

PAWEŁ KOSSAKOWSKI¹

MICHAŁ BAKALARZ²

Kielce University of Technology

¹ e-mail: kossak@tu.kielce.pl

² e-mail: mbakalarz@tu.kielce.pl

TIMBER NOISE BARRIERS

DREWNIANE EKRANY AKUSTYCZNE

Abstract

The paper presents the issue of protection against the negative effects of noise by means of timber noise barrier. Timber noise barriers are described with regard to the types of construction of the acoustic panel, technical solutions, materials and processing method. Advantages and disadvantages of timber noise barriers, and the range of application are also discussed in the article.

Keywords: noise, protection against noise, noise barriers, timber structures

Streszczenie

W artykule poruszona została problematyka ochrony przed hałasem przy wykorzystaniu drewnianych ekranów akustycznych. W szczególowy sposób opisano drewniane ekrany akustyczne, uwzględniając ich podział w zależności od konstrukcji panelu akustycznego, technologię wykonania oraz stosowane materiały i sposób ich obróbki. Przedyskutowano wady i zalety drewnianych ekranów akustycznych oraz możliwości ich lokalizowania w różnych warunkach terenowych.

Słowa kluczowe: hałas, ochrona przed hałasem, ekran akustyczny, konstrukcje drewniane

1. Introduction

Pollution of natural environment related to the negative effects of noise along with the air pollution are major threats resulting from human activities, which temporarily becomes a serious social problem.

Human activities performed in an outdoor environment are the reason of unwanted, annoying, irritating or harmful sounds defined collectively as “environmental noise”. The noise therefore, refers to perceptible auditory sensation produced by propagating acoustic wave in the elastic medium in which specific range is identified by receiver as a noise. In physical terms, noise is a measurable value of sound level corresponding to the sound pressure or intensity, expressed in decibels (dB). The main noise sources associated with human activities include road and rail vehicles and their infrastructure, aircraft, outdoor and industrial equipment and mobile machinery [1].

Protection against noise is one of the primary objectives of the European Community policy to achieve high level of health and environmental

1. Wprowadzenie

Zanieczyszczenie środowiska naturalnego związane z oddziaływaniem hałasu, obok zanieczyszczeń powietrza, stanowi obecnie największe zagrożenie wynikające z działalności człowieka, stające się poważnym problemem społecznym.

Działalność człowieka prowadzona na wolnym powietrzu jest przyczyną niepożądanych, uciążliwych, dokuczliwych lub szkodliwych dźwięków, definiowanych jako „hałas w środowisku”. Hałas utożsamiany może być z odczuwalnymi wrażeniami słuchowymi, wytworzonymi przez rozchodzącą się w ośrodku sprężystym falę akustyczną, do którego zaliczony zostanie przez odbiorcę określony zakres dźwięków. W ujęciu fizycznym jest to mierzalna wielkość głośności słyszalnego dźwięku odnosząca się do natężenia lub ciśnienia akustycznego wyrażanego w decybelach (dB). Głównymi źródłami hałasu są pojazdy kołowe i szynowe oraz ich infrastruktura, samoloty, urządzenia pracujące na otwartej przestrzeni i urządzenia przemysłowe oraz maszyny samojezdne [1].

Ochrona przed hałasem jest jednym z celów polityki Wspólnoty Europejskiej dążącej do osiągnięcia

protection. For this reason, a variety of measures aimed at reducing the negative noise effects are undertaken. Generally, these measures influence three key elements such as source, wave propagation path and receiver exposed to effects of this phenomenon. By this three elements, the level of sound effects is assessed.

Current legal regulations concerning protection of the environment from the noise in the European Union including Poland are described extensively in publications [1, 3-5].

2. Noise barriers

Noise barriers known also as a sound barriers are one of the most common technical solutions used to mitigate negative noise effects emitted by means of transport. They are defined as a natural or artificial obstacles situated on the path of acoustic wave propagation between the source of the sound and the noise receiver. Locally, the barriers form a vertical increase of a ground level. Thus, they play a role of acoustic insulation which purpose is to reduce the noise level in the protected area [2].

