

Janusz Bohatkiewicz

Modelowanie i ocena rozwiązań chroniących przed hałasem drogowym



Modelowanie i ocena rozwiązań
chroniących przed hałasem drogowym

Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Budownictwa i Architektury
ul. Nadbystrzycka 40
20-618 Lublin

Janusz Bohatkiewicz

Modelowanie i ocena rozwiązań chroniących przed hałasem drogowym



Politechnika Lubelska
Lublin 2017

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Jan Adamczyk, Centralny Instytut Ochrony Pracy –
Państwowy Instytut Badawczy

dr hab. inż. Andrzej Szarata, prof. Politechniki Krakowskiej

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2017

ISBN: 978-83-7947-297-0

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatorp.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 50 egz.

Spis treści

Streszczenie	9
Abstract	10
Wykaz skrótów i symboli	11
1. Wstęp	13
2. Cel, zakres i metody badań.....	19
3. Wpływ hałasu drogowego na zdrowie ludzi.....	21
3.1. Wskaźniki wpływu hałasu na zdrowie ludzi	21
3.1.1. Dokuczliwość hałasu	23
3.1.2. Zaburzenia snu	26
3.1.3. Efekty sercowo-naczyniowe	29
3.1.4. Upośledzenie funkcji poznawczych	32
3.2. Wartości graniczne i dopuszczalne hałasu drogowego.....	32
3.3. Ocena wpływu hałasu na zdrowie ludzi	37
3.3.1. Założenia WHO.....	37
3.3.2. Dyrektywa END.....	39
3.3.3. Rozwiązania krajowe	41
4. Synteza dotychczasowych prac w zakresie omawianej problematyki	45
4.1. Stopień zagrożenia hałasem i wartości dopuszczalne hałasu.....	45
4.2. Badania i opracowania środowiskowe w ochronie środowiska przed hałasem drogowym.....	48
4.3. Rozwiązania i środki zabezpieczające przed hałasem drogowym.....	62
4.4. Decyzje związane z wyborem rozwiązań i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym.....	71
5. Ocena i charakterystyka rozwiązań drogowych oraz środków zabezpieczających przed hałasem drogowym	75
5.1. Unikanie emisji hałasu	85
5.2. Zmniejszenie hałasu w strefie emisji.....	92
5.3. Przeniesienie hałasu ze strefy emisji	123
5.4. Rozwiązania i środki ochrony w strefie imisji hałasu z chronionymi obiektami	126
6. Modelowanie decyzji dotyczących wyboru rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym	131
6.1. Uwarunkowania i kryteria w planowaniu i projektowaniu dróg oraz w wyborze metod i środków ochrony przed hałasem drogowym.....	132
6.1.1. Uwarunkowania i kryteria w projektowaniu i budowie dróg.....	133
6.1.2. Kryteria i analizy rekomendowane przez WHO.....	135
6.1.3. Kryteria i analizy stosowane w krajowych programach ochrony środowiska przed hałasem i opracowaniach środowiskowych.....	136
6.1.4. Analizy CBA i CEA.....	140

Spis treści

6.1.5. Analiza CEA.....	143
6.1.6. Zintegrowana efektywność ekonomiczna, ekologiczna i społeczna ..	145
6.1.7. Oszacowanie efektywności zintegrowanej	151
6.2. Analityczny proces hierarchiczny AHP – założenia ogólne do modelu decyzyjnego w zakresie wyboru rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem.....	155
6.3. Schemat postępowania w budowie modelu wyboru rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym	155
6.3.1. Identyfikacja i definiowanie problemu oraz celu decyzyjnego – etap 1	157
6.3.2. Identyfikacja i wskazanie wariantów rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających – etap 2.....	162
6.3.3. Ocena i wybór wariantów z uwagi na uwarunkowania ekonomiczne, ekologiczne i społeczne oraz definiowanie kryteriów do modelu decyzyjnego – etap 3	163
6.3.4. Analiza i ocena wariantów w modelu decyzyjnym – etap 4.....	170
6.3.5. Wybór wariantu – etap 5.....	183
6.3.6. Wdrożenie wariantu i jego ocena – etap 6.....	183
6.4. Zalety i wady modelu	184
7. Przykład zastosowania modelu decyzyjnego wyboru rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem.....	185
7.1. Analiza w zakresie identyfikacji i definiowania problemu oraz celu decyzyjnego – etap 1.....	185
7.2. Identyfikacja i wskazanie wariantów rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających – etap 2	194
7.3. Ocena i wybór wariantów z uwagi na uwarunkowania ekonomiczne, ekologiczne i społeczne oraz definiowanie kryteriów do modelu decyzyjnego (wybór wariantów rozwiązań) – etap 3	196
7.4. Analiza i ocena wybranych wariantów rozwiązań i środków zabezpieczających przed hałasem – etap 4	211
7.4.1. Budowa modelu decyzyjnego.....	211
7.4.2. Macierze porównań parami i ocena wariantów.....	215
7.4.3. Analiza wrażliwości modelu.....	225
7.5. Wybór wariantu rozwiązań i środków zabezpieczających przed hałasem.....	228
8. Podsumowanie	229
9. Literatura.....	233

Table of contents

Summary	9
Abstract	10
List of abbreviations and symbols	11
1. Introduction.....	13
2. Purpose, scope and test methods.....	19
3. The impact of road noise on human health.....	21
3.1. Indicators of the effects of noise on human health.....	21
3.1.1. <i>Noise nuisance</i>	23
3.1.2. <i>Sleep disorders</i>	26
3.1.3. <i>Cardiovascular effects</i>	29
3.1.4. <i>Cognitive function impairment</i>	32
3.2. Limit and admissible values for road noise.....	32
3.3. Assessment of noise effect on human health.....	37
3.3.1. <i>WHO assumptions</i>	37
3.3.2. <i>END Directive</i>	39
3.3.3. <i>National solutions</i>	41
4. Synthesis of past actions taken in the area of discussed problems.....	45
4.1. Extent of noise hazard and noise limit values.....	45
4.2. Environmental studies and studies in environmental protection against road noise.....	48
4.3. Solutions and protective measures against road noise.....	62
4.4. Decisions related to road noise protection solutions and measures.....	71
5. Assessment and characterization of road noise protection solutions and measures.....	75
5.1. Avoiding noise emission.....	85
5.2. Reducing noise in the emission zone.....	92
5.3. Noise transfer from the emission zone.....	123
5.4. Solutions and protective measures in the noise immission zone with protected objects.....	126
6. Modeling decisions concerning the selection of road solutions and protecting measures against road noise.....	131
6.1. Conditions and criteria in road planning and design and in the selection of methods and measures to protect against road noise.....	132
6.1.1. <i>Conditions and criteria for road design and construction</i>	133
6.1.2. <i>Criteria and analyses recommended by WHO</i>	135
6.1.3. <i>Criteria and analyses used in national environmental programs for protection against noise, and environmental studies</i>	136
6.1.4. <i>CBA and CEA analyses</i>	140

Table of contents

6.1.5. CEA analysis.....	143
6.1.6. Integrated economic, environmental and social efficiency.....	145
6.1.7. Estimation of integrated efficiency.....	151
6.2. Analytical Hierarchical Process AHP – general assumptions for the decision-making model for the selection of road solutions and measures protecting against noise.....	155
6.3. Scheme of proceedings in the construction of a model for selection of road solutions and measures protecting against road noise.....	155
6.3.1. Identifying and defining the problem and the decision-making objective – Stage 1	157
6.3.2. Identification and indication of options for road solutions and protecting measures – Stage 2.....	162
6.3.3. Assessment and selection of options in view of economic, environmental and social conditions, and definition of criteria for decision-making model – Stage 3.....	163
6.3.4. Analysis and evaluation of options in the decision-making model – Stage 4.....	170
6.3.5. Option selection – Stage 5.....	183
6.3.6. Introducing the variant and its assessment – Stage 6.....	183
6.4. Advantages and disadvantages of the model.....	184
7. Examples of decision-making model application for selection of road solutions and measures protecting against noise.....	185
7.1. Analysis of problem identification and problem definition, and decision-making objective – Stage 1.....	185
7.2. Identification and indication of options for road solutions and protection measures – Stage 2.....	194
7.3. Assessment and selection of options on the basis of economic, ecological and social conditions, and defining criteria for the decision-making model (selection of solution options) – Stage 3.....	196
7.4. Analysis and evaluation of selected options for solutions and measures of protection against noise – Stage 4.....	211
7.4.1. Construction of decision-making model.	211
7.4.2. Matrices of pair comparisons and option assessment.....	215
7.4.3. Analysis of model sensitivities.....	215
7.5. Selecting the option of solutions and measures protecting against noise.....	225
8. Summary.....	229
9. References.....	233

Streszczenie

Monografia pt. „Modelowanie i ocena rozwiązań chroniących przed hałasem drogowym” związana jest z opracowaniami środowiskowymi, jakie wykonywane są w drogownictwie. Mają one bardzo duże znaczenie z uwagi na decyzje, jakie są podejmowane w zakresie często kosztownych rozwiązań ochrony przed hałasem. Dotychczasowy sposób podejmowania decyzji w tym zakresie jest niepełny i często powoduje znaczące koszty budowy i problemy w okresie eksploatacji. W większości przypadków w wyborze tych rozwiązań nie są uwzględniane uwarunkowania ekonomiczne, ekologiczne i społeczne jakie powinny towarzyszyć w podejmowaniu tych skomplikowanych decyzji.

Propozycja systemowego podejścia do wyboru rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem zawarta w monografii jest wynikiem wielu badań, analiz, ocen a także wykonanych przez autora rzeczywistych opracowań i obserwacji późniejszych efektów często opartych na wynikach analiz porealizacyjnych.

W nowym podejściu do wyboru rozwiązań ograniczających hałas drogowy zaproponowano schemat działania polegający na analizie doboru rozwiązań, które obejmują strefę emisji i imisji hałasu. W ramach tego schematu proponowane są rozwiązania z zakresu unikania emisji, jej zmniejszanie lub przeniesienie oraz związane z bezpośrednią ochroną obiektów mieszkalnych. W ramach przeglądu możliwych do stosowania rozwiązań i środków oceniono ich przydatność oraz stopień redukcji hałasu a także spełnienie dodatkowych uwarunkowań. Wybór najlepszych z nich w pierwszej kolejności oparto o możliwość redukcji wpływu na zdrowie człowieka przy wykorzystaniu wskaźników opisujących ten wpływ oraz na analizach ekonomicznych. Najlepsze warianty w dalszym procesie ich wyboru podlegają analizie w modelu decyzyjnym. Do modelowania decyzji użyto metody *AHP* (hierarchicznego procesu decyzyjnego) umożliwiającej wprowadzenie szeregu dodatkowych kryteriów: społecznych, środowiskowych i technicznych.

W monografii szczegółowo opisano etapy tworzenia modelu decyzyjnego i modelowania decyzji, które przedstawiono także na realnym przykładzie z wybranego programu ochrony środowiska przed hałasem dla odcinka drogi.

Abstract

The monograph entitled „Modelling and Assessment of Road Noise Protection Solutions” is related to the environmental studies that are carried out in road construction field. They present great importance because of the decisions that are made with regard to often expensive noise protection solutions. The current decision-making method in this area is incomplete, and often results in significant construction costs, as well as problems during the service life. In most cases, the selection of these solutions does not take into account the economic, ecological and social conditions that should accompany the decision-making process.

The proposal for a systemic approach to the selection of road solutions and noise protection measures contained in the monograph is the result of many studies, analyses and evaluations, as well as actual evaluation and observations of subsequent effects made by the author, often based on the results of post-execution analyses.

A scheme of actions which consists of the analysis of solution selection – including the noise emission and immission zone – was proposed in this new approach to the selection of road noise reduction solutions. As a part of this scheme, solutions are proposed for avoiding, reducing or relocating emissions and for direct protection of residential buildings. The review of possible solutions and measures assessed their usefulness, the extent of noise reduction, as well as the fulfillment of additional conditions. The selection of the best ones was first of all based on the possibility to reduce the impact on human health with the use of indicators describing this impact and economic analyses. The best options are further analyzed in the decision-making model. For the modeling of decisions, the *AHP* (hierarchical decision-making process) method was used, which allowed the introduction of a series of additional social, environmental, and technical criteria.

The monograph provides detailed description of decision-making model and modeling of decisions which are also presented on the basis of an actual example from a selected environmental noise protection program for a road section.

Wykaz skrótów i symboli

Skróty i symbole związane z wpływem hałasu drogowego na zdrowie ludzi:

D	– dokuczliwość hałasu – procent osób dotkniętych dokuczliwym hałasem
NZS	– niski stopień zaburzeń snu – procent osób dotkniętych niskim stopniem zaburzeń snu
WD	– bardzo wysoka (skrajna) dokuczliwość hałasu – procent osób dotkniętych bardzo wysoką dokuczliwością hałasu
WZS	– wysoki stopień zaburzeń snu – procent osób dotkniętych wysokimi zaburzeniami snu
ZS	– zaburzenia snu – procent osób dotkniętych zaburzeniami snu
$DALY$	– liczba lat życia skorygowana niesprawnością (<i>Disability Adjusted Live Year</i>)
L_{AeqD}	– równoważny poziom hałasu dla pory dnia (przedział czasu od godz. 6 ⁰⁰ do godz. 22 ⁰⁰) [dB]
L_{AeqN}	– równoważny poziom hałasu dla pory nocy (przedział czasu od godz. 22 ⁰⁰ do godz. 6 ⁰⁰) [dB]
$L_{DWN} (L_{den})$	– długookresowy średni poziom dźwięku A wyrażony w decybelach (dB), wyznaczony w ciągu wszystkich dób w roku (w Polsce z uwzględnieniem pory dnia rozumianej jako przedział czasu od godz. 6 ⁰⁰ do godz. 18 ⁰⁰ , pory wieczoru rozumianej jako przedział czasu od godz. 18 ⁰⁰ do godz. 22 ⁰⁰ oraz pory nocy rozumianej jako przedział czasu od godz. 22 ⁰⁰ do godz. 6 ⁰⁰)
$L_N (L_{night})$	– długookresowy średni poziom dźwięku A wyrażony w decybelach (dB), wyznaczony w ciągu wszystkich pór nocy w roku (w Polsce przedział czasu od godz. 22 ⁰⁰ do godz. 6 ⁰⁰)
YLD	– liczba lat życia z niepełnosprawnością (<i>Years Lived with Disability</i>)
YLL	– utracona liczba lat życia (<i>Years of Life Lost</i>)

Skróty i symbole związane z opracowaniami środowiskowymi oraz analizami dotyczącymi wyboru rozwiązań i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym:

AHP	– hierarchiczny proces decyzyjny (<i>Analytic Hierarchy Process</i>)
$CALM$	– Strategiczny Plan Badań Hałasu Unii Europejskiej (<i>Community Noise Research Strategy Plan</i>)
C/B	– koszty/korzyści (<i>Cost/Benefit</i>)
CBA	– analiza kosztów i zysków (<i>Cost-Benefit Analysis</i>)
CEA	– analiza kosztów – efektywności (<i>Cost-Effectiveness Analysis</i>)
CER	– wskaźnik efektywności kosztowej (<i>Cost-Effectiveness Ratio</i>)
$CEDR$	– Konferencja Europejskich Dyrektorów Dróg (<i>Conference of European Directors of Roads</i>)

Wykaz skrótów i symboli

CR	– współczynnik zgodności macierzy porównań parami (<i>Consistency Ratio</i>)
GIS	– Geograficzne Systemy Informacyjne (<i>Geografic Information System</i>)
ITS	– inteligentne systemy transportowe (<i>Intelligent Transportation Systems</i>)
MCDA	– wielokryterialna analiza porównawcza (<i>Multiple-Criteria Decision Analysis</i>)
POSPH	– program ochrony środowiska przed hałasem
POŚ	– ustawa Prawo ochrony środowiska
SEL_{in}	– poziom ekspozycyjny dźwięku (poziom ciśnienia akustycznego w ciągu 1 s) wewnątrz pomieszczenia mieszkalnego [dB]

Skróty i symbole inne:

EEA	– European Environment Agency
END	– Environmental Noise Directive (EU 2002/49)
IBDiM	– Instytut Badawczy Dróg i Mostów
ITB	– Instytut Techniki Budowlanej
LCA	– ocena cyklu życia (<i>Life Cycle Assessment</i>)
LCC	– koszty cyklu życia (<i>Life Cycle Costing</i>)
e-LCA	– środowiskowe koszty cyklu życia (<i>Environmental Life Cycle Costing</i>)
P+R	– parkuj i jedź (<i>Park and Ride</i>)
VMS	– znaki zmiennej treści (<i>Variable Message Signs</i>)
WHO	– Światowa Organizacja Zdrowia (<i>World Health Organization</i>)

1. Wstęp

Wraz z rozwojem sieci dróg i zwiększaniem się liczby pojazdów w Polsce po II wojnie światowej zaczęto dostrzegać coraz większy problem, jakim jest oddziaływanie ruchu drogowego i obiektów drogowych na środowisko. Oddziaływanie dróg i ruchu drogowego związane jest przede wszystkim z:

- hałasem drogowym,
- zanieczyszczeniami powietrza,
- drganiami i wibracjami,
- wpływem na świat roślinny i zwierzęcy,
- wpływem na wody,
- wpływem na grunty rolne i leśne,
- zmianami krajobrazu (w tym efekty estetyczne),
- wpływem na dobra materialne,
- wpływem na dobra kultury, zabytki, obiekty archeologiczne itp.

Hałas drogowy jest jednym z najniekorzystniejszych oddziaływań związanym z ruchem pojazdów. Na wielkość powstającego hałasu drogowego ma wpływ wiele czynników związanych z pojazdem, drogą i otoczeniem. Wśród różnych rodzajów hałasu drogowy jest jednym z dotkliwszych dla ludzi i ma on znaczący wpływ na ich zdrowie. Wraz z innymi rodzajami hałasu stanowi klimat akustyczny. W ocenach klimatu akustycznego stosowane są wskaźniki, które w większości odnoszą się do wpływu na zdrowie ludzi. Najczęściej używanym wskaźnikiem jest równoważny poziom dźwięku (L_{Aeq}) mierzony w decybelach (dB), który stanowi poziom uśrednionego natężenia dźwięku w określonym przedziale czasowym. Definiowany on jest jako stały poziom dźwięku, który działając przez taki sam czas, jak analizowany dźwięk o zmiennym poziomie, niesie za sobą taką samą energię i takie samo ryzyko wpływu na zdrowie człowieka [101].

W większości wykonywanych analiz dotyczących hałasu drogowego w procesie inwestycyjnym w drogownictwie wykorzystywany jest równoważny poziom dźwięku oddzielnie dla pory dnia i pory nocy oraz określonej doby w roku. W przypadku działań długoterminowych dotyczących ochrony przed hałasem w analizach dotyczących map akustycznych i programów ochrony środowiska przed hałasem wykorzystywane są wskaźniki związane z równoważnym poziomem hałasu dla trzech pór (dnia, wieczoru i nocy) dla wszystkich dób w roku. Poza tymi wartościami na podstawie badań wpływu hałasu na człowieka zostały także określone inne wskaźniki służące ocenie stanu klimatu akustycznego i oddziaływania na ludzi. Większość wyników badań wskazało, że wartościami granicznymi dla równoważnego poziomu hałasu dla ludzi są wartości 55 dB dla okresu całej doby oraz 50 dB dla pory nocy [47, 77]. Niezależnie od tych wartości większość krajów określiła swoje wartości dopuszczalne równoważnego poziomu hałasu uzależniając je od okresu analizy czy też funkcji terenu. W większości dla tych warto-

ści wykonywane są analizy związane z możliwością zastosowania rozwiązań i środków ochrony przed hałasem w przypadku, jeśli wartości te zostaną przekroczone.

Projektowanie i eksploatacja dróg oraz elementów drogowych jest obecnie zadaniem wymagającym i bardzo kosztownym. Jednym z istotniejszych kryteriów w projektowaniu oraz utrzymaniu dróg ostatnich lat jest ochrona środowiska. W pojęciu ochrona środowiska, zwłaszcza w przypadku budownictwa komunikacyjnego kryje się bardzo wiele zagadnień, co powoduje, że ochrona środowiska w budownictwie komunikacyjnym staje się interdyscyplinarną dziedziną wymagającą zarówno interdyscyplinarnej wiedzy, jak i podejścia systemowego. Bez takiego podejścia podejmowane decyzje obarczone są bardzo dużym ryzykiem nietrafionych rozwiązań, których błędy będą kosztowały kilkakrotnie więcej w okresie eksploatacji. Bardzo szybki rozwój i nadrabianie wieloletnich zaległości w infrastrukturze drogowej spowodowały, że niezbędne jest podejście systemowe do spraw ochrony środowiska w budownictwie komunikacyjnym. W wielu sytuacjach podejście to zastąpiło działanie doraźne, zorientowane na szybkie przeprowadzenie postępowań inwestycyjnych bez względu na inne skutki – ekonomiczne i społeczne. Nowe rozwiązania stosowane w budownictwie komunikacyjnym oparte jedynie na zbiorze przepisów ochrony środowiska, przepisów technicznych w wielu miejscach zawodzą. Pozornie odległa idea zrównoważonego rozwoju od projektowania infrastruktury drogowej staje się wyzwaniem dla drogownictwa. Wprowadzenia zasad zrównoważonego rozwoju uwzględniających efekty ekonomiczne, ekologiczne i społeczne może wymagać odpowiednich rozwiązań w drogownictwie. Monografia ma na celu wskazanie, że dobre rozwiązanie, to takie, które uwzględnia wszystkie elementy zrównoważonego rozwoju a decyzja podejmowana przy wyborze rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających głównie ludzi przed hałasem drogowym powinna być szczegółowo analizowana. Przedmiotem badań i analiz w monografii są przede wszystkim rozwiązania powstające w ramach wieloletnich programów ochrony przed hałasem, jakie powstają cyklicznie i mają już swoją historię nie tylko w Polsce, ale i również w krajach Unii Europejskiej. W programach tych można obecnie zauważyć, że decyzje związane są głównie z kluczowymi inwestycjami, gdzie rozwiązania i urządzenia ochrony środowiska przyjmowane są często bez dodatkowych analiz uwzględniających aspekty społeczne i ekonomiczne. Do 31 grudnia 2017 r. powinna zakończyć się III runda wykonywania map akustycznych. Po tym terminie rozpoczną się kolejne działania polegające na przygotowaniu programów ochrony środowiska przed hałasem dla dróg i terenów objętych dla których istnieje taki obowiązek prawny wynikający z przepisów krajowych i europejskich. Ponadto w ramach rozbudowy i przebudowy sieci drogowej wykonywane są poza lub w powiązaniu z dokumentacją projektową opracowania środowiskowe, które stanowią podstawę do wydawanych pozwoleń na realizację inwestycji drogowych. Zawarte w monografii badania i analizy mogą również być wykorzystywane w tych opracowaniach.

Polska jako jeden z nielicznych krajów Unii Europejskiej w wielu przypadkach nie stosuje w analizach środowiskowych formalnie określonych kryteriów ekonomicznych

związanych z doбором urządzeń ochrony środowiska. W większości przypadków obowiązują zasady „zanieczyszczający płaci” oraz „zasada przezorności”, które bez dodatkowych kryteriów (w tym ekonomicznych) powodują znaczące problemy ekonomiczne i problem polegający na zbyt powszechnym stosowaniu nie zawsze efektywnych ekranów akustycznych.

Ochrona przed hałasem drogowym jest jednym z podstawowych problemów, jakie spotyka się w praktyce inżynierskiej. Od prawidłowego sposobu zabezpieczenia przed hałasem drogowym zależy komfort życia mieszkańców wokół dróg. W niektórych przypadkach dużej wrażliwości środowiska przyrodniczego jego stan zachowania, głównie w przypadku ptaków zagadnienia ochrony przed hałasem drogowym są jeszcze bardziej skomplikowane niż w przypadku ludzi [248, 249] (również w zakresie prognoz, metod pomiarowych, stosowanych wskaźników oceny). Dobór metod i sposobów ochrony przed hałasem zależy od bardzo wielu czynników. Metody te będą inne dla dróg już istniejących z ukształtowanym otoczeniem, gdzie wykonywane są przebudowy i remonty, natomiast inne będą metody dla dróg w nowych przebiegach. Takie rozróżnienie dróg (istniejące i projektowane) powinno bezpośrednio rzutować na procedury doboru rozwiązań drogowych oraz metod i środków ochrony przed hałasem.

W monografii poruszone zostały zagadnienia dotyczące: ochrony zdrowia i wpływu hałasu drogowego na zdrowie ludzi, budownictwa drogowego, rozwiązań drogowych związanych z ochroną środowiska a także urządzeń zabezpieczających przed hałasem, procedur postępowania z hałasem drogowym w procesie inwestycyjnym i opracowaniach środowiskowych towarzyszącym temu procesowi oraz ocenie i podejmowaniu decyzji w zakresie przyjmowania do zastosowania rozwiązań chroniących przed hałasem drogowym.

W rozdziale 2 przedstawiono cel i zakres oraz metody badań.

W rozdziale 3 podano najważniejsze informacje dotyczące wpływu hałasu na zdrowie ludzi. W większości przypadków bazowano na wynikach badań WHO i innych materiałach a także obowiązujących aktach prawnych. Analiza tych materiałów umożliwiła określenie poza obowiązującymi wartościami dopuszczalnymi hałasu również wskaźniki, jakie powinny być stosowane w analizach wpływu hałasu drogowego na człowieka, które do tej pory praktycznie nie były stosowane. Wskaźniki te zostały użyte w dalszej części monografii w badaniach nad możliwością ich zastosowania do praktycznej oceny rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających.

W rozdziale 4 przedstawiono syntezę związaną ze wszystkimi wymienionymi zagadnieniami opisywanymi w ramach monografii. Ze względu na bardzo szeroki zakres poruszanych zagadnień syntezę ograniczono do najważniejszych elementów i materiałów istotnych z punktu widzenia drogownictwa oraz ochrony przed hałasem drogowym.

W początkowej części rozdziału 5 przedstawiono dotychczas stosowane podejście do metod ochrony środowiska przed hałasem, które w większości przypadków związane

jest z ekranami akustycznymi. Omówiono także przyczyny takiego podejścia. Scharakteryzowano trzy strefy, gdzie mogą być stosowane rozwiązania i środki zabezpieczające przed hałasem drogowym, tj.: strefa emisji hałasu, strefa imisji z chronionym terenem i obiektami oraz chroniony obiekt. W rozdziale tym jako podstawowy element, który został wykorzystany w kolejnych rozdziałach wprowadzono schemat zalecanego postępowania w planowaniu i projektowaniu rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym. Schemat ten obejmuje kolejne cztery etapy postępowania, jakie powinno się analizować przy doborze rozwiązań i środków ochrony przed hałasem drogowym, czyli: unikanie emisji hałasu, zmniejszenie hałasu w strefie emisji, przeniesienie hałasu ze strefy emisji oraz rozwiązania i środki ochrony w strefie imisji hałasu z chronionymi obiektami. Zachowanie kolejności analiz stanowi podejście systemowe, gdzie kolejno wykluczane bądź wprowadzane mogą być kolejne rozwiązania. Dla każdego z etapów podano także opis możliwych rozwiązań i środków ochrony przed hałasem wraz z ich wartościami redukcji hałasu. Dodatkowo dla każdego z tych rozwiązań i środków podano tabelaryczne zestawienia z charakterystykami rozwiązań w zakresie danego etapu analiz wraz z oceną stopnia ich wpływu na wybrane uwarunkowania (ekonomiczne, społeczne, środowiskowe i techniczne).

We wprowadzeniu do kolejnego rozdziału 6 związanego z procesem podejmowania decyzji dotyczących rozwiązań i środków ochrony przed hałasem podano uwarunkowania i kryteria stosowane w projektowaniu dróg, które zdaniem autora powinny również być stosowane w planowaniu i projektowaniu oraz wyborze rozwiązań i środków chroniących przed hałasem drogowym. W dalszej części tego rozdziału przytoczono zalecenia WHO, które nie są związane z wpływem hałasu na ludzi. Dotyczą one przede wszystkim analiz kosztów i korzyści stosowanych rozwiązań i środków chroniących przed hałasem. Zalecenia te mają jednak charakter głównie opisowy i aby możliwe stało się zastosowanie praktyczne tych analiz dokonano przeglądu stosowanych kryteriów i analiz stosowanych w już wykonanych krajowych *POSPH*. Dodatkowo uwzględniono zalecenia jakie są rekomendowane przy podejmowaniu decyzji o wyborze rozwiązań i środków chroniących przed hałasem drogowym przez ekspertów *CEDR* – analizy *CBA* i *CEA*. Zdaniem autora uwzględnienie zasad związanych ze zrównoważonym rozwojem w uwarunkowaniach i kryteriach powinno dawać najlepsze rozwiązania i środki zabezpieczające przed hałasem – wcześniejszy przegląd w tym rozdziale wskazał, że zalecane uwarunkowania i kryteria nie spełniają wszystkich zasad zrównoważonego rozwoju. Dlatego do sformułowania ostatecznych kryteriów w końcowej części rozdziału użyto pojęcia zintegrowanej efektywności ekologicznej, społecznej i technicznej. W efekcie do dalszych analiz wskazano sposób analizy kosztów-korzyści (*CBA*) oraz efektywności ekonomicznej (*CEA*) dla rozwiązań i środków ochrony przed hałasem drogowym, który wykorzystano w modelu decyzyjnym (w kolejnym rozdziale). W rozdziale tym zebrano także wszystkie opisane informacje w poprzednich rozdziałach na temat metod ochrony przed hałasem, kryteriów ich wyboru, metod oceny oraz z punktu widze-

nia możliwości ich wykorzystania w opracowaniach środowiskowych. Zestawienie tych informacji wykonano w ramach przyjętych kryteriów i podkryteriów jakie niezbędne były w budowie modelu decyzyjnego dotyczącego wyboru rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym. Schemat postępowania jaki założono przy podejmowaniu decyzji zawiera kilka etapów. W ramach tych etapów możliwy jest wybór dwustopniowy rozwiązań – pierwszy stopień to wybór rozwiązań na podstawie kryteriów zdrowotnych oraz ekonomicznych natomiast drugi stopień dotyczy kryteriów i podkryteriów społecznych, środowiskowych i technicznych. Po ustaleniu schematu postępowania w dalszych częściach tego rozdziału wprowadzono szczegółowy opis zastosowania metody *AHP* oraz przedstawiono poszczególne etapy budowy struktury hierarchicznej modelu, identyfikacji celu decyzyjnego, wprowadzenia kryteriów i podkryteriów, porównań parami oraz oceny i wyboru wariantów. Każdy etap tworzenia modelu decyzyjnego ma również swoje odzwierciedlenie w przykładzie obliczeniowym zawartym w rozdziale 7. Przykład ten został oparty na realnych wynikach jednego z programów ochrony środowiska przed hałasem zrealizowanych przez autora. Przykład wskazał jednoznacznie wpływ wybranych kryteriów na rozwiązanie, które związane było ze zmianami organizacji ruchu na odcinku drogi eliminując tym samym ewentualną budowę ekranów akustycznych.

