej w Polsce w okresie ostatnich 25 lat). Badania hałasu komunikacyjnego wykonano w trakcie realizacji inwestycji w 2014 roku, podczas montażu ekranów w 2015 roku, a także po uruchomieniu ruchu tramwajowego w 2016 roku. Wykonano pomiary natężenia i struktury rodzajowej ruchu drogowego. Wyniki pomiarów terenowych odniesiono do normowych wartości dopuszczalnych hałasu komunikacyjnego, a także wytycznych dotyczących skali uciążliwości hałasu komunikacyjnego opracowanych przez Państwowy Zakład Higieny. Dokonano sprawdzenia skuteczności zastosowanych ekranów akustycznych i ich wpływu na komfort akustyczny użytkowników otoczenia drogi, głównie mieszkańców zabudowy wielorodzinnej. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono wysoką skuteczność zastosowanych ekranów akustycznych, które spowodowały redukcję poziomu dźwięku o około 10 dB(A).

SŁOWA KLUCZOWE: ekrany akustyczne, hałas komunikacyjny, pomiary hałasu, transport.

ABSTRACT. The aim of the conducted research was to assess the effectiveness of the applied solutions for reducing traffic noise, using the tramline in Bydgoszcz (the largest new tramline in Poland in the last 25 years) as an example. The research of traffic noise was carried out during both the execution of the investment in 2014 and the assembly of noise barriers in 2015, as well as after launching tram traffic in 2016. Measurements of the intensity and type structure of road traffic were made. The results of on-site measurements were compared to the standard permissible values of traffic noise and also to guidelines about the scale of traffic noise nuisance, which were developed by the National Institute of Hygiene. The effectiveness of the used acoustic barriers and their impact on the acoustic comfort for users of the road environment, mainly residents of multi-family buildings, were verified. Based on the carried out measurements, a high efficiency of the applied acoustic barriers, which caused a reduction of sound level by approximately 10 dB(A) was proved.

KEYWORDS: noise barriers, noise measurements, traffic noise, transportation.

DOI: 10.7409/rabdim.018.008

¹⁾ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Katedra Geoinżynierii i Przedsięwzięć Budowlanych, ul. Kaliskiego 7, 85-791 Bydgoszcz; karol.pietrzak@utp.edu.pl (✉)

²⁾ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Katedra Geoinżynierii i Przedsięwzięć Budowlanych; tokarski@utp.edu.pl

³⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Dróg i Mostów, ul. L. Kaczyńskiego 16, 00-637 Warszawa; k.kowalski@il.pw.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Nawierzchnie drogowe spełniają szereg wymagań, związanych z bezpieczeństwem i komfortem jazdy, utrzymaniem i trwałością warstw konstrukcyjnych [1]. Spełnione muszą być wymagania dotyczące właściwego poziomu hałasu pochodzącego od przejeżdżających pojazdów samochodowych. Hałas i jego wpływ na otoczenie człowieka jest ograniczany m.in. przez stosowanie rozwiązań materiałowo-technologicznych [2] odpowiednich dla lokalnych warunków klimatycznych i drogowych [3]. Bardzo często uznaje się, że ekran akustyczny jest jedynym właściwym rozwiązaniem zapewniającym ochronę przed hałasem komunikacyjnym. Prowadzi to do zwiększenia kosztów inwestycji oraz ingeruje w estetykę infrastruktury miejskiej. W wielu przypadkach skuteczne ograniczenie hałasu można uzyskać stosując odpowiednie rozwiązania materiałowo-technologiczne czy rozwiązania z zakresu inżynierii ruchu [4]. Właściwości akustyczne ekranów zależą zarówno od czynników materiałowych, jak i konstrukcyjnych. Istotny wpływ na izolacyjność akustyczną ekranów ma jakość wykonania. Z analizy wyników badań paneli akustycznych prowadzonych przez Katedrę Mechaniki i Wibroakustyki Akademii Górniczo-Hutniczej wynika, że przy różnych dokładnościach wykonania próbek (precyzyjne i niedbałe lub nieuwzględniające istotnych parametrów) różnice w wartościach parametru R_w - jednolitego wskaźnika izolacyjności od dźwięków powietrznych, mogą sięgać od kilku do 10 dB(A). Ocena efektywności ekranów jest bardzo często możliwa po wykonaniu pomiarów dla zainstalowanych już paneli akustycznych i sprawdzeniu ich skuteczności in situ [5]. W procesie oceny klimatu akustycznego stosuje się skalę przedstawiającą komfort akustyczny. Klasyfikację komfortu akustycznego według Państwowego Zakładu Higieny przedstawiono w Tabl. 1, gdzie L_{Aeq} oznacza równoważny poziom dźwięku A.

Table 1. Acoustic comfort and noise hazards [6]
Tablica 1. Komfort akustyczny a zagrożenie hałasem [6]

Description of conditions / Opis warunków	Noise level / Poziom hałasu L_{Aeq} [dB]	
	daytime / pora dzienna	night-time / pora nocna
Full acoustic comfort / Pełny komfort akustyczny	< 50	< 40
Average acoustic conditions / Przeciętne warunki akustyczne	50-60	40-50
Average noise hazard / Przeciętne zagrożenie hałasem	60-70	50-60
High noise hazard / Wysokie zagrożenie hałasem	> 70	> 60

Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) zaleca, aby równoważny poziom dźwięku A na zewnątrz budynku nie przekraczał 55 dB(A) w dzień i 45 dB(A) w nocy [7]. Zgodnie

1. INTRODUCTION

Road surfaces meet a number of requirements related to both the safety and comfort of driving, and also to the maintenance and durability of structural layers [1]. The requirements regarding the appropriate noise level from passing vehicles must also be met. Noise and its impact on the human environment is limited, among others, by the use of material and technological solutions [2] that are suitable for the local climatic and road conditions [3]. It is often assumed that a noise barrier is the only appropriate solution that provides protection against traffic noise. This leads to increased investment costs and also interferes with the aesthetics of urban infrastructure. In many cases, effective noise reduction can be achieved using appropriate material and technological solutions, or other solutions from the area of traffic engineering [4]. The acoustic properties of barriers depend on both material and design factors. The quality of workmanship has a significant influence on the acoustic insulation of barriers. Analysis of the results of noise barrier tests, which were conducted by the Department of Mechanics and Vibroacoustics of the AGH University of Science and Technology, revealed that with a different accuracy of executing specimens (precise, negligible or ones that did not take into account relevant parameters), differences in the R_w parameter - a single-number indicator of airborne sound insulation - can range from several to 10 dB(A). The assessment of the efficiency of noise barriers is very often only possible after conducting measurements for already installed noise barriers and checking their effectiveness in situ [5]. In the process of assessing the acoustic climate, a scale representing acoustic comfort is used. Classification of acoustic comfort according to the National Institute of Hygiene is presented in Table 1, where L_{Aeq} is the equivalent level of sound A.