The principle of operation of noise barriers refers to the rules governing propagation of acoustic waves in the elastic medium. The sound wave propagating from the source of the sound towards the protected area is partly reflected from the barrier facing, diffracted on the edges or transmitted through the noise barrier, where absorption of sound occurs. As a result, the noise level measured in the protected area is mitigated and is equal to the sum of sounds passed directly (transmitted through barrier) and indirectly (diffracted on barrier edges) to receiver. Noise reduction effect occurs in the area so-called "acoustic shadow".

The acoustic effectiveness of sound barriers depends primarily on [6]:

- location in relations to the sound source and receiver,
- shape of the cross-section,
- geometric parameters of barrier such as height and length,
- type of material and its thickness,
- shape of the terrain within the source and noise receiver.

For this reason, the most effective noise barriers are appropriately dense and stiff obstacles with great and workable geometric properties, located as close to the source or sound receiver as possible [6]. Absorption effectiveness of sound transmitted through the barrier depends on used material and its thickness. Other parameters contribute to the elongation of the path which an acoustic wave needs to cover [7].

wysokiego poziomu zdrowia i ochrony środowiska. W tym celu podejmowane są działania ukierunkowane na redukcję efektów hałasu, które wpływają na trzy kluczowe elementy, tj. źródło, drogę propagacji fali akustycznej oraz odbiorcę narażonego na skutki tego zjawiska. Na podstawie tych elementów wielkość hałasu jest określana.

Aktualne regulacje prawne dotyczące ochrony przed hałasem w Unii Europejskiej, w tym Polsce, omówiono zostały szczegółowo w publikacjach [1, 3-5].

2. Ekran akustyczny

Jednym z najbardziej rozpowszechnionych rozwiązań służących ochronie przed oddziaływaniem hałasu, wyemitowanego przez środki transportu są bariery dźwiękochłonne, określane również jako ekrany akustyczne. Definiowane są one jako naturalne lub sztuczne przeszkody usytuowanego na drodze propagacji fali akustycznej pomiędzy źródłem a odbiorcą hałasu. Lokalnie przyjmują postać pionowego podwyższenia linii terenu. Pełnią one zatem rolę izolacji, której zadaniem jest ograniczenie hałasu w obszarze chronionym [2].

Zasada działania ekranów akustycznych opiera się na zjawisku propagacji fal akustycznych w ośrodku sprężystym. Fala dźwiękowa rozchodząca się od źródła w kierunku obszaru chronionego, w momencie napotkania na przeszkodę, ulega częściowo odbiciu, załamaniu na krawędziach bariery lub przenika przez barierę i jest tłumiona. W rezultacie poziom hałasu po stronie odbiorcy jest obniżony i stanowi sumę fal, które dotarły bezpośrednio (przeniknęły przez barierę) i pośrednio (po ścieżce załamanej) do odbiorcy. Redukcja hałasu występuje w obszarze określanym jako tzw. cień akustyczny.

Efektywność akustyczna barier dźwiękochłonnych zależy głównie od [6]:

- lokalizacji względem źródła i odbiorcy hałasu,
- kształtu przekroju poprzecznego,
- wymiarów geometrycznych bariery, jak wysokość i długość,
- rodzaju materiału i jego grubości,
- kształtu terenu w obrębie źródła i odbiorcy hałasu.

Z tego względu najbardziej efektywne ekrany akustyczne to przegrody o dużej sztywności i gęstości, których wymiary geometryczne są możliwie największe i zlokalizowane są jak najbliżej źródła lub odbiorcy hałasu [6]. Efektywność tłumienia dźwięku przenikającego przez przegrodę zależy od przyjętego materiału oraz jego grubości. Pozostałe parametry przyczyniają się do wydłużenia drogi, jaką pokonać musi fala akustyczna [7].

