

**Barbara LEBIEDOWSKA**

Wydział Turystyki, Hotelarstwa i Promocji Środowiska, Akademia Humanistyczna im. A. Gieysztor

Faculty of Tourism, Hotel Management and Environmental Promotion, Aleksander Gieysztor Academy of Humanities

## **Wpływ warunków meteorologicznych na propagację hałasu w terenach podmiejskich**

### **Influence of meteorological conditions for sound propagation on suburban areas**

**Słowa kluczowe:** hałas w środowisku, propagacja hałasu, czynnik meteorologiczny

**Key words:** outdoor noise, noise propagation, meteorological factors

#### **Wprowadzenie**

Zmiany poziomu hałasu w znacznych odległościach od źródła są wywołane zjawiskiem refrakcji fali akustycznej w dolnych warstwach atmosfery – jest to bowiem strefa jej propagacji. Refrakcja ta jest spowodowana zmianami prędkości dźwięku w tej strefie. Zmiany te są z kolei wywołane specyficzną stratyfikacją temperatury powietrza oraz prędkości wiatru. To właśnie zmiany profilu pionowego temperatury oraz prędkości wiatru, rzutowanej na kierunek: źródło hałasu – odbiorca, definiują profil prędkości dźwięku i w konsekwencji generują zmiany poziomu dźwięku w znacznych odległościach od źródła.

Studia prowadzone między innymi przez autorów francuskiej metody obliczeniowej – Nouvelle Methode de Prevision de Bruit NMPB-96 (Laporte 1994, Zouboff i in. 1994, 1997, Bruit des infrastructures... 1997) wskazują, że możliwe jest sklasyfikowanie warunków propagacji fali akustycznej w funkcji struktury termicznej atmosfery w dolnych jej warstwach. Metodologia ta oparta jest na pewnych jakościowych informacjach dotyczących warunków meteorologicznych, stosunkowo prostych do zastosowania. Aby jednak można było ją wykorzystać praktycznie, konieczne było sklasyfikowanie jakościowe podstawowych warunków meteorologicznych.

W warunkach względnie stabilnych do podstawowego charakteryzowania atmosfery, jako ośrodka propagacji fal akustycznych, wystarczająca jest znajomość kilku parametrów, takich jak: temperatura, profil pionowy temperatury, kierunek wiatru, prędkość wiatru

i jej profil pionowy. Wielkości te ujmują z wystarczającą dokładnością dla oceny technicznej zjawiska związane z dynamiką atmosfery. Wiążą je także podstawowe zależności charakteryzujące ośrodki gazowe: równanie stanu, równanie politropy, równania równowagi dynamicznej, przedstawione najczęściej w postaci eulerowskiego wektorowego pola prędkości (Lebiedowska, w przygotowaniu).

## Rodzaje profili pionowych prędkości dźwięku

Wymiana termiczna pomiędzy podłożem a dolną warstwą atmosfery prowadzi do zmian temperatury powietrza w funkcji wysokości nad terenem i w konsekwencji do zmian prędkości dźwięku. Jednocześnie przy uwzględnieniu stanu szorstkości powierzchni terenu prędkość wiatru jest zawsze większa w miarę zwiększania wysokości.

W sytuacji rzeczywistej prędkość dźwięku w obecności wiatru odpowiada sumie algebraicznej prędkości dźwięku w przypadku braku wiatru oraz prędkości wiatru rzutowanego na rozważany kierunek propagacji. Prędkość ta jest zmienna w zależności od wysokości nad poziomem terenu. Wyróżnić można zatem trzy podstawowe sytuacje propagacji dźwięku w warunkach rzeczywistych, a mianowicie: warunki niekorzystne, warunki korzystne i warunki jednorodne.

**Warunki tzw. niekorzystne dla propagacji fali dźwiękowej (propagacja w obecności ujemnego gradientu pionowego prędkości).** Możliwe są tutaj dwie różne sytuacje meteorologiczne:

1. Temperatura powietrza maleje wraz z wysokością ponad terenem. Zjawi-

sko takie ma miejsce w ciągu dnia solarne. Słońce nagrzewa podłoże, które z kolei ogrzewa kolejne warstwy powietrza (podłoże szybciej nagrzewa się niż powietrze), w efekcie czego temperatura powietrza w pobliżu powierzchni terenu jest wyższa niż w wyższych partiach. Prędkość dźwięku maleje więc wraz z oddalaniem się od powierzchni Ziemi.