The World Health Organization (WHO) recommends that the equivalent A sound level outside a building should not exceed 55 dB(A) during the day and 45 dB(A)

z Rozporządzeniem Ministra Środowiska w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku z 2007 r. [8] dla terenów zabudowy wielorodzinnej i zamieszkania zbiorowego dopuszczalny poziom hałasu L_{AeqD} był równy 60 dB(A), a poziom L_{AeqN} był równy 50 dB(A). Zgodnie z nowym Rozporządzeniem Ministra Środowiska z 1 października 2012 r. [9] nastąpiła zmiana dopuszczalnych poziomów hałasu. W przypadku terenów zabudowy wielorodzinnej nowe, aktualne poziomy dopuszczalne hałasu wynoszą odpowiednio: L_{AeqD} równy jest 65 dB(A), natomiast L_{AeqN} równy jest 56 dB(A). W zależności od właściwości ekrany akustyczne dzielą się na: pochłaniające dźwięki, odbijające dźwięki i odbijająco-rozpraszające dźwięki [10].

Badania prowadzone przez IOŚ-PIB (Instytut Ochrony Środowiska - Państwowy Instytut Badawczy) [5] wskazują na istotne różnice wyników obliczeń i bezpośrednich pomiarów natężeń hałasu. Przyjęcie poprawnego modelu jest warunkiem wyznaczenia prawidłowych wartości parametrów geometrycznych i konstrukcyjnych ekranów akustycznych. Pomiar przeprowadzone przy ekranach akustycznych w Warszawie wykazały, że ekrany krótkie i niskie mają zdecydowanie wyższą teoretyczną niż rzeczywistą skuteczność pochłaniania dźwięku [10]. Skuteczność ekranów rozumiana jako różnica poziomu dźwięku przed instalacją ekranów i po ich instalacji mierzona in situ wykazuje, że są one niewystarczające do ochrony przed hałasem. Inaczej jest w przypadku ekranów wysokich i długich, których rzeczywista skuteczność jest podobna lub wyższa od obliczonej [11].

Pomiary parametrów akustycznych ekranowania mają na celu wyznaczenie podstawowego parametru - skuteczności. Pomiar przeprowadza się dwiema metodami: pośrednią i bezpośrednią. Wymagania dotyczące pomiarów zawarte są w normie PN-ISO 10847:2002 „Akustyka - Wyznaczanie *in situ* zewnętrznych ekranów akustycznych wszystkich rodzajów”. Zakład Akustyki Środowiska Instytutu Ochrony Środowiska prowadził badania terenowe przy drodze S-8 w Warszawie. Wyniki pomiarów wskazywały, że skuteczność ekranów z blachy perforowanej i paneli przezroczystych na wysokości normatywnej nad ekranem wyniosła od około 3,3 dB(A) do 10,1 dB(A) [12].

Niedoskonałość stosowanych obecnie modeli obliczeniowych powoduje, że nie zawsze zaprojektowany ekran akustyczny w pełni zabezpiecza teren chroniony przed nadmiernym poziomem hałasu komunikacyjnego w rozumieniu ustawy Prawo Ochrony Środowiska. Dlatego bardzo istotna jest weryfikacja przyjętych w projektowaniu parametrów ekranów akustycznych. Prowadzenie stałego monitoringu

at night [7]. According to the Regulation of the Minister of the Environment from 2007 regarding the permissible noise levels in the environment [8] for multi-family housing and collective housing, the admissible level of noise L_{AeqD} was equal to 60 dB(A) and the level of noise L_{AeqN} was equal to 50 dB(A). In accordance with the new Regulation of the Minister of the Environment from October 1, 2012 [9] there was a change in the permissible noise levels. In the case of multi-family housing areas, the new current noise levels are: L_{AeqD} equal to 65 dB(A), while L_{AeqN} is equal to 56 dB(A). Depending on their properties, noise barriers are divided into: absorbing sounds, reflecting sounds, and reflecting-distracting sounds [10].

Research conducted by IOŚ-PIB (The Institute for Environmental Protection - National Research Institute) [5] indicates significant differences in the results of calculations and the direct measurements of noise levels. The adoption of the correct model is a condition for determining the correct values of the geometrical and construction parameters of noise barriers. Measurements carried out in the vicinity of noise barriers in Warsaw showed that short and low barriers have a much higher theoretical sound absorption than their actual one [10]. The efficiency of barriers, understood as the difference in sound level before the installation of noise barriers and after their installation, which is measured in-situ, shows that they are insufficient to protect against noise. It is different in the case of high and long barriers, of which the actual effectiveness is similar or higher than to that which is calculated [11].

Measurements of the acoustic parameters of shielding are aimed at determining the basic parameter - their effectiveness. The measurements are carried out using two methods: indirect and direct. The requirements regarding measurements are contained in the PN-ISO 10847:2002 standard “Acoustics - *in-situ* determination of external noise barriers of all types”. The Department of Environmental Acoustics of The Institute of Environmental Protection conducted in-situ studies in the vicinity of the S-8 road in Warsaw. The results of measurements indicated that the effectiveness of barriers made of perforated metal sheet and transparent panels at the normative height above the barrier was equal from approx. 3.3 dB(A) to 10.1 dB(A) [12].

The imperfection of currently used computational models means that designed noise barriers do not always fully shield an area that is protected against an excessive traffic noise level regarding to the Environmental Protection Law Act. Therefore, it is very important to verify the parameters of noise barriers assumed in design. Continuous

natężenia hałasu w postaci tzw. badań porealizacyjnych ma na celu zobrazowanie stanu klimatu akustycznego wokół nowo wybudowanej trasy, przy pełnym obciążeniu komunikacyjnym. Umożliwia korektę przyjętego modelu obliczeniowego, a również doraźne uzupełnienie ekranów w miejscach, gdzie jest to niezbędne i możliwe technicznie. Wyniki badań w przeprowadzonych przez IOŚ-PIB pomiarach terenowych przy obwodnicy Sochaczewa [13], wskazują, że ekrany akustyczne, zainstalowane wzdłuż obwodnicy, nie spełniają założonych w projekcie warunków ochrony zabudowy mieszkaniowej zlokalizowanej wzdłuż obwodnicy. Zalecono wykonanie dodatkowych zabezpieczeń przeciwhałasowych w postaci uzupełnienia istniejących barier dźwiękochłonnych. Zaproponowane rozwiązania spowodowały poprawę klimatu akustycznego oraz warunków bytowych ludzi mieszkających wzdłuż obwodnicy Sochaczewa.