Na zakończenie podsumowano w rozdziale 8 najważniejsze kierunki dalszych badań i analiz oraz podano najważniejsze wnioski. W rozdziale 9 zestawiono spis literatury.

2. Cel, zakres i metody badań

Projektowanie i eksploatacja dróg oraz elementów drogowych jest obecnie zadaniem wymagającym spełnienia wielu kryteriów. Wymaga ono również odpowiednio podejmowanych decyzji ze względu choćby na znaczne koszty rozwiązań. Celem podstawowym monografii są oceny i modelowanie rozwiązań drogowych oraz zabezpieczeń, które mogą być stosowane w ochronie ludzi przed hałasem drogowym. W dotychczasowej praktyce stosowane są obecnie przede wszystkim ekrany akustyczne, które pomimo wielu zalet w wielu sytuacjach można zastąpić innymi rozwiązaniami, które mogą być równie skuteczne jak ekrany akustyczne a także ekonomicznie bardziej uzasadnione. W zależności od sytuacji, celu ochrony, dostępności terenu a również środków istotne stają się kryteria doboru urządzeń i środków chroniących przed hałasem. Bardzo ważnym w ocenie i wyborze tych rozwiązań jest także sposób prowadzenia analizy, która powinna odpowiadać na pytanie – jak należy analizować i modelować dostępne rozwiązania i środki chroniące przed hałasem drogowym? Odpowiedź na to pytanie powinna tworzyć logiczny (hierarchiczny) schemat postępowania, który wyklucza przypadkowy wybór przypadkowego rozwiązania. Dlatego też poza określeniem możliwości i modelowaniem rozwiązań i ich zakresem redukcji hałasu zaproponowano schemat wykonywania takich analiz – począwszy od jezdni (źródła emisji hałasu) do chronionego obiektu włącznie. Tak zaproponowany schemat powoduje, że w wyniku analizy, które rozwiązania są najlepsze z punktu widzenia ochrony przed hałasem drogowym otrzymywane są warianty tych rozwiązań. Warianty, które najlepiej chronią przed hałasem stają się w dalszej części rozwiązaniami preferowanymi. W obecnej praktyce o wyborze wariantów decydują różne kryteria często ze sobą niepowiązane. Dlatego też w ramach analiz usystematyzowano możliwe kryteria jakie mogą być uwzględniane w ocenie i wyborze wariantów. W tym zakresie bardzo ważnym stało się określenie najlepszego wariantu, czyli takiego, który jednocześnie będzie spełniał uwarunkowania ekonomiczne, środowiskowe i techniczne. Wprowadzenie trzech grup kryteriów umożliwiło uporządkowanie elementów, które je tworzą. Przykładowo w ramach oceny i wyboru ostatecznego rozwiązania duże znaczenie ma kryterium społeczne. Jednak ono samo powinno składać się z elementów (podkryteriów) oceny, które wspomagają proces podejmowania decyzji. W przypadku rozwiązań chroniących przed hałasem niezwykle istotna jest ich akceptacja społeczna. Dlatego w ramach kryteriów usystematyzowano podstawowe podkryteria, które są elementem oceny rozwiązania oraz modelu decyzyjnego i jednocześnie współtworzą ostateczną decyzję. Dla lepszego odwzorowania procesu podejmowania decyzji przy użyciu kryteriów i podkryteriów wykorzystano metodę wielokryterialną *AHP* dzięki której możliwe było zbudowanie modelu decyzyjnego, który odwzorowuje realny sposób w jaki powinna być podejmowana decyzja o ocenie i wyborze najlepszego wariantu rozwiązań i środków chroniących przed hałasem. Model ten testowano na realnym przykładzie fragmentu drogi, w otoczeniu której niezbędne

2. Cel, zakres i metody badań

jest zastosowanie określonych rozwiązań ochronnych. Pierwszy etap oceny rozwiązań wskazał na dwa warianty, które były bardzo zbliżone do siebie z punktu widzenia skuteczności ochrony mieszkańców. Były one jednak mocno zróżnicowane z punktu widzenia wskaźników ekonomicznych. Dzięki odpowiedniej strukturze kryteriów i ich elementów (podkryteriów) oraz budowie modelu decyzyjnego możliwe było poddanie ocenie tych wariantów i ostateczny wybór jednego z nich. W ramach oceny wykorzystano zespół specjalistów, którzy starali się wypracować wspólną ocenę rozwiązań. Umożliwiło to określenie jak powinna być prowadzona ocena wariantów rozwiązań. W zakres wykonanych badań i analiz, oceny rozwiązań, wskazania kryteriów oceny oraz budowy modelu hierarchicznego podejmowania decyzji wchodziły przede wszystkim:

- Badania i analizy dostępnych wskaźników i kryteriów dotyczących wpływu hałasu drogowego na zdrowie ludzi wraz z oceną możliwości ich zastosowania w programach ochrony środowiska przed hałasem i innych opracowaniach środowiskowych wykonywanych dla dróg.
- Analiza istniejących metod wyboru rozwiązań i środków ochrony przed hałasem komunikacyjnym z jednoczesnym określeniem stref, gdzie mogą być one stosowane.
- Wypracowanie schematu i jego badania obejmujące kolejność wykonywania analiz podczas wyboru rozwiązań i środków chroniących przed hałasem drogowym.
- Określenie oraz ocena wpływu na uwarunkowania ekonomiczne, społeczne, środowiskowe i techniczne pojedynczych rozwiązań i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym.
- Określenie, analiza i badania kryteriów wspomagających modelowanie decyzji dotyczących wyboru najlepszych rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem.
- Budowa modelu decyzyjnego przy wykorzystaniu metody hierarchicznego procesu decyzyjnego *AHP* wraz ze szczegółowymi analizami i obliczeniami dla rzeczywistego przykładu z programu ochrony środowiska przed hałasem.
- Określenie dalszych kierunków badań i analiz w zakresie modelowania wyboru rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym.

3. Wpływ hałasu drogowego na zdrowie ludzi

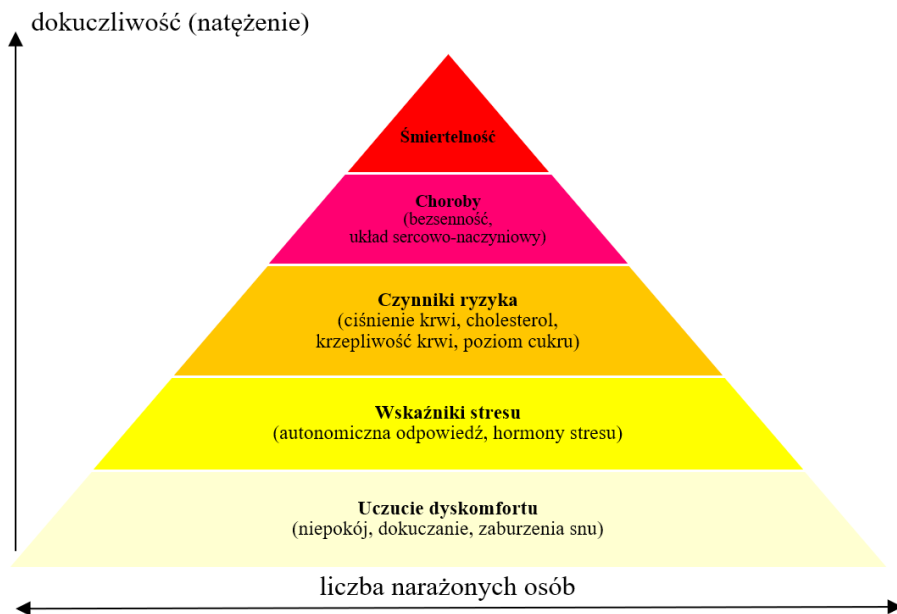
W dużej części dotychczasowe oceny wpływu hałasu drogowego na ludzi polegają na odnoszeniu się jedynie do wartości dopuszczalnych hałasu, które są wyznaczone przez Ministra Środowiska w porozumieniu z Ministrem Zdrowia [141, 184] (ich wartości zostaną podane w dalszej części tego rozdziału) bez dodatkowej oceny uzyskanych wartości poziomu hałasu. Takie podejście uniemożliwia pełną ocenę stanu faktycznego zagrożenia i jest jedynie działaniem technicznym wskazującym na obszar i wielkość zagrożeń. Badania prowadzone od wielu lat np. [10, 11, 41, 57, 79, 81, 90, 138, 164, 165, 177] określające efekty wpływu hałasu na człowieka spowodowały, że poza odniesieniem wartości L_{Aeq} , L_{DWN} i L_N do wartości dopuszczalnych niezbędne jest wprowadzenie metod, które umożliwią ocenę tych wartości z uwagi na zdrowie ludzi. W obowiązującej Dyrektywie *END* [47] dopuszcza się posługiwanie współczynnikami dawka-efekt (opisywane także jako narażenie-skutek) przy dokonywaniu oceny szkodliwych skutków. Jednocześnie poza określeniem wskaźników, jakie mogą być używane w ocenie nie podano konkretnych zasad i formuł, co przewidywane jest w zmianie Dyrektywy *END* [118].

3.1. Wskaźniki wpływu hałasu na zdrowie ludzi

Zgodnie z definicją WHO [79] zdrowie jest stanem kompletnego fizycznego, umysłowego i społecznego dobrobytu a nie tylko stanem braku choroby lub kalectwa. Hałas najczęściej definiowany jest jako niepożądany dźwięk. WHO określa, że hałas jest słyszalnym dźwiękiem, który wywołuje zaburzenie, upośledzenie lub ubytek zdrowia [79]. Praktycznie słowo „hałas” ma negatywne znaczenie, które kojarzone jest z niekorzystnym wpływem i oddziaływaniem powodującym rozdrażnienie, brak możliwości spokojnego funkcjonowania i odpoczynku a także niejednokrotnie obawę o stan zdrowia. Bardzo często zauważalne jest to podczas konsultacji społecznych, kiedy mieszkańcy wypowiadają się na temat np. blisko położonej zabudowy względem drogi. Niekorzystne oddziaływanie na człowieka powodowane hałasem drogowym kojarzone jest z negatywnymi uczuciami takimi jak: niepokój, niezadowolenie, przykrość, rozdrażnienie oraz dokuczliwość [77]. Dokuczliwość hałasu jest w tym przypadku używanym terminem do wyrażenia negatywnych odczuć takich jak niepokój, niezadowolenie, gniew, irytacja, utrapienie [77]. Niepożądane skutki hałasu pojawiają się wówczas wtedy, gdy oddziaływania powodują, że zaburzeniu ulegają zamierzone czynności danej osoby. Poziom dźwięku bodźca akustycznego, jego charakterystyka psychoakustyczna, czas pojawienia się, przebieg czasowy, jego zakres częstotliwości oraz zawartość informacji zwykle modyfikują reakcję [77]. Niezwykle istotny jest odpoczynek związany ze snem, ponieważ w jego trakcie następuje nieświadoma aktywacja autonomicznego układu nerwowego. W takiej sytuacji następuje bezpośrednia interakcja bez kontroli kory mózgowej. Stąd praktycznie we wszystkich przepisach i zaleceniach stosuje się obniżenie poziomu dźwięku w porze nocy w stosunku do pory dnia. W opisywanych powyżej sytuacjach dotyczą-

3. Wpływ hałasu drogowego na zdrowie ludzi

cych wpływ niekorzystnego oddziaływania hałasu na ludzi będzie związany z ich zdrowiem oraz spokojem (dobrostanem). Skutki, jakie może wywoływać hałas pokazano na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Wpływ hałasu na zdrowie i samopoczucie ludzi

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [10, 77]

W przypadku, jeśli część społeczeństwa będzie narażona na znaczny hałas zostanie to zauważone i spowoduje negatywne reakcje związane z tym zjawiskiem. U części tego społeczeństwa pojawią się reakcje stresowe (stres), zmiany w śnie i inne efekty biologiczne oraz biofizyczne. Mogą one włączyć czynniki ryzyka, takie jak wzrost ciśnienia krwi i inne objawy. Dla niewielkiej części społeczeństwa czynniki te mogą doprowadzić do objawów klinicznych takich jak bezsenność i choroby sercowo-naczyniowe, które w konsekwencji mogą nawet zwiększyć śmiertelność. Stąd wiele badań koncentruje się nad poszukiwaniem zależności pomiędzy hałasem i zdrowiem. Modele opisujące zależności pomiędzy hałasem i stresem, hałasem i wpływem na sen zostały zweryfikowane eksperymentalnie. Niektóre z nich zostały opisane ilościowo i dla niektórych z nich podano zależności. W tabl. 3.1 przedstawiono zebrane charakterystyczne wskaźniki hałasu ich wartości graniczne (progi) oraz ich wpływ na zdrowie ludzi [77].

3.1. Wskaźniki wpływu hałasu na zdrowie ludzi

Tabl. 3.1. Wpływ hałasu na zdrowie i samopoczucie człowieka

Efekt	Oceniany czynnik	Wskaźnik akustyczny ¹⁾	Wartość progowa efektu zdrowotnego ²⁾	Oddziaływanie w czasie
Dokuczliwość, uciążliwość	psychospołeczny, jakość życia	L_{DWN}	42	długotrwałe
Zaburzenie snu na podstawie własnej oceny	jakość życia, efekty somatyczne	L_N	42	długotrwałe
Uczenie się, pamięć	wydajność	L_{Aeq}	50	dolegliwe, długotrwałe
Hormony stresu	wskaźniki stresu	L_{max} , L_{Aeq}	brak danych	dolegliwe, długotrwałe
Sen (sen polisomnograficzny)	pobudzenie, ruchliwość, jakość snu	L_{max} , $L_{wewnątr}$	32	dolegliwe, długotrwałe
Zgłaszane przebudzenia	sen	$SEL_{wewnątr}$	53	dolegliwe
Własna ocena stanu zdrowia	dobrze samopoczucie, zdrowie kliniczne (objawy kliniczne)	L_{DWN}	50	długotrwałe
Nadciśnienie	fizjologia, zdrowie somatyczne	L_{DWN}	50	długotrwałe
Choroby niedokrwienne serca	zdrowie (objawy kliniczne)	L_{DWN}	60	długotrwałe

¹⁾ L_{DWN} and L_N są wskaźnikami używanymi w tym przypadku w środowisku (na zewnątrz budynków). L_{max} mogą być wskazywane dla wewnątrz lub na zewnątrz obiektów.

²⁾ Poziom, powyżej którego zaczynają występować efekty lub zaczynają się wyróżniać z tła.

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [77]

Wskaźniki te mogą być używane przy ocenie w sytuacjach specjalnych (analizach), którym towarzyszy zwłaszcza niepewność wnioskowania co do zdrowia i samopoczucia ludzi. Wskaźniki i wartości (traktowane jako wartości progowe) podane w tabl. 3.1 mogą stanowić dodatkowe elementy oceny niezależnie od wartości dopuszczalnych hałasu w przepisach regulujących te kwestie [141, 184].

3.1.1. Dokuczliwość hałasu

Jednym z istotnych efektów związanych z oddziaływaniem hałasu na ludzi jest dokuczliwość (rozdrażnienie), która jest stanem emocjonalnym człowieka [77]. Często jest ona połączona z uczuciami dyskomfortu, złości, depresji, a także bezradności. Dokuczliwość jest jednym z istotniejszych niesłuchowych efektów hałasu. Do oceny dokuczliwo-

3. Wpływ hałasu drogowego na zdrowie ludzi

ści (efekt) WHO zaleca [77] stosowanie wskaźnika L_{DWN} (dawka) – podstawowy wskaźnik używany w mapach akustycznych, który pozwala ocenić wielkość hałasu w ciągu całej doby w całym roku na określonym obszarze.

Zgodnie z zaleceniami [77, 138] dokuczliwość od hałasu drogowego opisywana jest dwoma związkami (dawka-efekt), jako:

- dokuczliwość hałasu – procent osób dotkniętych dokuczliwym hałasem (*ang. annoyed*);

$$\begin{aligned} \%D = & 1,795 \cdot 10^{-4} \cdot (L_{DWN} - 37)^3 + 2,110 \cdot 10^{-2} \cdot (L_{DWN} - 37)^2 + \\ & + 0,5353 \cdot (L_{DWN} - 37) \end{aligned} \quad (3.1)$$

- wysoka (skrajna) dokuczliwość hałasu – procent osób dotkniętych wysoką dokuczliwością hałasu (*ang. highly annoyed*);

$$\begin{aligned} \%WD = & 9,868 \cdot 10^{-4} \cdot (L_{DWN} - 42)^3 + 1,436 \cdot 10^{-2} \cdot (L_{DWN} - 42)^2 + \\ & + 0,5158 \cdot (L_{DWN} - 42) \end{aligned} \quad (3.2)$$

gdzie:

L_{DWN} – długookresowy średni poziom dźwięku A wyrażony w decybelach (dB), wyznaczony w ciągu wszystkich dób w roku (w Polsce z uwzględnieniem pory dnia rozumianej jako przedział czasu od godz. 6⁰⁰ do godz. 18⁰⁰, pory wieczoru rozumianej jako przedział czasu od godz. 18⁰⁰ do godz. 22⁰⁰ oraz pory nocy rozumianej jako przedział czasu od godz. 22⁰⁰ do godz. 6⁰⁰).

Badania nad powyższymi związkami dawka-efekt zostały przeprowadzone w Europie, Ameryce Północnej i Australii dla samolotów, ruchu drogowego i kolejowego [77]. Badania te są wykonywane także w Polsce [167]. Uwzględniają one dokuczliwość zjawisk akustycznych. Badania te wykonywane są na podstawie ankiet, w których używane są różne skale (od trzech do jedenastu). W celu uzyskania porównywalnych uciążliwości dla różnej liczby odpowiedzi dokonuje się ich przeniesienia na skalę od 0 do 100 [77]. Wyniki dokuczliwości zaznacza się na wykresie, gdzie osi pionowej przypisuje się dokuczliwość (efekt) natomiast osi poziomej wielkość poziomu hałasu (dawka hałasu). Przyjęto, że punkt na skali dokuczliwości równy 50% rozumiany jest jako dokuczliwość natomiast 72% jako bardzo wysoka dokuczliwość.

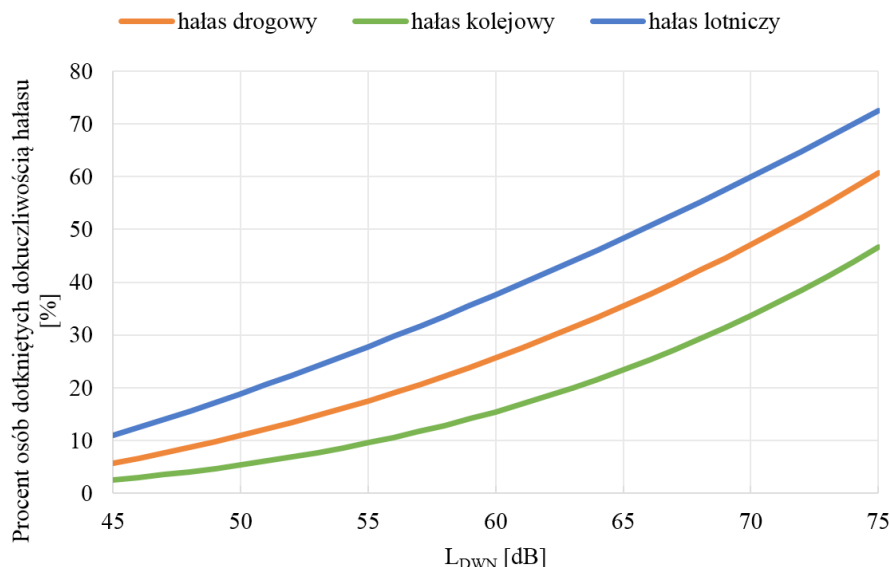
Powyższe związki zostały wyprowadzone dla hałasu drogowego bez dodatkowych efektów, jaki ten ruch może powodować. Niektóre efekty związane z ruchem drogowym i nawierzchnią drogi mogą wpływać istotnie na wyniki analiz dokuczliwości [77]:

- przerywany charakter ruchu pojazdów (np. otoczenie sygnalizacji świetlnej) – zgłaszane są zmiany o +3 dB,
- podwyższony hałas o niskiej częstotliwości – wzrost rozdrażnienia,

3.1. Wskaźniki wpływu hałasu na zdrowie ludzi

- ciche nawierzchnie drogowe – zgłaszane jest obniżenie efektu uciążliwości (mniejsza dokuczliwość niż spodziewana na podstawie samego obniżenia fizycznego zmniejszenia).

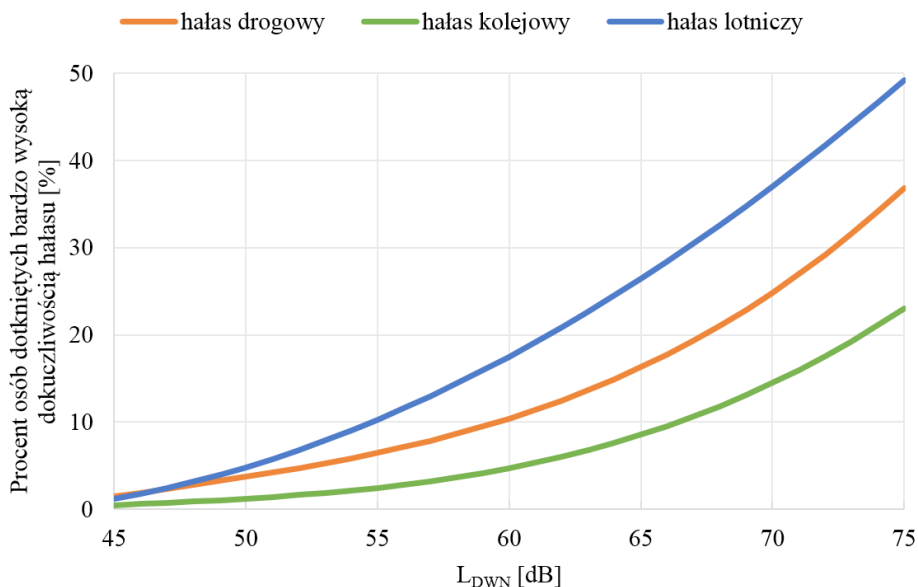
Podobne zależności podaje się dla innych rodzajów hałasu transportowego: kolejowego, lotniczego [77]. Jak wynika z badań i wyprowadzonych z nich zależności najbardziej dokuczliwym jest hałas lotniczy i drogowy – rys. 3.2 i 3.3.



Rys. 3.2. Procent osób dotkniętych dokuczliwością hałasu w zależności od wielkości L_{DWN} i różnych źródeł transportu

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [77]

W 2016 r. w Danii zostały wykonane badania dokuczliwości hałasu drogowego z udziałem około 7000 osób [58], które mieszkają wzdłuż dróg w dużych miastach i przy autostradach. Badania te wykazały, że bardziej dokuczliwy hałas występuje w otoczeniu autostrad niż dróg miejskich – oznacza to, że hałas z autostrad może być bardziej dokuczliwy niż wskazano to w [164]. Dla 20% osób wykazujących bardzo wysoką dokuczliwość hałasu (L_{DWN}) różnica między tymi dwoma rodzajami dróg wynosiła 10 dB. Wyniki te wskazują na konieczność uwzględnienia hałasu z autostrad oddzielnie od hałasu z innych dróg.



Rys. 3.3. Procent osób dotkniętych wysoką (skrajną) dokuczliwością hałasu w zależności od wielkości L_{DWN} i różnych źródeł transportu

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [77]

3.1.2. Zaburzenia snu

Jednym z bardziej niekorzystnych oddziaływań hałasu na ludzi jest jego wpływ na sen. Analizy prowadzone przez ekspertów [165] i skonstruowane na ich podstawie Wytyczne WHO [138] podają związki między hałasem, jakością snu oraz zdrowiem. Sen jest ważną funkcją biologiczną. Hałas może wywoływać efekt zdrowotny i być związany z wieloma chorobami. Niedobór snu (deprywacja snu), jaki może być związany z hałasem komunikacyjnym uznawany jest jako negatywny efekt zdrowotny. W analizach hałasu komunikacyjnego zaleca się stosowanie L_N jako reprezentatywnego wskaźnika (wykorzystywany w mapach akustycznych [47]).

Poniżej podano związki pomiędzy hałasem drogowym, a jego charakterystycznymi oddziaływaniami na sen.

Zaburzenia snu na podstawie własnej oceny

Podobnie jak w przypadku dokuczliwości, zaburzenia (zakłócenia) snu badane są przy wykorzystaniu ankiet. Poniżej podano zalecane w analizach związki dotyczące zaburzeń snu w przypadku hałasu drogowego [77, 99, 165]:

- niski stopień zaburzeń snu – procent osób dotkniętych niskim stopniem zaburzeń snu (*ang. low sleep disturbance*);

3.1. Wskaźniki wpływu hałasu na zdrowie ludzi

$$\%NZS = -8,4 + 0,16 \cdot L_N + 0,01081 \cdot L_N^2 \quad (3.3)$$

- zaburzenia snu – procent osób dotkniętych zaburzeniami snu (*ang. sleep disturbance*);

$$\%ZS = 13,8 - 0,85 \cdot L_N + 0,01670 \cdot L_N^2 \quad (3.4)$$

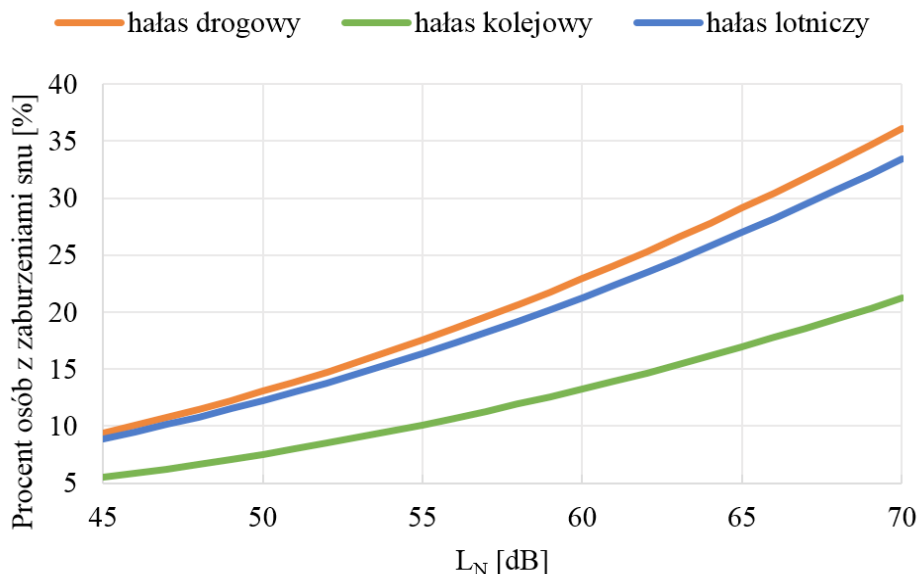
- wysoki stopień zaburzeń snu – procent osób dotkniętych wysokimi zaburzeniami snu (*ang. highly sleep disturbed*);

$$\%WZS = 20,8 - 1,05 \cdot L_N + 0,01486 \cdot L_N^2 \quad (3.5)$$

gdzie:

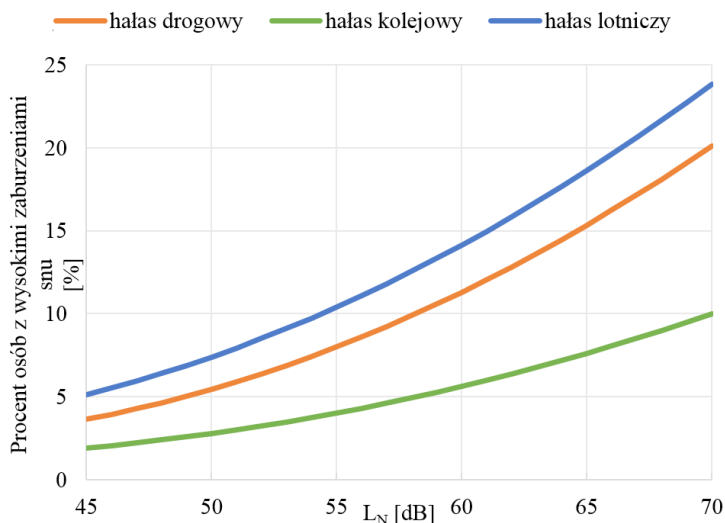
- L_N – długookresowy średni poziom dźwięku A wyrażony w decybelach (dB), wyznaczony w ciągu wszystkich pór nocy w roku (w Polsce przedział czasu od godz. 22⁰⁰ do godz. 6⁰⁰).

Na podstawie wyników analiz [165] hałas drogowy ma większy wpływ na zaburzenia snu niż hałas lotniczy i kolejowy – rys. 3.4. W przypadku wysokiego stopnia zaburzeń snu dominujący jest hałas lotniczy – rys. 3.5. W obu przypadkach na zakłócenia snu najmniejszy wpływ ma hałas kolejowy.



Rys. 3.4. Procent osób z zaburzeniami snu w zależności od wielkości hałasu L_N i różnych źródeł transportu

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [165]



Rys. 3.5. Procent osób z wysokimi zaburzeniami snu w zależności od wielkości hałasu L_N i różnych źródeł transportu

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [165]

Sen polisomnograficzny (reakcje EEG)

Przy niskich wartościach poziomu hałasu można zauważyć podczas snu reakcję ciała na dźwięki (przy wartości L_{max} około 33 dB) [77, 138, 165]. Prowadzone badania EEG¹ i EMG² wykazują w takich sytuacjach zmiany we wzorze fal mózgowych. Są one kategoryzowane jako pobudzenia, zmiany stadium snu lub rozbudzenia. Przyjęto, że aktywacje EEG oraz EMG (nazywane dalej również, jako reakcje EEG lub EMG), które trwają przez co najmniej 15 sekund, są klasyfikowane, jako czuwanie. Naturalne, biologiczne efekty takie, jak zmiany stadium snu lub przebudzenia nie są uznawane za efekt zdrowotny, jednakże, jeśli zmiany te wzrastają poza spontaniczne reakcje niezwiązane z hałasem zaczyna to stanowić element ostrzegawczy. Badania prowadzone w tym zakresie [165] (zwłaszcza wpływu hałasu lotniczego) związane są głównie z prawdopodobieństwem rozbudzenia (rejestrowanego przez EEG) powodowanego hałasem L_{max} względem spontanicznych rozbudzeń (zwykle występują około 24 przebudzenia nawet w trakcie niezakłóconych 8 godzin nocy). Reakcja organizmu na nadmierny hałas w nocy może także powodować poza zakłóceniami snu i przebudzeniami [165]: wzrost częstości zażywania środków medycznych, wzrost liczby spontanicznych ruchów ciała podczas snu,

¹ EEG – nieinwazyjna metoda diagnostyczna służąca do badania bioelektrycznej czynności mózgu

² EMG – nieinwazyjna metoda służąca do badań czynności elektrycznej mięśni i nerwów obwodowych (napięcia mięśni)

3.1. Wskaźniki wpływu hałasu na zdrowie ludzi

bezsennosc. Podobnie jak reakcje EEG, wzrost ruchów ciała rozpoczyna się przy niskich poziomach dźwięku – efekt zdrowotny w takich przypadkach nie jest dokładnie przebadany [165]. Dlatego w analizach dotyczących stanu zdrowia efekt ten nie jest przeważnie analizowany [77].