In this paper, noise barriers in which organic material such as wood or wood-based material is used to suppress noise are described.

3. Timber noise barriers

3.1. General information

Timber noise barriers are primarily shaped as a wall with lumber, plywood and glued-laminated wood members. Typical construction consists of posts and acoustic panels filling the space between them [7]. The posts are responsible for carrying the loads (mainly wind actions) and transmitting them to foundations as well as for construction stability. The panels are responsible for reducing the noise level.

Because of specific wood texture, timber noise barriers are characteristic in terms of architectural and visual aspects. The appearance of barrier is affected by the wood species and the processing method, including such factors as [8]:

- plank orientation – within the element and its fragments various configuration of plank such as vertical, horizontal and diagonal may be provided;
- battens pattern;
- grain orientation – texture of outer surfaces depends on wood species including its roughness and grain arrangement;
- lamination method – for glulam barriers different design is obtained by modifying layers arrangement;
- post type – material, dimensions, shape as well as the exposition of post is significant.

From a construction point of view, plain technical solutions analogical to these in noise barriers made out of other materials are frequently used.

Below, types of construction systems of timber noise barriers regarding to the previously mentioned wood members used to shape barrier are presented.

3.2. Construction system

Post-panel structures are fundamental construction systems of timber noise barriers (Fig. 1). The posts act as cantilevers attached to foundations, while the panels form a spanning in horizontal alignment.

Various wood species are applied for columns and panels as well as wood-based materials for acoustic panels.

Timber plank noise barriers are made out of lumber panels supported by timber posts. The posts in this constructions usually take the form of rectangle or circle in cross-section. Tongue and groove planking

W pracy omówiono ekrany akustyczne, w których do tłumienia dźwięków zastosowano materiał organiczny, jakim jest drewno oraz materiały drewnopochodne.

3. Drewniane ekrany akustyczne

3.1. Informacje ogólne

Drewniane ekrany akustyczne wykonywane są w postaci ściany z drewna litego, sklejki i drewna klejonego warstwowo. Typowa konstrukcja składa się ze słupów oraz paneli wypełniających przestrzeń pomiędzy nimi [7]. Słupy odpowiedzialne są za przenoszenie obciążeń (głównie oddziaływań wiatru) i przekazywanie ich na fundamenty oraz stateczność konstrukcji. Panele akustyczne odpowiadają za redukcję hałasu.

Z uwagi na specyficzną teksturę drewna, ekrany są charakterystyczne pod względem architektonicznym i wizualnym. Wygląd przegród uzależniony jest od przyjętego gatunku drewna oraz sposobu jego obróbki, wliczając takie czynniki, jak [8]:

- orientacja desek – układ desek w obrębie całego elementu lub jego fragmentu może być kształtowany jako poziomy, pionowy lub ułożony pod kątem;
- układ listew;
- przebieg włókien – tekstura powierzchni elementów zależy od przyjętego gatunku drewna, w tym jego szorstkości i układu włókien;
- sposób klejenia – dla elementów wykonanych z drewna klejonego warstwowo, zmianę wyglądu można osiągnąć za pomocą rozkładu lamel;
- typ słupów – istotny jest materiał, kształt, wymiary, a także ekspozycja słupów.

Z konstrukcyjnego punktu widzenia najczęściej stosowane są rozwiązania o prostych układach, analogiczne do ekranów wykonywanych z innych materiałów.

Poniżej przedstawiono układy konstrukcyjne ekranów akustycznych w odniesieniu do wspomnianego wcześniej elementu drewnianego wykorzystanego do jego wykonania.

3.2. Układ konstrukcyjny

Podstawowym systemem konstrukcyjnym drewnianych ekranów akustycznych jest układ słup–panel (rys. 1). Słupy funkcjonują jako wsporniki zakotwiczone w fundamentach, a panele stanowią przęsła w układzie poziomym.

Różne gatunki drewna litego stosowane są na słupy i panele, jak również materiały drewnopochodne na panele.