2. CEL I ZAKRES ARTYKUŁU

Celem artykułu jest ocena efektywności zastosowanych rozwiązań technicznych ograniczających hałas komunikacyjny na przykładzie linii tramwajowej w Bydgoszczy. Pomiarów wykonano w sierpniu 2014 roku, w październiku 2015 roku w trakcie trwania budowy, w lutym 2016 roku po uruchomieniu ruchu tramwajów [14, 15], a także w czerwcu 2016 roku. Lokalizacja punktu badawczego znajdowała się w pobliżu ekranów akustycznych, a celem badań było sprawdzenie skuteczności pochłaniania dźwięku przez bariery dźwiękochłonne. W artykule zawarto informacje dotyczące budowy nowej linii tramwajowej, opisu przeprowadzonych pomiarów terenowych, przedstawiono wyniki pomiarów i ich analizę.

3. BUDOWA NOWEJ LINII TRAMWAJOWEJ W BYDGOSZCZY

W listopadzie 2013 roku rozpoczęła się największa w Polsce po 1989 roku budowa 10-kilometrowego torowiska tramwajowego w Bydgoszczy. Inwestycja została zgłoszona do odbioru w listopadzie 2015 roku, a w grudniu inwestor odebrał pozwolenie na użytkowanie. Inwestycja budowy linii tramwajowej do Fordonu w latach 2013-2015 spowodowała istotne zmiany w infrastrukturze miejskiej. Obok torowiska wykonano odcinki nowych ulic, sygnalizację świetlną, zmodernizowano istniejącą sieć drogową, a także wybudowano ekrany akustyczne chroniące mieszkańców przed hałasem drogowym. Przy ul. Akademickiej w Bydgoszczy powstały bariery dźwiękochłonne w pobliżu zabudowy wielorodzinnej.

monitoring of noise intensity in the form of so-called post-implementation research aims to illustrate the state of the acoustic climate around a newly built route with a full traffic load. It enables correction of the adopted calculation model, as well as the supplementation of noise barriers in places where it is necessary and technically possible. The results of in-situ investigations carried out by the IOŚ-PIB in the vicinity of the Sochaczew beltway [13] indicated that noise barriers installed along the beltway do not meet the conditions for the protection of housing located along the beltway. Additional noise protection in the form of supplementing existing noise barriers was recommended. The proposed solutions improved the acoustic climate and living conditions of people living along the Sochaczew beltway.

2. AIM AND SCOPE OF THE PAPER

The aim of the article is to assess the effectiveness of the technical solutions used for reducing traffic tramway noise. The measurements were conducted in August 2014 and October 2015 during the construction phase, and also in February and June 2016 after tram traffic started [14, 15]. The research point was located in the vicinity of noise barriers, and the aim of the research was to check the effectiveness of sound absorption by sound-absorbing barriers. The article contains information on the construction of a new tramway line, a description of the carried out field measurements, the results of measurements and their analysis.

3. CONSTRUCTION OF A NEW TRAMWAY IN BYDGOSZCZ

The construction of a 10-kilometer tram track in Bydgoszcz, which is the largest in Poland after 1989, began in November 2013. The investment was submitted for acceptance in November 2015, and in December the investor received the operation permit. The investment of the construction of the tramway to Fordon in 2013-2015 caused significant changes in the urban infrastructure. In addition to the track, sections of new streets and traffic lights were also constructed, the existing road network was modernized, and noise barriers were built to protect residents from road noise. Sound absorbing barriers were created in the vicinity of multi-family buildings on Akademicka Street in Bydgoszcz.

The most important elements of acoustic protection for residents against traffic noise are built-in noise barriers. The barriers of 390 m long were made in accordance with

Najważniejszym elementem ochrony akustycznej mieszkańców przed hałasem drogowym są wbudowane ekrany akustyczne. Ekrany o długości 390 m, wykonano zgodnie z wnioskami wynikającymi z badań IOŚ-PIB [7], w górnej części są pochylone w stronę jezdni. Ekrany postawiono wzdłuż istniejącej zabudowy oraz poza nią, zwiększając tym samym pole cienia akustycznego. Zgodnie z wytycznymi wynikającymi z konsultacji społecznych zaprojektowano przezroczyste, odbijające ekrany akustyczne o wysokości 6 m, złożone z części pionowej o wysokości 4,5 m i górnej o wysokości 1,5 m odgiętej w kierunku drogi. Długość segmentu ekranu wynosi 4 m. Rys. 1 przedstawia widok modelu 3D segmentu zastosowanego ekranu akustycznego.

Uruchomienie ruchu tramwajowego zaplanowane na styczeń 2016 roku poprzedzono konsultacjami społecznymi. Rys. 2 przedstawia lokalizację inwestycji, natomiast Rys. 3 jej widok po oddaniu linii tramwajowej do użytkowania.



Fig. 2. View of the investment location (photo by K. Pietrzak)
Rys. 2. Widok lokalizacji inwestycji (fot. K. Pietrzak)



Fig. 3. Noise barriers along the tramway after completion of the investment (photo by K. Pietrzak)
Rys. 3. Ekrany akustyczne wzdłuż linii tramwajowej po zakończonej inwestycji (fot. K. Pietrzak)

Nową linię obsługują między innymi pojazdy Swing. Nowoczesny tabor szynowy pozwolił na redukcję emisji hałasu. W ramach inwestycji przewidziano regulację ruchu

the conclusions resulting from IOŚ-PIB research [7], and are therefore in their upper part inclined towards the roadway. The barriers were built along the existing buildings and beyond, thus increasing the area of acoustic shadow. According to guidelines resulting from public consultation, transparent sound reflective barriers with a height of 6 m were designed, and consisted of a vertical part with a height of 4.5 m and a top part with a height of 1.5 m that was inclined towards the road. The length of the noise barrier segment is 4 m. Fig. 1 shows the view of the 3D model of the applied segment of the noise barrier.

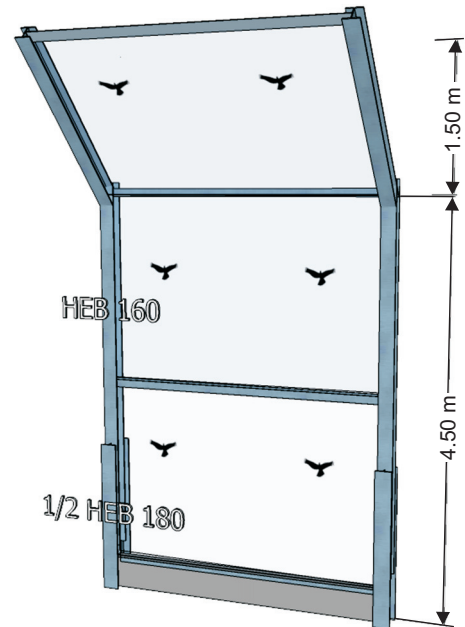


Fig. 1. 3D visualization of the applied noise barriers (own elaboration)

Rys. 1. Wizualizacja 3D zastosowanych ekranów akustycznych (opracowanie własne)

The launch of tram traffic, which was planned for January 2016, was preceded by public consultations. Fig. 2 shows the location of the investment, while Fig. 3 presents its view after the tramway was commissioned for use.