Zgłaszane przebudzenia

Badania wskazują, że człowiek budzi się lub przebudza w sposób świadomy i często pamiętany jeden do dwóch razy w ciągu nocy [77]. Każdy wzrost liczby takich przebudzeń jest niepokojący ze względu na obawy związane ze zdrowiem – organizm ma tendencję do tłumienia przebudzeń nawet pomimo wysokich poziomów hałasu. Zgodnie z zaleceniami WHO [138] procent przebudzeń *PP* wywołanych hałasem można obliczyć przy użyciu zależności:

$$PP = -0,564 + 1,909 \cdot 10^{-4} \cdot (SEL_{in})^2 [\%] \quad (3.6)$$

gdzie:

- SEL_{in} – poziom ekspozycyjny dźwięku (poziom ciśnienia akustycznego w ciągu 1 s) wewnątrz pomieszczenia mieszkalnego [dB].

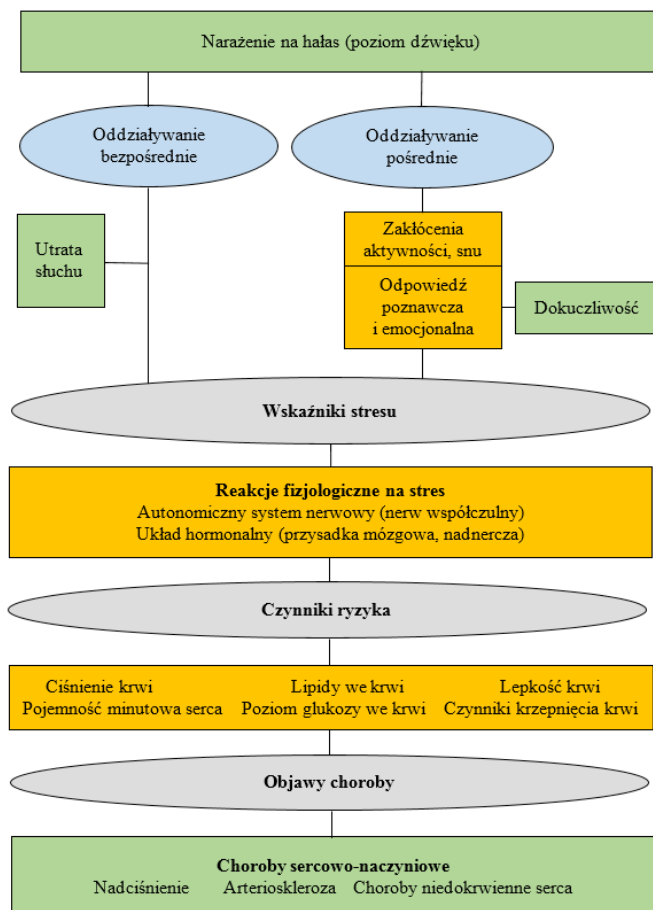
3.1.3. Efekty sercowo-naczyniowe

Badania potwierdzają wpływ hałasu na zdrowie układu sercowo-naczyniowego [77] – zwłaszcza choroby niedokrwiennej serca (w tym zawał mięśnia sercowego) oraz nadciśnienia (wysokie ciśnienie krwi), co doprowadza również do tzw. „starzenia się serca”. Hałas wpływa bezpośrednio lub pośrednio na autonomiczny układ nerwowy oraz układ endokrynną (układ wewnątrzwydzielniczy), co ma w efekcie wpływ na homeostazę metaboliczną (równowagę fizjologiczną) organizmu, w tym biologiczne czynniki ryzyka i tym samym zwiększając ryzyko pojawienia się zaburzeń w perspektywie długoterminowej [77]. Z uwagi na to, że problemy sercowo-naczyniowe mogą pojawić się w dłuższej perspektywie czasu to w analizach niekorzystnych oddziaływań hałasu możliwe jest określanie ryzyka ich wystąpienia przez określenie wartości tego ryzyka względnego w zależności od wartości poziomu dźwięku za pomocą funkcji dawka-efekt (wskaźnika względnego ryzyka) dla konkretnego czynnika (*ang.* *OR – odds rate*).

Czynniki biologiczne – hormony stresu

Badania [57] wykazały, że nawet przy niższych poziomach hałasu zaburzeniu ulegają pewne stany takie jak: koncentracja, relaksacja lub sen. Na rys. 3.6 przedstawiono, jak długotrwała ekspozycja na hałas może wpływać na efekty zdrowotne, w tym przez wpływ na organizm wywierany przez efekty stresowe (stres należy do niesłuchowych efektów hałasu) [10, 57].

3. Wpływ hałasu drogowego na zdrowie ludzi



Rys. 3.6. Uproszczony schemat reakcji na efekty hałasu

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [165]

Nadciśnienie

Podstawowe badania związane z nadciśnieniem związane są z hałasem lotniczym [77]. Badania te były prowadzone w różnych miejscach i warunkach stąd trudno jest podać jednoznaczne zależności wpływu hałasu na nadciśnienie i ryzyko jego powstawania. W [77] sugeruje się stosowanie $L_{DWN}=50$ lub $L_{DWN}=55$ dB (dla wartości L_N znacznie mniejszych od L_{DWN}), jako kategorii odniesienia dla której względne ryzyko przyjmowane jest jako 1,00. Odpowiednie względne ryzyka dla badanych, którzy żyją na obszarach, gdzie $L_{DWN}=55-60$ dB oraz $L_{DWN}=60-65$ dB wynosiłyby w przybliżeniu odpowiednio 1,13 oraz 1,20 zgodnie z [77] lub 1,06 oraz 1,13 zgodnie z [11].

3.1. Wskaźniki wpływu hałasu na zdrowie ludzi

WHO zaleca, aby przyjmować w przypadku efektów związanych z nadciśnieniem funkcję dawka-efekt (ryzyko względne): OR wzrasta na każde 10 dB o 1,13 (przy 95% przedziale ufności: 1,00–1,28) dla zakresu poziomu dźwięku 50–70 dB [77].

Choroba niedokrwienna serca

Analizy związane z chorobą niedokrwienną serca (*ang. Ischaemic Heart Disease – IHD*) dotyczyły hałasu drogowego [77]. Jako marker choroby niedokrwiennej serca używany był w badaniach zawał mięśnia sercowego (*ang. myocardial infarction – MI*) [11]. Dla hałasu drogowego zalecana jest ocena ryzyka względnego OR (rozumiana również, jako prawdopodobieństwo wystąpienia) na podstawie funkcji narażenia-reakcji dla zawału mięśnia sercowego [77] – rys. 3.7:

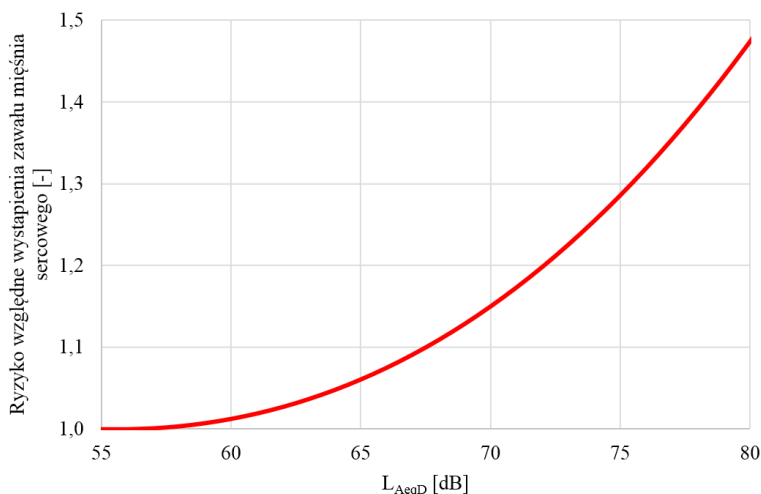
$$OR = 1,629657 - 0,000613 \cdot L_{AeqD}^2 + 0,000007357 \cdot L_{AeqD}^3 \quad [-] \quad (3.7)$$

gdzie:

- L_{AeqD} – równoważny poziom dźwięku w porze dnia (rozumiane, jako 16 godzin – 6⁰⁰–22⁰⁰) [dB].

W przypadku analiz wykonywanych na podstawie map akustycznych może wystąpić brak danych dotyczących równoważnego poziomu hałasu w ciągu pory dnia (L_{AeqD}). W takim przypadku zaleca się dla hałasu drogowego [77] wykorzystanie wartości L_{DWN} i następującej zależności:

$$L_{AeqD} = L_{DWN} - 2 \quad [dB] \quad (3.8)$$



Rys. 3.7. Ryzyko względne wystąpienia zawału mięśnia sercowego

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [77]

3.1.4. Upośledzenie funkcji poznawczych

Badania laboratoryjne wskazują, że hałas ma wpływ na uczenie się oraz wydajność pracy [77]. Problem ten jednak jest złożony ze względu m.in. na to, że ludzie starają się podtrzymywać wydajność pomimo wpływu hałasu. Badania międzynarodowe [209] prowadzone głównie na dzieciach w wieku szkolnym wykazały, że istnieje związek między uczeniem się (mierzone jako zdolność czytania ze zrozumieniem) a ekspozycją na hałas lotniczy. Wyniki badań wykazały wzrost ryzyka kognitywnego (upośledzenia funkcji poznawczych) wraz ze wzrostem ekspozycji na hałas – przyjęto, że 100% osób ekspozowanych na hałas jest dotkniętych kognitywnie przy bardzo wysokim poziomie dźwięku (np. $L_{DWN}=95$ dB) oraz że nikt nie jest dotknięty przy bezpiecznie niskim poziomie (np. $L_{DWN}=50$ dB). Badania wykazały także, że efekty ekspozycji na hałas lotniczy mogą występować nawet poniżej wartości 50 dB.

Powyższe wskaźniki opisane w tym rozdziale poza określeniem jak wpływa hałas drogowy na zdrowie człowieka wskazują również na charakterystyczne wartości po przekroczeniu których może dochodzić do znaczących problemów zdrowotnych. Wskaźniki te i ich wartości wskazują także w jakim czasie (porze doby) są one najgroźniejsze dla zdrowia człowieka – część z nich ma znaczący wpływ w porze nocy, część przez całą dobę. Badania i analizy tych wskaźników są bezpośrednim powodem wskazania wartości granicznych i wprowadzanych formalnie w poszczególnych krajach wartości dopuszczalnych hałasu.

3.2. Wartości graniczne i dopuszczalne hałasu drogowego

Na podstawie powyższych informacji oraz [77, 99, 138] w tabl. 3.2 zestawiono wyniki badań i analiz wartości, które stanowią wartości progowe ze względu na zdrowie ludzi.

Tabl. 3.2. Wartości progowe poziomu hałasu ze względu na zdrowie ludzi

Kryterium oceny (ryzyka)	Progowa wartość poziomu dźwięku [dB]
Pora dnia	
Ryzyko chorób sercowo-naczyniowych	> 65
Poważna uciążliwość (wysoka dokuczliwość)	> 55
Umiarkowana uciążliwość (dokuczliwość)	> 50
Pora nocy	
Ryzyko chorób sercowo-naczyniowych	> 55
Zaburzenia (zakłócenia) snu	> 40/45

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [50, 99, 138]

3.2. Wartości graniczne i dopuszczalne hałasu drogowego

Na podstawie wytycznych WHO z 2000 r. [79] zaleca się, aby poziom hałasu dopuszczalnego w ciągu dnia (16 godzin) L_{Aeq} nie przekraczał 50–55 dB. W znacznej liczbie krajów UE wartości dopuszczalne są większe od tych zalecanych wartości [101], a wartość średnia dla hałasu drogowego w przypadku L_{DWN} wynosi dla obszarów mieszkalnych 58 dB [77]. Dla wartości dopuszczalnych w nocy zasada „10 dB mniej” obowiązuje w większości krajów i dla hałasu drogowego wartość ta przeważnie wynosi 50 dB. Tymczasem zalecenia WHO z 2009 r. [138] wskazują, że wartością skuteczną dla ochrony zdrowia jest 40 dB (zauważa się także, że efekty biologiczne pojawiają się również dla 30 dB). Jednocześnie WHO [138] zaleca, aby „tymczasowa wartość docelowa” L_N wynosiła 55 dB na zewnątrz budynków natomiast wewnątrz 30 dB – wartość uważana za najniższy poziom obserwowanego efektu (ang. *Lowest Observed Effect Level* – LOEL). Wartość 40 dB na zewnątrz budynku uważana jest jako najniższy zaobserwowany niepożądany efekt (ang. *Lowest Observed Adverse Effect Level* – LOAEL). Należy zwrócić uwagę, że poziom hałasu we wnętrzu budynku zależy od możliwości i przyzwyczajień mieszkańców, którzy w nocy często zostawiają uchylone okna. W [138] przyjmuje się, że roczna średnia różnica pomiędzy poziomem hałasu na zewnątrz i wewnątrz budynku wynosi 21 dB, co jest związane z tym, że duża część mieszkańców zostawia lekko otwarte okna przez przynajmniej połowę czasu. Sposoby prowadzenia analizy w takich przypadkach podano w [77].

Strategia dalszych badań i celów ochrony przed hałasem komunikacyjnym (w tym drogowym) dla Europy zostały określone do roku 2020 w ramach programu europejskiego (sieci) CALM II [177] (CALM – *Community Noise Research Strategy Plan*). Cele te zostały podane w tabl. 3.3.

Tabl. 3.3. Cele do osiągnięcia w ochronie środowiska przed hałasem do roku 2020

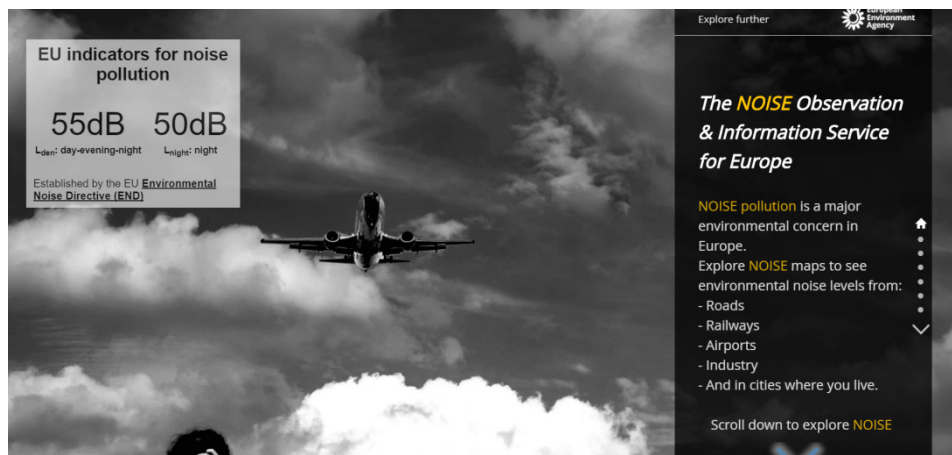
Cel	L_{DWN} [dB]	L_N [dB]	Grupa ekspertów/instytucja zalecająca
Minimum	65	55	Agencja Ochrony Środowiska Niemiec
Średni	55	45	Światowa Organizacja Zdrowia (WHO)
Optymalny	50	40	Ministerstwo Mieszkalnictwa, Planowania Przestrzennego i Środowiska (Holandia) i Federalna Agencja Ochrony Środowiska (Niemcy)

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [177]

W rekomendacjach WHO [77] wskazano, że poziom hałasu w ciągu doby L_{DWN} (również L_{Aeq}) nie powinien przekraczać 50 dB natomiast hałas w porze nocy L_N nie powinien przekraczać 45 dB. Wartości te w ocenie WHO i grup ekspertów pozwalają chronić społeczeństwo przed poważnymi skutkami zdrowotnymi. WHO rekomenduje także, aby analizy dotyczące oddziaływań w okresie nocy były wykonywane od wartości $L_N=40$ dB.

3. Wpływ hałasu drogowego na zdrowie ludzi

Pomimo iż w Dyrektywie *END* [47] nie są podawane bezpośrednio wartości dopuszczalnych poziomów hałasu, to jako wartości graniczne można przyjąć, że jest to dla pory doby L_{DWN} wartość 55 dB, natomiast dla pory nocy L_N wartość 50 dB. Wartości te zostały wskazane na stronie internetowej prowadzonej przez *EEA*³, gdzie zgromadzone są podstawowe wyniki map akustycznych dla wszystkich krajów UE – rys. 3.8.



Rys. 3.8. Ekran serwisu internetowego *EEA* dotyczącego wyników map akustycznych dla wszystkich krajów UE

Źródło: [224]

W 2016 r. w krajowych Wytycznych do sporządzania map akustycznych [117] wskazano jakościowe cele w zakresie poprawy warunków akustycznych środowiska. Autorzy tych Wytycznych wskazują, że wartości te mogą być dobrym przykładem określania celów operacyjnych przyjmowanych w programach ochrony środowiska przed hałasem (tabl. 3.4), a także w raportach oddziaływania na środowisko – w tabeli tej wykorzystywane są zalecenia Agencji Ochrony Środowiska Niemiec (UBA).

Tabl. 3.4. Jakościowe cele w zakresie poprawy warunków akustycznych środowiska

Lp.	Działanie	Perspektywa (strategia)	Graniczna wartość poziomu		Ocena z uwagi na
			L_{DWN} [dB]	L_N [dB]	
1	Prewencja	krótkookresowa	65	55	ryzyko utraty zdrowia
2	Zmniejszenie hałasu (redukcja)	średniookresowa	60	50	poważną uciążliwość
3	Zapobieganie	długookresowa	55	45	poważną uciążliwość

Źródło: [117]

³The NOISE Observation & Information Service for Europe [źródło: <https://www.eea.europa.eu/themes/human/noise/noise-story-map>, dostęp: lipiec 2017]

3.2. Wartości graniczne i dopuszczalne hałasu drogowego

W obowiązujących przepisach krajowych dotyczących wartości dopuszczalne poziomów hałasu w środowisku dla programów ochrony środowiska przed hałasem podano w rozporządzeniu Ministra Środowiska [141, 189] – Tabela 3 rozporządzenia [141]. W tych samych przepisach podano wartości dopuszczalne dla wybranej doby, które stosowane są w analizach akustycznych związanych z opracowaniami środowiskowymi na etapie przygotowania inwestycji oraz kontroli po jej realizacji. Wartości te przedstawiono w tabl. 3.5.

Tabl. 3.5. Dopuszczalne poziomy hałasu w środowisku powodowane przez drogi lub linie kolejowe dla programów ochrony (L_{DWN} , L_N) środowiska i innych opracowań środowiskowych (L_{AeqD} , L_{AeqN})

Lp.	Rodzaj terenu	Dopuszczalny długookresowy średni poziom dźwięku A w [dB]		Dopuszczalny poziom hałasu w [dB]	
		$L_{DWN}^{1)}$	$L_N^{1)}$	$L_{AeqD}^{1,2)}$	$L_{AeqN}^{1,3)}$
1	a) Strefa ochronna „A” uzdrowiska b) Tereny szpitali poza miastem	50 (50)	45 (45)	50 (50)	45 (45)
2	a) Tereny zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej b) Tereny zabudowy związanej ze stałym lub czasowym pobytem dzieci i młodzieży ⁴⁾ c) Teren domów opieki społecznej d) Tereny szpitali w miastach	64 (55)	59 (50)	61 (55)	56 (50)
3	a) Tereny zabudowy mieszkalnej wielorodzinnej i zamieszkania zbiorowego b) Tereny zabudowy zagrodowej c) Tereny rekreacyjno-wypoczynkowe ⁴⁾ d) Tereny mieszkaniowo-usługowe	68 (60)	59 (50)	65 (60)	56 (50)
4	a) Tereny w strefie śródmiejskiej miast powyżej 100 tys. mieszkańców	70 (65)	65 (55)	68 (65)	60 (55)

¹⁾ W nawiasach podano wartości dopuszczalne poziomów hałasu obowiązujące do 19 lipca 2007 r. w rozporządzeniu [184].

²⁾ Przedział czasu odniesienia równy 16 godzinom (pora dnia: 6⁰⁰–22⁰⁰).

³⁾ Przedział czasu odniesienia równy 8 godzinom (pora nocy: 22⁰⁰–6⁰⁰).

⁴⁾ W przypadku niewykorzystania tych terenów, zgodnie z ich funkcją, w porze nocy, nie obowiązują na nich dopuszczalny poziom hałasu w porze nocy – dotyczy tylko wskaźnika L_{AeqN} .

⁵⁾ Strefa śródmiejska miast powyżej 100 tys. mieszkańców to teren zwartej zabudowy mieszkaniowej z koncentracją obiektów administracyjnych, handlowych i usługowych. W przypadku miast, w których występują dzielnice o liczbie mieszkańców powyżej 100 tys., można w tych dzielnicach strefę śródmiejską, jeżeli charakteryzuje się ona zwartą zabudową mieszkaniową z koncentracją obiektów administracyjnych, handlowych i usługowych.

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [141, 189]

3. Wpływ hałasu drogowego na zdrowie ludzi

Oprócz wskaźników określających dopuszczalny poziom hałasu na zewnątrz budynków i na terenach chronionych (wskaźniki L_{DWN} , L_N oraz L_{AeqD} i L_{AeqN}) normalizuje się także w Polsce wartości poziomu hałasu wewnątrz budynków. Wartości te uzależnione są przede wszystkim od funkcji pomieszczeń oraz urządzeń, które mogą stanowić źródło hałasu wewnątrz budynku. Wybrane wartości dopuszczalne poziomu hałasu wewnątrz pomieszczeń w budynku przedstawiono w tabl. 3.6.

Tabl. 3.6. Wybrane wartości dopuszczalne hałasu wewnątrz pomieszczeń w budynku

Lp.	Przeznaczenie pomieszczeń	L_{Aeq} [dB]	
		dzień	noc
1.	Pomieszczenia mieszkalne w budynkach mieszkalnych, internatach, domach rencistów, domach dziecka, hotelach kategorii S i I, hotelach robotniczych	40	30
2.	Kuchnie i pomieszczenia sanitarne w mieszkaniach	45	40
3.	Pokoje w hotelach kategorii II i niższych	45	35
4.	Pokoje w domach wczasowych	40–45	30–35
5.	Pokoje chorych w szpitalach i sanatoriach z wyjątkiem pokoiów intensywnej opieki medycznej	35	30
6.	Pomieszczenia łóżkowe w oddziałach intensywnej opieki medycznej	30	30
7.	Sale operacyjne, pokoje przygotowania chorych do operacji	35	–
8.	Gabinety badań lekarskich w przychodniach i szpitalach, pomieszczenia do psychoterapii	35	–
9.	Pokoje lekarskie, pielęgniarskie oraz inne pomieszczenia szpitalne (z wyjątkiem działów technicznych i gospodarczych)	40	30
10.	Laboratoria medyczne, pokoje recepturowe w aptekach	40	–
11.	Pokoje dla dzieci w żłobkach, klasy w przedszkolach	35	–
12.	Klasy i pracownie szkolne (z wyjątkiem pracowni zajęć technicznych), sale wykładowe, audytoria	40	–
13.	Sale konferencyjne	40	–
14.	Pomieszczenia do pracy umysłowej wymagającej dużej koncentracji uwagi	35	–
15.	Pomieszczenia administracyjne bez wewnętrznych źródeł hałasu	40	–
16.	Pomieszczenia administracyjne z wewnętrznymi źródłami hałasu, pomieszczenia administracyjne w obiektach tymczasowych	45	–
17.	Sale zajęć w domach kultury	35–45	–
18.	Sale kawiarniane i restauracyjne	50	–
19.	Sale sklepowe	50	–

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [152]

3.3. Ocena wpływu hałasu na zdrowie ludzi

Wartości dopuszczalne określone zostały dla różnych rodzajów terenu – faktycznie dla obszarów z zabudową mieszkalną o różnym charakterze i intensywności zamieszkania. Jak łatwo zauważyć wartości dopuszczalne zmienione w 2017 r. [189] znacznie przekraczają wcześniej opisywane wartości graniczne z uwagi na zdrowie ludzi na obszarze Polski. Wartości podane w tabl. 3.5 w powiązaniu z powyższymi informacjami i zapisami ustawy prawo ochrony środowiska [244] (*POŚ*), gdzie przez teren zagrożony hałasem rozumie się teren, na którym są przekroczone dopuszczalne poziomy hałasu, określone wskaźnikami L_{DWN} , L_N oraz L_{AeqD} i L_{AeqN} powodują to, że należy liczyć się z poważnymi uciążliwościami na tych terenach, a nawet ryzykiem utraty zdrowia. Wskaźniki L_{DWN} i L_N zgodnie z ustawą *POŚ* uznane zostały za wartości, które mają zastosowanie do prowadzenia długookresowej polityki w zakresie ochrony środowiska przed hałasem natomiast L_{AeqD} i L_{AeqN} stanowią wskaźniki kontrolne, które odnosi się do jednej wybranej doby. Pozostałe wskaźniki, które opisano w powyższym rozdziale mogą stanowić informacje (wskaźniki) uzupełniające. Wskaźniki te, które są wynikiem narażenia, są opisywane w polskich przepisach [244], jako „efekt szkodliwy” (rozumiany jako efekt szkodliwy dla zdrowia) lub efekt „uciążliwy” (rozumiany jako negatywne reakcje człowieka bez zauważalnych szkodliwych skutków dla jego zdrowia). Wskaźniki te zgodnie z mogą być wprowadzone do stosowania przez Ministra Zdrowia w porozumieniu z Ministrem Środowiska (art. 117, ust. 10 i 11 [244]).

3.3. Ocena wpływu hałasu na zdrowie ludzi

3.3.1. Założenia WHO

WHO i Bank Światowy zaleca wykonywanie oceny ryzyka w oparciu o efekty zdrowotne oraz wycenę finansową [77]. Formuła podana przez WHO do oceny oddziaływania hałasu dotyczy części populacji AF i opisuje ona narażenie na uciążliwości oraz zapadalność na choroby ze względu na ekspozycję na hałas:

$$AF = \frac{\sum (P_i \cdot RR_i) - 1}{\sum (P_i \cdot RR_i)} \quad (3.9)$$

gdzie:

- P_i – odsetek populacji w danym zakresie ekspozycji hałasu i ,
- RR_i – ryzyko względne przy danym zakresie ekspozycji hałasu i .

Ponadto w analizach WHO zalecono ocenę przy użyciu wskaźnika *DALY* (*ang. Disability Adjusted Live Year*) [77]. W tym celu każde zjawisko kliniczne jest analizowane tak, aby ustalić wagę, która uwzględnia: śmiertelność, mobilność i jej utratę, samoopiekę, codzienne aktywności, ból i dyskomfort, dokuczliwość i depresje oraz funkcje kognitywne. *DALY* zgodnie z zasadami jest obliczane jako liczba lat potencjalnego życia utracona

3. Wpływ hałasu drogowego na zdrowie ludzi

ze względu na przedwczesną śmierć oraz lata życia produkcyjnego utracone ze względu na niepełnosprawność (utrata zdrowia) [41, 77] dla danego czynnika ryzyka (np. zawału mięśnia sercowego):

$$DALY = YLL + YLD \text{ [lata]} \quad (3.10)$$

gdzie:

- YLL – utracona liczba lat życia (*ang. Years of Life Lost*);

$$YLL = \sum_i (N_i^m \cdot L_i^m + N_i^f \cdot L_i^f) \text{ [lata]} \quad (3.11)$$

- $N_i^m (N_i^f)$ – liczba zgonów kobiet (mężczyzn) w grupie wiekowej i ,
- $L_i^m (L_i^f)$ – standardowa oczekiwana długość życia w wieku zgonu w latach,
- YLD – liczba lat życia z niepełnosprawnością (*ang. Years Lived with Disability*) obliczana wg wzoru:

$$YLD = I \cdot DW \cdot D \text{ [lata]} \quad (3.12)$$

- I – liczba przypadków zachorowalności,
- DW – waga niepełnosprawności wynikająca z efektu zdrowotnego (w skali 0–1, gdzie 0 – pełne zdrowie, 1 – śmierć) – zgodnie z tabl. 3.7,
- D – średni czas niepełnosprawności w latach.

Tabl. 3.7. Waga niepełnosprawności dla różnych stanów zdrowia

Stan zdrowia	Waga niepełnosprawności
Śmiertelność	1,000
Ostry zawał mięśnia sercowego nieprowadzący do śmierci	0,406
Choroba niedokrwienna serca	0,350
Wysokie ciśnienie krwi	0,352
Bezsenna pierwotna	0,100
Zaburzenia snu	0,070
Dokuczliwość (rozdrażnienie)	0,020 ¹⁾
Upośledzenie funkcji kognitywnych	0,006

¹⁾ Wartość zalecana przez WHO

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [77]

Powyższe wagi zalecane przez WHO mogą mieć różne wartości w różnych krajach i zależą od bardzo wielu czynników (są elementem krytycznym analiz). Przyjęcie tych wag umożliwia jednak przyjęcie hierarchii w podejściu do celów związanych z ochroną przed hałasem.

3.3.2. Dyrektywa END

W ocenie wpływu hałasu zalecono posługiwanie się współczynnikami dawka-efekt, które zostały określone w załączniku do Dyrektywy END jedynie jako zapisy ogólne. Należały do nich głównie dla różnych źródeł oddziaływań (ruch kołowy, szynowy i lotniczy, a także przemysłowy) – załącznik III [47]:

- stosunek między dokuczliwością a L_{DWN}
- stosunek między zakłóceniami (zaburzeniami) snu a L_N .

Dopuszczalne są także inne wskaźniki oceny (dawka-efekt). W praktyce rzadko wykorzystuje się te wskaźniki ze względu na brak jednoznacznych zaleceń co do ich formy, stosowanych wzorów, współczynników itp. Zmiana w Dyrektywie END [118] zapowiadana na koniec 2018 r. poza metodą oceny (metodą obliczeń) stosowaną dla map akustycznych (załącznik II) wprowadza istotne uzupełnienia do załącznika III związanego z oceną wpływu hałasu na zdrowie ludzi. Celem w tym przypadku jest określenie wspólnego podejścia krajów UE wykonujących mapy akustyczne i programy ochrony środowiska przed hałasem. Zmiany te uwzględniają przede wszystkim postęp, jaki dokonał się w badaniach nad wpływem hałasu na zdrowie ludzi [41, 77, 79, 138]. Uzupełnienia oceny skutków w Dyrektywie END oparto na zależnościach opisanych w poprzednim rozdziale. Jako wskaźniki, które powinny być wykorzystywane w ocenie wpływu hałasu na zdrowie ludzi wskazano:

- narażenie populacji na hałas,
- obciążenia chorobami,
- inne wskaźniki, które będą wykorzystywane w przyszłości (np. upośledzenie funkcji poznawczych u dzieci, zdrowie psychiczne i samopoczucie, osłabienie słyszenia, szum w uszach itd.).