Bariery z desek wykonane są z paneli z drewna litego podpieranych przez słupy. Słupy w tych konstrukcjach przyjmują formę kolumny o przekroju prostokątnym.

instead of overlapping is preferred to prevent the occurrence of gaps between either the ground and panel or barrier members respectively [9]. Thicker planks, than required from static analysis may provide additional protection against rheological effects, lengthening barrier design life [6].

Plywood barriers are made of plywood panels attached usually to steel or lumber posts [7]. Plywood is manufactured by gluing together thin layers (plies) of wood veneer with moisture-resistant adhesives. The subsequent layers are rotated in such way to ensure crossing of the grains in the adjacent layers. External and internal plies may vary in mechanical properties. In comparison to planks, plywood panels are stronger and more durable, and can be also used in modular systems [6]. Depending on the requirements

kątnym bądź okrągłym. W celu uniknięcia przerw pod konstrukcją panelu i jej elementami preferowane są połączenia desek na tzw. pióro-wpust [9]. Przyjęcie grubszych desek, niż wynikające z obliczeń statycznych, może zapewnić dodatkową ochronę przed efektami reologicznymi, co pozwoli wydłużyć czas eksploatacji [6].

Panele akustyczne ze sklejki połączone są zwykle ze stalowymi bądź drewnianymi słupami [7]. Wytwarzane są poprzez sklejanie ze sobą za pomocą wodoodpornego kleju cienkich lamel drewna. Kolejne warstwy obracane są względem siebie, tak by włókna się krzyżowały, a wewnętrzne warstwy sklejki różnić się mogą gatunkowo od warstw zewnętrznych. Sklejka charakteryzuje się większą wytrzymałością i trwałością w porównaniu do desek oraz może być stosowana w systemach modu-



Fig. 1. Timber noise barrier with a board panel (authors' photography)

Rys. 1. Drewniany ekran akustyczny z panelem z desek (fotografia autorów)

on the intensity of the sound, the noise barriers may consist of one or more layers of plywood. Combining several plywood layers requires appropriate their distribution, so the connection of adjacent layers do not overlap.

larnych [6]. W zależności od wymagań dotyczących intensywności hałasu przegroda składać się może z jednej lub większej ilości warstw sklejki. Połączenie kilku przylegających do siebie wymaga odpowiedniego ich rozłożenia, tak by złącza nie nakładały się na siebie.

Plywood panels are also used in the rehabilitation of timber noise barriers when small defects occurs, and as an alternative solution of facing of the lightweight concrete panels [9].

Glued-laminated (glulam) noise barriers consist of several structural members fabricated by bonding together specific number of lamellae with a durable moisture-resistant adhesives. The arrangement of individual lamellae within a single structural element is such that the course of the grains in the adjacent layers is close to parallel. Such arrangement provides the best mechanical properties. The characteristic feature of this solution is similar to a mirror reflection look of the barrier on both sides.

It should be noted that the acoustic panels in the solutions described above can be either assembled and integrated on site or delivered as a prefabricated elements. However, greater acoustic durability due to installation method will be achieved for prefabricated elements [10].

4. Material and structure solutions

4.1. Reflective and absorbing barriers

Due to the noise mitigation solution reflective (Fig. 2) and absorbing barriers are specified.

The principle of operation of the reflective noise barriers as the name indicates basis on the phenomenon of the sound wave reflection. When the wave strikes the barrier facing, part of the energy is transmitted through the barrier, however the vast majority is reflected towards the source of the sound. Depending on the facing and porosity (as well as the length of the wave) sound can be diffracted in various directions. Reflective noise panels are usually made out of planks supported by treated lumber framing, and attached to the foundations through metal or timber profiles. Planks can be either planed or not. Metal profiles are connected with the foundations by means of welded plates and changeable in shape and diameter screws.

The connections should be made with the use of moisture-resistant elements, such as stainless steel screws.