The new tramway is used, among others, by Swing vehicles. The use of modern rolling stock allowed noise emissions to be reduced. As part of the investment, traffic regulation was predicted with the use of Intelligent Transport Systems (ITS), which enabled the introduction of a “green wave”, i.e. the passage of trams on a green light throughout the entire length of the route. The ITS system was calibrated for the first few months. To date, systems to trigger the change of signalling phases due to tram traffic have been introduced at most intersections. The construction of noise barriers in places most exposed to

z wykorzystaniem Inteligentnych Systemów Transportowych (ITS), co umożliwiło wprowadzenie „zielonej fali” tj. przejazd tramwajów na zielonym świetle przez całą długość trasy. Przez kilka pierwszych miesięcy trwała kalibracja systemu ITS. Aktualnie na większości skrzyżowań zostały wprowadzone systemy wzbudzania zmiany faz sygnalizacji ze względu na ruch tramwajowy. Budowa ekranów akustycznych w miejscach najbardziej ekspozycyjnych na hałas drogowy oraz zastosowanie współczesnych środków przewozowych i nowoczesnych rozwiązań z inżynierii ruchu, umożliwiło znaczną redukcję negatywnych skutków oddziaływania ruchu drogowego na mieszkańców. Istotną zmianą w organizacji ruchu było zlikwidowanie transportu autobusowego na badanej trasie, co miało duży wpływ na obniżenie poziomu hałasu.

4. PRZYGOTOWANIE I PRZEPROWADZENIE POMIARÓW TERENOWYCH

4.1. CELE POMIARÓW TERENOWYCH

W celu sprawdzenia skuteczności zastosowanych rozwiązań ograniczających hałas komunikacyjny przeprowadzono pomiary terenowe. Wykonano pomiary hałasu ekwiwalentnego bez ekranu akustycznego oraz w tym samym miejscu po wbudowaniu ekranu akustycznego. Pomiary próbne przeprowadzono w roku 2014 w miejscu budowy linii tramwajowej przy ulicy Akademickiej w Bydgoszczy. W trakcie trwania realizacji inwestycji drogowej, w 2015 roku przeprowadzono następne pomiary w tej samej lokalizacji. Zastosowano doskonalszą aparaturę pomiarową umożliwiającą pomiar na wysokości 4 m. Pomiary te stanowiły bazę do analiz hałasu po uruchomieniu czterech nowych linii tramwajowych. Przy pomiarach akustycznych bardzo ważne jest usytuowanie stanowisk pomiarowych. W lutym 2016 roku, w miesiąc po uruchomieniu linii tramwajowej, przeprowadzono pomiary hałasu oraz pomiary natężenia i struktury rodzajowej pojazdów. W czerwcu 2016 roku kontynuowano pomiary w celu sprawdzenia zmian w poziomie hałasu na skutek wzrostu natężenia ruchu drogowego. Jako istotne należy zaznaczyć, że ruch drogowy odbywa się równoległe do torowiska.

4.2. WARUNKI POMIARU HAŁASU KOMUNIKACYJNEGO

Celem badań terenowych było wykonanie pomiarów poziomu hałasu komunikacyjnego, natężenia ruchu drogowego oraz warunków atmosferycznych. Badania hałasu obejmowały pomiar równoważnego poziomu dźwięku A (funkcja L_{Aeq}). Widoczność na stanowiskach pomiarowych była dobra. Pomiar wykonywano w porze dziennej.

traffic noise, and also the use of modern means of transport and modern solutions in traffic engineering, has enabled a significant reduction of the negative effects of traffic on the residents. An important change in the organization of traffic was the elimination of bus transport on the investigated route, which had a major impact on the reduction of the noise level.

4. FIELD MEASUREMENTS

4.1. AIMS OF FIELD MEASUREMENTS

In order to check the effectiveness of the applied solutions for reducing traffic noise, in-situ measurements were carried out. Measurements of equivalent noise were made in the place without a noise barrier, and then again in the same place after the noise barrier was installed. The test measurements were carried out in 2014 at the construction site of the tramway on Akademicka Street in Bydgoszcz. During the implementation of the road investment in 2015, further measurements were carried out in the same location. The better measuring equipment that was used enabled measurements at a height of 4 m to be conducted. These measurements were the basis for noise analysis after the launch of four new tramways. The location of measuring stations is very important in acoustic measurements. In February 2016, a month after the launch of the new tramway, noise measurements and measurements of the intensity and type structure of vehicles were carried out. In June 2016, measurements were continued in order to check changes in the noise levels due to increased traffic. An important thing that should be noted is that road traffic takes place parallel to the tram track.

4.2. MEASURING CONDITIONS FOR TRAFFIC NOISE

The purpose of the in-situ research was to conduct measurements of the level of traffic noise, traffic intensity and also atmospheric conditions. Noise tests included the measuring of the equivalent sound level A (L_{Aeq} function). Visibility on the measuring stations was good and the measurement was performed during the daytime.

To assess the impact of road traffic intensity on traffic noise, vehicle categories were adopted in accordance with PN-EN ISO 11819-1:2004 standard [13]. At the same time as the conducted measurements of traffic and sound intensity, the temperature of the road surface and its surroundings, wind speed, air humidity and atmospheric pressure were also measured.

Do oceny wpływu natężenia ruchu drogowego na hałas komunikacyjny przyjęto kategorie pojazdów zgodnie z normą PN-EN ISO 11819-1:2004 [13]. Równocześnie z prowadzonymi pomiarami natężenia ruchu i dźwięku rejestrowano temperaturę nawierzchni drogowej i otoczenia, prędkość wiatru, wilgotność powietrza oraz ciśnienie atmosferyczne.

4.3. LOKALIZACJA PUNKTÓW POMIAROWYCH

W celu identyfikacji zagrożenia hałasem drogowym oraz sprawdzenia skuteczności pochłaniania dźwięku przez ekran akustyczny wykonano pomiary w pięciu punktach pomiarowych. Punkty pomiarowe zlokalizowane były przy zakręcie toru i charakteryzowały się największym wpływem prędkości pojazdów na poziom dźwięku. Punkt pomiarowy A zlokalizowany był 10 m od krawędzi drogi w miejscu ekranu akustycznego na wysokości 4 m. Punkt B jako referencyjny umieszczony był w odległości 20 m od krawędzi jezdni na wysokości 4 m. Punkt C umieszczony był 7,5 m od osi jezdni w miejscu, gdzie nie było ekranu akustycznego na wysokości 1,2 m, a punkt D w tej samej odległości 7,5 m oraz wysokości 1,2 m, w miejscu ustawienia ekranu akustycznego. Punkt E znajdował się 10 m od krawędzi drogi w miejscu, gdzie nie było ekranu akustycznego, w odległości około 150 m od punktu A. Zestawienie czasu wykonania i lokalizacji pomiarów przedstawiono w Tabl. 2. Widok lokalizacji wszystkich punktów pomiarowych przedstawiono na Rys. 4. Na Rys. 5 pokazano widok miejsca pomiarów w roku 2014 przed budową linii tramwajowej.