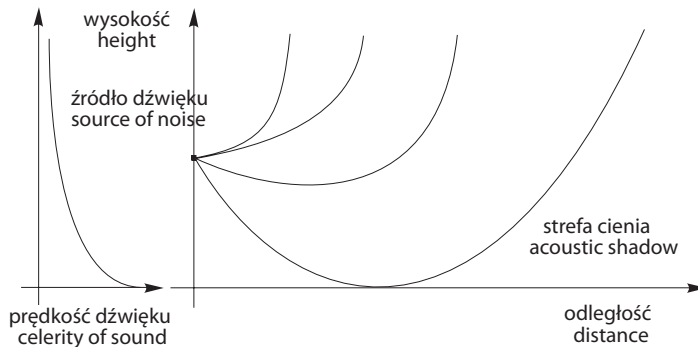
2. Wieje wiatr przeciwny do kierunku propagacji fal akustycznych. Wtedy prędkość wiatru koryguje prędkość dźwięku w stosunku do warunków bezwietrznych. Prędkość dźwięku zmniejsza się więc wraz z wysokością.

Efekt tego typu warunków termicznych i aerodynamicznych przedstawia rysunek 1.

Wszystkie te zjawiska meteorologiczne powodują, że kierunek propagacji fali akustycznej jest odchylany ku górze. W tych warunkach poziom dźwięku w znacznych odległościach od źródła bywa niższy niż dla warunków jednorodnych (tj. przy całkowitym braku wpływu czynników meteorologicznych). Należy także zwrócić uwagę na fakt, iż w pobliżu źródła powstaje pewna strefa cienia, gdzie żaden bezpośredni promień nie dociera i gdzie poziom dźwięku jest niższy, niż można byłoby oczekiwać. Tego typu warunki są więc warunkami niekorzystnymi z punktu widzenia propagacji fal akustycznych.

**Propagacja dźwięku w obecności gradientu pionowego pozytywnego, warunki tzw. korzystne dla propagacji fali akustycznej.** Możliwe są tutaj również dwie różne sytuacje meteorologiczne:

1. Nocą, przy bezchmurnym niebie, powierzchnia Ziemi wypromieniowuje



RYSUNEK 1. Propagacja fali akustycznej w warunkach tzw. niekorzystnych  
 FIGURE 1. Propagation of the acoustic wave in so-called unfavourable conditions

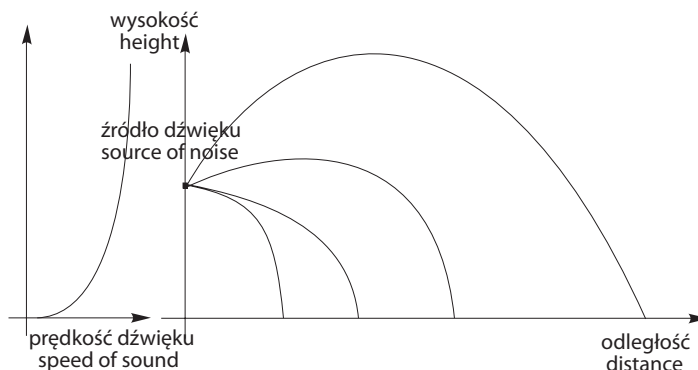
energię ciepłą do atmosfery. Ochładzanie się powierzchni Ziemi następuje znacznie szybciej niż powietrza. Niższe warstwy powietrza stają się chłodniejsze od warstw wyższych. W tym przypadku temperatura powietrza wzrasta wraz z wysokością. Prędkość dźwięku maleje więc w pobliżu powierzchni terenu. Jest to tzw. sytuacja inwersji temperatury, która prowadzi do pozytywnego gradientu pionowego prędkości dźwięku.

2. Kierunek wiatru jest zgodny z kierunkiem propagacji fali akustycznej. Wtedy suma algebraiczna prędkości dźwięku w warunkach jednorodnych i prędkości wiatru wzmacniają profil

prędkości dźwięku. Prędkość dźwięku wzrasta więc wraz z wysokością. Efekt tego typu warunków termicznych i aerodynamicznych przedstawia rysunek 2.

W tych warunkach kierunek propagacji, czyli tzw. promienie dźwięku, są odchylane ku dołowi. Powoduje to, że poziom dźwięku w znacznych odległościach od źródła jest wyższy niż w warunkach jednorodnych. Tego typu warunki meteorologiczne są więc warunkami korzystnymi dla propagacji fali akustycznej.