Technological solutions in absorptive noise barriers are similar to these in reflective noise barriers, with the difference that the interior of the panel is filled with the acoustic wave absorbing material. The fibrous materials such as mineral wool or rock wool are commonly used. Filling material is protected against the atmospheric effects using the protective membranes (black glass mat). The external facing (from the receiver side) of the absorptive barrier is

Panele ze sklejki stosowane są również przy naprawach ubytków drewnianych barier oraz jako alternatywne wykończenie powierzchni lekkich paneli betonowych [9].

Bariery z drewna klejonego warstwowo składają się z elementów wytworzonych przez połączenie określonej ilości lamel za pomocą wytrzymałego, odpornego na wilgoć kleju. Układ poszczególnych lamel w obrębie jednego elementu konstrukcyjnego jest taki, że kierunek przebiegu włókien, w przystających do siebie lamelach jest w przybliżeniu równoległy. Taki układ zapewnia najlepsze parametry mechaniczne. Charakterystyczną cechą tego rozwiązania jest zbliżony do lustrzanego odbicia wygląd przegrody po obu jej stronach.

Należy zauważyć, iż panele w opisanych powyżej rozwiązaniach mogą być zmontowane i wbudowywane na placu budowy lub dostarczane jako elementy prefabrykowane. Jednakże większa trwałość akustyczna ze względu na metodę instalacji osiągnięta zostanie dla elementów prefabrykowanych [9].

4. Rozwiązania konstrukcyjne i materiałowe

4.1. Ekran odbijający i pochłaniający

Ze względu na sposób łagodzenia hałasu wyróżniamy ekrany odbijające (rys. 2) i pochłaniające dźwięk.

Zasada działania ekranów odbijających dźwięk, jak sama nazwa wskazuje, bazuje na zjawisku odbicia fali dźwiękowej. W momencie uderzenia w powierzchnię bariery część energii jest transmitowana przez przegrodę, lecz zdecydowana większość jest odbijana w kierunku źródła hałasu. W zależności od kształtu i chropowatości powierzchni (oraz długości fali dźwiękowej) dźwięk może być załamany w różnych kierunkach. Odbijające panele konstruowane są z desek opartych na ramowej konstrukcji z obrobionych bali drewnianych i połączone są z podporami z metalowych profili bądź drewna. Deski mogą być strugane lub nie. Profile metalowe łączone są z fundamentem za pomocą przyspawanych płyt i śrub o zmiennej średnicy i kształcie.

Połączenia wykonane powinny być z elementów niepodatnych na działanie wilgoci, jak na przykład nierdzewne wkręty.

Rozwiązania technologiczne w ekranach pochłaniających dźwięk są zbliżone do ekranów odbijających, z tą różnicą, że wewnątrz panelu wypełnione jest czynnikiem pochłaniającym falę akustyczną. Najczęściej używane są do tego materiały włókniste, takie jak wełna mineralna czy skalna. Materiał wypełniający chroniony jest przed oddziaływaniem atmosferycznym za pomocą membran ochronnych (szklanych welonów koloru czarnego). Okładzina zewnętrzna (od strony



Fig. 2. Reflective noise barrier (authors' photography)
 Rys. 2. Odbijający ekran akustyczny (fotografia autorów)

covered with tongue and groove planking. While, the inner surface (from the sound source) is covered with battens, with different regarding to the manufacturer percentage of surface coverage [10].

4.2. Wood species

Specific species of seasoned or dried hardwood are used [11]. In Poland, most commonly pine and spruce with densities of 550 kg/m^3 and 470 kg/m^3 respectively are utilized. The density of timber influences the acoustic effectiveness. With the increase of density, required plank thickness for which the same level of noise reduction is achieved decreases [10].

Regarding to wood species the appropriate treatment against moisture, insects and fire is required. To this end, a chemical wood preservation is usually applied through the pressure impregnation. In particular, protection due to the flammability of structure taking into account the possibility of pollution air, soil or groundwater need to be considered. In case of fire, both fumes as well as the ash should not pose a threat.