4.3. LOCATION OF MEASURING POINTS

In order to identify the hazard of road noise and to check the effectiveness of sound absorption by the noise barrier, measurements were taken at five measuring points. The measuring points were located on the bend of the track and were characterized with the highest impact of vehicle speed on the noise level. Measuring point A was located 10 m from the edge of the road in the location of the noise barrier at a height of 4 m. Point B, as a reference point, was placed at a distance of 20 m from the edge of the road at a height of 4 m. Point C was placed 7.5 m from the road axis at a height of 1.2 m in a place where there were no noise barriers, and point D at the same distance of 7.5 m and a height of 1.2 m but in the place of the location of noise barriers. Point E was located 10 m from the edge of the road in a place where there were no noise barriers and 150 m away from point A. A summary of execution times and the location of measuring points are presented in Table 2. The view of the location of all measuring points is shown in Fig. 4. Fig. 5 shows the view of the place of measurements in 2014 before the construction of the tramway.

In 2015 and 2016, measurements were carried out at four measuring points - behind a noise barrier and in a place where there were no noise barriers. Fig. 6 shows the view of measuring points during tests for points A and B.

Table 2. Summary of measuring points
Tablica 2. Zestawienie punktów pomiarowych

Date of measurements Data pomiarów	Measuring point designation Oznaczenie punktu	Distance [m] Odległość	Height [m] Wysokość	Noise barrier Ekran akustyczny
October 2015, February, June 2016 październik 2015, luty, czerwiec 2016	A	10 m from the edge of the road 10 m od krawędzi jezdni	4	yes / tak
October 2015, February, June 2016 październik 2015, luty, czerwiec 2016	B	20 m from the edge of the road 20 m od krawędzi jezdni	4	yes / tak
August 2014, October 2015, February, June 2016 sierpień 2014, październik 2015 luty, czerwiec 2016	C	7.5 m from the axis of the road 7.5 m od osi jezdni	1.2	no / nie
October 2015, February, June 2016 październik 2015, luty, czerwiec 2016	D	7.5 m from the axis of the road 7.5 m od osi jezdni	1.2	yes / tak
October 2015, February, June 2016 październik 2015, luty, czerwiec 2016	E	10 m from the edge of the road 10 m od krawędzi jezdni	4	no / nie



Fig. 4. Location of measuring points (photo by K. Pietrzak)
Rys. 4. Lokalizacja stanowisk pomiarowych (fot. K. Pietrzak)

W roku 2015 i 2016 prowadzono pomiary w czterech punktach pomiarowych, za ekranem akustycznym oraz w miejscu, gdzie nie występowały ekrany akustyczne. Widok stanowisk pomiarowych w trakcie badań dla punktów A i B przedstawiono na Rys. 6.

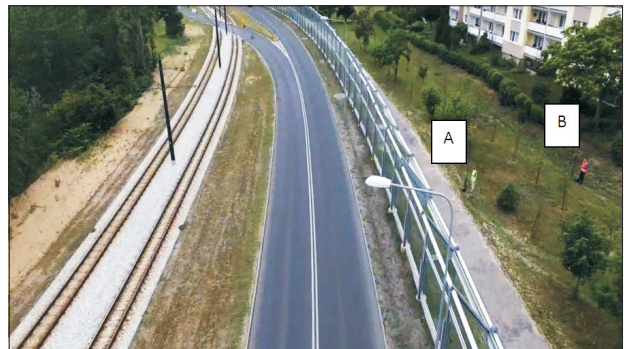
Fig. 6. View of a measurement points in 2016
(photo by K. Pietrzak)

Rys. 6. Widok punktów pomiarowych w roku 2016
(fot. K. Pietrzak)



Fig. 5. View of a measurement point in 2014
(photo by K. Pietrzak)

Rys. 5. Widok stanowiska pomiarowego w 2014 roku
(fot. K. Pietrzak)



5.1. POMIARY HAŁASU KOMUNIKACYJNEGO

5. WYNIKI POMIARÓW TERENOWYCH

Wyniki pomiarów hałasu komunikacyjnego zestawiono w Tabl. 3.

Table 3. The results of traffic noise measurements
Tabl. 3. Wyniki pomiarów hałasu komunikacyjnego

Measuring point Punkt pomiarowy	Date of measurements Data pomiaru	Time of measurements Godzina pomiaru	L_{max} [dB(A)]	L_{min} [dB(A)]	L_{eq} [dB(A)]
C	28.10.2015	14:20	73.0	44.2	60.8
C	28.10.2015	14:40	88.0	44.0	63.3
A	30.10.2015	12:05	69.0	42.9	54.8
A	30.10.2015	12:10	67.6	43.7	55.2
B	30.10.2015	12:05	70.0	43.1	53.7
B	30.10.2015	12:10	60.2	44.3	53.5
C	30.10.2015	12:45	77.3	47.3	63.9
C	30.10.2015	12:50	76.5	45.3	63.7
D	30.10.2015	13:00	69.8	45.0	52.8
D	30.10.2015	13:05	64.9	48.3	55.0

5. FIELD MEASUREMENT RESULTS

5.1. MEASUREMENTS OF THE TRAFFIC NOISE

The measurement results of traffic noise are summarized in Table 3.

Równoległe do pomiarów hałasu prowadzono badania warunków atmosferycznych wpływających na rozchodzenie fali dźwiękowych przez ośrodek jakim jest powietrze. W 2014 roku temperatura powietrza wynosiła około 11°C, temperatura nawierzchni drogowej około 9°C, wilgotność 71%, natomiast siła wiatru wynosiła 1,3-1,7 m/s. W czasie pozostałych pomiarów warunki atmosferyczne były zbliżone.

5.2. POMIARY NATĘŻENIA RUCHU DROGOWEGO

Wykonano pomiar natężenia ruchu drogowego przy pomocy kamery video. Wyniki, które odczytano w warunkach laboratoryjnych, przedstawiono w Tabl. 4, zawierającej zestawienie liczebności środków transportowych. Dane zestawiono w kategoriach: 1 – samochody osobowe i samochody dostawcze, 2a – samochody ciężarowe 2- i 3-osiowe oraz autobusy, 2b – samochody ciężarowe wieloosiowe, z naczepami przyczepami oraz motocykle. Środki transportu osiągały prędkość 50-65 km/h.