Ocena narażenia populacji na hałas

W projekcie zmiany załącznika III Dyrektywy END [118] pierwszy element, który powinien zostać użyty do oceny wpływu hałasu na zdrowie ludzi to oszacowanie narażenia populacji na uciążliwości oraz choroby (efekt). Należą do nich: dokuczliwość, możliwość wystąpienia zawału serca oraz zaburzenia snu. Odsetek konkretnej choroby w populacji, która jest szacowana na skutek hałasu w otoczeniu, dla każdego źródła hałasu x (drogowego, kolejowego, przemysłowego lub lotniczego) i efektu zdrowotnego y (dokuczliwość hałasu, zaburzenia snu, choroby układu krążenia w postaci zawału mięśnia sercowego) powinna być szacowana zgodnie ze wzorem [118]:

$$PAF_{x,y} = \left(\frac{\sum_{\text{zakres ekspozycji } i} \left[p_i \cdot (RR_{i,x,y} - 1) \right] - 1}{\sum_{\text{zakres ekspozycji } i} \left[p_i \cdot (RR_{i,x,y} - 1) \right]} \right) \quad (3.13)$$

gdzie:

- PAF – odsetek zagrożonej populacji,

3. Wpływ hałasu drogowego na zdrowie ludzi

- p_i – odsetek ogólnej liczby osób P w analizowanym obszarze, który narażony jest na zakres ekspozycji hałasu i ,
- RR_i – ryzyko względne związane z danym źródłem hałasu x oraz z efektem zdrowotnym y przy danym zakresie ekspozycji na hałas i – tabl. 3.8 (podano wartości jedynie dla hałasu drogowego),
- zakres ekspozycji i uwzględniany w ocenie powinien mieć wartość początkową nie większą niż $L_{DWN}=55$ dB i $L_N=50$ dB.

Na podstawie [50, 74] wzór 3.13 powinien mieć faktycznie postać:

$$PAF_{x,y} = \left(\frac{\sum_{\text{zakres ekspozycji } i} \left[p_i \cdot (RR_{i,x,y} - 1) \right]}{\sum_{\text{zakres ekspozycji } i} \left[p_i \cdot (RR_{i,x,y} - 1) \right] + 1} \right) \quad (3.14)$$

Tabl. 3.8. Ryzyko względne RR związane z efektem zdrowotnym y przy danym zakresie ekspozycji na hałas drogowy

Efekt zdrowotny	Wskaźnik hałasu	Waga niepełnosprawności RR dla zakresu ekspozycji hałasu [dB]						
		40–45	45–50	50–55	55–60	60–65	65–70	>70
Dokuczliwość hałasu	L_{DWN}	1	1	1,938	3,205	5,092	7,889	11,887
Choroby układu krążenia (zawał mięśnia sercowego)	L_N	1	1	1	1	1,015	1,067	1,200
Zaburzenia snu	L_N	1,299	1,918	2,857	4,116	5,694	7,593	9,812

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [118]

Ocena obciążenia chorobami

Drugim elementem oceny w Dyrektywie *END* [118] jest obciążenie chorobami, które ma bezpośredni wpływ na sprawność i długość życia ludzi. Wskaźnikiem, który przyjęto w ocenie jest $DALY^4$ (zgodnie z określeniem w poprzednim rozdziale). W przypadku pojedynczego źródła hałasu x oraz efektu zdrowotnego y (dokuczliwość, zaburzenia snu, choroby układu krążenia w postaci zawału mięśnia sercowego) do obliczenia $DALY$ należy użyć następującej formuły [118]:

$$DALY_x = \sum_y \left(PAF_{x,y} \cdot DW_y + PAF_{x,y} \cdot YLL_y \right) \cdot P \quad [\text{lata}] \quad (3.15)$$

gdzie:

- P – liczba osób w analizowanym obszarze [liczba osób],

⁴ $DALY=1$ rozumiany jest jako jeden stracony rok zdrowego życia

3.3. Ocena wpływu hałasu na zdrowie ludzi

- $PAF_{x,y}$ – odsetek zagrożonej populacji źródłem hałasu x oraz efektu zdrowotnego y [liczba osób],
- DW_y – waga niepełnosprawności wynikająca z efektu zdrowotnego y , przy czym; $DW=0,070$ dla dokuczliwości, $DW=0,405$ dla chorób układu krążenia (zawał mięśnia sercowego), $DW=0,100$ dla zaburzeń snu,
- YLL_y – utracona liczba lat życia [lat] – tabl. 3.9 (podano wartości jedynie dla hałasu drogowego),
- zakres ekspozycji i uwzględniany w ocenie powinien mieć wartość nie większą niż $L_{DWN}=55$ dB i $L_N=50$ dB.

Tabl. 3.9. Utracona liczba lat życia YLL związana z efektem zdrowotnym y przy danym zakresie ekspozycji na hałas drogowy

Efekt zdrowotny	Wskaźnik hałasu	Zakres ekspozycji hałasu [dB]						
		40–45	45–50	50–55	55–60	60–65	65–70	>70
Dokuczliwość hałasu	L_{DWN}	0	0	0	0	0	0	0
Choroby układu krążenia (zawał mięśnia sercowego)	L_N	0	0	0	0	5	10	15
Zaburzenia snu	L_N	0	0	0	0	0	0	0

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [118]

W przypadku, kiedy analizowanych jest kilka źródeł hałasu x (drogowy, kolejowy, lotniczy, przemysłowy) wówczas należy zastosować poniżą formułę [118]:

$$DALY = \left[\sum_y \left(\max_x \{ PAF_{x,y} \cdot DW_y \} + \max_y \{ PAF_{x,y} \cdot YLL_y \} \right) \right] \cdot P \text{ [lata]} \quad (3.16)$$

gdzie: oznaczenia jak we wzorze 3.15.

3.3.3. Rozwiązania krajowe

W Polsce oceny wpływu na hałas dla programów ochrony środowiska przed hałasem oparte są na wskaźnikach (wartościach dopuszczalnych L_{DWN} i L_N), które wyznaczył Minister Środowiska w rozporządzeniu [141, 189] – tabl. 3.5. W przypadku pozostałych opracowań środowiskowych wartości te dotyczą pojedynczej doby w roku.

Ważną rolę zarówno w ocenie, jak i decyzjach o kolejności podejmowania działań związanych ze stosowaniem metod i środków przed hałasem odgrywa wskaźnik M , który w rozporządzeniu dotyczącym wymagań, jakie powinien spełniać program ochrony środowiska przed hałasem ustalany jest na podstawie wzoru [182]:

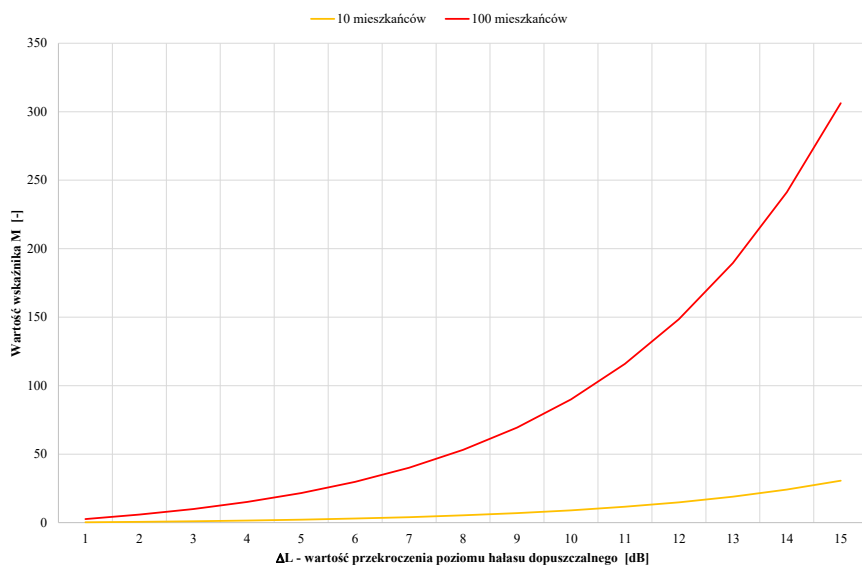
3. Wpływ hałasu drogowego na zdrowie ludzi

$$M = 0,1 \cdot m \cdot (10^{0,1\Delta L} - 1) \quad [-] \quad (3.17)$$

gdzie:

- m – liczba mieszkańców wielkość na terenie o przekroczonym poziomie dopuszczalnym [liczba osób],
- ΔL – wielkość przekroczenia dopuszczalnego poziomu hałasu [dB].

Wskaźnik ten charakteryzuje wielkość przekroczenia dopuszczalnego poziomu hałasu i liczbę mieszkańców na terenie, gdzie występuje to przekroczenie. Realizację zadań zgodnie z rozporządzeniem [182] ustala się w kolejności od największej do najmniejszej wartości wskaźnika M . Na rys. 3.9 pokazano przykładowe wartości wskaźnika M dla dwóch przypadków, kiedy w budynku jest 10 i 100 mieszkańców.

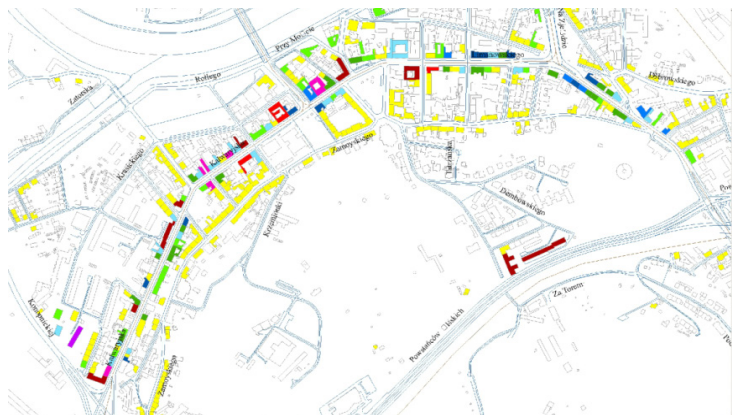


Rys. 3.9. Przykładowe wartości wskaźnika M dla dwóch przypadków

Źródło: opracowanie własne

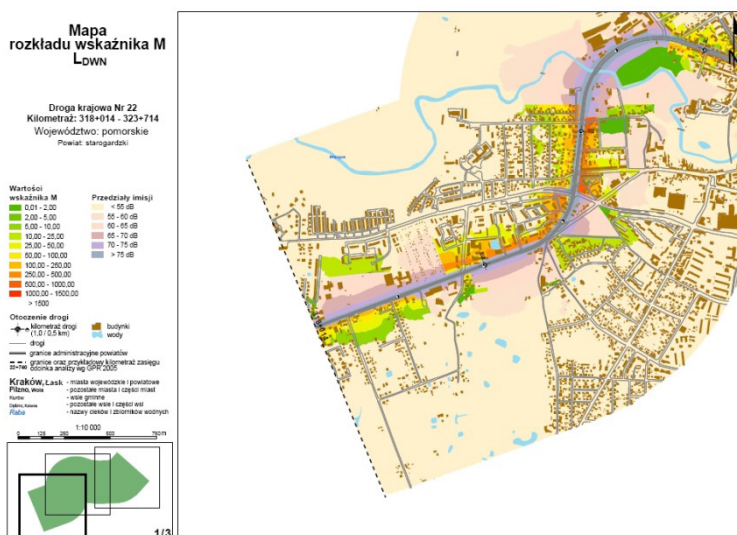
Wartość wskaźnika M „preferuje” obiekty i obszary o dużej liczbie mieszkańców na terenach przekroczonych wartościach dopuszczalnych L_{DWN} i L_N . Wskaźnik ten nie ma swojego odpowiednika w pozostałych opracowaniach środowiskowych. Wartości jego określa się w ramach map akustycznych na podstawie jednej z przygotowywanych map. Analiza wskaźnika M sprawia niejednokrotnie sporo problemów interpretacyjnych, ponieważ można ją wykonywać (i obliczać wartość wskaźnika M) dla określonego obszaru, strony drogi, budynku itp. Przykłady map akustycznych dotyczących wskaźnika M przedstawiono na rys. 3.10 i 3.11.

3.3. Ocena wpływu hałasu na zdrowie ludzi



Rys. 3.10. Przykładowa mapa z rozkładem wartości wskaźnika M pojedynczych budynków dla obszaru miasta

Źródło: opracowanie własne



Rys. 3.11. Przykładowa mapa z rozkładem wartości wskaźnika M dla otoczenia odcinka drogi

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [237]

Wykonując mapę akustyczną przy wykorzystaniu narzędzi GIS nie jest problemem uzyskanie dodatkowych wyników, które mogą wspomagać ocenę wpływu hałasu nie tylko na ludzi, ale jednocześnie wskazywać na zanieczyszczenie hałasem terenu oraz obiektów.

3. Wpływ hałasu drogowego na zdrowie ludzi

Do takich danych dodatkowych uzyskiwanych w poszczególnych zakresach ekspozycji hałasu można wskazać:

- liczbę osób,
- powierzchnię terenu,
- liczbę budynków.

Dane te mogą posłużyć do porównań wariantów rozwiązań ochronnych i tworzenia dodatkowych wskaźników przy uwzględnieniu innych uzyskiwanych wyników. W dużej części powyższe wskaźniki mogą być wykorzystywane do łączenia ich z innymi np. ekonomicznymi.

Poza limitami wartości dopuszczalnych hałasu częstym sposobem oceny wpływu hałasu na zdrowie ludzi stosowanym w opracowaniach środowiskowych jest stosowanie różnego rodzaju skal wpływu hałasu na człowieka. Są one często uzależnione od wartości poziomu hałasu i krótkiego opisu skali uciążliwości. Przykład takiej skali podano w tabl. 3.10

Tabl. 3.10. Skala uciążliwości hałasu stosowana w ocenach wpływu hałasu na człowieka

Uciążliwość hałasu	L_{Aeq} [dB]
Mała	<52
Średnia	52–62
Duża	62–70
Bardzo duża	>70

Źródło: [107]

Stosowane są również skale, które poza wartościami poziomu hałasu podają opis wpływu hałasu na człowieka. Przykładem jest skala Prof. J. Sadowskiego [197], która uwzględnia różne stopnie oddziaływanie hałasu na organizm, a tym samym różną szkodliwość dla zdrowia. Zgodnie z tą skalą oddziaływania hałasu można podzielić w zależności od jego poziomu na pięć następujących grup:

- poniżej 35 dB(A) – nieszkodliwe dla zdrowia, mogą być denerwujące lub przeszkadzać w pracy wymagającej skupienia,
- 35–70 dB(A) – wpływają na zmęczenie układu nerwowego człowieka, poważnie utrudniają zrozumiałość mowy, zasypianie i wypoczynek,
- 70–85 dB(A) – wpływają na znaczne zmniejszenie wydajności pracy, mogą być szkodliwe dla zdrowia i powodować uszkodzenie słuchu,
- 85–130 dB(A) – powodują liczne schorzenia organizmu ludzkiego, uniemożliwiają zrozumiałość mowy nawet z odległości 0,5 m,
- powyżej 130 dB(A) – powodują trwałe uszkodzenie słuchu, wywołują pobudzenie do drgań organów wewnętrznych człowieka powodując ich schorzenia.

4. Synteza dotychczasowych prac w zakresie omawianej problematyki

W ramach syntezy dotyczącej zagadnień poruszanych w monografii wykonano szereg analiz literatury przede wszystkim z uwagi na: wpływu hałasu na zdrowie ludzi, opracowania środowiskowe, które w wielu przypadkach stają się narzędziami naprawczymi, wybór i ocenę rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym. Ze względu na ograniczoną objętość w syntezie podano jedyne najistotniejsze informacje, które zostały także rozwinięte dodatkowo w poszczególnych rozdziałach monografii.

4.1. Stopień zagrożenia hałasem i wartości dopuszczalne hałasu

Na podstawie wyników analiz z wykonywanych map akustycznych dla krajów Unii Europejskiej (oraz krajów spoza UE, które przyjęły obowiązek wykonywania tych opracowań – Szwajcaria, Norwegia, Turcja) można stwierdzić, że na hałas drogowy o wartości ponad 55 dB w okresie doby narażonych jest ponad 120 mln ludzi – tabl. 4.1.

Tabl. 4.1. Liczba zagrożonych ludzi w krajach UE hałasem o wartości ponad 55 dB

Źródło hałasu	W obszarach miejskich	Poza obszarami miejskimi
Drogi	86 423 300	35 015 600
Linie kolejowe	8 904 500	3 818 500
Lotniska	3 503 900	1 243 600
Przemysł	1 369 000	

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [224]

W ramach tych analiz objęto w 2007 r. w Polsce około 10 mln osób (26,0% liczby ludności kraju w tym 42,7% populacji miejskiej) [113]. Z raportu Głównego Inspektora Ochrony Środowiska [113] wynika, że na hałas powyżej 55 dB w ciągu doby narażonych jest w miastach objętych analizami 5,3 mln osób, a w porze nocy na hałas powyżej 50 dB narażonych jest 3,66 mln mieszkańców. Prawdopodobny wzrost ruchu drogowego może to zjawisko jeszcze zwiększyć w następnych latach. W przypadku przewozów ładunków samochodami ciężarowymi, które stanowią bardzo istotne źródło hałasu prognozuje się, że wzrost pracy przewozowej w latach 2005–2012 wzrośnie w Polsce o ponad 70%, a w latach 2005–2030 ponad 115% [148] – jest to najwyższy wzrost spośród wszystkich krajów UE.

Jedną z pierwszych prac dotyczących możliwości uwzględnienia warunków zdrowotnych w planowaniu miast było opracowanie Prof. J. Sadowskiego z 1964 r. [197] natomiast w ocenach wpływu hałasu na środowisko na określoną populację ludzi opracowanie Mauriña z 1981 r. [129].

4. Synteza dotychczasowych prac w zakresie omawianej problematyki

Dane i informacje dotyczące wpływu hałasu komunikacyjnego na zdrowie ludzi a w tym drogowego oraz kolejne badania doprowadziły do opublikowania w ostatnich latach m.in. raportów WHO [41, 138] i Europejskiej Agencji Ochrony Środowiska [77]. Opisy i zalecenia w nich zawarte oparto na wielu badaniach oraz analizach [10, 11, 41, 79, 81, 138, 164, 165, 246]. Obecnie kontynuowane są dalsze badania związane z wpływem hałasu drogowego na człowieka (m. in. [57, 90, 177]) – również o rozszerzonym charakterze jak, np. nad wpływem hałasu drogowego na przyjęty do analiz zintegrowany model biologiczny człowieka [175], łączny wpływ zanieczyszczenia powietrza i hałasu [147], czy łączny wpływ oddziaływań transportu na człowieka [136]. Celem tych badań jest m.in. dostarczenie praktycznych informacji związanych z wpływem hałasu i innych niekorzystnych oddziaływań pochodzących od ruchu na zdrowie człowieka, warunki jego zamieszkania, komfort odpoczynku i życia. Istotnym elementem jest określenie wskaźników określających wpływ hałasu na zdrowie człowieka. Związane to jest przede wszystkim z określeniem procentu osób narażonych na szkodliwe działanie hałasu w zakresie czynników zdrowotnych, jak np. dokuczliwość, zaburzenia snu, nadciśnienie dla określonego poziomu hałasu a nie wyłącznie liczby osób narażonych na określoną wartość dopuszczalną hałasu (jak to jest analizowane do tej pory). Oszacowania liczby osób narażonych na określony dopuszczalny poziom hałasu (która w większości przypadków jest wartością abstrakcyjną) nie daje efektu i często poza niezrozumieniem powoduje protesty społeczne. Ponadto wartości dopuszczalne na przestrzeni lat zmieniały się kilkakrotnie – zmiany w ostatnich latach są bardzo duże i w wielu przypadkach mogą one nie mieć związku z realną ochroną ludzi przed skutkami zdrowotnymi wpływu dla ludzi (tabl. 4.2).

Tabl. 4.2. Zmiany wartości dopuszczalnych poziomu hałasu w środowisku w Polsce dla dróg od 1980 r.

Rodzaj (funkcja) terenu	Poziomy dopuszczalne hałasu w środowisku i okresy obowiązywania ¹⁾ [dB]				
	30.09.1980 – 16.06.1998	16.06.1998 – 30.06.2004	13.08.2004 – 19.07.2007	20.07.2007 – 22.10.2012	23.10.2012 – obecnie
• Strefa ochronna uzdrowskowa „A” • Tereny szpitali poza miastem	40/30 – 60/50	50/40	50/45	50/45	50/45
• Tereny zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej • Tereny domów opieki społecznej • Tereny szpitali w miastach		55/45	55/50	55/50	61/56
• Tereny zabudowy mieszkaniowej wielorodzinnej i zamieszkania zbiorowego • Tereny zabudowy zagrodowej • Tereny rekreacyjno-wypoczynkowe • Tereny mieszkaniowo-usługowe		60/50	60/50	60/50	65/56
Tereny w strefie śródmiejskiej miast powyżej 100 tys. mieszkańców		65/55	65/55	65/55	68/60

¹⁾ dopuszczalny poziom hałasu w porze dziennej (od godziny 6⁰⁰ do godziny 22⁰⁰) / dopuszczalny poziom hałasu w porze nocnej (od godziny 22⁰⁰ do godziny 6⁰⁰).

Źródło: opracowanie własne

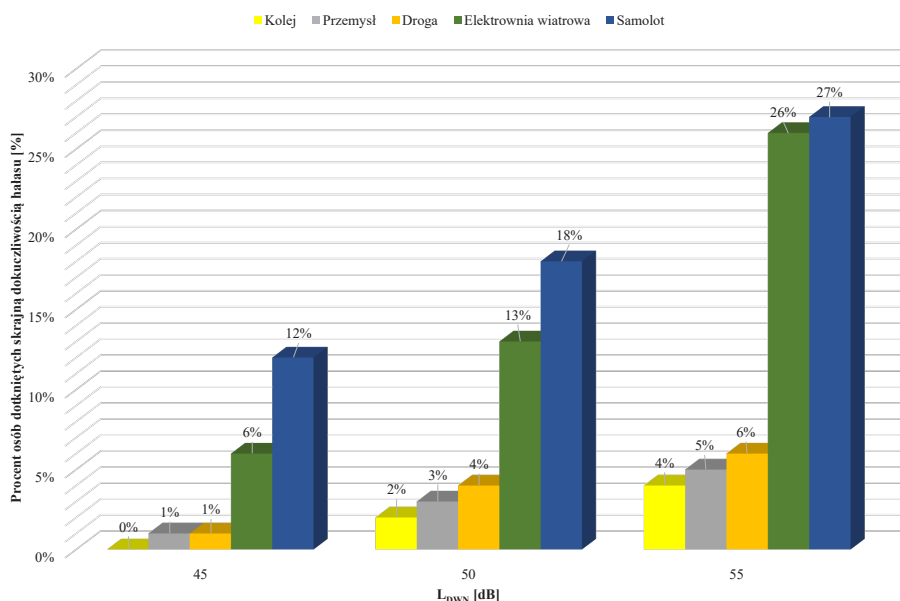
4.1. Stopień zagrożenia hałasem i wartości dopuszczalne hałasu

W Dyrektywie dotyczącej spraw hałasu 2002/49/WE [47] wprowadzone są zapisy o wykorzystaniu do oceny wpływu hałasu związków dawka-efekt (opisywane w rozdz. 3). Ponadto w Załączniku V (3) tej Dyrektywy wprowadzony został zapis o wymaganiach dotyczących planów działań (programów ochrony środowiska przed hałasem – *POSPH*), gdzie każdy plan działania poza odniesieniem do wartości dopuszczalnych hałasu powinien zawierać szacunki w kwestii zmniejszenia liczby dotkniętych osób dokuczliwością hałasu oraz cierpiących na zaburzenia snu lub inne zaburzenia. Ocena prowadzona w ten sposób i przygotowanie *POSPH* umożliwia przede wszystkim wskazanie potencjalnych szkodliwych oddziaływań hałasu dla danej populacji [47]. Powinno się to przedkładać na proces planowania działań w celu złagodzenia lub zmniejszenia szkód w analizowanej grupie ludzi [54]. Praktycznie wszystkie plany ochrony środowiska przed hałasem do tej pory wykonane nie zawierają tego elementu poza odniesieniem się do wartości dopuszczalnych hałasu i krótkim opisem o charakterze ogólnym, jakie problemy zdrowotne powoduje hałas bez odniesienia się jaka populacja jest zagrożona określonymi czynnikami zdrowotnymi. Dzięki znanyim związkom dawka-efekt możliwe jest stworzenie dodatkowych map do analiz, np. map dokuczliwości, które mogą mieć duże znaczenie przy określaniu obszarów cichych w miastach [77].

W większości przypadków wykonywanie *POSPH* natrafia na największe trudności w przygotowaniu wniosków w związku z kosztami ich realizacji. Poza miejscami szczególnie dotkniętymi oddziaływaniem hałasu drogowego (*hot spots*) w otoczeniu dróg (w krajowej rzeczywistości – zagospodarowania terenu) niezwykle trudne staje się przyjęcie środków ochronnych przy ograniczonych środkach finansowych. W takich przypadkach powinno się przeprowadzać analizę kosztów oraz ocenę przy użyciu różnego rodzaju wskaźników [77] – rozdz. 3. Umożliwi to racjonalne oszacowanie prawdziwych kosztów hałasu i ustalenie kolejności oraz priorytetyzacji działań. Należy zwrócić uwagę, że *POSPH* określają także inne źródła niekorzystnych oddziaływań w zakresie hałasu, dla których należy sporządzić plan działania i przewidzieć odpowiednie nakłady finansowe. Pomimo, że hałas drogowy w polskich miastach ma charakter dominujący, to inne źródła mogą mieć często o wiele silniejsze oddziaływania i odbiór – np. otoczenie lotnisk – rys. 4.1.

Często w takich przypadkach, zwłaszcza w sytuacji kumulacji niekorzystnych oddziaływań (hałas od drogi wyższej klasy technicznej i lotniska) nie rozróżnia się różnic pomiędzy źródłami hałasu, kiedy graniczną wartością analiz jest np. $L_{DWN} = 55$ dB. Jeśli dominującym jest hałas lotniczy i od elektrowni wiatrowych może to prowadzić do niedoszacowania efektów zdrowotnych wśród mieszkańców. Stąd wskazane jest przy wykonywaniu *POSPH* analiz wpływu na mieszkańców z rozróżnieniem źródeł hałasu – przy czym hałas drogowy i kolejowy może być analizowany wspólnie ze względu na bardzo zbliżone efekty.

4. Synteza dotychczasowych prac w zakresie omawianej problematyki



Rys. 4.1. Porównanie wpływu różnych źródeł hałasu w zakresie skrajnej dokuczliwości dla ludzi w zależności od wielkości L_{DWN}

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [77]

4.2. Badania i opracowania środowiskowe w ochronie środowiska przed hałasem drogowym

W końcu XIX w. i na początku XX w. pojawiły się pierwsze przepisy dotyczące ochrony przed hałasem [52] – w Wielkiej Brytanii w 1897 r., Stanach Zjednoczonych w 1910 r., w 1914 r. w Szwajcarii. Początkowo dotyczyły one hałasu przemysłowego. Wielka Brytania była praktycznie pierwszym krajem w świecie, w którym opracowano metody i oceny zagrożenia hałasem a także aparaturę do pomiarów akustycznych – w 1895 r. powstaje Narodowe Laboratorium Fizyki (UK National Physical Laboratory), które od początku prowadzi badania akustyczne. W 1933 r. w Szwajcarii wprowadzono pierwsze przepisy dotyczące zakazu ruchu ciężkich pojazdów drogowych w nocy. Pierwsze działania zorganizowane związane z ograniczaniem poziomu hałasu rozpoczynają się po II wojnie światowej [52]. W Polsce w tym samym roku powstaje Główna Komisja do Walki z Hałasem. Wykonano wówczas pierwsze pomiary hałasu w kilku miastach – m.in. w Warszawie, Wilnie, Krakowie [52, 121]. Komisja w 1936 r. w „Sprawozdaniu z prac wstępnych walki z hałasem na terenie Polski” (opublikowane przez Związek Przedsiębiorstw Komunikacyjnych) postulowała m.in. powołanie specjalnej instytucji do walki z hałasem [121]. Jako początek walki z hałasem w Polsce przyjmuje się rok 1948. W rok

później zostaje napisana pierwsza książka przez Prof. Ignacego Maleckiego w Instytucie Techniki Budowlanej (ITB) pt. „Akustyka budowlana”. W książce zostały opisane problemy akustyczne dotyczące projektowania i wykonywania budynków a także planowania przestrzennego [52]. W 1963 r. powstaje Polskie Towarzystwo Akustyczne a w rok później powołany zostaje Komitet Akustyki Polskiej Akademii Nauk. W latach 1965–1970 Zakład Akustyki ITB we współpracy z innymi ośrodkami badawczymi prowadził prace nad problemami akustyki urbanistycznej w Warszawie Gdańsku i Poznaniu [121]. W ramach prac wykonano pierwsze plany akustyczne dla tych miast [197]. W 1991 r. ITB wydał instrukcję nr 310 dotyczącą metod sporządzania kompleksowych planów akustycznych miast i obszarów [91]. W 1980 r. Sejm uchwalił „Ustawę o ochronie i kształtowaniu środowiska” i w rok później Rada Ministrów wydała rozporządzenie w sprawie ochrony środowiska przed hałasem i wibracjami. W latach 1974–2001 w oparciu o instrukcję nr 310 ITB [91] wykonano około 250 planów akustycznych miast, gdzie jednym z podstawowych zagadnień był hałas drogowy [121].

Począwszy od 1949 r. w Stanach Zjednoczonych wydawane są pierwsze dokumenty określające zagrożenie hałasem i przepisy związane z koniecznością jego ograniczania. Jednym z pierwszych krajów, gdzie stosowane były ekrany akustyczne to Japonia. W kraju tym uchwalone zostało w 1986 r. prawo hałasowe, w którym przyjęto standardy ochrony akustycznej dla różnych źródeł hałasu oraz funkcji terenu. Podobne prawo zostało wcześniej uchwalone w Holandii (1979 r.). Europejskie przepisy związane z ochroną przed hałasem zostały zawarte w pierwszych dokumentach Europejskiej Wspólnoty Gospodarczej (od 1993 r. Wspólnoty Europejskiej). W art. 100 a i 118 a Traktatu w Sprawie Ustanowienia Europejskiej Wspólnoty Gospodarczej (w tzw. Traktacie Rzymskim z 1958 r.) zawarto zobowiązania dotyczące wymagania dotyczące ochrony środowiska, w tym ochrony przed hałasem [52]. Bardzo wysoki stan zagrożenia i zanieczyszczenia hałasem drogowym powoduje liczne problemy zdrowotne ludzi mieszkających w otoczeniu dróg i wymaga od zarządzających drogami stosowania odpowiednich działań naprawczych. Obecnie obowiązek taki wprowadzają przepisy europejskie [47, 48] i krajowe [141, 143, 244]. Wskazują one na konieczność wykonywania opracowań środowiskowych takich jak: mapy akustyczne i programy ochrony środowiska przed hałasem a także inne wykorzystywane w procesie inwestycyjnym (raporty o oddziaływaniu przedsięwzięć na środowisko, karty informacyjne przedsięwzięcia, analizy porealizacyjne, przeglądy ekologiczne, monitoringi). Stąd praktycznie na wszystkich etapach procesu inwestycyjnego oraz w okresie eksploatacji występują zagadnienia związane z hałasem drogowym, które zawarte są w opracowaniach środowiskowych w większości pełnią rolę narzędzi w działaniach naprawczych.