**Propagacja dźwięku w obecności gradientu pionowego zerowego; warunki tzw. jednorodne.** Występowanie

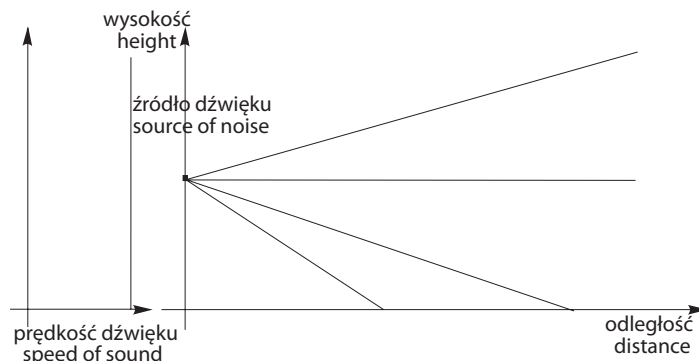


RYSUNEK 2. Propagacja fali akustycznej w warunkach tzw. korzystnych  
 FIGURE 2. Propagation of the acoustic wave in so-called favourable conditions

połączonych warunków termicznych i aerodynamicznych dla danego terenu charakteryzuje duża zmienność w czasie. Jednocześnie należy zauważyć, że sytuacje bez wpływu tych efektów są stosunkowo rzadko spotykane. Warunki takie są tłumaczone brakiem gradientu pionowego prędkości dźwięku. Zjawisko to może jednak powstać w wyniku dwóch sytuacji meteorologicznych:

1. Prędkość wiatru jest zerowa i temperatura powietrza jest stała w funkcji wysokości liczonej od poziomu terenu. Może to mieć miejsce o wschodzie i zachodzie Słońca lub w warunkach pełnej, grubej pokrywy chmur, ograniczającej wymianę ciepła między podłożem a atmosferą.
2. Efekty termiczne oraz aerodynamiczne znoszą się nawzajem. Może to mieć miejsce na przykład podczas wiatru przeciwnego do kierunku propagacji fal akustycznych. Sytuacja ta może mieć miejsce również nocą przy niebie bezchmurnym lub także podczas dnia solarnego w obecności wiatru niosącego średniego lub słabego.

Propagację dźwięku w tych warunkach ilustruje rysunek 3.



RYSUNEK 3. Propagacja w warunkach tzw. jednorodnych  
FIGURE 3. Propagation in so-called homogenous conditions

Dwie wyżej opisane sytuacje są obserwowane stosunkowo rzadko, a propagacja fali akustycznej przy braku gradientu pionowego prędkości dźwięku jest raczej rozważana jako granica pomiędzy dwoma sposobami propagacji dźwięku – korzystnymi i niekorzystnymi.

### Rzeczywisty profil prędkości dźwięku w funkcji temperatury i kierunku propagacji wiatru

Wiedząc, że prędkość rzeczywista dźwięku jest funkcją temperatury oraz energii i kierunku wiatru w stosunku do kierunku źródła – punkt odbioru, profil rzeczywisty jego prędkości można zapisać następująco (Panofsky i in. 1984):

$$c(z) = u(z) \cdot \cos(\alpha_m - \alpha_b) + c_0 \sqrt{1 + T(z)/273} \quad (1)$$

gdzie:

$u(z)$  – profil pionowy prędkości wiatru,  
 $T(z)$  – profil pionowy temperatury,  
 $c_0$  – prędkość dźwięku w temperaturze odniesienia ( $c_0 = 331$  m/s),

$\alpha_m$  – kierunek wiatru (skąd wieje wiatr) w stosunku do kierunku północnego,  
 $\alpha_b$  – kierunek widzenia źródła z punktu odbioru w stosunku do kierunku północnego.

Równanie (1) ujmuje kompleksowo wpływ podstawowych parametrów funkcyjnych opisujących profil pionowy prędkości dźwięku.