Table 4. Results of road traffic intensity divided into noise categories
Tablica 4. Wyniki natężenia ruchu drogowego z podziałem na kategorie hałasu

Time of measurements / Godzina pomiaru	Category / Kategoria		
	1	2a	2b
	Cardinality in categories / Liczebność w kategorii		
12:05 - 12:10	45	1	0
12:10 - 12:15	38	3	2

6. ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW

Przeprowadzone pomiary nie mogły stanowić podstawy do określenia przekroczeń wartości dopuszczalnych ze względu na zbyt krótki czas trwania pomiarów. Przewidziano bowiem pomiar ciągły w dzień w czasie 16. godzin mogący stanowić pomiar kontrolny. Dopuszczalny poziom hałasu w ciągu dnia dla wybranej lokalizacji pomiarowej wynosił 65 dB(A) [9]. Najwyższy pojedynczy wynik w interwale 5-minutowym osiągnął 63,9 dB(A). Oznacza to, że dopuszczalny poziom hałasu nie został przekroczony w miejscu bez stosowania ekranu akustycznego. Należy natomiast zaznaczyć, że w przypadku odniesienia do poprzednich norm z 2007 roku, poziom ten byłby przekroczony.

Na podstawie pomiarów terenowych zaobserwowano, że pomiar bez ekranu i za ekranem akustycznym wykazywał różnicę około 10 dB(A). Poprzez zastosowanie ekranów akustycznych obniżono znacząco emisję hałasu do środowiska po stronie zabudowy wielorodzinnej. Najwyższy zarejestrowany poziom hałasu w interwałach 5-minutowych

Together with the noise measurements, atmospheric conditions, which influence the propagation of sound waves through the air medium, were also investigated. In 2014, the air temperature was about 11°C, the temperature of the road surface was circa 9°C, humidity was equal to 71%, and the wind strength amounted to 1.3-1.7 m/s. During the remaining measurements, the atmospheric conditions were similar.

5.2. MEASUREMENTS OF ROAD TRAFFIC INTENSITY

The traffic intensity was measured using a video camera. The results, which were read in laboratory conditions, are presented in Table 4 containing a summary of the number of means of transport. The data was presented in the following categories: 1 - passenger cars and delivery vans, 2a - two-axle and three-axle trucks and buses, 2b - motorcycles and multi-axle trucks with semi-trailers and trailers. All vehicles reached the speed of 50-65 km/h.

6. RESULT ANALYSES

The carried out measurements could not be the basis for determining the exceeding of limit values due to the fact that the duration of measurements was too short. It was anticipated that the continuous measurement during the day, which took place over 16 hours, may be treated as a control measurement. The permitted daytime noise level for a selected measuring location was 65 dB(A) [9]. The highest single result in a 5-minute interval was 63.9 dB(A). This means that the permissible noise level was not exceeded in the place without noise barriers. It should be noted, however, that in the case of reference to previous standards from 2007, this level would be exceeded.

On the basis of field measurements, it was observed that the measurements taken both in the place without a noise barrier, and also behind it, show a difference of approximately 10 dB(A). Due to the use of noise barriers, the noise emission to the environment on the side of multi-family buildings was significantly reduced. The highest recorded

wynosił 55,6 dB(A). Oznacza to, że zastosowane rozwiązanie skutecznie wyeliminowało problem szkodliwego hałasu w danej lokalizacji. Zaobserwowano również, że najwyższy hałas chwilowy $L_{A \max}$ w miejscu zastosowania ekranu akustycznego wynosił 69,8 dB(A), natomiast bez stosowania ekranu 77,3 dB(A).

W związku z wytycznymi WHO [7] nie stwierdzono przekroczeń poziomów dopuszczalnych, natomiast aktualnie poziom komfortu akustycznego w bezpośrednim otoczeniu drogi określa się jako przeciętne warunki akustyczne. Na podstawie pomiarów terenowych można stwierdzić, że ekrany spełniają wymogi ochrony środowiska zgodnie ze zrównoważonym rozwojem, który zakłada ochronę również przyszłych użytkowników otoczenia inwestycji drogowej i są w danej lokalizacji potrzebne. Dzięki ich zastosowaniu ryzyko przekroczenia hałasu komunikacyjnego w długim horyzoncie czasowym zostało wyeliminowane. Znacząco zwiększył się również komfort akustyczny w otoczeniu drogi. Na Rys. 7 przedstawiono zależność hałasu od natężenia i struktury ruchu drogowego w punkcie A w dniu 30.10.2015. Na rysunku można zaobserwować, że największy wpływ na poziom hałasu komunikacyjnego mają pojazdy kategorii 2a oraz 2b. Najwyższy poziom hałasu sięgający 55,6 dB(A) zaobserwowano w godzinach 12:10-12:15. Można zauważyć, że w tym czasie występuje największy ruch pojazdów ciężkich natomiast mniejszy ruch pojazdów osobowych. Zależność ta jest szczególnie istotna z punktu widzenia zastosowanych rozwiązań komunikacyjnych, czyli uruchomienia 4 linii tramwajowych. Na Rys. 8 przedstawiono natomiast zestawienie wyników dwóch serii pomiarów w punkcie C bez ekranu akustycznego i D za ekranem akustycznym uzyskanych w roku 2015.

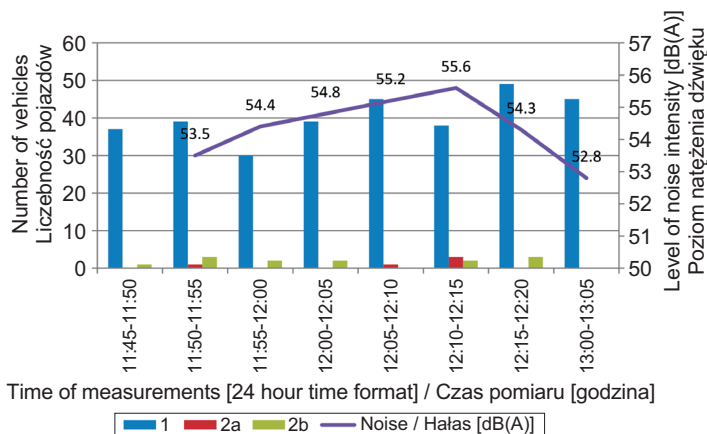


Fig. 7. The relationship between noise and road traffic intensity (1, 2a, 2b - category of transport means)

Rys. 7. Zależność hałasu od natężenia ruchu drogowego (1, 2a, 2b - kategorie środków transportowych)

noise level in 5-minute intervals was equal to 55.6 dB(A). This means that the applied solution has effectively eliminated the problem of harmful noise in a given location. It was also observed that the maximum sound level $L_{A \max}$ in the place of the noise barrier was equal to 69.8 dB(A), while without the noise barrier it was equal to 77.3 dB(A).

With regards to the WHO guidelines [7], admissible noise levels were not exceeded, while the level of acoustic comfort in the close vicinity of the road is currently defined as the average acoustic conditions. On the basis of field measurements, it can be stated that noise barriers meet the requirements of environmental protection, which assume the protection of future road environment users in accordance with sustainable development. They also proved that noise barriers are required in a given location. Due to their application, the risk of exceeding the level of traffic noise in the long-term time horizon was eliminated. The acoustic comfort around the road was also significantly increased. Fig. 7 presents the dependence between noise and both traffic intensity and the structure of road traffic at point A on 30/10/2015. It shows that category 2a and 2b vehicles have the greatest impact on the level of traffic noise. The highest level of noise, reaching 55.6 dB (A), was observed between 12:10 p.m. - 12:15 p.m. It can be noticed that at that time there is a larger traffic of heavy vehicles than passenger car traffic. This dependence is particularly important with regards to the used communication solutions, i.e. the launch of 4 tramways. Fig. 8 presents a summary of the results of two series of measurements obtained in 2015 at point C without a noise barrier, and at point D behind the noise barrier.