Na rys. 4.2 przedstawiono opracowania środowiskowe, jakie mogą wystąpić na poszczególnych etapach procesu inwestycyjnego oraz eksploatacji obiektu drogowego.

4. Synteza dotychczasowych prac w zakresie omawianej problematyki



Rys. 4.2. Opracowania środowiskowe w procesie inwestycyjnym i na etapie eksploatacji oraz utrzymania drogi

Źródło: opracowanie własne

Powyższy proces był wprowadzany na początku lat dziewięćdziesiątych XX wieku podczas przygotowań wejścia Polski do Unii Europejskiej i był on już wielokrotnie modyfikowany w ramach obowiązujących przepisów. Mankamentem nadal jest niedocenywanie roli oceny strategicznej, która w połączeniu z prawidłowym procesem planowania przestrzennego w wielu sytuacjach umożliwiałaby unikanie wielu i niekorzystnych oddziaływań hałasu na zdrowie ludzi. Proces inwestycyjny w obecnej postaci dla inwestycji nowych jest stosowany od niedawna. Do rozwiązania pozostało wiele problemów z o wiele większą liczbą dróg i obiektów drogowych, które zostały wcześniej wybudowane i które nie były wyposażone w rozwiązania i środki zabezpieczające przed hałasem drogowym. W podobnej sytuacji znajdują się inne kraje UE. Przy tak dużej liczbie zagrożonych ludzi oraz ograniczonych środkach finansowych niezbędne stało się wprowadzenie rozwiązań systemowych, które zapewnić ma Dyrektywa END [47]. Została ona wprowadzona w 2002 r. i stanowi podstawowy akt prawny w Unii Europejskiej związany z zarządzaniem hałasem w środowisku. Zapisy tej Dyrektywy zostały zaimplementowane w Polsce do ustawy Prawo ochrony środowiska [244]. Na podstawie Dyrektywy END i ustawy Prawo ochrony środowiska powstały krajowe rozporządzenia dotyczące wyko-

nywania map akustycznych [183, 185, 186, 187, 188] oraz programów ochrony środowiska przed hałasem [182]⁵. Poza europejskimi i krajowymi aktami prawnymi powstało szereg dodatkowych materiałów zagranicznych dotyczących m.in. metod obliczeniowych stosowanych w przygotowaniu map akustycznych [3, 44]. Bardzo ważnym materiałem stał się Przewodnik dotyczący dobrych praktyk wykonywania map akustycznych przygotowany przez grupę roboczą ekspertów europejskich ds. hałasu w 2003 r. [75], który został aktualizowany w 2007 r. [76]. W 2008 r. ten sam zespół opublikował także zalecenia związane z konsultacjami społecznymi i prezentacjami map akustycznych społeczeństwu [168]. Materiały te stały się podstawą dla wielu wytycznych w krajach UE, a także w Polsce [29, 98, 115, 116, 117, 237]. Początkowo materiały te opisywały metodyki wykonywania map akustycznych ze szczególnym uwzględnieniem gromadzenia danych oraz ich przetwarzania z punktu widzenia dokładności wyników (map akustycznych). W kolejnych uwaga skierowana została poza dokładnością map akustycznych również na takie elementy jak: model obliczeniowy, jego dokładność, współpraca z systemami GIS (ang. *Geographic Information System*), prezentacje dla społeczeństwa itp.

Podstawą Dyrektywy *END* stała się Zielona Księga Komisji Europejskiej w sprawie przyszłej polityki dotyczącej hałasu (uchwała z dnia 10 czerwca 1997 r. Komisji Parlamentu Europejskiego) – w kolejnej edycji Zielonej Księgi [259], Dyrektywa *END* jest podstawowym aktem prawnym dotyczącym polityki w zakresie ochrony przed hałasem. Do celów podstawowych Dyrektywy należą trzy grupy zadań:

- określenie stopnia narażenia na hałas w środowisku poprzez wykonanie map akustycznych przy zastosowaniu takich samych metod oceny we wszystkich krajach członkowskich UE,
- zapewnienie społeczeństwu dostępu do informacji związanej z hałasem w środowisku i jego skutkami,
- przyjęcie planu działań (naprawczych i zapobiegających) zmierzających do zapobiegania powstawaniu hałasu w środowisku i obniżania jego poziomu.

Cele te związane są z rozwijaniem środków w zakresie obniżania hałasu z głównych źródeł, do których zaliczono m.in. transport samochodowy. Zakres Dyrektywy *END* odnosi się do hałasu w środowisku, na jaki narażeni są ludzie – głównie w obszarach zabudowanych, w publicznych parkach lub na innych obszarach względnie cichych w aglomeracji, na obszarach ciszy na otwartym terenie poza miastem, w pobliżu szkół, szpitali i innych wrażliwych na hałas budynków i obszarów. W ramach Dyrektywy *END* określone zostały następujące zagadnienia mające bezpośredni lub pośredni wpływ na wykonanie map akustycznych dla dróg: wskaźniki hałasu i ich stosowanie, metody oceny, sporządzanie strategicznych map hałasu, plany działań, informowanie społeczeństwa, przekazanie danych Komisji oraz ich publikowanie oraz gromadzenie.

⁵ Cytowane tutaj rozporządzenia są aktualne na dzień 31.07.2017 r.

4. Synteza dotychczasowych prac w zakresie omawianej problematyki

Wskaźniki hałasu i ich stosowanie

Dla wykonywania oraz analiz map hałasu zostały wprowadzone dwa nowe wskaźniki L_{den} i L_{night} (odpowiednikami tych wskaźników w przepisach krajowych są L_{DWN} i L_N), które dotyczą hałasu długotrwałego (całorocznego) reprezentującego dokuczliwość w różnych porach doby (dzień, wieczór, noc). Znaczącą zmianą w zakresie oszacowania wpływu hałasu na zdrowie ludzi będzie wprowadzenie zmian w Dyrektywie *END* od 31.12.2018 r. wskaźników umożliwiających oszacowanie wpływu na zdrowie ludzi [118], które zostały opisane w rozdz. 3.

Metody oceny, czyli metody obliczania, prognozowania oraz pomiaru wskaźników hałasu

Do ustalania powyższych wskaźników podano metody oceny w załączniku II Dyrektywy *END*. Zapisy związane z metodami oceny wskazały w przypadku hałasu drogowego na krajową metodę francuską [55, 256] lub metodę danego kraju o ile taka została wprowadzona (w Polsce do tej pory taka metoda nie została oficjalnie wprowadzona). W przypadku modeli obliczeniowych należy zwrócić szczególną uwagę na dokładność obliczeń. Od jakości analiz wyników zależy jakość wnioskowania oraz stosowane rozwiązania ochrony przed hałasem i w efekcie również ich koszty. Jako podstawowy model obliczeniowy do przygotowania map akustycznych zalecony został w Dyrektywie *END* dla hałasu pochodzącego od dróg model francuski [55]. W praktyce model ten jest wykorzystywany do prognozowania hałasu drogowego w Polsce i zdecydowanej większości przypadków jego dokładność jest zadowalająca. W tabl. 4.3 przedstawiono wpływ danych wejściowych na dokładność obliczeń hałasu, jaką określił Prof. J. Kazimierzczak w 2000 r. [98], w trakcie pierwszej rundy wykonywania map akustycznych.

Tabl. 4.3. Wpływ danych wejściowych na wyniki obliczeń hałasu drogowego

Lp.	Parametr wejściowy	Zakres zmian danych wejściowych	Zmiana wyniku obliczeń ΔL_{AeqT} dB
1	Natężenie ruchu Q_{sr}	$\pm 10\%$ $\pm 20\%$	$\pm 0,5$ dB ± 1 dB
2	Średnia prędkość ruchu	± 10 km	± 1 dB
3	Rodzaj nawierzchni	asfalt cichy – kostka brukowa	-3,5 - +3,5 dB
4	Rodzaj ruchu	ciągły, pulsujący	-1,5 - +1,5 dB

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [98]

Na podstawie powyższego zestawienia łatwo zauważyć, że jednym z większych problemów, jakie stwarza model obliczeniowy to słaba dokładność w zakresie rodzaju nawierzchni. Prace związane z nowym modelem obliczeniowym CNOSSOS-EU wprowadziły szereg zmian w celu zwiększenia dokładności obliczeń dla różnych rodzajów nawierzchni drogowych [99]. Z wielu doświadczeń praktycznych wynika również fakt mniejszej dokładności wyników obliczeń w warunkach miejskich (duża zmienność w zakresie ruchu drogowego, podłoża, obiektów itp.), gdzie bardzo istotnym elementem

staje się walidacja modelu. Model obliczeniowy daje poprawne wyniki, jeśli różnica pomiędzy wartością zmierzoną a obliczoną dla równoważnego poziomu hałasu nie przekracza [98]:

- 1 dB dla terenów niezabudowanych i odległości źródło-receptor do 100 m,
- 2 dB dla obszarów płaskich i odległości źródło-receptor do 2000 m,
- 5 dB dla obszarów zurbanizowanych i pagórkowatych, dla odległości źródło-receptor do 2000 m.

Dotychczasowe metody obliczeniowe mogą być stosowane do momentu wprowadzenia jednolitej metody oceny przez Komisję na terenie całej UE. Zapowiadane zmiany zostały w praktyce ogłoszone i nowa metodyka (CNOSSOS-EU) zacznie obowiązywać na mocy nowej Dyrektywy [48] zmieniającej zawartość załącznika II ustanawiając wspólne metody oceny hałasu (obowiązuje od 31 grudnia 2018 r). Prace, które poprzedziły te zmiany zawarte są w raporcie [99].

Sporządzanie strategicznych map hałasu

Mapy akustyczne wykonywane po raz pierwszy zostały sporządzone w większości krajów do 30 czerwca 2007 r. dla głównych dróg (w tym dróg krajowych) o natężeniu ruchu ponad 6 milionów pojazdów rocznie, miast o liczbie mieszkańców powyżej 250 tys. mieszkańców oraz głównych linii kolejowych i głównych lotnisk. Od tego czasu państwa UE powinny powiadamiać Komisję o takich drogach systematycznie, co 5 lat. Ponadto kraje UE wykonywały po raz drugi mapy akustyczne dla dróg głównych (zgodnie z definicją są to drogi o natężeniu ruchu ponad 3 miliony pojazdów rocznie) oraz miast o liczbie powyżej 100 tys. mieszkańców do dnia 30 czerwca 2012 r. Następnie mapy akustyczne będą wykonywane systematycznie, co 5 lat (również linie kolejowe i lotniska). Mapy akustyczne muszą przedstawiać sytuację w poprzednim roku kalendarzowym. Minimalne wymagania dla strategicznych map hałasu zawarte są w załączniku IV Dyrektywy *END*.

Plany działań

Również co 5 lat państwa członkowskie UE muszą sporządzić plany działań dla potrzeb zarządzania problemami hałasu i skutkami hałasu oraz w miarę potrzeby, zmniejszania hałasu. Plany te sporządza się dla obiektów, dla których wykonywano mapy akustyczne. W polskich przepisach plany działań przyjęły nazwę programów ochrony środowiska przed hałasem (w dalszych opisach stosowany jest także skrót *POSPH*). Zakres planu działań w Dyrektywie *END* został wprowadzony do załącznika V – jego wartość podano poniżej.

Informowanie społeczeństwa

Zadanie to zostało określone jako jeden z celów głównych wykonania map akustycznych. Wykonane mapy akustyczne oraz plany działań powinny zostać udostępnione w możliwie szerokim zakresie społeczeństwu. Przygotowana informacja dla społeczeństwa powinna być przejrzysta, zrozumiała i przystępna. Powinna ona również

4. Synteza dotychczasowych prac w zakresie omawianej problematyki

zawierać podsumowanie z wyszczególnieniem najważniejszych zagadnień. Informowanie społeczeństwa o stanie akustycznym obszaru oraz stanie zagrożenia jest jednym z trudniejszych zadań wykonywanych w programach ochrony środowiska przed hałasem.

Przekazanie danych Komisji oraz ich publikowanie oraz gromadzenie

Kraje sporządzające mapy akustyczne mają obowiązek przekazywać cyklicznie Komisji dane i streszczenia planów działań w ciągu 6 miesięcy od terminów ich zakończenia – terminy te zostały opisane w dwóch powyższych punktach. Zakres przekazywanych informacji do Komisji określono w załączniku VI Dyrektywy *END*.

Poniżej podano minimalne wymagania dla sporządzanych map hałasu (poniższe zapisy podano w pełnym brzmieniu zgodnie z Dyrektywą *END* [47]):

1. *Strategiczna mapa hałasu stanowi prezentację danych w jednym z następujących aspektów:*
 - *obecna, poprzednia lub przewidywana sytuacja hałasu w kategoriach wskaźnika hałasu,*
 - *przekroczenie wartości progowej,*
 - *przybliżona liczba lokali mieszkalnych, szkół i szpitali, które na danym obszarze są poddane działaniu konkretnych wartości wskaźnika hałasu,*
 - *przybliżona liczba osób przebywających na danym obszarze, poddanych działaniu hałasu.*
2. *Strategiczne mapy hałasu można udostępniać społeczeństwu w postaci:*
 - *wykresów,*
 - *danych liczbowych w tabelach,*
 - *danych liczbowych w formie elektronicznej.*
3. *W strategicznych mapach hałasu dla aglomeracji uwzględnia się szczególnie hałas z:*
 - *ruchu kołowego,*
 - *ruchu szynowego,*
 - *lotnisk,*
 - *miejsz prowadzenia działalności przemysłowej, w tym także portów.*
4. *Sporządzanie strategicznych map hałasu służy następującym celom:*
 - *pozyskiwaniu danych do przekazania Komisji zgodnie z art. 10 ust. 2 i w załączniku VI,*
 - *jako źródło informacji dla obywateli zgodnie z art. 9,*
 - *jako podstawę planu działań zgodnie z art. 8.*

Dla każdego z wyżej wymienionych zastosowań sporządza się innego rodzaju strategiczne mapy hałasu.
5. *Minimalne wymagania dla strategicznych map hałasu w zakresie danych przeznaczonych do przekazania Komisji są określone w pkt 1.5, pkt 1.6, pkt 2.5, pkt 2.6 i pkt 2.7 załącznika VI.*
6. *Dla potrzeb informowania obywateli zgodnie z art. 9 i sporządzania planów działań zgodnie z art. 8, podaje się dodatkowe i bardziej szczegółowe dane, takie jak:*
 - *prezentacja graficzna,*
 - *mapa przedstawiająca przekroczenie wartości progowej,*
 - *mapy różnic, przedstawiające porównanie sytuacji obecnej z wariantami możliwych sytuacji w przeszłości,*

- mapy przedstawiające wartość wskaźnika hałasu na wysokości innej niż 4 m, tam gdzie jest to właściwe.

Państwa Członkowskie mogą ustanowić zasady dotyczące typów i formatów map hałasu, o których mowa.

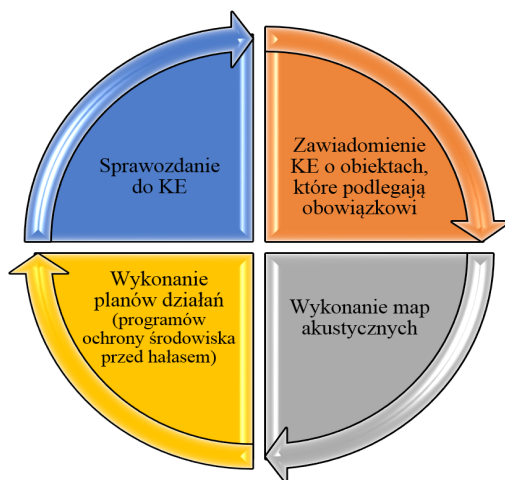
7. Strategiczne mapy hałasu na potrzeby lokalne lub krajowe sporządza się dla wysokości oceny 4 m i dla zakresu L_{den} i L_{night} 5 dB zgodnie z definicją podaną w załączniku VI.
8. Dla aglomeracji obowiązuje sporządzanie odrębnych strategicznych map hałasu dla hałasu z ruchu kołowego, szynowego i lotniczego i hałasu przemysłowego. Dopuszcza się dołączanie map dla innych źródeł.
9. Komisja może opracować wytyczne, zawierające dalsze wskazówki odnośnie map hałasu, sporządzania map hałasu i oprogramowania do sporządzania map hałasu, zgodnie z art. 13 ust. 2.

Minimalne wymagania dla planów działań (programy ochrony środowiska przed hałasem) zgodnie z Dyrektywą END [47] to:

1. Plan działań musi zawierać co najmniej następujące elementy:
 - opis danej aglomeracji, jej głównych dróg, głównych linii kolejowych lub głównych lotnisk i innych uwzględnionych źródeł hałasu,
 - odpowiedzialne władze,
 - kontekst prawny,
 - wszystkie obowiązujące wartości graniczne zgodnie z art. 5,
 - podsumowanie wyników sporządzania map hałasu,
 - szacunkowa liczba osób poddanych działaniu hałasu, określenie problemów i sytuacji wymagających poprawy,
 - historię społecznych konsultacji organizowanych zgodnie z art. 8 ust. 7,
 - wszelkie obowiązujące już środki zmniejszania hałasu i wszelkie przygotowywane przedsięwzięcia,
 - działania, jakie właściwe władze zamierzają podjąć w ciągu najbliższych pięciu lat, łącznie ze środkami zachowania obszarów ciszy,
 - długofalową strategię,
 - dane finansowe (o ile są dostępne): budżety, ocena efektywności kosztowej, ocena relacji koszt/korzyść,
 - przewidywane przepisy, służące ocenie wdrożenia i wyników planu działań.
2. Działania, jakie właściwe władze zamierzają podjąć w dziedzinach podlegających ich kompetencji, mogą obejmować na przykład:
 - planowanie komunikacji,
 - planowanie przestrzenne,
 - środki techniczne u źródeł hałasu,
 - wybór cichszych źródeł,
 - zmniejszenie przekazywania dźwięku,
 - środki lub bodźce natury prawnej lub ekonomicznej.
3. Plan działań powinien zawierać szacunki dotyczące zmniejszenia liczby dotkniętych osób (cierpiących z powodu dokuczliwości, zakłócenia snu i innych skutków).
4. Komisja może opracować wytyczne, zawierające dalsze wskazówki odnośnie do planów działań zgodnie z art. 13 ust. 2.

4. Synteza dotychczasowych prac w zakresie omawianej problematyki

System stworzony przez Dyrektywę *END* zapewnia ciągle działania w zakresie oceny, monitorowania i zarządzania hałasem tworząc w efekcie wieloletni program do walki z hałasem. Cykliczność tych działań przedstawiono na rys. 4.1. W tabl. 4.4 podano terminy pierwszych trzech rund wykonywania map akustycznych oraz programów ochrony środowiska.



Rys. 4.3. Cykl wykonywania map akustycznych i planów działań tworzący wieloletni program walki z hałasem

Źródło: opracowanie własne

Tabl. 4.4. Dotychczasowe i nadchodzące terminy wykonywania poszczególnych materiałów i przekazywania wyników w cyklu wykonywania map akustycznych i planów działań

Runda cyklu	Zawiadomienie KE o obiektach podlegających obowiązkowi wykonywania map akustycznych	Termin wykonania map akustycznych	Termin zakończenia prac nad planami działań (programami ochrony środowiska przed hałasem)	Termin przekazania wyników do KE
I	30.06.2005	30.06.2007	15.07.2008	pół roku od terminu wykonania mapy akustycznej i planu działań
II	30.06.2010	30.06.2012	15.07.2013	
III	30.06.2015	30.06.2017	15.07.2018	

Źródło: opracowanie własne

Należy zwrócić uwagę, że termin przekazania informacji do KE o obowiązkowi wykonywania map akustycznych dla dróg o ruchu większym od 3 mln pojazdów na rok zbiega się w czasie z generalnym pomiarem ruchu, jaki wykonywany jest co pięć lat w drogownictwie. Ponadto plany działań powinny być wykonywane w cyklu krótszym

niż 5 lat w przypadku wystąpienia istotnego zdarzenia, która rzutuje na istniejącą sytuację akustyczną.

Polska jak już wcześniej wspomniano zaimplementowała podstawowe zapisy Dyrektywy *END* do ustawy Prawo ochrony środowiska [244]. W kolejnych rozporządzeniach Ministra Środowiska precyzowane były zapisy związane z obowiązkiem i zakresem wykonywania map akustycznych i pomiarów oraz programów ochrony środowiska przed hałasem. Należą do nich (w poniższym zestawieniu ujęto również te przepisy, które pośrednio związane są z mapami akustycznymi i programami ochrony środowiska przed hałasem):

- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 października 2002 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinien odpowiadać program ochrony środowiska przed hałasem [182].
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 17 stycznia 2003 r. w sprawie rodzajów wyników pomiarów prowadzonych w związku z eksploatacją dróg, linii kolejowych, linii tramwajowych, lotnisk oraz portów, które powinny być przekazywane właściwym organom ochrony środowiska, oraz terminów i sposobów ich prezentacji [183].
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 grudnia 2006 r. w sprawie dróg, linii kolejowych i lotnisk, których eksploatacja może powodować negatywne oddziaływanie akustyczne na znacznych obszarach, dla których jest wymagane sporządzanie map akustycznych, oraz sposobów określania granic terenów objętych tymi mapami [185].
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 października 2007 r. w sprawie szczegółowego zakresu danych ujętych na mapach akustycznych oraz ich układu i sposobu prezentacji [186].
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 10 listopada 2010 r. w sprawie sposobu ustalania wartości wskaźnika hałasu L (DWN) [187].
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 16 czerwca 2011 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów poziomów substancji lub energii w środowisku przez zarządzającego drogą, linią kolejową, linią tramwajową, lotniskiem lub portem [188].
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 października 2012 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku [189].

Aktualnie obowiązujące przepisy dotyczące obowiązku wykonywania map akustycznych oraz programów ochrony środowiska przed hałasem można uznać za kompletne z punktu widzenia Dyrektywy *END* [47], choć w wielu przypadkach stwarzają one problemy interpretacyjne. W monografii ograniczono opis obowiązujących przepisów do zakresu map akustycznych i programów ochrony środowiska przed hałasem, które stanowią podstawę do długookresowej polityki w zakresie ochrony środowiska przed hałasem.

4. Synteza dotychczasowych prac w zakresie omawianej problematyki

Zgodnie z Dyrektywą *END* [47] oraz rozporządzeniem Ministra Środowiska [185] mapy akustyczne wykonywane są dla obiektów, które mogą w znaczący sposób pogorszyć oddziaływanie akustyczne w większych obszarach. Do obiektów tych należą [185]:

- drogi, po których przejeżdża ponad 6 000 000 pojazdów rocznie,
- linie kolejowe, po których przejeżdża ponad 60 000 pociągów rocznie,
- lotniska cywilne, na których ma miejsce ponad 50 000 operacji (startów lub lądowań) statków powietrznych rocznie, z wyłączeniem lotów szkolnych wykonywanych przy użyciu samolotów o masie startowej poniżej 5700 kg.

Powyższe wartości były ograniczone dla dróg i linii kolejowych o połowę w pierwszej rundzie wykonywania map akustycznych. Ponadto na podstawie Dyrektywy *END* [47] w ustawie Prawo ochrony środowiska [244] zawarto obowiązek wykonywania map akustycznych i planów ochrony dla miast o liczbie ponad 100 tys. mieszkańców – w Polsce dotyczy to 37 miast (Bydgoszcz, Bytom, Chorzów, Częstochowa, Dąbrowa Górnicza, Elbląg, Gdańsk, Gdynia, Gliwice, Gorzów Wielkopolski, Kalisz, Katowice, Kielce, Koszalin, Kraków, Legnica, Łódź, Lublin, Olsztyn, Opole, Płock, Poznań, Radom, Ruda Śląska, Rybnik, Rzeszów, Sosnowiec, Szczecin, Tarnów, Toruń, Tychy, Wałbrzych, Warszawa, Włocławek, Wrocław, Zabrze, Zielona Góra).

W ramach tych opracowań analizowany jest hałas pochodzący z linii komunikacyjnych (drogi, koleje, linie tramwajowe), a także hałas przemysłowy i lotniczy. Jak można zauważyć w przypadku dróg istotna jest wielkość obciążenia ruchem a nie klasa drogi, czy też zarządca drogi. Na zarządcy drogi spoczywa obowiązek wykonania map akustycznych, co powoduje, że praktycznie w Polsce mapy akustyczne dotyczące dróg wykonywane są zarówno przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych, jaki i Zarządy Dróg Wojewódzkich (działające w imieniu marszałków województw) oraz zarządców dróg miejskich.

Granice map akustycznych (ich zasięg) wyznaczane są na podstawie dwóch wskaźników: $L_{DWN} = 55$ dB oraz $L_N = 50$ dB [185]. Wskaźnik L_{DWN} zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska wyznaczany jest na podstawie wzoru [187]:

$$L_{DWN} = 10 \cdot \left[\frac{12}{24} \cdot 10^{0,1 \cdot L_D} + \frac{10}{24} \cdot 10^{0,1 \cdot (L_w + 5)} + \frac{8}{24} \cdot 10^{0,1 \cdot (L_N + 10)} \right] \quad (4.1)$$

gdzie:

- L_{DWN} – oznacza długookresowy średni poziom dźwięku A wyrażony w decybelach (dB), wyznaczony w ciągu wszystkich dób w roku, z uwzględnieniem pory dnia (rozumianej jako przedział czasu od godz. 6⁰⁰ do godz. 18⁰⁰), pory wieczoru (rozumianej jako przedział czasu od godz. 18⁰⁰ do godz. 22⁰⁰) oraz pory nocy (rozumianej jako przedział czasu od godz. 22⁰⁰ do godz. 6⁰⁰),

- L_D – oznacza długookresowy średni poziom dźwięku A wyrażony w decybelach (dB), wyznaczony w ciągu wszystkich pór dnia w roku (rozumianych jako przedział czasu od godz. 6⁰⁰ do godz. 18⁰⁰),
- L_W – oznacza długookresowy średni poziom dźwięku A wyrażony w decybelach (dB), wyznaczony w ciągu wszystkich pór wieczoru w roku (rozumianych jako przedział czasu od godz. 18⁰⁰ do godz. 22⁰⁰),
- L_N – oznacza długookresowy średni poziom dźwięku A wyrażony w decybelach (dB), wyznaczony w ciągu wszystkich pór nocy w roku (rozumianych jako przedział czasu od godz. 22⁰⁰ do godz. 6⁰⁰).

Zakres danych na mapach oraz ich układ i sposób prezentacji zostały zawarte w rozporządzeniu Ministra Środowiska z 2007 r. [186], które zostało zmienione po pierwszej rundzie wykonywania map akustycznych. W załącznikach do tego rozporządzenia podane zostały szczegółowe wymagania dotyczące: informowania państwowego monitoringu środowiska, tworzenia i aktualizacji programów ochrony środowiska przed hałasem oraz informowania społeczeństwa o zagrożeniach środowiska hałasem.

Istotnymi z punktu widzenia analiz prowadzonych w tym opracowaniu są mapy akustyczne dla tworzenia i aktualizacji POSPH. Zgodnie z załącznikiem nr 2 do rozporządzenia Ministra Środowiska [186] szczegółowy zakres danych ujęty na tego rodzaju mapach akustycznych oraz ich układ i sposób prezentacji, to:

1. Zakres danych wykorzystywanych do tworzenia i aktualizacji programów ochrony środowiska przed hałasem ujętych na mapach akustycznych oraz ich układ i sposób prezentacji obejmuje dane określone w pkt 2–11 załącznika nr 1⁶ do rozporządzenia oraz dodatkowo dane określone w niniejszym załączniku.
2. Zakres danych części opisowej mapy akustycznej powinien być uzupełniony o:
 - 1) informacje i analizy uprzednio wykonanych map akustycznych, o ile takie były wykonane; analizy takie są wykonywane nawet w przypadku, gdy podstawy metodyczne wykonania tych map różniły się od obecnie stosowanych;
 - 2) informacje na temat uprzednio opracowanych i wdrożonych programów ochrony środowiska przed hałasem, w tym w szczególności:
 - a) obszar objęty programem,
 - b) rodzaj źródła hałasu,
 - c) nazwę programu i rodzaj: program lokalny lub ponadlokalny,
 - d) rok opracowania;
 - 3) efekty wynikające z podejmowanych uprzednio działań w zakresie ochrony środowiska zarówno w odniesieniu do opracowanych i wdrożonych programów ochrony środowiska przed hałasem, jak też działań o charakterze lokalnym:
 - a) obszar, źródło,
 - b) przedsięwzięcia infrastrukturalne, w tym budowa obwodnic,

⁶ Odnosi się do zakresu map dla państwowego monitoringu środowiska.