### **Ustalenie korzystnych warunków meteorologicznych**

W celu określenia poziomu długotrwałego dźwięku z uwzględnieniem warunków meteorologicznych wprowadzono parametr  $P$  (Bruit des infrastructures... 1997), który ujmuje częstotliwość pojawiania się, w długich okresach, warunków korzystnych ( $P$  jest zawarte pomiędzy 0 a 1). Oczywisty jest fakt, że w danej sytuacji terenowej częstość pojawiania się warunków korzystnych zależy od kierunku źródło-punkt odbioru, bowiem warunki te zależą od kierunku wiatru na danym terenie. Aby więc wykonać pełne obliczenia, uwzględniające warunki meteorologiczne na propagację hałasu, należy dysponować dla danego terenu znajomością częstości pojawiania się warunków korzystnych dla wszystkich możliwych kierunków propagacji źródło-odbiorca. W praktyce określenie tego parametru jest niezwykle pracochłonne i wymaga bardzo dużej liczby danych meteorologicznych odczytywanych co godzinę, takich jak: średnia prędkość wiatru, kierunek wiatru w stosunku do północy, zachmurzenie, godzina wschodu i zachodu słońca. Daje to roczną liczbę 34 560 danych. Dla każdej

godzinowej sytuacji meteorologicznej ustala się odpowiednio klasę termiczną i aerodynamiczną (Lebiedowska i in. 2001), które z kolei krzyżuje się ze sobą, zgodnie z zasadą tablicy Zouboffa (Zouboff i in. 1994, Lebiedowska i in. 1997), w celu ustalenia rodzaju sytuacji meteorologicznych. Zliczenie wszystkich sytuacji korzystnych daje wielkość parametru  $P$  dla poszczególnych kierunków źródło-punkt odbioru.

### **Obliczenia symulacyjne i ich analiza**

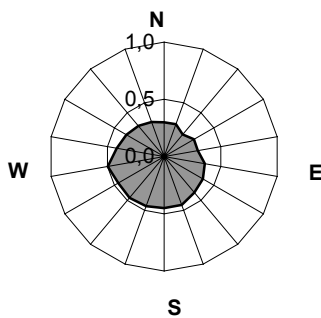
Obliczenia symulacyjne wykonano, wykorzystując pakiet francuskiego oprogramowania komputerowego Mithra. Algorytm tego programu oparty jest na zalecanej przez dyrektywę 49/2002/CE metodzie NMPB-96, służącej do obliczeń hałasu drogowego.

Obliczenia miały na celu ustalenie wpływu na poziom dźwięku (w długich okresach) przebiegu trasy drogi w stosunku do kierunku północnego. Drogi zlokalizowano w pobliżu dwóch miast – Łodzi i Montelimar (Francja). Wielkość tego wpływu określono jako różnicę pomiędzy warunkami rzeczywistymi korzystnymi a warunkami jednorodnymi propagacji hałasu. W analizowanych przykładach kierunek przebiegu trasy drogi zmieniano od  $0^\circ$  do  $360^\circ$  w stosunku do kierunku północnego, z krokiem równym  $20^\circ$ . Przyjęto, że odległość drogi od zabudowy wynosi 1200 m (odległość, dla której wpływy meteorologiczne przyjmują wielkości maksymalne – Lebiedowska, w przygotowaniu). W ten sposób uzyskano dla długich okre-

sów „różę wpływów warunków meteorologicznych” na poziom hałasu w funkcji wysokości punktu odbioru.

### Analiza akustyczna trasy drogi w pobliżu Łodzi

Obliczenia poziomu hałasu pochodzącego od hipotetycznej drogi wykonano, wykorzystując różę warunków korzystnych określoną dla pory dziennej (rys. 4), zgodnie z badaniami własnymi (Lebiedowska i in. 2001), a następnie

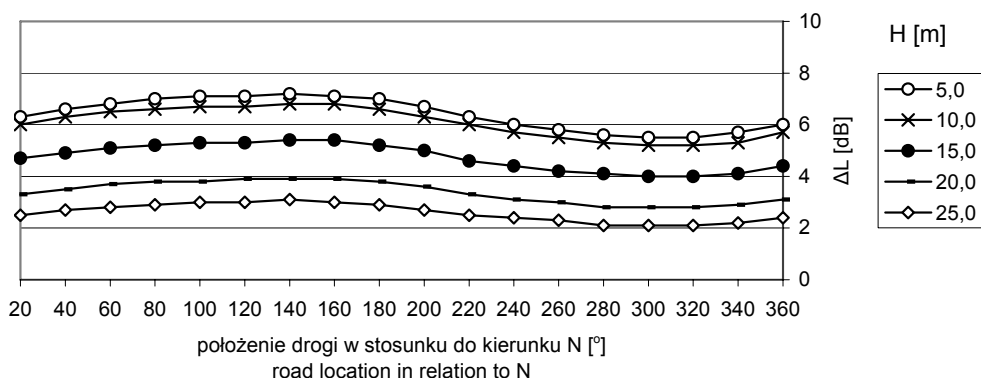


RYSUNEK 4. Róża pojawiania się warunków korzystnych ( $P$ ) dla propagacji dźwięku dla regionu łódzkiego