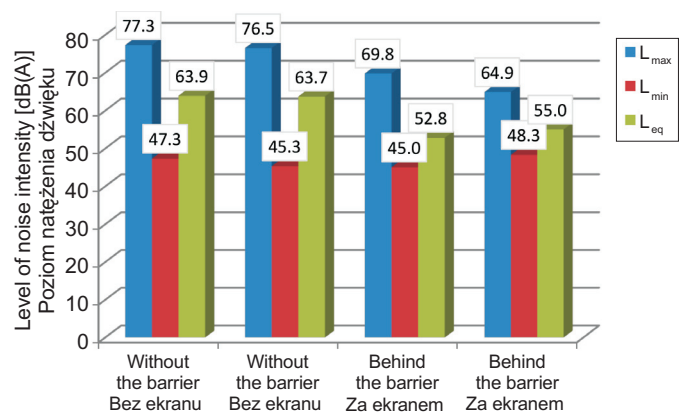


Fig. 8. Noise levels in front of and behind a noise barrier in 2015 (source: own study)

Rys. 8. Poziom natężenia dźwięku przed i za ekranem akustycznym w roku 2015 (źródło: opracowanie własne)

Najwyższa wartość hałasu ekwiwalentnego L_{Aeq} wyniosła w miejscu bez ekranu akustycznego 63,9 dB(A), natomiast za ekranem akustycznym 55 dB(A). Uzyskano również mniejsze wartości maksymalnego hałasu, gdzie najwyższa wartość wyniosła 77,3 dB(A) dla lokalizacji bez ekranu, a 69,8 dB(A) dla lokalizacji za ekranem. Wartości minimalne, które decydują o tle akustycznym były podobne.

Z powyższych analiz wynika, że zastosowane ekrany akustyczne mają skuteczność na poziomie 8,7-10,5 dB(A) i stanowią bardzo istotny element ochrony akustycznej w badanej lokalizacji. W literaturze [12] podaje się skalę oceny skuteczności akustycznej w następujący sposób:

$D_{IL} > 10$ dB(A) – bardzo wysoka skuteczność,
 6 dB(A) $< D_{IL} \leq 10$ dB(A) – zadowalająca skuteczność,
 4 dB(A) $< D_{IL} \leq 6$ dB(A) – tolerowana skuteczność,
 0 dB(A) $< D_{IL} \leq 4$ dB(A) – ekran praktycznie nieskuteczny.

Na Rys. 9 przedstawiono wyniki pomiarów po uruchomieniu ruchu tramwajowego. Uzyskane wyniki pokazują, że poziom hałasu nie uległ zmianie. Oznacza to, że wprowadzenie ruchu tramwajowego nie zwiększyło poziomu hałasu w danej lokalizacji. Średnia wartość poziomu hałasu komunikacyjnego przed uruchomieniem ruchu tramwajowego wynosiła około 63,8 dB(A) w miejscu bez ekranu akustycznego i 53,5 dB(A) za ekranem akustycznym, a po uruchomieniu ruchu tramwajowego odpowiednio 64 dB(A) bez ekranu i 51,6 dB(A) za ekranem.

7. WNIOSKI

Budowa ekranów akustycznych wzdłuż linii tramwajowej w Bydgoszczy była wynikiem decyzji środowiskowej z 2012 roku, a także konsultacji społecznych prowadzonych z mieszkańcami pobliskiej zabudowy wielorodzinnej. Analizy wykazały, że poprzez prognozowany wzrost natężenia ruchu drogowego i dodatkowy ruch tramwajowy przekroczone będą dopuszczalne poziomy hałasu w otoczeniu inwestycji drogowej. Przeprowadzone pomiary in situ oraz analiza wyników tych pomiarów wskazują na wysoką skuteczność redukcji hałasu przez wybudowane ekrany akustyczne typu odbijającego. Wnioski wynikające z analizy hałasu komunikacyjnego są następujące:

1. Wyniki pomiarów jednoznacznie wskazują na zasadność zastosowania ekranów akustycznych w otoczeniu drogi. Bariery dźwiękochłonne znacząco zwiększają komfort akustyczny pieszych poruszających się wzdłuż ciągów komunikacyjnych oraz mieszkańców zabudowy wielorodzinnej. Zaobserwowano obniżenie poziomu hałasu równoważnego o około 10 dB(A).

The highest equivalent noise L_{Aeq} was equal to 63.9 dB(A) in the place without a noise barrier, while behind the barrier it was equal to 55 dB(A). Lower values of the maximum noise were also obtained, and the highest value was equal to 77.3 dB(A) for the location without a noise barrier, and 69.8 dB(A) for the location behind the noise barrier. The minimum values that determine the acoustic background were similar.

The above analyses show that the used noise barriers have an efficiency of 8.7-10.5 dB (A) and constitute a very important element of acoustic protection in the tested location. In literature [12], the acoustic effectiveness assessment scale is given as follows:

$D_{IL} > 10$ dB(A) – very high efficiency,
 6 dB(A) $< D_{IL} \leq 10$ dB(A) – satisfactory efficiency,
 4 dB(A) $< D_{IL} \leq 6$ dB(A) – tolerated efficiency,
 0 dB(A) $< D_{IL} \leq 4$ dB(A) – a practically ineffective noise barrier.

Fig. 9 shows the results of measurements after the start of tram traffic. The obtained results show that the noise level did not change. This means that the introduction of tram traffic did not increase the noise level in a given location. The average value of the traffic noise level before the start of tram traffic was around 63.8 dB(A) in a place without a noise barrier, and 53.5 dB(A) behind a noise barrier. After the start of tram traffic it was around 64 dB(A) without a noise barrier, and 51,6 dB(A) behind a noise barrier.