4. Synteza dotychczasowych prac w zakresie omawianej problematyki

- c) rozwiązania techniczne z uwzględnieniem zmiany nawierzchni oraz zastosowania ekranów akustycznych,
 - d) środki planistyczne, w tym obszary ograniczonego użytkowania, strefy przemysłowe,
 - e) środki ekonomiczne ograniczania hałasu,
 - f) przepisy prawa miejscowego;
- 4) analizy wykonane pod kątem możliwości wpływu na klimat akustyczny, aktualnych i przewidywanych w najbliższym czasie zamierzeń inwestycyjnych dla obszaru działań lub efektów według układu określonego w ppkt 2 oraz ppkt 3; w szczególności może to obejmować analizę rozwiązań wariantowych;
- 5) analizy kosztów i korzyści.
3. Fragmenty części opisowej mapy akustycznej, odnoszące się do prezentacji i podsumowania wyników, powinny zostać uzupełnione o:
- 1) wyniki analiz rozkładu hałasu przy elewacjach budynków, przeprowadzonych na różnych wysokościach;
 - 2) oszacowania liczby ludności zamieszkałej na obszarach:
 - a) na których zrealizowano przedsięwzięcia w zakresie ochrony środowiska przed hałasem, o których mowa w pkt 2 ppkt 3,
 - b) na których przewiduje się realizację przedsięwzięć w zakresie ochrony środowiska przed hałasem, o których mowa w pkt 2 ppkt 4; oszacowania te powinny spełniać warunki wymienione w pkt 4 ppkt 1 oraz w pkt 4 ppkt 3 załącznika nr 1 do rozporządzenia;
 - 3) oszacowania efektów zrealizowanych przedsięwzięć w zakresie zwalczania hałasu, o których mowa w pkt 2 ppkt 3, oraz przewidywanych efektów przedsięwzięć, o których mowa w pkt 2 ppkt 4;
 - 4) identyfikację obszarów, które powinny zostać ustanowione jako obszary ciche w aglomeracji;
 - 5) uzupełnienie wniosków wynikających z analiz i oszacowań, o których mowa w ppkt 1–4.
4. Informacje, o których mowa w pkt 3, powinny być w miarę możliwości zestawiane tabelarycznie i uzupełniane wykresami oraz diagramami.
5. Zakres danych części graficznej mapy akustycznej, oprócz wymagań określonych w załączniku nr 1 do rozporządzenia, powinien także obejmować:
- 1) rozkład przestrzenny wartości wskaźnika M, określonego w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 14 października 2002 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinien odpowiadać program ochrony środowiska przed hałasem (Dz. U. Nr 179, poz. 1498);
 - 2) zestaw map pokazujących efekty zastosowania przedsięwzięć ochrony środowiska przed hałasem, odpowiadających sytuacjom ujętym w pkt 2 ppkt 3;

- 3) zestaw map prognostycznych⁷, które mogą obejmować tylko wycinek obszaru objętego mapą akustyczną, odpowiadających sytuacji ujętej w pkt 2 ppkt 4;
- 4) mapy zawierające proponowane kierunki zmian zagospodarowania przestrzennego, wynikające z potrzeb ochrony przed hałasem; w szczególności na mapach tych oznaczane są proponowane obszary ciche.
6. Mapy akustyczne wymienione w pkt 5 ppkt 2 oraz w pkt 5 ppkt 3, a mające charakter lokalny, mogą być wykonane i prezentowane także w oparciu o inny wskaźnik oceny poza L_{DWN} oraz L_N i na innych wysokościach niż 4 m.
7. Sposób prezentacji map, a w szczególności skala i format map wymienionych w pkt 6, może być dobierany indywidualnie w zależności od potrzeb.

Na podstawie powyższego wyciągu z przepisów można stwierdzić, że należy również analizować rozwiązania wariantowe zamierzeń inwestycyjnych oraz wykonać analizę kosztów i korzyści – p. 2, 4) i 5). W zamierzeniach inwestycyjnych z reguły analizowane są rozwiązania i środki ochrony przed hałasem.

Na szczególną uwagę zasługują tzw. obszary ciche. W ustawie Prawo ochrony środowiska [244] definiowane są one jako:

- obszar cichy w aglomeracji – jest to obszar, na którym nie występują przekroczenia dopuszczalnych poziomów hałasu wyrażonych wskaźnikiem hałasu L_{DWN} ,
- obszar cichy poza aglomeracją – jest to obszar, który nie jest narażony na oddziaływanie hałasu komunikacyjnego, przemysłowego lub pochodzącego z działalności rekreacyjno-wypoczynkowej.

Aglomeracja w tym przypadku definiowana jest jako miasto lub kilka miast o wspólnych granicach administracyjnych [244].

Mapy akustyczne są materiałem bezpośrednio wykorzystywanym w programach ochrony środowiska przed hałasem. Zakres *POSPH* został podany w rozporządzeniu Ministra Środowiska z 2002 r. [182]. Ze względu na jego objętość nie jest tutaj cytowany w pełnym zakresie. Program ochrony środowiska składa się z trzech części: opisowej, wyszczególniającej ograniczenia i obowiązki wynikające z realizacji programu oraz uzasadnienia zakresu zagadnień. Podobnie jak mapy akustyczne programy bazują na wskaźnikach hałasu L_{DWN} i L_N oraz wartościach dopuszczalnych dla nich wyznaczonych (z uwzględnieniem funkcji terenu) – szczegóły podano w rozdz. 3.2.

Z istotnych informacji z punktu widzenia kosztów realizacji programu w części opisowej należy podać m.in.:

- wyszczególnienie podstawowych kierunków i zakresu działań niezbędnych do przywrócenia dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku;
- koszty realizacji programu, w tym koszty realizacji poszczególnych zadań;
- źródła finansowania programu.

⁷ Rozumie się przez to mapę przedstawiającą różnice między stanem akustycznym środowiska w okresie, dla którego sporządzono mapę akustyczną, a przewidywanym stanem akustycznym w przyszłości w określonym roku lub w przedziale czasu.

4. Synteza dotychczasowych prac w zakresie omawianej problematyki

W uzasadnieniu zakresu zagadnień należy również wskazać koncepcję działań zabezpieczających środowisko przed hałasem. W *POSPH* należy także określić i ocenić efektywność ekologiczną i ekonomiczną zadań programu we wzajemnym ich powiązaniu. Na podstawie powyższych informacji należy stwierdzić, że zarówno mapy akustyczne, jak programy ochrony środowiska przed hałasem poza koniecznością zaplanowania odpowiednich rozwiązań chroniących środowisko przed hałasem przewidują analizy związane z efektywnością ekonomiczną oraz ekologiczną.

Warto również zwrócić uwagę na kryterium kolejności realizacji zadań programów ochrony środowiska, którym jest wskaźnik *M*. Postać tego wskaźnika określana jest za pomocą wzoru 3.17.

W krajowej literaturze występuje bardzo niewiele informacji nt. sposobu wykonywania programów ochrony środowiska przed hałasem. Z reguły podawane są zapisy rozporządzenia [182], które reguluje głównie skład i zakres programów ochrony środowiska przed hałasem oraz krótkie rozszerzenie tych zapisów jak np. w [98]. Stąd w ramach dwóch rund już wykonywanych programów można zaobserwować bardzo duże zróżnicowanie sposobu ich wykonywania zwłaszcza w zakresie doboru urządzeń ochrony środowiska ich wartości, realności ich zastosowania oraz oceny w zakresie uwarunkowań ekonomicznych i społecznych (głównie wpływ hałasu na zdrowie ludzi). Zależy to przede wszystkim od doświadczeń zespołów wykonujących oraz ich składu – czy są w nich również specjaliści branży drogowej [23].

4.3. Rozwiązania i środki zabezpieczające przed hałasem drogowym

Wybór rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym niezależnie od tego, w jakim opracowaniu środowiskowym występuje, jest jedną z ważniejszych decyzji procesu inwestycyjnego w drogownictwie. Aby taka decyzja mogła być podjęta prawidłowo konieczna jest znajomość głównych czynników powodujących powstawanie hałasu drogowego – są to głównie czynniki związane z [18, 24]:

- ruchem drogowym:
 - natężenie ruchu drogowego,
 - prędkość pojazdów,
 - struktura rodzajowa ruchu a w tym udział pojazdów hałaśliwych (motocykle, skutery, pojazdy ciężarowe itp.),
 - płynność, styl jazdy i warunki ruchu,
 - organizacja ruchu a w tym głównie sposoby i metody kształtowania prędkości pojazdów,
 - strategie sterowania ruchem w arteriach lub obszarach za pomocą systemów i urządzeń ITS.

4.3. Rozwiązania i środki zabezpieczające przed hałasem drogowym

- związane z drogą:
 - rodzaj, geometria i elementy wyposażenia drogi (liczba jezdni, szerokość pasów ruchu, pas awaryjny, skarpy nasypów i wykopów),
 - położenie w stosunku do poziomu terenu (nasyp, wykop, estakada, tunel),
 - pochylenie podłużne,
 - rodzaj i stan nawierzchni drogowej,
 - lokalizacja i funkcjonowanie urządzeń ograniczających płynność ruchu pojazdów – skrzyżowania o różnych formach organizacji ruchu oraz sposobach sterowania,
 - lokalizacja i rodzaje środków fizycznych uspokojenia ruchu.

Konieczna jest też znajomość czynników wpływających na rozchodzenie się hałasu w otoczeniu drogi. Do głównych czynników należą związane z [24]:

- otoczeniem drogi:
 - ukształtowanie terenu,
 - rodzaj podłoża pomiędzy drogą a punktem odbioru,
 - odległość i wysokość przeszkód mogących mieć wpływ na warunki propagacji hałasu (ekrany akustyczne, zieleń, obiekty itp.),
 - wysokość i szerokość pasów zieleni.
- warunkami atmosferycznymi – temperatura, ciśnienie, wielkość i kierunek wiatru;
- budynkiem (obiektem chronionym):
 - rodzaj i kształt zabudowy,
 - gęstość zabudowy,
 - odległość zabudowy (budynku) od drogi,
 - wysokość zabudowy,
 - rodzaj wykończenia elewacji budynków oraz urządzeń ochrony przed hałasem,
 - materiały budowlane (ich właściwości akustyczne),
 - lokalizacją pomieszczeń mieszkalnych w stosunku do drogi.

Powyższe czynniki wskazują, jakie mogą być skuteczne rozwiązania i środki zabezpieczające przed hałasem drogowym. Jednocześnie duża liczba tych czynników, ich zmienność powoduje, że wybór rozwiązania drogowego i środków zabezpieczających przed hałasem staje się zadaniem często skomplikowanym i obciążonym ryzykiem związanym z ich efektywnością, kosztami i wieloletnimi problemami w utrzymaniu. Badania nad rozwiązaniami i metodami ochrony przed hałasem drogowym trwają praktycznie nieprzerwanie, odkąd na drogach pojawił się pojazd (niekoniecznie z silnikiem spalinowym). Pierwsze problemy pojawiły się, kiedy zaczęły się poruszać zaprzęgi, które powodowały hałas kół toczących się po nawierzchni. Rozwój współczesnych rozwiązań chroniących przed hałasem drogowym nastąpił w XX w. W 1971 r. w trakcie Światowego Kongresu Drogowego w Pradze zostały opisane w raporcie przez dr. inż. W. Suchorzewskiego, inż. W. Dzierana i doc. dr. L. Tomaszewskiego podstawowe zagadnienia i metody

4. Synteza dotychczasowych prac w zakresie omawianej problematyki

ochrony przed hałasem w miastach i na jego obrzeżach [211]. W raporcie przewidywano, że w wyniku prac nad zmianami konstrukcyjnymi pojazdów zmniejszone zostaną zanieczyszczenia spalinami – nie zmieni się natomiast hałas od pojazdów. Ważnym stwierdzeniem w raporcie była konieczność odpowiedniego projektowania dróg w celu ochrony dzielnic mieszkaniowych przed hałasem drogowym. W raporcie przedstawiono wyniki badań ITB hałasu w Polsce (badania wykonane głównie w Warszawie) oraz zaproponowano różnego rodzaju metody ochrony przed hałasem drogowym. Ówczesne badania zostały wykonane dla natężeń ruchu od 500 do 3000 pojazdów na godzinę w odległości 2,0 m od krawędzi drogi. Spośród najważniejszych metod ochrony przed hałasem wskazano m.in. na:

- Zastosowanie zieleni w otoczeniu dróg. Zwrócono wówczas uwagę, że pas zieleni o szerokości 60 m izoluje redukuje hałas o około 6–8 dB. Jednocześnie wskazano, że metoda ta jest skuteczna dopiero po 25–30 latach, kiedy drzewa osiągną odpowiednią wielkość.
- Zachowanie odpowiednich odległości i lokalizacji budynków względem drogi. W przypadku dróg prowadzących duży ruch drogowy zalecane odległości zabudowy od budynków to 500–600 m. Odległości te można zmniejszyć jednak w przypadku zastosowania odpowiednich sposobów maskujących emisję hałasu – np. droga w wykopie z ogrodzeniem (ekranem) lub budynkiem (garaże) i zielenią na krawędzi wykopu.
- Zastosowanie ogrodzeń (ekranów) o wysokości 2–3 m w otoczeniu dróg. Dla tych urządzeń przyjmowano redukcję poziomu hałasu 10–15 dB. W konstrukcjach tych zalecano stosowanie otworów o średnicy 20–25 cm w celu przepuszczenia wód opadowych i roztopowych. W celu nieograniczania widoku z drogi zalecano także stosowanie ekranów akustycznych przeźroczystych.

Już wtedy podstawowym zaleceniem było odpowiednie wkomponowanie urządzeń ochrony przed hałasem w otoczenie. Jednocześnie określano, że poziom hałasu przy otwartym oknie nie może przekroczyć 45–50 dB w dzień a w nocy 35–45 dB.

Jednym z opracowań kierowanym do branży drogowej w tym czasie, jakie dotyczyło metod ochrony przed hałasem komunikacyjnym było również opracowanie Elmara Sälzera z 1978 r. [204]. Podawało ono podstawowe informacje związane z metodami urbanistycznymi ochrony środowiska przed hałasem w miastach. Już w 1974 r. uznano w Niemczech, że środki niezbędne na ochronę przed hałasem mogą być na tyle duże, że konieczne jest wprowadzenie prawidłowego ich doboru [204]. Uznano, że rozwiązania takie są oszczędniejsze i jednocześnie lepiej zintegrowane z innymi działaniami. W latach siedemdziesiątych XX w. w Niemczech przyjmowano, że poziom hałasu na zewnątrz budynków nie powinien przekroczyć 65 dB [204]. W opisie stwierdzono, że w praktyce nie osiągnie się odpowiedniej ochrony przed hałasem, jeśli nie będzie zachowany komplet działań – ochrona na etapie przygotowywania planów zagospodarowania

4.3. Rozwiązania i środki zabezpieczające przed hałasem drogowym

terenu (metody urbanistyczne) oraz na etapie projektowania (metody techniczne). Do metod urbanistycznych zaliczono:

- Wariantowanie lokalizacji drogi. W analizach tego typu należy uwzględnić liczbę ludności, koszty budowy z zabezpieczeniami i bez zabezpieczeń akustycznych oraz wskaźniki poziomu hałasu. Przydatne tutaj mogą być mapy akustyczne, które zasilają informacjami miejscowe plany zagospodarowania przestrzennego terenu. W ten sposób może powstawać wariant optymalny z punktu widzenia lokalizacji i ochrony akustycznej. W tego rodzaju analizach nie bez znaczenia jest wielkość tła akustycznego (hałas wewnątrz obszaru chronionego lub pochodzący z daleko zlokalizowanych źródeł), które najlepiej jest pomierzyć.
- Wały, ściany izolujące (ekrany akustyczne) i ich kombinacje.
- Obniżenie niwelety drogi poniżej poziomu otaczającego terenu – droga w wykopie.
- Zabudowa (obudowywanie tras budynkami) i tunele oraz częściowe przekrycia.
- Położenie budynków mieszkalnych. Najlepszym sposobem jaki wskazano w tym zakresie był dobór odpowiedniej funkcji obiektów położonych najbliżej drogi – mogą to być garaże, obiekty handlowe, które nie są związane z ochroną przed hałasem. W przypadku lokalizacji zabudowy mieszkalnej w bezpośrednim sąsiedztwie drogi niezbędne jest wyposażenie ich w okna tłumiące hałas lub z przesłonami, odpowiednio izolującą elewację (odpowiedni kształt elewacji, wyposażenie jej w wykładziny dźwiękochłonne) itp. Ważne jest także odpowiedni dobór pomieszczeń narażonych na hałas w stosunku do drogi – sypialnie, pokoje do pracy itp.
- Pokrycie terenu roślinnością. W wielu przypadkach metoda ta zdaniem Sälzera jest mocno przeceniana. Poza aspektem psychologicznym (efekt koloru i samej zieleni) efektywność tej metody występuje dopiero wtedy, kiedy zieleń ma odpowiednie parametry. Należą do nich: szerokość, gęstość i wysokość. W zależności od różnych wyników badań zalecane są różne rozwiązania związane z zielenią. Sälzer zalecił przyjmowanie zieleni jako skuteczną metodę ochrony wtedy, kiedy jej wysokość jest o 2–3 m wyższa niż linia łącząca źródło hałasu i odbiorcę oraz kiedy jej szerokość jest nie mniejsza niż 50 m (poniżej tej szerokości stwierdzono, że zieleń ma jedynie znaczenie psychologiczne). Ważne jest również odpowiednie stosowanie zieleni – lepsze jest stosowanie wąskich pasów zieleni niż pojedynczy pas zieleni o charakterze leśnym. Przy stosowaniu pasów zieleni powstaje efekt tłumienia związany z załamaniem fali dźwiękowej. Jednocześnie zieleń stanowi odpowiednią zasłonę (filtr biologiczny) dla zanieczyszczeń spalinami.
- Ochrona metodami budowlanymi. Sälzer wskazał na problem tła akustycznego, który jest niezwykle istotny w przypadku osiedli. Jako przykład podano krótką analizę, w której, jeśli przyjąć, że na osiedlu na każdą rodzinę przypada 1 samochód wówczas poziom tła może osiągać wartości zbliżone do wartości dopuszczalnych hałasu w niektórych godzinach. Prowadzi to do bardzo dużych różnic pomiędzy poziomem hałasu np. na osiedlu willowym i zespołem wieżowców.

4. Synteza dotychczasowych prac w zakresie omawianej problematyki

W powyżej opisywanych opracowaniach, które były przeznaczone dla drogownictwa uwzględniono wpływ hałasu na człowieka i zawarto zalecenia co do samych urządzeń. Nie zawarto jednak w nich zaleceń związanych ze sposobami wyboru (decyzjami) dotyczącymi rozwiązań chroniących w różnych przypadkach. Stan ten pomimo wiedzy o możliwościach ograniczenia hałasu drogowego wielu rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających praktycznie utrzymał się do dziś. Powyżej opisywane opracowania nie zawierały również szczegółów dotyczących ekranów akustycznych oraz najnowszych rozwiązań i sposobów ochrony przed hałasem jakimi są nawierzchnie o właściwościach redukujących hałas drogowy (opisywane również dalej jako ciche nawierzchnie). To ostatnie rozwiązanie znajduje w ostatnich latach coraz więcej zastosowań i jest przedmiotem wielu badań. Rozwiązanie to staje się niezwykle istotne biorąc pod uwagę coraz większe ograniczenia emisji hałasu związane z wprowadzaniem pojazdów hybrydowych i elektrycznych, gdzie znacznie obniżona jest emisja silnika oraz elementów napędowych. W ostatnich latach badania dotyczące hałaśliwości nawierzchni prowadzone były przez Prof. J. Ejsmonta i Prof. W. Gardziejczyka [65, 66, 67, 202, 203] oraz Prof. D. Sybilskiego [213]. W ramach prac prowadzonych przez Prof. Radziszewskiego z zespołem analiza objęła perspektywy i kierunki rozwoju nawierzchni drogowych w Polsce [171].

W pracach badawczych Prof. M. Tracza z zespołem w 2014 r. określona została rola budowanych obwodnic w poprawie klimatu akustycznego otoczenia przejść drogowych przez miasta [242]. Najnowsze badania realizowane przez zespół Politechnik: Krakowskiej, Wrocławskiej, Warszawskiej i Lubelskiej oraz *IBDiM* w ramach programu Rozwój Innowacji Drogowych pt. „Ochrona przed hałasem drogowym” dla *GDDKiA* i *NCBiR* ukierunkowane są na poszukiwania szczegółowych elementów i wskaźników stosowanych w ocenie stanu nawierzchni, które mogą mieć wpływ na poziom hałasu a także kompleksowe rozwiązania w ochronie przed hałasem drogowym.

W ramach badań europejskich od około 1996 r. zorientowane one były na następujące zagadnienia:

- Emisję hałasu i jej prognozowanie, mapy akustyczne i plany działań (*POSH*) – m.in. programy: *CALM*, *CALM II*, *FUORE*, *IMAGINE*, *HARMONOISE*, *QUIET*, *TRAF-FIC*, *PREDICT*, *IPG*, *NADIA*, *HUSH*, *CITYHUSH*.
- Nawierzchnie drogowe (nowe rodzaje, projektowanie, technologie) – m.in. programy: *SIRUUS*, *SILVIA*, *ROTRANOMO*, *SILENCE*, *INQUEST*, *QCITY*, *ROTRANOMO*, *ROSANE*.
- Opony samochodowe (projektowanie, materiały, kształt) – m.in. programy: *ROTRANOMO*, *SILENCE*, *QCITY*, *TINO*, *RATIN*, *VISPeR*.
- Pojazdy (inteligentne materiały, napęd, układ wydechowy itp.) – m.in. programy: *VI-SPeR*, *DINOISE*, *ARTEMIS*, *ACES*, *InMAR*, *ROTRANOMO*, *SILENCE*, *QCITY*, *QUIESST*, *CEMOBIL*.

4.3. Rozwiązania i środki zabezpieczające przed hałasem drogowym

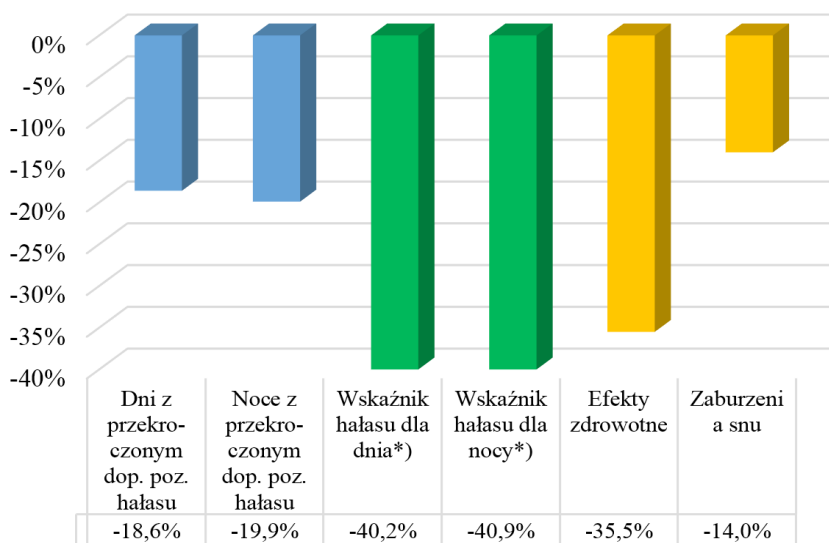
- Zarządzanie ruchem i zachowania kierowców – m.in. programy: *UDC*, *EFFNOISE*, *ROTRANOMO*, *SILENCE*, *QCITY*.
- Planowanie (przestrzenne) w mieście – m.in. programy: *SYLVIE*, *PULS*, *EFFNOISE*, *SILENCE*, *QCITY*.
- Redukcja hałasu w obszarach miejskich i drogach niższych klas – m.in. programy: *NADIA*, *QSIDE*, *SPAS*.
- Obszary ciche – *QUADMAP*.

W krajach Unii Europejskiej odbyły się praktycznie dwie rundy wykonywania map i planów działań (programów ochrony środowiska przed hałasem). Przed pierwszą rundą niektóre kraje takie jak Niemcy posiadały już doświadczenia w konstruowaniu planów ochrony przed hałasem. Zgodnie z tymi doświadczeniami i obowiązującym prawem, ograniczenie hałasu może odbywać się na podstawie poniższej hierarchii działań [178]:

- **Unikanie emisji** – właściwe planowanie regionalne i rozwój miast, promowanie ruchu pieszego i rowerowego, miejskich środków komunikacji, planowanie i zarządzanie transportem towarowym.
- **Zmniejszanie emisji hałasu** – optymalizacja efektywności komunikacji, planowanie i zarządzanie parkingami, spowolnienie i ukierunkowanie ruchu samochodowego, elementy ograniczające hałas wzdłuż dróg.
- **Przeniesienie emisji hałasu** – połączenie strumieni ruchu samochodowego włącznie z ich przeniesieniem, przeniesienie punktów ciężkości emisji hałasu.
- **Ograniczenie emisji hałasu** – użycie metod i środków zmniejszających imisję hałasu – ekrany akustyczne i wały ochronne, dźwiękoszczelne okna, elewacje z materiałów absorbujących dźwięki, odpowiednia lokalizacja budynków (względem siebie) i planowanie funkcji w mieszkaniach.

Jak można zauważyć w powyższym schemacie postępowania najpierw należy sprawdzić, w jakim stopniu można uniknąć emisji hałasu, następnie wykorzystać potencjał układu drogowego oraz możliwości komunikacji publicznej i dopiero wtedy można rozważać przeniesienie emisji hałasu w inne miejsce. W przypadku, jeśli w tych trzech krokach (trzy pierwsze punkty) nie jest możliwe uzyskanie wystarczającego ograniczenia emisji wówczas można użyć metody i środków ograniczające imisję hałasu (punkt ostatni). Takie postępowanie umożliwia zmniejszenie hałasu w obszarze a nie dla punktowych obiektów (pojedyncze budynki). Rozwiązanie takie wpisuje się w zalecenia Dyrektywy *END*. Przykład zmian w kształtowaniu hałasu przy użyciu takiego systematycznego sposobu postępowania od roku 1955 do roku 2002 w mieście Henningsdorf przedstawiono na rys. 4.4.

4. Synteza dotychczasowych prac w zakresie omawianej problematyki



*) Wskaźnik hałasu (wskaźnik „M”) ($L_{den}=55$ dla dnia i $L_N=50$ dB dla nocy)

Rys. 4.4. Ograniczenia uciążliwości w mieście Henningsdorf od roku 1995 do roku 2000 po zastosowaniu procedury ograniczającej emisję i imisję hałasu

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [178]

Powyżej opisaną procedurę przyjęto w rozbudowanej wersji w dalszych analizach związanych z postępowaniem przy ocenie i wyborze rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym – rozdz. 5. Również w tym rozdziale podano wyniki najważniejszych aktualnych badań wraz z niezbędną literaturą dotyczącą poszczególnych rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym.

Na szczególną uwagę zasługują prace Grupy hałasowej DG Environment (np. [3]) a także CEDR związane ze stosowaniem rozwiązań i środków zabezpieczających przed hałasem prowadzone od 2009 r. W ramach tej organizacji powołano Grupę ds. hałasu drogowego (CEDR RN2), której celem było zbadanie szeregu kwestii związanych z hałasem w celu osiągnięcia celów określonych w Planie strategicznym CEDR – m.in. związanych ustanowieniem standardów zgodnych z dyrektywami w zakresie hałasu drogowego. Początkowo były to prace związane z obowiązkiem wykonywania map akustycznych i planów działań zgodnych z Dyrektywą END [47] – prace te wykonano w latach 2009-2013. Zaowocowały one publikacjami i raportami [4, 5, 6, 56, 99, 130, 146], w których zawarto m.in. następujące rekomendacje:

- Aby zminimalizować koszty związane z realizacją map hałasu w 2017 r., poszczególne kraje powinny monitorować i uczestniczyć w opracowywaniu proponowanej

4.3. Rozwiązania i środki zabezpieczające przed hałasem drogowym

nowej metodologii obliczania (CNOSSOS-UE) w celu zapewnienia uproszczonego podejścia. Powinno to uniemożliwić ponoszenie dodatkowych kosztów związanych ze zwiększeniem aktualnych metod gromadzenia danych.

- Krajowe władze drogowe należące do CEDR powinny sprzeciwiać się wprowadzeniu wartości dopuszczalnych hałasu poniżej 55 dB dla L_{den} i 45 dB dla L_{night} .
- Krajowe władze drogowe mogłyby wykorzystać treść planów działania (POSPH) jako uzasadnienie poszukiwania dodatkowych środków na utrzymanie dróg i środków ograniczających hałas.
- Krajowe władze drogowe powinny zażądać od Komisji Europejskiej przedstawienia zharmonizowanego narzędzia oceny kosztów w celu przeprowadzenia analiz kosztów i korzyści planów działania (POSPH).
- Krajowe władze drogowe powinny rozważyć zintegrowanie zawartości planów działań (POSPH) w ich proces planowania lub system utrzymania dróg.
- Krajowe władze drogowe powinny ściśle współpracować z Komisją Europejską, aby zapewnić wprowadzenie surowszych przepisów UE w celu zmniejszenia poziomu hałasu z pojazdu i opon.
- W odniesieniu do łagodzenia hałasu u odbiorców, krajowe władze drogowe powinny korzystać z nawierzchni o cechach redukujących hałas jako pierwszego rozwiązania (w analizach), ponieważ okazały się one najbardziej opłacalnym środkiem zmniejszania hałasu.
- Jednym z istotniejszych wyników tego etapu prac poza rekomendacjami skierowanych do krajowych władz drogowych była analiza kosztów ochrony przed hałasem dla różnych rozwiązań i środków oraz liczby zagrożonych osób dokuczliwością i wysoką dokuczliwością hałasu (pojęcia te wyjaśniono w rozdz. 3.1.1) – tabl. 4.5.

Jak można zauważyć najlepszym i najbardziej efektywnym z uwagi na koszty rozwiązaniem jest wyciszenie pojazdów i opon – na efekt ten nie mają jednak wpływu zarządcy dróg. Jednocześnie koszty całkowite dla zminimalizowania hałasu w UE to około 6 mld euro (wartość netto). W przypadku Polski Grupa RN2 oszacowała [130]:

- koszty całkowite w ciągu 20 lat na poziomie 123 858 027 euro,
- długość ekranów akustycznych 167 km,
- koszty wymiany okien 147 009 euro,
- nawierzchnie z porowatego asfaltu 2 957 km,
- cienkie warstwy (nakładki) bitumiczne 13 065 km.

Powyższe oszacowanie wykonano dla dróg istniejących (krajowych i wojewódzkich, dla których wykonywane są mapy akustyczne). Zdaniem autora wartości te są mało realne i należy je traktować czysto teoretycznie w przypadku stosowania asfaltu porowatego i cienkich warstw bitumicznych należy te założenia uznać jako błędne (świadczy to choćby o nieznajomości uwarunkowań klimatycznych Polski przez autorów raportu [130] i trendów w rozwoju nawierzchni w Polsce).

4. Synteza dotychczasowych prac w zakresie omawianej problematyki

Tabl. 4.5. Koszty środków mających na celu redukcję hałasu wraz z redukcją liczby osób zagrożonych dokuczliwością hałasu

Środki mające na celu redukcję hałasu	Liczba osób dotkniętych dokuczliwością/ wysoką dokuczliwością hałasu [mln]	Redukcja liczby osób zagrożonych dokuczliwością/ wysoką dokuczliwością hałasu po zastosowaniu środków [mln]	Koszt redukcji hałasu dla osób zagrożonych dokuczliwością/ wysoką dokuczliwością hałasu [EUR/osobę/rok]	Redukcja hałasu [dB]
Redukcja hałasu od pojazdów o 5 dB	384,0/463,0	31,5/15,2	16/34	5,2
Redukcja hałasu od pojazdów o 3 dB ¹⁾	384,0/463,0	19,7/9,6	18/36	3,1
Pojedyncza cienka warstwa nawierzchni bitumicznej	81,8/63,0	2,2/1,3	136/260	2
Pojedyncza warstwa nawierzchni bitumicznej porowatej	38,8/29,9	1,1/0,6	290/540	2
Izolacja elewacji budynku ²⁾	4,8/4,8	0,5/0,3	570/1300	8
Podwójna warstwa nawierzchni bitumicznej porowatej	6,2/4,9	0,3/0,2	940/1800	4
Ekrany akustyczne	1,12/0,86	0,07/0,04	4200/7500	1–8

¹⁾ Zgodnie z „Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on the sound level of motor vehicles, COM(2011) 856 final, December 2011”.

²⁾ Zakłada się zastosowanie takiego rozwiązania, które redukuje o 60% efekt dokuczliwości hałasu (głównie wymiana okien).