FIGURE 4. Rose of occurrence of conditions favourable ( $P$ ) for noise propagation for the Łódź region

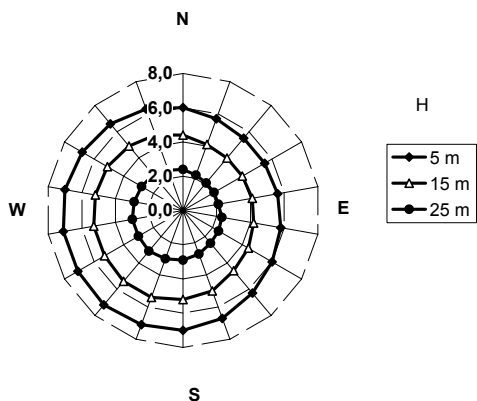
porównano je z poziomem hałasu określonym dla warunków jednorodnych w celu oszacowania wpływów rzeczywistych warunków meteorologicznych na poziom dźwięku w punktach obserwacji, umiejscowionych na kilku wysokościach (rys. 5). Na rysunku 6, jako efekt obliczeń, przedstawiono „różę wpływów warunków meteorologicznych” dla 2000 roku w regionie łódzkim.

Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych, zdecydowanie najmniej korzystne, z punktu widzenia klimatu akustycznego, jest wytyczanie tras komunikacyjnych w tym regionie o kierunku przebiegu pomiędzy  $70^\circ$  a  $170^\circ$  w stosunku do północy (tj. od strony północno-wschodniej miasta), bowiem maksimum wpływów meteorologicznych odczuwalne jest na kierunku od  $160^\circ$  do  $260^\circ$ . Maksymalne wpływy występują na wysokości drugiej i trzeciej kondygnacji i przekraczają wielkość 7 dB.



RYSUNEK 5. Wpływy meteorologiczne na poziom długotrwałego hałasu w funkcji położenia drogi w stosunku do północy dla regionu łódzkiego dla różnych położen (wysokości) punktu odbioru

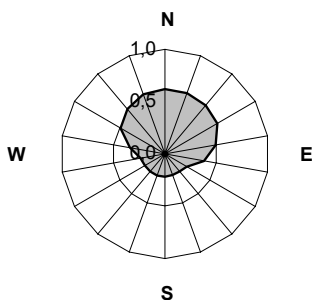
FIGURE 5. Meteorological influences on long-term noise as a function of the road location in relation to the North for the Łódź region for various positions (height) of the receiver point



RYSUNEK 6. Róża wpływów meteorologicznych [dB] dla regionu łódzkiego  
 FIGURE 6. Rose of meteorological influences [dB] for the Łódź region

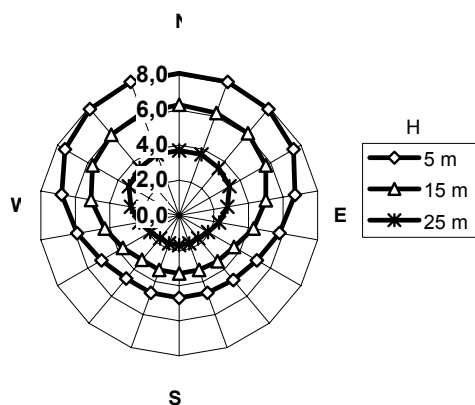
### Analiza akustyczna wytyczania trasy drogi w pobliżu miasta Montelimar (Francja)

Analogiczne obliczenia poziomu hałasu przeprowadzono dla miasta Montelimar w południowej Francji (dolina Rodanu). Wykorzystano w tym przypadku różę warunków korzystnych (z okresu 30 lat) określoną dla pory dziennej, zgodnie z danymi zawartymi w bibliotece oprogramowania Mithra (rys. 7). Następnie porównano je z poziomami hałasu okre-



RYSUNEK 7. Róża pojawiania się warunków korzystnych dla propagacji dźwięku ( $P$ ) dla okolic miasta Montelimar  
 FIGURE 7. Rose of occurrence of conditions favourable for noise propagation ( $P$ ) for the Montelimar region

ślonymi dla warunków jednorodnych w celu oszacowania wpływów rzeczywistych warunków meteorologicznych na poziom dźwięku w punktach obserwacji, umiejscowionych na kilku wysokościach. Na rysunku 8, jako efekt obliczeń, przedstawiono różę wpływów warunków meteorologicznych w tym rejonie.