5. Advantages and disadvantages

The main advantages of timber noise barriers are:

- aesthetics qualities*: the ability of visual blending the devices dealing with protection of life and human health with the surrounding environment,
- design life*: appropriately treated timber with chemical preservatives against fungi, insects, pests

odbiorcy) panelu pokryta jest deskami na pióro-wpust. Natomiast powierzchnie wewnętrzne (od strony źródła hałasu) pokryte są listewkami o różnym w zależności od producenta, procencie pokrycia powierzchni [10].

4.2. Gatunki drewna

Do budowy ekranów wykorzystywane są określone gatunki sezonowanego bądź suszonego drewna iglastego [11]. W Polsce najczęściej stosowane jest drzewo sosnowe i świerkowe o gęstości odpowiednio 550 kg/m^3 i 470 kg/m^3 . Gęstość drewna wpływa na jego właściwości tłumienia dźwięku. Wraz z jej wzrostem maleje wymagana grubość deski, pozwalająca uzyskać taki sam poziom redukcji hałasu [10].

Niezależnie od gatunku drewna wymagane są zabiegi ochronne przed oddziaływaniem wilgoci, szkodników i ognia. W tym celu stosowana jest zazwyczaj impregnacja ciśnieniowa drewna za pomocą środków chemicznych. Szczególnie istotna jest ochrona z uwagi na palność konstrukcji, uwzględniająca możliwość zanieczyszczenia powietrza, gleby i wód gruntowych. W przypadku pożaru zarówno dym, jak i popiół nie powinny stanowić zagrożenia.

5. Zalety i wady

Głównymi zaletami drewnianych ekranów są:

- względy estetyczne*: możliwość wkomponowania urządzeń służących ochronie życia i zdrowia ludzkiego w obszar otaczającego krajobrazu;
- czas użytkowania*: odpowiednio zabezpieczone drewno związkami chemicznymi przeciwko gry-

and other organisms that may adversely affect on the structure of the wood can extend the design life up to 50 years [6];

- c) *cost of solution*: wood is a common material in nature and therefore is relatively cheap, which translates to low installation and rehabilitation cost [12];
- d) *constructability*: timber members may be simply modified, also on site [8];
- e) *lightweight structures*: indirectly translates to relatively short assembling time[6].

The main disadvantages of timber noise barriers are:

- a) *instability of dimensions and shape of barrier*: aging the construction material causes cracks and warping of the structure, which may result in [12]:
 - gaps and holes through which the sound will be leaking, reducing the noise barrier effectiveness,
 - disorder of the structure cohesiveness contributing to increasing the stress level in elements,
 - deterioration of aesthetics;
- b) *susceptibility to soil and groundwater influence*: regardless to wood species and treatment method, pre-mentioned factors may cause degradation (rotting) of barrier members [12];
- c) *low cleaning effectiveness*: wood surfaces are susceptible to vandalism in the form of graffiti and therefore needs to be painted over each time to restore the look of the facing [6];
- d) *limited ability of shaping the size of the barrier*: barrier geometry is limited within the range of acceptable stress level corresponding to mechanical parameters of wood;
- e) *necessity of more frequent controls and repairs*.

Some disadvantages may be partially neutralized by selecting appropriate processing method, material and technical solution.

6. Summary

Timber noise barriers represent a diverse in visual context measures dealing with the protection of life and human health. Nevertheless, the range of its application is limited by inherent wood defects. Primarily they are used because of the ability to integrate and blend with the local landscape. Therefore, these barriers are applied in the suburbs or rural areas, where in addition to its primary function may also act as a fence.

bom, owadom, szkodnikom oraz innym organizmom mogącym wpływać negatywnie na jego strukturę pozwala wydłużyć użytkowanie do 50 lat [6];

- c) *koszt rozwiązania*: drewno jest materiałem powszechnie występującym i stosunkowo tanim, co przekłada się na niskie koszty instalacji oraz rehabilitacji [12];
- d) *wykonalność*: elementy mogą zostać łatwo zmodyfikowane, również na placu budowy [8];
- e) *niski ciężar konstrukcji*: pośrednio przekłada się to na względnie krótki czas montażu [6].