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [130]

W kolejnych działaniach Grupy CEDR RN2 od 2014 r. do tego roku zajęto się głównie szczegółowymi analizami dotyczącymi zastosowania środków redukujących hałas drogowy oraz ich kosztami, procedurami analizy kosztów i korzyści oraz efektywności tych środków stosowanymi w poszczególnych krajach. Szczególną uwagę skierowano na możliwość zastosowania nowoczesnych nawierzchni redukujących hałas – wykorzysta-

no w tym celu efekty europejskich programów badawczych i doświadczenia niektórych krajów CEDR. Zdaniem autora analizy te nie przyniosły na razie zakładanych przez Grupę rezultatów ze względu m.in. na duże różnice w podejściu do technologii, warunków klimatycznych, systemach utrzymania itp. W ramach drugiego etapu działania Grupy CEDR RN2 powstało szereg publikacji i raportów [14, 58, 222, 223].

Pomimo udziału przedstawicieli Polski w spotkaniach Grupy CEDR RN2 nie zostały zaimplementowane w kraju żadne z elementów rekomendacji czy zaleceń końcowych sformułowanych zarówno w pierwszym jak i w drugim etapie prac tej Grupy. Niektóre z tych zaleceń i rekomendacji (np. analiza kosztów CBA i CEA dla rozwiązań i środków chroniących przed hałasem) zostały wykorzystane w niniejszej monografii.

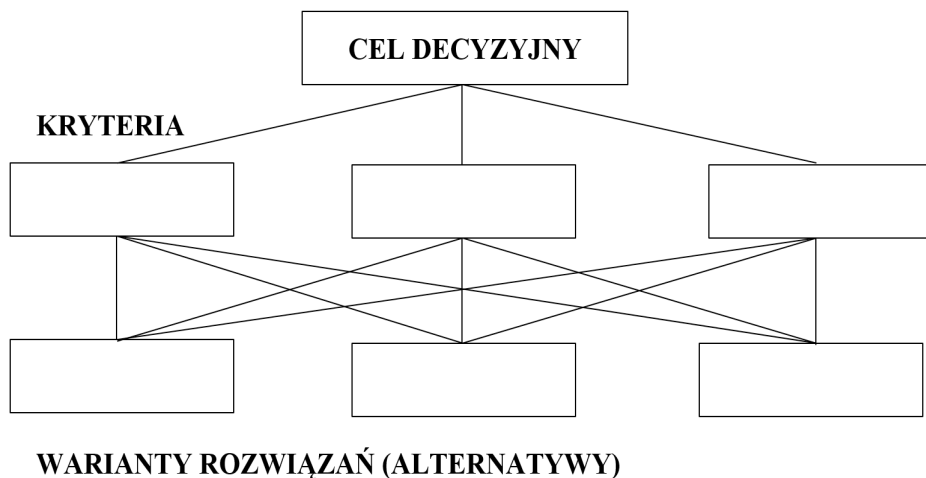
4.4. Decyzje związane z wyborem rozwiązań i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym

Pomimo coraz lepszej wiedzy związanej z rozwiązaniami drogowymi i środkami zabezpieczającymi przed hałasem drogowym nadal problemem jest ich właściwy dobór oraz decyzje uwzględniające wiele kryteriów, jakie powinny im towarzyszyć. Najpowszechniejszy do tej pory środek zabezpieczający przed hałasem drogowym w Polsce, jakim jest ekran akustyczny stał się znaczącym problemem ze względu na koszty, problemy estetyczne oraz problemy społeczne i bezpieczeństwo ruchu drogowego, a także utrzymanie w kolejnych latach eksploatacji. Powszechność stosowania ekranu akustycznego w najprostszych jego formach spowodowała swoisty przesyt i jest źródłem krytyki a nawet protestów przeciwko tym rozwiązaniom. Powodem tych problemów jest brak jednoznacznych procedur wyboru rozwiązań a głównie braku stosowania różnorodnych kryteriów, jakie należy uwzględnić w procesie podejmowania decyzji. Decyzja ta musi uwzględniać w zależności od przypadku w różnym stopniu uwarunkowania ekologiczne, społeczne a także ekonomiczne.

Każda złożona decyzja, w której pojawia się możliwość wyboru rozwiązania wymaga przeprowadzenia procesu myślowego, który oparty jest na wielu danych, kryteriach oraz w wielu przypadkach na doświadczeniach i intuicji. Każda decyzja, od której zależy zdrowie ludzi wymaga szczególnego podejścia i wymaga odpowiedniego wspomagania. Metody wspomagania decyzji związane z systemami i metodykami pojawiły się dopiero wraz z odkryciem rachunku prawdopodobieństwa. Obecnie do stosowanych metod wspomagania decyzji należy wielokryterialna analiza porównawcza (ang. *Multiple-Criteria Decision Analysis* – często stosowany skrót *MCDA*). Jedną z tych metod jest metoda analizy hierarchicznej procesu *AHP* (ang. *Analytic Hierarchy Process*), która nazywana jest też hierarchicznym modelem decyzyjnym.

Metoda *AHP* została zaproponowana przez amerykańskiego matematyka Thomasa L. Saaty w latach siedemdziesiątych XX wieku [194, 196]. W metodzie tej każdy hierarchiczny model decyzyjny ma określony cel, kryteria, które są oceniane pod kątem ich

4. Synteza dotychczasowych prac w zakresie omawianej problematyki znaczenia dla celu oraz wariantu rozwiązania (alternatywy). Oceniane są one również pod kątem ich preferencji w odniesieniu do każdego kryterium. Ogólny schemat trzypoziomowego modelu *AHP* przedstawiono na rys. 4.5.



Rys. 4.5. Hierarchiczny model decyzyjny *AHP* – schemat ogólny

Źródło: opracowanie własne

Jednym z ważniejszych działań w metodzie *AHP* jest przygotowanie struktury modelu decyzyjnego, który musi zachowywać odpowiednią hierarchię poszczególnych elementów. Prawdłowo przygotowana struktura hierarchiczna umożliwia uporządkowanie podobnych (jednorodnych) elementów w grupy (cel decyzyjny, kryteria i podkryteria, warianty rozwiązań). Taka strukturalna budowa modelu umożliwia wykonanie analiz uwzględniających wszystkie zagadnienia dotyczące podejmowanej decyzji.

Po zbudowaniu modelu decyzyjnego wszystkie kryteria podlegają porównaniu parami. Jeżeli struktura modelu składa się z kryteriów i podkryteriów to początkowo porównywane są (oceniane) parami kryteria pomiędzy sobą względem celu decyzyjnego, podkryteria z danej grupy względem kryteriów a warianty rozwiązań względem wszystkich podkryteriów. W trakcie porównania używana jest dziewięciostopniowa skala porównawcza. Porównania kryteriów i subkryteriów są jedną z bardziej pracochłonnych prac w analizie *AHP* i wymagają bardzo rzetelnego oraz obiektywnego (zwłaszcza do informacji jakościowych) podejścia. Etap ten w metodzie *AHP* powoduje najwięcej problemów związanych z niezgodnością ocen podczas porównań parami kryteriów i subkryteriów. Bardzo często angażuje się do tego grupy ekspertów, którzy powinni mieć wysoki poziom merytoryczny (wiedza i doświadczenie) oraz zachować obiektywne podejście do oceny.

W kolejnym etapie obliczane są wartości współczynników wagowych (wagi, priorytety) dla poszczególnych kryteriów, podkryteriów (jeśli występują) oraz wariantów. Wyniki porównań wprowadzane są do macierzy porównań. W dalszych analizach wykorzystywany jest rachunek macierzowy lub inne uproszczone metody, które niewiele mniej dokładne dają jednak wystarczające wyniki oraz przyspieszenie obliczeń. Po obliczeniu współczynników wagowych wykonuje się dla każdej macierzy porównań analizę jakości dzięki, której możliwa jest ocena zgodności a przez to rzetelności wykonanych porównań. Ocenę tą wykonuje się na podstawie analizy współczynnika zgodności CR (ang. *consistency ratio*). Dzięki temu współczynniki określa się również jakość pracy ekspertów po wykonaniu porównań. Często wykonywana jest też analiza wrażliwości (ang. *sensitivity analysis*) dzięki której możliwe staje się sprawdzenie, jak na wartości poszczególnych wag (priorytetów) wpływają zmiany poszczególnych ocen.

Metoda AHP stosowana jest w drogownictwie (w Polsce) głównie przy wyborze lokalizacji wariantów dróg. Została ona zaproponowana do stosowania przez autora monografii w Podręczniku dobrych praktyk wykonywania opracowań środowiskowych dla dróg krajowych [24] dla wyboru najlepszego wariantu lokalizacji drogi (głównie autostrady i drogi ekspresowe). Model ten został wielokrotnie wykorzystywany w ocenie i wyborze lokalizacji wielu autostrad i dróg ekspresowych w Polsce od 2008 r. – na jego podstawie wybrano szereg przebiegów autostrad i dróg ekspresowych a także dróg niższych klas technicznych. Kryteria, które stosowane są w wyborze wariantów wynikają w tych przypadkach z wyników analiz technicznych, przyrodniczych itp. [260]. W przypadku niniejszej monografii opis kryteriów oraz towarzyszącej im literatury zebrano w rozdz. 6.1, natomiast szczegółowy opis zastosowania metody AHP w modelowaniu decyzji związanych z wyborem rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem w rozdz. 6.

O wyborze w dalszych analizach metody AHP do modelowania decyzji poza dotychczasowymi doświadczeniami jej zastosowania przy wyborze wariantów lokalizacji dróg zdecydowało przede wszystkim to, że obserwując dotychczasowe sposoby podejmowania decyzji przy wyborze rozwiązań decydent dąży do uszeregowania wariantów od najlepszego do najgorszego stosując wybiórczo niektóre kryteria dotyczące zagadnień efektywności akustycznej i kosztów (o wiele rzadziej kryteriów technicznych czy środowiskowych). Metoda AHP należy do grupy metod szeregowania, gdzie poza uporządkowanymi kryteriami następuje określenie rankingu wariantów. Ponadto poza stosowanymi metodami Electre, ANP, kompensacyjno-koniunkcyjna, Promethee, Oreste, UTA, Mappac, metoda AHP jest jedną z najczęściej wykorzystywanych w procesach decyzyjnych ze względu na przeciętny stopień jej skomplikowania dla użytkownika w analizach zagadnień nie tylko drogowych, ale i np. transportowych [208].

5. Ocena i charakterystyka rozwiązań drogowych oraz środków zabezpieczających przed hałasem drogowym

W celu ochrony akustycznej zabudowy mieszkaniowej i terenów chronionych stosuje się różnego rodzaju metody i sposoby oraz środki zapobiegawcze. Bardzo często, pomimo zastosowania zabezpieczeń nie jest możliwe uzyskanie efektu zmniejszenia wielkości hałasu do wyznaczonych przepisami wartości dopuszczalnych [189], a jedynie zmniejszenie i ograniczenie uciążliwości. W praktyce należy jednak przyjąć, że ograniczenie poziomu hałasu już o 3 do 5 dB powoduje odczuwalne skutki dla ludzi (rozdz. 3).

Ważnym elementem w ochronie akustycznej jest ocena i dobór odpowiednich zabezpieczeń, które w większości przypadków powinny być zadaniami uwzględniającymi oprócz uwarunkowań akustycznych także i inne kryteria – niekoniecznie związane jedynie z ochroną przed hałasem.

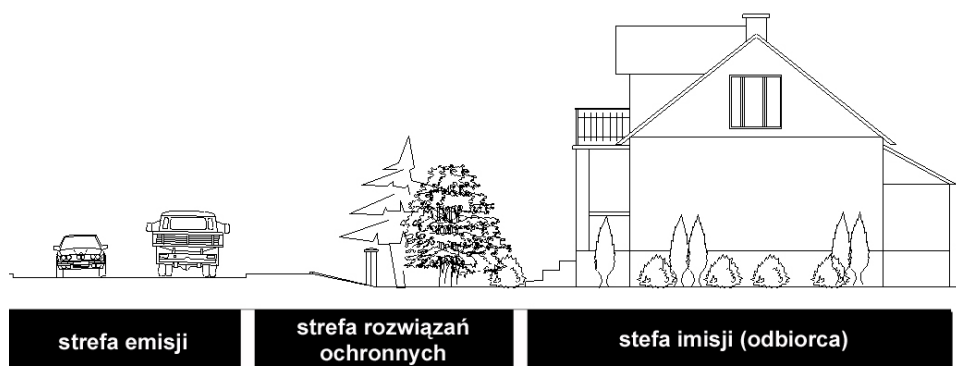
W rozdziale tym podano ogólną charakterystykę większości stosowanych obecnie rozwiązań ochrony przed hałasem ze szczególnym zwróceniem uwagi na rozwiązania drogowe. Lista i charakterystyka tych rozwiązań nie wyczerpuje na pewno wszystkich problemów, które występują w praktyce, a zwłaszcza na poziomie inwestora lub zarządcy drogi, a także wykonawcy zabezpieczeń. W dalszym opisie zwrócono uwagę przede wszystkim na techniczne możliwości i uwarunkowania stosowania tych rozwiązań oraz na aspekty ekonomiczne i zdrowotne.

Większość opisanych zagadnień dotyczy istniejących dróg i układów komunikacyjnych w miastach. Programy ochrony środowiska przed hałasem poza opracowaniami dla realizacji konkretnej inwestycji (analizy porealizacyjne, przeglądy ekologiczne i monitoringi) są najważniejszym opracowaniem, który powinno wspomagać długookresowe plany walki z hałasem drogowym. Aby jednak programy te stały się faktycznym narzędziem konieczna jest zmiana podejścia co do wyboru rozwiązań chroniących przed hałasem oraz wprowadzenie metody (modelu) podejmowania decyzji związanej z aspektami ekonomicznymi, ekologicznymi, społecznymi i technicznymi.

Od wielu lat, kiedy w Polsce nastąpiły zmiany ustrojowe i możliwe stało się szybkie inwestowanie w nowe drogi oraz przebudowy istniejących dzięki funduszom UE, czas przygotowania inwestycji oraz realizacji zaczął odgrywać podstawową rolę. Spowodował on konieczność wprowadzenia wielu uproszczeń w projektach i decyzjach, które z kolei wpłynęły na kolejne uproszczenia w stosowaniu urządzeń ochrony środowiska, a w tym ochrony przed hałasem. Najważniejsze stało się jak najszybsze zdobywanie pozwoleń (w tym decyzji środowiskowej), pozyskanie terenu i realizacja inwestycji. W przypadku ochrony przed hałasem drogowym najważniejszym urządzeniem stał się ekran akustyczny [40], który zapewnia jednocześnie: szybkie i nieskomplikowane projektowanie, niewielką ilość zajętego terenu, szybkość budowę i montaż oraz w trafionych przypadkach niezłą efektywność akustyczną. W szybkim planowaniu i projektowaniu zabrakło miejsca na analizy związane z: utrzymaniem i kosztami, efektami krajobrazowymi (estety-

5. Ocenia i charakterystyka rozwiązań drogowych ...

ką), wpływem na bezpieczeństwo ruchu, komfort życia mieszkańców itd. Niewątpliwie na efekt ten wpłynął także brak doświadczeń i niewielka wiedza o innych metodach i środkach ochrony przed hałasem drogowym. Wytworzyło się w ten sposób swoiste „tradycyjne” podejście do ochrony przed hałasem, w którym zakłada się, że większość możliwych do zastosowania metod można wprowadzić jedynie w bezpośrednim sąsiedztwie jezdni. Powstał przez to pogląd związany z tym, że w bezpośrednim sąsiedztwie drogi istnieje strefa rozwiązań ochronnych pomiędzy strefą emisji hałasu, a strefą imisji (u odbiorcy) – rys. 5.1.



Rys. 5.1. „Tradycyjne” podejście do ochrony przed hałasem drogowym

Źródło: opracowanie własne

Przekonanie to utrwała od wielu lat zapis ustawy Prawo ochrony środowiska [141, 244], która nakazuje dotrzymać standardów środowiska (w tym przypadku wartości dopuszczalnych hałasu), w praktyce na granicy pasa drogowego, do którego zarządzający drogą ma tytuł prawny:

„Art. 174.

1. *Eksploatacja dróg, linii kolejowych, linii tramwajowych, lotnisk oraz portów nie może powodować przekroczenia standardów jakości środowiska. 2*
2. *Emisje polegające na:*
 - 1) *wprowadzaniu gazów lub pyłów do powietrza,*
 - 2) *wprowadzaniu ścieków do wód lub ziemi,*
 - 3) *wytwarzaniu odpadów,*
 - 4) *powodowaniu hałasu,**powstające w związku z eksploatacją drogi, linii kolejowej, linii tramwajowej, lotniska oraz portu, nie mogą, z zastrzeżeniem ust. 3, spowodować przekroczenia standardów jakości środowiska poza terenem, do którego zarządzający tym obiektem ma tytuł prawny.*
3. *Jeżeli w związku z eksploatacją drogi, linii kolejowej, linii tramwajowej lub lotniska utworzono obszar ograniczonego użytkowania, eksploatacja nie może spowodować przekroczenia standardów jakości środowiska poza tym obszarem.”*

5. Ocenia i charakterystyka rozwiązań drogowych ...

Był to jeden z powodów powstania niekorzystnego efektu „ekranowania dróg” i dopóki przepis ten nie zmieni się w stosunku do hałasu drogowego (w większości krajów UE miejscem analizy jest elewacja budynku i w określonych sytuacjach obszar w otoczeniu drogi) ekran akustyczny poza jego niewątpliwie bardzo dobrymi cechami będzie stosowany nadal powszechnie. Ponadto utrwalony nawyk w drogownictwie oraz brak jednoznacznych kryteriów i procedur wyboru urządzeń ochrony przed hałasem może pomimo dużej krytyki stosowania ekranów akustycznych pogłębiać nadal ten problem.

Tymczasem większość skutecznych rozwiązań (w wielu przypadkach nawet skuteczniejszych) niż ekran akustyczny, możliwe są do zastosowania praktycznie w całym obszarze, otoczeniu drogi i u samego odbiorcy. Można stwierdzić, że strefa rozwiązań ochronnych jest praktycznie wszędzie, gdzie ma się do czynienia z zasięgiem niekorzystnego oddziaływania hałasu drogowego – rys. 5.2.



Rys. 5.2. Możliwości stosowania rozwiązań ochrony przed hałasem drogowym – obszar rozwiązań ochronnych

Źródło: opracowanie własne

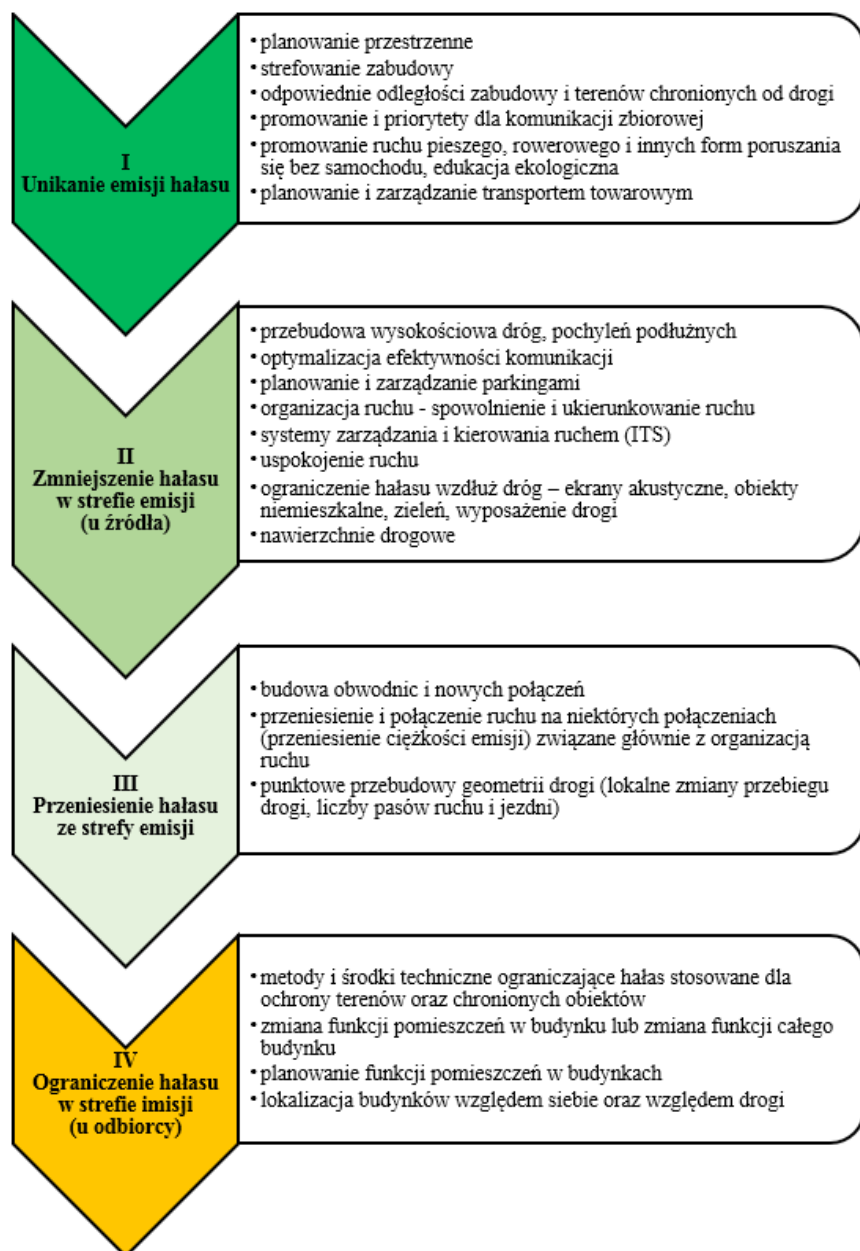
Takie podejście związane ze stosowaniem urządzeń ochrony przed hałasem wymaga znaczących zmian w polskim prawie, zwłaszcza dla obszaru imisji, gdzie powinny być dopuszczone formalnie do stosowania rozwiązania związane z budynkiem nie tylko w sytuacjach, kiedy jest on zlokalizowany na granicy pasa drogowego (ostatnie zmiany prawa [141] dopuściły już takie rozwiązania). Po pierwszym programie realizacji dróg niezbędne jest też w kolejnych latach, w procesie inwestycyjnym wprowadzenie optymalizacji tych rozwiązań [193]. Przy takim podejściu do obszaru rozwiązań ochronnych istotne staje, które urządzenie spośród wielu rodzajów powinno być zastosowane, jaka jest jego efektywność itd. W rzeczywistości ochrona przed hałasem może być realizowana w trzech charakterystycznych strefach:

- **emisji hałasu** – strefa ta obejmuje praktycznie jezdnię (w większości przypadków można umownie przyjąć, że jest to korona drogi) w ramach której generowany jest hałas od pojazdów.

- **imisji z chronionym terenem i obiektami** – strefa ta dotyczy głównie obszaru, dla którego ustanowione są wartości dopuszczalne hałasu, a ochrona przed hałasem jest bezpośrednio związana z tym obszarem i pośrednio obiektem (nie jest celem w tym przypadku ochrona jedynie obiektu).
- **imisji z chronionymi obiektami** – strefa ta związana jest przede wszystkim z ochroną bezpośrednią obiektu i jego wnętrza, gdzie obowiązują normy [152] dla wartości dopuszczalnych hałasu wewnątrz budynków – tabl. 3.6. W szczególnych przypadkach (np. zabudowa obustronna w mieście) obiekt może być zlokalizowany na granicy pasa drogowego lub nawet w pasie drogowym.

Metody stosowane w ochronie przed hałasem przy podejściu jak wyżej w większości przypadków ograniczają się do stosowania środków technicznych i organizacyjnych. Dotyczą one głównie zrealizowanych dróg zamiejskich, gdzie zmiany lokalizacji lub szersze działania związane z przeniesieniem części lub całości ruchu na inne trasy są praktycznie niemożliwe. W przypadku miast takie podejście jest niewystarczające, ponieważ nie uwzględnia efektów planowania i coraz większych problemów dotyczących m.in.: parkowania, zanieczyszczeń powietrza, koniecznych priorytetów komunikacji zbiorowej, wykorzystania niskoemisyjnych pojazdów, lepszego wykorzystaniem przestrzeni publicznej przez pieszych, rowerzystów oraz innych form poruszania się itp. Aby program ochrony przed hałasem stał się realnym narzędziem wspomagającym zarządzanie hałasem a nie jak do tej pory dodatkowym obowiązkiem, w którym wprowadza się głównie efekty związane z dużymi inwestycyjnymi musi uwzględnić wszelkie możliwe efekty planowania w wielu kierunkach i przy uwzględnieniu wielu kryteriów. Zmiana w podejściu, która powinna nastąpić w kolejnych rundach wykonywania programów ochrony środowiska przed hałasem powinna zawierać podejście systemowe oraz uwzględniać inne programy zmian (np. programy rewitalizacji, uspokojenia ruchu itp.) przy wykorzystaniu odpowiednich narzędzi decyzyjnych. Podstawą w tych działaniach powinno być priorytetowe podejście do strefy emisji hałasu, które wykorzystywane jest w innych krajach.

W analizach dotyczących wyboru urządzeń przed hałasem (nie tylko w programach ochrony przed hałasem) proponuje się podejście systemowe, jakie stosuje się w innych krajach [178]. Podejście to zostało przedstawione na rys. 5.3 – jest to jednocześnie zalecany przez autora schemat postępowania, jaki powinien obowiązywać w planowaniu i projektowaniu podstawowych metod i urządzeń ochrony przed hałasem.



Rys. 5.3. Schemat zalecanego postępowania w planowaniu i projektowaniu rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym

Źródło: opracowanie własne

5. Ocenia i charakterystyka rozwiązań drogowych ...

Działania podejmowane zgodnie z powyższym schematem są działaniami systemowymi i zawsze powinny obejmować na początku analizy dotyczące efektów unikania emisji hałasu (I) oraz zmniejszenia hałasu w strefie emisji (II). Dopiero po wyczerpaniu możliwych działań I i II powinno rozważyć się przeniesienie hałasu ze strefy emisji (III). W przypadku, kiedy nie zostanie osiągnięta odpowiednia emisja po wykonaniu działań I–III należy rozważyć ograniczenie hałasu w strefie emisji (IV). Taki schemat postępowania w programach ochrony środowiska przed hałasem wymaga bardzo perspektywicznego spojrzenia nie tylko na problemy hałasu, ale i również inne związane z wieloma zagadnieniami funkcjonowania obszarów miejskich i zamieszkanych. Niezwykle ważnym elementem programów jest fakt, że nie muszą one określać sztywnych zobowiązań głównie związanych z kosztami, ponieważ powinny stanowić zgodnie z ich ideą długofalowe strategie. Dopiero połączenie programów ochrony środowiska przed hałasem z innymi programami i strategiami zapewni rozwiązania optymalne. Ze względu jednak na znaczny stan zanieczyszczenia hałasem dużej części Polski (zwłaszcza miast) zdaniem autora w wielu sytuacjach likwidując miejsca szczególnie uciążliwe (*hot spots*) przed przystąpieniem do działań I–III konieczne będzie zastosowanie początkowo rozwiązań w obszarze emisji (IV) do momentu wprowadzania działań systemowych (I–III).

W większości analiz związanych z wyborem rozwiązań i środków ochronnych w opracowaniach środowiskowych, a w tym programach ochrony środowiska przed hałasem, brak jest nie tylko analiz ekonomicznych związanych z efektywnością ekonomiczną oraz efektów zdrowotnych, ale i również analiz możliwości technicznych ich zastosowania. Równocześnie z obserwacji i wykonanych analiz [14, 23, 34, 86] wynika, że najskuteczniejsze rozwiązania otrzymywane są w wyniku łączenia kilku rozwiązań równocześnie – rozwiązania (metody) mieszane.

W prowadzonych analizach i wykonanych opracowaniach środowiskowych (programy ochrony środowiska przed hałasem, raporty o oddziaływaniu przedsięwzięć na środowisko, analizy porealizacyjne i monitoringi) oraz projektach konieczne jest uwzględnianie klas dróg i związanych z nimi funkcji. Należy zwrócić uwagę, że klasy dróg przypisane są do różnych kategorii [180]:

- krajowa – klasy A, S lub GP,
- wojewódzkie – klasy GP lub G,
- powiatowe – klasy GP, G lub Z,
- gminne – klasy GP, G, Z, L lub D.

Przy przebudowach możliwe jest przyjęcie klasy o jeden poziom niżej. Powyższy podział ma charakter funkcjonalny i związany jest również z podziałem administracyjnym dróg. W przypadku analiz hałasu istotny jest przede wszystkim ruch drogowy i jego wielkość (natężenie ruchu) oraz lokalizacja drogi względem chronionych terenów i obiektów. Dlatego w analizach tych w trakcie wyboru urzędzeń ochrony środowiska należy mieć na względzie zarówno obciążenie ruchem tych dróg, jak i pełnione przez nie funkcje – nie jest dopuszczalne np. stosowanie uspokojenia ruchu na autostradzie (skrajny przykład),

5. Ocenia i charakterystyka rozwiązań drogowych ...

której funkcją i zadaniem jest przemieszczanie się z dużymi prędkościami największych potoków ruchu wraz z ruchem pojazdów ciężkich. Istotne w tych przypadkach mogą być koszty – dlatego przy doborze rozwiązań należy uwzględnić, czy droga jest nowoprojektowana, czy istniejąca. Przykład analizy możliwości zastosowania wybranych rozwiązań ochrony przed hałasem w strefie emisji hałasu podano w tabl. 5.1 i tabl. 5.2.

Tabl. 5.1. Możliwości zastosowania wybranych rozwiązań drogowych w strefie emisji hałasu – drogi nowoprojektowane

Rozwiązania drogowe i środki ochrony przed hałasem	Klasa drogi			
	A-S	GP-G	Z	L-D
Geometria drogi w planie	+	+	+	+
Pochylenie drogi	+/-	+/-	+	+
Rozwiązania wysokościowe	+	+	+/-	-
Skrzyżowania i węzły drogowe	+	+	+/-	-
Nawierzchnia	+	+	+	+/-
Organizacja ruchu i działania w zakresie zmian sposobów poruszania się ludzi	+/-	+	+	+
Sterowanie ruchem – systemy ITS	+/-	+	+	-
Uspokojenie ruchu	-	+/-	+	+

Źródło: opracowanie własne

Tabl. 5.2. Możliwości zastosowania wybranych rozwiązań drogowych w strefie emisji hałasu – drogi istniejące

Rozwiązania drogowe i środki ochrony przed hałasem	Klasa drogi			
	A-S	GP-G	Z	L-D
Geometria drogi w planie	-	-	+/-	+/-
Pochylenie drogi	-	-	+/-	+/-
Rozwiązanie wysokościowe	+/-	+/-	+/-	-
Skrzyżowania i węzły drogowe	+/-	+	+	+/-
Nawierzchnia	+	+	+	+/-
Organizacja ruchu i działania w zakresie zmian sposobów poruszania się ludzi	+/-	+	+	+
Sterowanie ruchem (systemy ITS)	+/-	+	+	-
Uspokojenie ruchu	-	+/-	+	+

Źródło: opracowanie własne

Oznaczenia dla Tabl. 5.1. i 5.2.2:

- + możliwość zastosowania
- +/- niewielka możliwość zastosowania (uzależnione od różnych czynników)
- brak możliwości zastosowania (ze względu na funkcję drogi, problemy techn.-ekon. itp.)