RYSUNEK 8. Róża pojawiania się warunków korzystnych [dB] dla propagacji dźwięku dla okolic miasta Montelimar  
 FIGURE 8. Rose of meteorological influences [dB] for the Montelimar region

Zdecydowanie najmniej korzystne, z punktu widzenia klimatu akustycznego, jest wytyczanie tras komunikacyjnych w regionie miasta Montelimar po jego stronie południowej, bowiem maksimum wpływów meteorologicznych odczuwalne jest w tym rejonie na kierunku od  $340^\circ$  do  $40^\circ$ . Maksymalne wpływy, występujące na poziomie drugiej i trzeciej kondygnacji, przekraczają wartość 8 dB.

### Podsumowanie

Zasadniczym sposobem unikania zagrożeń wynikających z eksploatacji dróg i autostrad jest przede wszystkim wyty-

czanie ich tras odpowiednio daleko od terenów mieszkalnych. Konieczne należy unikać trasowania dróg międzynarodowych przez miasta i osiedla. W przypadku konieczności zbliżenia trasy ruchliwej drogi do terenów zabudowanych należy brać również pod uwagę czynniki meteorologiczne, charakterystyczne dla danego terenu, występujące w długim okresie. Wytyczenie drogi na podstawie analizy zawartej w „różny warunków korzystnych” dla propagacji hałasu umożliwia takie jej przeprowadzenie, które pozwala zminimalizować jej negatywne oddziaływanie akustyczne na najbliższą zabudowę w długich okresach.

## Literatura

- Bruit des infrastructures routières méthode de calcul incluant les effets météorologiques, 1997. Ed. D. Soulage. CERTU, CSTB, LCPC, SETRA,
- LAPORTE J.C. 1994: Approche probabiliste de la propagation du bruit en milieu extérieur. Etude bibliographique. *Bull. Liason Labo. P. et Ch* 190: 75–95.
- LEBIEDOWSKA B. (w przygotowaniu). Parametry propagacji hałasu w terenach otwartych. Praca habilitacyjna.
- LEBIEDOWSKA B., ZOUBOFF V., BRUNET Y., LAPORTE J.C. 1997: Metoda jakościowej oceny wpływu czynników meteorologicznych na rozprzestrzenianie się hałasu w terenie otwartym. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej* 787, *Budownictwo* 49: 16–25.
- LEBIEDOWSKA B., DEFRANCE J., RAPIN J.M. 2001: Calcul des roses d'occurrences météorologiques de long termes des conditions favorables a la propagation du son en Pologne. VIII Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka budowli w teorii i praktyce”: 348–355.
- PANOFSKY H.A., DUTTON J.A. 1984: Atmospheric turbulence – Models and methods for engineering applications. A Wiley-Interscience Publication, New York.
- ZOUBOFF V., BRUNET Y., SECHET E., BERTRAND J. 1994: Validation d'une méthode qualitative d'estimation de l'influence de la météorologie sur le bruit. *Journal de Physique* IV, *Colloque C5, supplément au journal de Physique* III, 4: C5 813–816.
- ZOUBOFF V., LAPORTE J.C., BRUNET Y. 1997: Prise en compte des conditions météorologiques dans la propagation du bruit. Approche pratique. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* 210: 105–119.

## Summary

**Influence of meteorological conditions for sound propagation on suburban areas.** Outdoor noise propagation, is influenced by the energy of the sound source as well as properties of the medium in which acoustic waves travel. Elements of component phenomena, popularly called meteorological phenomena, influence noise energy propagation in open area, shaping the air mass dynamic. Two case studies are offered: the city of Łódź (Poland) and Montelimar (France). The comparison shows that the influence of meteorological conditions on noise propagation may make it easier to design and take urban decisions concerning the location of noise-generating facilities.

### Author's address:

Barbara Lebiedowska  
Akademia Humanistyczna im. A. Gieysztor  
w Pułtusku  
Wydział Turystyki, Hotelarstwa  
i Promocji Środowiska  
ul. 17 Stycznia 56A, 06-400 Ciechanów  
Poland  
e-mail: barbara\_lebiedowska@yahoo.sr