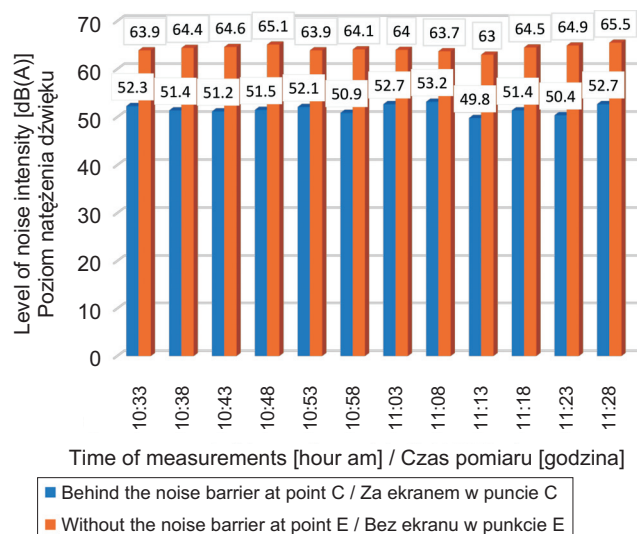


Fig. 9. Effectiveness of shielding after the start of tram traffic in 03/02/2016

Rys. 9. Skuteczność ekranowania po uruchomieniu ruchu tramwajowego w dniu 03/02/2016

2. Stwierdzono, że dzięki zastosowaniu ekranów akustycznych osiągnięto pełny komfort akustyczny dla mieszkańców pobliskiej zabudowy wielorodzinnej.
3. W świetle aktualnych przepisów na podstawie badań można stwierdzić brak konieczności zastosowania ekranów akustycznych. Według norm z 2007 poziom hałasu był przekroczony. Zbudowanie ekranów akustycznych było decyzją środowiskową, w której uwzględniono potrzebę podniesienia komfortu akustycznego mieszkańców.
4. Przeprowadzone w latach 2014-2016 pomiary terenowe stanowią podstawę do cyklicznego monitoringu hałasu komunikacyjnego przy nowej linii tramwajowej w Bydgoszczy, który należy prowadzić w celu sprawdzenia skuteczności zastosowanych rozwiązań w świetle aktualnych i przyszłych norm emisji hałasu do środowiska.
5. Porównanie wyników pomiarów wykonanych przed i po uruchomieniu ruchu tramwajowego wykazało brak zmian w poziomie hałasu komunikacyjnego w badanej lokalizacji. Oprócz zamontowanych ekranów akustycznych istotnym tego powodem jest zlikwidowanie ruchu autobusów, a także zastosowanie nowoczesnego taboru szynowego.

INFORMACJE DODATKOWE

Część z prac prezentowanych w tym artykule była współfinansowana przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad oraz Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach pracy badawczej RID-I-76.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Tracz M., Bohatkiewicz J.*: Uwarunkowania środowiskowe rozwoju infrastruktury transportowej w Polsce. 58 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZiTb, Krynica, 16-21 września 2012 r., 205-214
- [2] *Kowalski K.J., Bańkowski W., Król J.B., Gajewski M., Horodecka R., Świeżewski P.*: Selection of quiet pavement technology for Polish climate conditions on the example of CiDRO project. *Transportation Research Procedia*, **14**, 2016, 2724-2733
- [3] *Kowalski K.J., McDaniel R.S., Shah A., Olek J.*: Long-Term Monitoring of Noise and Frictional Properties of Three Pavements: Dense-Graded Asphalt, Stone Matrix Asphalt, and Porous Friction Course. *Transportation Research Record (TRR), Journal of the Transportation Research Board (TRB)*, **2127**, 2009, 12-19

7. CONCLUSIONS

The construction of noise barriers along the tramway in Bydgoszcz resulted from the environmental decision in 2012, as well as from social consultations conducted with the residents of nearby multi-family buildings. Analyses showed that due to the forecasted increase in road traffic and additional tram traffic, acceptable noise levels in the vicinity of the road investment will be exceeded. The carried out in-situ measurements and the analysis of the results of these measurements indicated a high efficiency of noise reduction of the built-in sound reflective barriers. The conclusions resulting from the analysis of traffic noise are as follows:

1. The measurement results clearly indicate the validity of using noise barriers in the vicinity of the road. Sound-absorbing barriers significantly increase the acoustic comfort of pedestrians moving along communication routes and also residents of multi-family buildings. A reduction in the equivalent noise level of approximately 10 dB(A) was observed.
2. It was found that due to the use of noise barriers, full acoustic comfort was achieved for residents of nearby multi-family buildings.
3. With regards to current regulations, it can be concluded from the research that there is no need to use noise barriers. According to the standards from 2007, the noise level was exceeded. The construction of noise barriers was an environmental decision that took into account the need to improve the acoustic comfort of residents.
4. The field measurements, which were carried out in 2014-2016, form the basis for cyclical monitoring of traffic noise along the new tramway in Bydgoszcz, which should be conducted in order to check the effectiveness of the applied solutions with regards to current and future standards of noise emission to the environment.
5. A comparison of the results of measurements that were taken before and after the start of tram traffic showed no changes in the level of traffic noise in the examined location. An important reason for this, apart from the noise barriers, is the elimination of bus traffic, as well as the use of modern rolling stock.

ACKNOWLEDGMENT

This work was partially supported by the General Director for National Roads and Motorways in Poland and by the National Centre for Research and Development in Poland under the grant agreement RID-I-76.

- [4] Kowalski K.J., Brzeziński A.J., Król J.B., Radziszewski P., Szymański Ł.: Traffic analysis and pavement technology as a tool for urban noise control. Archives of Civil Engineering, **LXI**, 4, 2015, 107-125
- [5] Taras A.: Badanie wybranych typów ekranów akustycznych. Magazyn Autostrady, 8-9, 2012, 52-55
- [6] Szyszlak-Bargłowicz J., Słowik T., Zajac G.: Zanieczyszczenia środowiska hałasem komunikacyjnym na terenie Parku Krajobrazowego Pogórza Przemyskiego. Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe, **13**, 10, 2012, 144-147
- [7] Guidelines for community noise. WHO, 1999, Geneva, 10-16
- [8] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2007 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku (Dz.U. 2007 nr 120, poz. 826)
- [9] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 października 2012 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku (Dz.U. 2012.1109)
- [10] Szymański Z.: Badania skuteczności ekranowania zgodnie z normą PN-ISO 10847:2002 Akustyka - Wyznaczanie „in situ” zewnętrznych ekranów akustycznych wszystkich rodzajów. Magazyn Autostrady 5, 2012, 164-167
- [11] Niewiadomski L., Świerczyńska Sz., Wuwer W.: Capacity assessment and modification of high noise barriers. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **13**, 2, 2014, 145-155
- [12] Sikora J.: Czynniki wpływające na skuteczność ekranu akustycznego. Magazyn Autostrady, 7, 2011, 62-68
- [13] Truszkowski M.: Zastosowanie budowy obwodnic drogowych do ochrony przed hałasem drogowym na przykładzie obwodnicy Sochaczewa. Magazyn Autostrady, 6, 2012, 12-15
- [14] Lakusic S.: Impact of tram traffic on noise and vibrations. Electronic Journal Technical Acoustics, 13, 2006, 1-10, http://www.ejta.org/en/lakusic1_06.06.2017
- [15] Pallas M.A., Lelong J., Chatagnon R.: Characterisation of tram noise emission and contribution of the noise sources. Applied Acoustics, **72**, 7, 2011, 437-450
- [16] Sandberg U., Ejsmont J.: Tyre/road noise reference book. Informex, Kisa, Sweden, 2002