Głównymi wadami drewnianych ekranów akustycznych są:

- a) *niestabilność wymiarów i kształtu przegrody*: starzenie się materiału konstrukcyjnego powoduje pęknięcia lub paczenie się konstrukcji, czego następstwem mogą być [12]:
 - szczeliny oraz otwory, przez które przedostawać się będzie hałas, zmniejszając efektywność ekranu,
 - zaburzenie spójności struktury, przyczyniając się do zwiększenia poziomu naprężeń w elementach,
 - pogorszenie estetyki;
- b) *wrażliwość na oddziaływanie gruntu i wód gruntowych*: niezależnie od gatunku drewna i sposobu obróbki powyższe czynniki mogą wywołać degradację (gnicie) elementów bariery [12];
- c) *niską efektywność czyszczenia*: powierzchnie drewniane są podatne na wandalizm w postaci graffiti i wymagają każdorazowo malowania w celu odnowienia wyglądu powłoki zewnętrznej [6];
- d) *ograniczone możliwości kształtowania wielkości przegrody*: geometria bariery ograniczona jest przez zakres naprężeń wynikających z parametrów mechanicznych drewna;
- e) *konieczność częstszych kontroli i napraw*.

Niektóre z wad mogą zostać częściowo zniwelowane przez dobór odpowiednich rozwiązań konstrukcyjnych, materiałowych oraz obróbkę drewna.

6. Podsumowanie

Drewniane ekrany akustyczne stanowią zróżnicowane wizualnie rozwiązanie służące ochronie życia i zdrowia ludzkiego. Jednak nieodłączne wady drewna ograniczają zakres ich zastosowania. Najczęściej wykonywane są ze względu na możliwość wpasowania i zmieszania z miejscowym krajobrazem. Dlatego też, stosowane są na przedmieściach lub terenach wiejskich, gdzie oprócz swojej podstawowej funkcji pełnią rolę ogrodzenia.

References

- [1] Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise (Official Journal of the EC L 189/12, 18.07.2002).
- [2] Kossakowski P.: *Ekran akustyczny o konstrukcji stalowej z wypełnieniem ziemnym* (Steel noise barrier with ground filling). *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej Nr 283, Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, zeszyt 59 (3/2012/TV), pp. 257-264.
- [3] Kossakowski P.: *Protection against noise in the European Union - general requirements, applied noise indicators and assessment methods*. *Structure and Environment* 3, 4 (2011), pp. 38-45.
- [4] Kossakowski P., Wciślik W.: Legal regulations for protection of the environment from the noise and the current requirements for permissible noise level in Poland. *Structure and Environment* 5, 1 (2013), pp. 34-41.
- [5] Kossakowski P.: *Strategic noise maps*, *Structure and Environment* 4, 3 (2012), pp. 35-43.
- [6] NZ Transport Agency, *State Highway Noise Barrier Design Guide*, Wellington: NZTA, 2010.
- [7] Boothby T.E., et al.: *Design of Wood Highway Sound Barriers*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 2001. Retrieved from: <http://www.woodcenter.org>
- [8] <https://www.fhwa.dot.gov/>
- [9] NSW Government.: *Noise wall design guideline*. Design guideline to improve the appearance of noise walls in NSW, 2016. Retrieved from: www.rms.nsw.gov.au
- [10] Morgan P.A.: *The acoustic durability of timber noise barriers on England's strategic road network*. Transport Research Laboratory, 2010. Retrieved from: www.assets.highways.gov.uk
- [11] Bjelić M., et al.: *Analysis of materials used for production of noise protection barriers*. 2012 pp. 101-103.
- [12] Bowlby W.: *In-service Experience with Traffic Noise Barriers*, National Academy Press, Washington, D.C., 1992.