5. Ocenia i charakterystyka rozwiązań drogowych ...

W tabl. 5.1 i tabl. 5.2 zestawiono możliwości zastosowania rozwiązań drogowych, które mają wpływ na kształtowanie poziomu hałasu w otoczeniu dróg w podziale na drogi nowoprojektowane i istniejące. Zestawienie to należy traktować jedynie jako wskazówkę w zależności od rodzaju planowanej inwestycji. Należy też mieć na uwadze, że prawidłowy dobór rozwiązań i środków ochrony przed hałasem zależy od wielu kryteriów – zebrane informacje i zalecenia podano w rozdz. 6.3.3.

W poniższym opisie ograniczono się głównie do podania głównych charakterystyk rozwiązań i środków zabezpieczających przed hałasem, które niezbędne będą w dalszych opisach i analizach. Z uwagi na dalsze analizy dotyczące oceny rozwiązań (w kolejnych rozdziałach) dla każdego opisywanego poniżej rozwiązania podano ocenę stopnia jego wpływu ze względu na trzy rodzaje uwarunkowań (społeczne, środowiskowe i techniczne) oraz elementy w nich występujące. Ocenę i stopień wpływu rozwiązania na poszczególne uwarunkowania oraz elementy dla poszczególnych rozwiązań podano w poniższych tabelach. Podany stopień wpływu, który jest reprezentowany przez skalę (1, 3, 5, 7, 9) może być wykorzystywany w budowie modelu decyzyjnego wspomagającego wybór rozwiązań (opis modelu podano w rozdz. 6). Wartości oceny tego stopnia ustalono na podstawie własnych doświadczeń oraz obserwacji a także analizy dostępnej literatury. Stopień wpływu poszczególnych rozwiązań może być inaczej oceniony przez specjalistów związanych z poszczególnymi zagadnieniami w zależności od konkretnego przypadku. Może się on zmieniać również wraz z upływem czasu z uwagi na ciągły postęp technologiczny (jest to istotne w ewentualnych prognozach). Powinien podlegać dyskusjom i ewentualnie badaniom przed ich wykorzystaniem. Należy także zwrócić uwagę, że nie ocenia się stopnia wpływu czy ma on znaczenie pozytywne, czy negatywne, ponieważ w wielu sytuacjach zależy to od bardzo wielu czynników, jak choćby trafność zastosowania, prawidłowość wykonania i utrzymania. W większości przypadków ma on znaczenie pozytywnego wpływu – w każdej jednak sytuacji powinno się go jednak analizować (będzie to miało miejsce w modelu decyzyjnym opisywanym w rozdz. 6).

W dalszej części opisu starano się ująć większość ważniejszych charakterystyk dotyczących poszczególnych uwarunkowań, jakie mogą mieć wpływ na wybór rozwiązań drogowych i urządzeń zabezpieczających przed hałasem drogowym. W uwarunkowaniach społecznych zawarto m.in. przestrzeń publiczną. Element ten oznacza możliwość wpływu danego rozwiązania na lepsze kształtowanie przestrzeni publicznej związanej z ruchem pieszych, rowerzystów, komunikacji zbiorowej i innych użytkowników z wyłączeniem korzystania z pojazdów. W uwarunkowaniach technicznych umieszczono redukcję hałasu pomimo tego, że można ją również uznać za uwarunkowanie społeczne. W tym przypadku jednak bardziej interesujące jest ono z punktu widzenia oceny rozwiązania i dalszego podejmowania decyzji, stopień wpływu na ochronę przed hałasem i aspekty techniczne. Stopień wpływu dla redukcji hałasu można powiązać ze skalą zawartą w tabl. 5.3. W tabl. 5.3 na podstawie [14] podano charakter zmian odczuwany przez człowieka przy określonej wartości redukcji hałasu.

5. Ocenia i charakterystyka rozwiązań drogowych ...

Tabl. 5.3. Wpływ redukcji hałasu na odczuwanie zmian przez człowieka

Redukcja hałasu [dB]	Charakter zmian
1	bardzo mała zmiana
2	ledwo słyszalna zmiana
3	słyszalna, mała zmiana
5	znaczna i wyraźna zmiana
10	o połowę ciszej
20	bardzo duża zmiana

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [14]

W tym samym uwarunkowaniu technicznym podano także trwałość akustyczną, którą autor definiuje jako zdolność do zachowywania możliwości redukcji hałasu drogowego w określonym czasie – np. jest bardzo istotne w przypadku nawierzchni redukujących hałas, gdzie przy niektórych ich rodzajach można zauważyć szybki spadek zdolności redukcji hałasu. W tym samym kryterium technicznym po wielu analizach przypadków z doświadczeń autora nie wprowadzono preferencji i akceptacji zarządcy drogi. Odnosi się to do sytuacji wielokrotnie zaobserwowanych w praktyce, gdzie zarządca drogi podejmował decyzję bez dodatkowych analiz mając na względzie jedynie koszty i czas wykonania oraz w mniejszym stopniu pozostałe elementy jak np. utrzymanie czy trwałość techniczną i akustyczną rozwiązania. Uwzględnienie takiego podejścia, gdzie konieczna jest analiza szeregu czynników technicznych umożliwi w dalszych częściach dotyczących wyboru rozwiązań budowę bardziej realnego modelu decyzyjnego.

W dalszych charakterystykach pominięto także dodatkowe informacje związane z możliwościami i zmianami pojazdów (parku samochodowego), tj. redukcji hałasu dzięki zmianom: konstrukcji (zawieszenie, kształt – współczynnik opływu), konstrukcji silnika, rodzaju stosowanych opon. Metody te i środki ochrony nie są bezpośrednio związane z możliwymi działaniami technicznymi czy organizacyjnymi zarządców dróg, którzy nie mają wpływu na stan techniczny poruszających się po drogach pojazdów choć jest to jedno z ważniejszych zagadnień, które również należy uwzględniać w programach ochrony środowiska przed hałasem i opracowaniach środowiskowych. Wymiana parku samochodowego w Polsce na lepszy będzie opóźniona głównie z powodu możliwości sprowadzania z krajów UE pojazdów starych, których emisja hałasu na pewno jest większa w stosunku do nowych konstrukcji pojazdów. Potwierdziły to badania wykonane w ramach analiz dotyczących zmian emisji hałasu w ciągu ostatnich lat [21]. Należy jednak zwrócić uwagę, że coraz większy postęp w zakresie samochodów z napędem elektrycznym i hybrydowym będzie powodował systematyczną poprawę w zakresie hałasu drogowego aż do momentu, kiedy najważniejsze staną się rozwiązania związane z hałasem powstającym na styku opony pojazdu i nawierzchni. Będzie to prawdopodobnie

5. Ocenia i charakterystyka rozwiązań drogowych ...

proces wieloletni, chyba, że nastąpią istotne zmiany w prawie uniemożliwiające import starych pojazdów i ich eksploatację przy jednoczesnym wprowadzeniu systemu zachęt i wspomagania zakupu nowych samochodów. Efekty te należy uwzględnić we wszelkiego rodzaju analizach, które uwzględniają prognozę hałasu drogowego w założonym horyzoncie czasowym [24].

W poniższych charakterystykach za istotne autor uznaje te, które związane są bezpośrednio z ruchem drogowym i jego wpływem na emisję hałasu. Dla łatwiejszego odniesienia danego rozwiązania do oceny redukcji poziomu hałasu dla danego rozwiązania przyjęto, że wpływ ruchu na hałas występuje wtedy, gdy następują zmiany dotyczące:

- natężenia ruchu – przykładowe wielkości redukcji podano w tabl. 5.4 (w tym przypadku należy zwrócić uwagę, że wartości te będą się zmieniały w zależności od liczby pojazdów ciężkich w potoku ruchu oraz prędkości pojazdów).
- natężenia ruchu pojazdów ciężkich (hałaśliwych) – przykładowe wartości redukcji hałasu podano w tabl. 5.11,
- prędkości pojazdów – przykładowe wartości redukcji hałasu przy zmniejszaniu prędkości podano w tabl. 5.6,
- stylu jazdy – przykładowy wpływ przyspieszenia na zwiększenie poziomu hałasu podano w tabl. 5.7.

Tabl. 5.4. Przykładowy wpływ spadku natężenia ruchu na redukcję poziomu hałasu

Zmniejszenie natężenia ruchu [%]	Redukcja poziomu hałasu L_{Aeq} [dB]
10	0,5
20	1,0
30	1,6
40	2,2
50	3,0
75	6,0

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [13]

Tabl. 5.5. Przykładowy wpływ zmniejszenia udziału w ruchu pojazdów ciężkich na redukcję hałasu

Zmniejszenie udziału w ruchu pojazdów ciężkich [%]	Prędkość 50 km/h	Prędkość 80 km/h
z 5 do 0	- 0,7	- 1,0
z 10 do 0	- 1,4	- 1,9
z 15 do 0	- 2,0	- 2,6

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [13]

5.1. Unikanie emisji hałasu

Tabl. 5.6. Przykładowy wpływ zmniejszania prędkości ruchu na redukcję hałasu

Zmniejszenie prędkości ruchu (z – do) [km/h]	Zmniejszenie poziomu hałasu L_{Aeq} – pojazdy lekkie [dB]	Zmniejszenie poziomu hałasu L_{Aeq} – pojazdy ciężkie [dB]
130–120	1,0	-
120–110	1,1	-
110–100	1,2	-
100–90	1,3	1,0
90–80	1,5	1,1
80–70	1,7	1,2
70–60	1,9	1,4
60–50	2,3	1,7
50–40	2,8	2,1
40–30	3,6	2,7

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [50]

Tabl. 5.7. Przykładowy wpływ stylu jazdy (przyspieszenia) na zwiększenie poziomu hałasu

Rodzaj pojazdu	Przyspieszanie przy prędkości 30 km/h	Przyspieszanie przy prędkości 50 km/h
Samochód osobowy	+ 2,0	+ 1,4
Samochód dostawczy	+ 3,5	+ 2,3
Samochód ciężarowy (zależnie od mocy silnika)	od + 3,5 do + 4,4	od + 2,7 do + 3,5

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [50]

W poniższych charakterystykach podano także te rozwiązania, na które zarządcy dróg mogą mieć wpływ przynajmniej pośredni (np. w trakcie opiniowania niektórych rozwiązań). Są to przede wszystkim działania planistyczne związane z planowaniem przestrzennym oraz związane z obiektem chronionym.

5.1. Unikanie emisji hałasu

Zgodnie ze schematem na rys. 5.3 i założonym postępowaniem w planowaniu oraz projektowaniu rozwiązań drogowych oraz urządzeń ochrony środowiska przed hałasem unikanie emisji hałasu jest pierwszym etapem w postępowaniu wyboru rozwiązań i środków zabezpieczających przed hałasem. W zakresie planowania nowych elementów lub przebudów układu komunikacyjnego, czy też obszarów mieszkaniowych jest również działaniem

5. Ocenia i charakterystyka rozwiązań drogowych ...

w praktyce najważniejszym. Do najważniejszych rozwiązań chroniących przed hałasem w zakresie unikania emisji można zaliczyć: planowanie przestrzenne; strefowanie zabudowy; odpowiednie odległości zabudowy i terenów chronionych od drogi; promowanie i priorytety dla komunikacji zbiorowej; promowanie ruchu pieszego, rowerowego i innych form poruszania się bez samochodu, edukacja ekologiczna; planowanie i zarządzanie transportem towarowym.

Planowanie przestrzenne

Planowanie przestrzenne jest w praktyce najważniejszym sposobem, który bezpośrednio związany jest z ochroną przed hałasem. W jego ramach możliwe jest odpowiednie kształtowanie klimatu akustycznego włącznie ze strefami ciszy. W zdecydowanej większości przypadków istniejące zagospodarowanie przestrzenne i związana z nim obudowa dróg stwarza obecnie wiele problemów w ochronie przed hałasem nie tylko przy przejściach dróg przez miejscowości, czy w dzielnicach mieszkaniowych, ale również w centrach miast [82, 190]. Brak obowiązujących dokumentów planistycznych na znacznej powierzchni kraju oraz polityka władz samorządowych prowadzi do niekontrolowanego rozprzestrzeniania się zabudowy (żywiolowa suburbanizacja) [89] – przykład pokazano na rys. 5.4.



Rys. 5.4. Przykład typowej zabudowy mieszkalnej w otoczeniu dróg w Polsce

Źródło: opracowanie własne

5.1. Unikanie emisji hałasu

W planowaniu przestrzennym dla nowych rozwiązań niezbędne jest uwzględnienie wpływu hałasu na otoczenie dróg. Niedopuszczalne jest planowanie wokół dróg o dużych natężeniach ruchu obszarów chronionych akustycznie. Poza utrzymywaniem rezerwy pod budowę dróg niezbędne jest planowanie odpowiednich funkcji terenu w otoczeniu drogi. Konsekwencją dobrego planowania powinno być strefowanie zabudowy oraz odpowiednie odległości zabudowy od drogi opisane w dalszej części tego rozdziału. Zachowanie odpowiedniej odległości zabudowy oraz jej strefowanie umożliwia także wykorzystanie innych rozwiązań takich jak zastosowanie zieleni, obiektów osłaniających, które nie są przeznaczone na pobyt ludzi – metody zakresu zmniejszenia hałasu w strefie emisji opisywane w kolejnym rozdziale.

W zakresie uwarunkowań ekonomicznych koszty planowania przestrzennego mogą być początkowo bardzo wysokie jednak właściwe ukształtowanie ładu przestrzennego terenu przynosi znaczny zysk w postaci mniejszego wpływu hałasu na zdrowie ludzi i co z tym związane z mniejszymi kosztami społecznymi [84, 137]. W wytycznych [80] podaje się, że koszty planowania przestrzennego są niewielkie – dotyczy to jednak krajów w UE, które od lat stosują zasady utrzymania ładu przestrzennego na o wiele wyższym poziomie niż w Polsce. Koszty utrzymania odpowiedniego planowania przestrzennego to z reguły niewielkie koszty, które związane są głównie z regularnym utrzymaniem odpowiednich baz danych oraz konsekwentnym utrzymywaniem prawa lokalnego w tym zakresie.

Rozwiązanie to z uwagi na hałas drogowy ma jeden z największych stopni redukcji hałasu, który ocenia się na ponad 20 dB.

Strefowanie zabudowy

Strefowanie zabudowy polega na stosowaniu odpowiedniej kolejności obiektów zgodnie z zasadą, że im bliżej drogi tym obiekt nie powinien pełnić funkcji związanej ze stałym lub czasowym przebywaniem w nich ludzi. Rozwiązanie to nierozdzielnie związane jest z planowaniem przestrzennym [89, 204] oraz odpowiednią odległością zabudowy od drogi. Efekty redukcji hałasu w przypadku tego rozwiązania są praktycznie jednymi z większych zwłaszcza w obszarach o dużej intensywności zamieszkania. W przypadku zastosowania w otoczeniu drogi budynków niemieszkalnych w bezpośrednim sąsiedztwie drogi na większej długości należy się liczyć z możliwym zwiększeniem zanieczyszczeń powietrza – efekt „kanionu” zatrzymującego zanieczyszczone masy powietrza. W związku z tym może dochodzić do kumulacji oddziaływań w zakresie zanieczyszczeń powietrza. Rozwiązanie to może zwiększać bezpieczeństwo ruchu i wpływać pozytywnie na przepustowość i warunki ruchu ze względu na konieczność odpowiedniego zorganizowania dostępności do drogi w ramach skrzyżowań i organizacji ruchu lokalnego.

Odpowiednie odległości zabudowy i terenów chronionych od drogi

W praktyce rozwiązanie to jest mało realne do zastosowania w terenach miejskich zarówno dla nowych rozwiązań jak i istniejących, ponieważ niezbędna odległość w celu uzyskania niewielkiego wpływu hałasu na ludzi musi być nawet przy przeciętnych natężeniach ruchu większa niż kilkaset metrów. W wielu sytuacjach stosuje się poza zwiększoną odległością zabudowy od drogi inne rozwiązania związane zarówno z unikaniem emisji hałasu (etap I), jak i jego ograniczaniem (etap IV).

Odpowiednia odległość od drogi w połączeniu z zielenią może stanowić skuteczny środek ochrony przed zanieczyszczeniami powietrza. Większa odległość od drogi będzie wpływała pozytywnie na efekty związane z drganiami i wibracjami.

W przypadku terenów chronionych przyrodniczo i wpływu hałasu na zwierzęta rozwiązanie to może być jednym z podstawowych rozwiązań ochronnych – dotyczy głównie dróg zamiejskich. Często praktyką jest odsunięcie drogi od terenów wrażliwych na hałas. Wpływ hałasu w tym przypadku rozpatruje się jednak w wielu różnych aspektach [248, 249].

Promowanie i priorytety dla komunikacji zbiorowej

Działania te i rozwiązania głównie zmierzają do zmiany przyzwyczajeń użytkowników dróg w korzystaniu z samochodów prywatnych i spowodowanie korzystania z komunikacji zbiorowej. Komunikacja zbiorowa musi jednak zapewniać odpowiednie standardy zarówno w zakresie samego taboru oraz jego komfortu jak i poruszania się w układzie komunikacyjnym (zapewnienie priorytetu przejazdu, czasu przejazdu, częstotliwości, punktualności). Należy również zwrócić uwagę, że promocja może być wtedy skuteczna, kiedy zapewnione będzie odpowiednie ukształtowanie systemów transportu zbiorowego [83, 191] przy uwzględnieniu szeregu zasad związanych z: prowadzeniem tras, pokryciem obszaru liniami i przystankami, czasu przejazdu, który powinien być porównywalny z czasem przejazdu samochodem osobowym itd. Z punktu widzenia ochrony przed hałasem drogowym działanie to wykorzystuje efekt zmniejszenia natężenia ruchu jak również ograniczenia ruchliwości pojazdów w zakresie poszukiwania wolnych miejsc parkingowych [80]. Stosowanie tego rozwiązania może przynieść niewielką redukcję hałasu, jednakże w przypadku coraz częściej stosowanych pojazdów komunikacji zbiorowej o napędach elektrycznych rozwiązanie to może zapewniać istotne obniżenie poziomu hałasu (nawet do 5 dB) w przypadku, jeśli uzyska się wyeliminowanie z ruchu pojazdów osobowych i ciężarowych. Należy również zauważyć, że już sama wymiana taboru może spowodować znaczący wpływ na poprawę stanu akustycznego w otoczeniu drogi.

Promowanie ruchu pieszego, rowerowego i innych form poruszania się bez samochodu, edukacja ekologiczna

W ramach tego rozwiązania i jego oceny z punktu widzenia przydatności w rozwiązaniach chroniących przed hałasem zakłada się, że infrastruktura ta jest wykonana prawidłowo i zgodnie z zasadami – m.in. z tzw. programem pięciu wymogów CROW dla dróg rowerowych [166]. W praktyce polskiej większość miast posiada już standardy dla ruchu rowerowego oraz pieszego – np. dla miasta Lublina [166, 257]. Rozwiązanie to poza promocją zdrowego stylu życia ma podobnie jak w przypadku komunikacji zbiorowej zmienić przyzwyczajenia użytkowników samochodów osobowych. Udział ruchu rowerowego w podróżach w mieście systematycznie rośnie i rozpatrywany razem z komunikacją zbiorową jest w stanie znacząco ograniczyć emisję hałasu. Przykładowo kompleksowe badania ruchu wykonane w Krakowie 2015 r. wskazują na to, że transport zbiorowy stanowił 36,3% przemieszczeń, samochody 33,7%, pieszo 28,4% [39, 104] – Kraków podpisując Kartę Brukselską (karta ogłoszona na konferencji Velo-City 2009) zobowiązał się do wzrostu udziału ruchu rowerowego do 15% w 2020 r. Aby jednak rozwiązanie to było skuteczne niezbędna jest infrastruktura rowerowa wraz ze zmianą polityki samochodowej dotyczącej m.in. centrów miast. Edukacja ekologiczna w zakresie hałasu drogowego w Polsce praktycznie w praktyce nie jest stosowana. Elementy edukacji występują w trakcie spotkań z mieszkańcami głównie podczas konsultacji społecznych. Jest to jednak zbyt mało i praktycznie zbyt późno, ponieważ elementy tego rodzaju edukacji powinny występować już w szkole podstawowej, jak np. w Niemczech [119].

Planowanie i zarządzanie transportem towarowym

Rozwiązania te związane są z ograniczeniami czasowymi dowozu towarów, zmianą sposobów dostarczania towarów w określone obszary (przeładunek towarów z dużych pojazdów ciężarowych na mniejsze pojazdy dostawcze, stosowanie rowerów towarowych) oraz wyznaczanie tras przewozu transportowego. Do rozwiązań tych należą również wyłączenia czasowe (głównie w porze nocy) niektórych połączeń drogowych, wokół których zlokalizowane są wrażliwe na hałas tereny z zabudową mieszkaniową. Rozwiązanie to może przynieść redukcję hałasu o około 2 dB – może ono być jednak większe w połączeniu z ograniczeniami prędkości oraz utrzymaniu płynności ruchu. Zależy ono również od konkretnych rozwiązań i w niektórych sytuacjach redukcja może wynosić nawet do 6 dB [22, 207]. Tego typu działania nie wymagają z reguły dużych nakładów finansowych.

W tabl. 5.8 zestawiono charakterystykę rozwiązań w zakresie unikania emisji hałasu wraz z oceną stopnia wpływu na uwarunkowania ekonomiczne, społeczne, środowiskowe i techniczne.

5. Ocenia i charakterystyka rozwiązań drogowych ...

Tabl. 5.8. Charakterystyka rozwiązań w zakresie unikania emisji hałasu wraz z oceną stopnia ich wpływu na wybrane uwarunkowania

Uwarunkowania	Planowanie przestrzenne	Strefowanie zabudowy	Odpowiednie odległości zabudowy i terenów chronionych od drogi	Promowanie i priorytety dla komunikacji zbiorowej	Promowanie ruchu pieszego, rowerowego i innych form poruszania się bez samochodu, edukacja ekologiczna	Planowanie i zarządzanie transportem towarowym
Ekonomiczne						
Koszty budowy/zastosowania	5-9	5-9	5-9	3-7	3-7	3-5
Koszty utrzymania i remontów	1-3	3-7	3-5	3-7	3-7	3-7
Społeczne						
Preferencje i akceptacja społeczna	1-3	3-7	3-9	5-7	5-9	5-9
Przestrzeń publiczna	5-9	5-9	3-7	5-9	5-9	3-7
Warunki poruszania się niepełnosprawnych	5-9	3-7	3-7	5-9	5-9	3-7
Środowiskowe						
Zanieczyszczenia powietrza	5-9	3-7	5-9	3-7	5-9	3-5
Wibracje i drgania	3-7	1-3	3-7	1-3	3-7	5-7
Rośliny i zwierzęta	3-7	1-3	3-9	1	1-3	1-3
Wody	3-5	1-3	1-3	1	1-3	1-3
Zmiany krajobrazu i estetyka	5-9	5-9	3-7	1-3	5-9	1-5
Dobra materialne	5-9	1-3	1-5	1-3	3-7	1-3
Dobra kultury	5-9	1-3	1-5	1-3	3-7	1-3
Kumulacja oddziaływań	5-9	3-7	3-7	1-3	3-7	3-5
Techniczne						
Redukcja hałasu	5-9 (od kilku do ponad 20 dB)		3-5 (w zależności od wielkości zmniejszenia natężenia ruchu 0,5-5,0 dB)			
Bezpieczeństwo ruchu drogowego	5-9	5-7	5-7	3-7	5-9	3-7
Trwałość techniczna	3-7	5-9	1-3	1-3	5-9	3-7
Trwałość akustyczna	5-9	7-9	5-9	5-7	5-9	5-7
Przepustowość i warunki ruchu	5-9	5-7	1-5	3-5	3-7	3-5
Względy konstrukcyjne, technologiczne i materiałowe	1-3	5-7	1-3	1-3	3-5	3-5
Warunki budowy i montażu	3-7	1-3	1-3	1-3	3-7	1-3
Warunki użytkowania i utrzymania	3-7	3-5	1-3	3-7	5-7	3-7

¹⁾ Oznaczenia dla oceny stopnia wpływu rozwiązania:

1 – obojętny (brak wpływu), 3 – mały (niewielki), 5 – duży, 7 – bardzo duży, 9 – całkowity.

Źródło: opracowanie własne

5.1. Unikanie emisji hałasu

Poniżej podano podstawowe zalety i wady tego rozwiązania w zakresie unikania emisji hałasu z uwagi na różne zagadnienia związane z tym etapem.

Zalety:

- uzyskanie trwałych efektów związanych nie tylko z ograniczeniem poziomu hałasu, ale również innych uciążliwości,
- możliwość prostego tworzenia obszarów ciszy ze względu na brak ruchu samochodowego w określonych strefach,
- uporządkowanie problemów parkingowych,
- podporządkowanie przestrzeni publicznej pieszym, osobom niepełnosprawnym poruszającym się na wózkach, rowerzystom i innym użytkownikom korzystających z innych form poruszania się (rolki, deskorolki, segway, boards, hulajnogi),
- zmiany w sposobie poruszania się wpływające na poprawę kondycji i stanu zdrowia,
- możliwość tworzenia nowej jakości przestrzeni publicznej,
- separacja różnych użytkowników i poprawa bezpieczeństwa ruchu drogowego.

Wady:

- wieloletnie przebudowy i związane z tym uciążliwości,
- wysokie koszty i konieczność założenia wieloletnich działań inwestycyjnych oraz w zakresie organizacji ruchu,
- trudna do określenia wielkość redukcji hałasu z uwagi na możliwe zmiany charakteru klimatu akustycznego (np. hałas nocny związany działalnością rozrywkową itp.),
- pogorszenie stanu klimatu akustycznego obszaru w przypadku nieprzemyślanych rozwiązań – dotyczy to zwłaszcza rozwiązań punktowych (pojedyncze działania symulujące efekt uspokojenia ruchu – np. jeden lub seria progów zwalniających z najazdami podrzutowymi).
- początkowa niechęć mieszkańców oraz użytkowników komercyjnych terenu (sklepy, restauracje itp.).

Jak można zauważyć wymienione powyżej wady możliwe są do uniknięcia a ewentualne niekorzystne oddziaływania mają charakter odwracalny. Koszty w dłuższej perspektywie niwelowane są przez uzyskane efekty, w tym przede wszystkim zdrowotne. Efektywność tych rozwiązań jest zróżnicowana. Zależy ona w dużej mierze od rodzaju zastosowanych rozwiązań i może wynosić od kilku do ponad 20 dB. Planowana efektywność przy bardzo dużych kosztach powinna zawsze zmierzać do uzyskiwania pełnego komfortu akustycznego i osiągania co najmniej wartości dopuszczalnych hałasu. W przypadku braku możliwości oszacowania tych działań z punktu widzenia redukcji hałasu tuż po ich realizacji powinno się je oceniać przez opinię (jakość) ich bezpośrednich użytkowników oraz np. miary związane z ruchem drogowym, pieszym itp. Dzięki programom ochrony środowiska przed hałasem rozwiązania możliwe jest określenie ilościowe dla tych rozwiązań przy pomocy zarówno pomiarów hałasu, jak i obliczeniowo. W przypadku, jeśli działania te mają obejmować znaczne powierzchnie oraz kiedy będą prowadzone etapowo powinna być sporządzona ocena strategiczna programu zmian, której wyniki powinny być uwzględniane dla pojedynczych działań i opracowań środowiskowych.

5.2. Zmniejszenie hałasu w strefie emisji

Zmniejszanie hałasu w strefie emisji jest drugim w kolejności etapem postępowania w planowaniu i projektowaniu ochrony przed hałasem. W sytuacji, kiedy nie jest możliwe unikanie emisji hałasu powinno się dokonać analizy czy nie jest możliwe zmniejszenie hałasu w strefie emisji. O ile pierwszy etap związany z unikaniem emisji ma w większości charakter planistyczny o tyle etap zmniejszenia hałasu w strefie emisji jest związany z infrastrukturą istniejącą. W znacznej części przypadków będą to rozwiązania, które mogą być powiązane z innymi działaniami inwestycyjnymi i priorytetami (przebudowa z uwagi na poprawę przepustowości, bezpieczeństwa ruchu drogowego itp.). Liczne rozwiązania na tym etapie z zakresu organizacji ruchu, aby były skuteczne akustycznie powinny być uwzględnione w początkowych swoich założeniach i realizowane również z zamiarem ograniczenia hałasu. Częstym błędem jest opisywanie w programach ochrony środowiska informacji o np. realizacji systemu zarządzania ruchem w mieście, kiedy w założeniach tego programu nie uwzględniano efektów związanych z redukcją hałasu. Tymczasem system taki może być zorientowany na wprowadzenie priorytetu przemieszczania się ruchu dla konkretnych arterii powodując tym samym kolejki pojazdów i podwyższoną emisję hałasu na wlotach bocznych skrzyżowań. Stąd każde z tego typu rozwiązań powinno określać wartość zakładanej redukcji hałasu oraz wskazywać metody badań przed i po realizacji w celu potwierdzenia wartości tych redukcji. Do najważniejszych rozwiązań drogowych i środków ograniczających poziom hałasu drogowego w zakresie jego zmniejszania w strefie emisji należą:

- Przebudowa wysokościowa dróg i pochyłeń podłużnych.
- Optymalizacja efektywności komunikacji.
- Planowanie i zarządzanie parkingami.
- Organizacja ruchu – spowolnienie i ukierunkowanie ruchu.
- Systemy zarządzania i kierowania ruchem.
- Uspokojenie ruchu drogowego.
- Ograniczenie hałasu wzdłuż dróg – ekrany akustyczne, zabudowa osłaniająca, zieleń.
- Nawierzchnie drogowe.

Przebudowa wysokościowa dróg i pochyłeń podłużnych

Rozwiązanie takie z uwagi na wysokie koszty z reguły połączone są z innymi celami (poprawa warunków jazdy, bezpieczeństwo ruchu drogowego, ograniczenie emisji zanieczyszczeń powietrza, poprawa przepustowości, płynności i warunków ruchu itp.). W ramach przebudowy wysokościowej dróg możliwa jest zmiana przebiegu niwelety drogi i jej obniżenie (wprowadzenie do wykopu). W przypadku drogi w wykopie skarpy zaczynają pełnić ochronną ze względu na ograniczenie rozchodzenia się fali dźwiękowej (podobnie jak w przypadku ekranów akustycznych). Z reguły wprowadzenie niwelety drogi do wykopu jest jednym ze skuteczniejszych rozwiązań w ochronie przed hałasem.

5.2. Zmniejszenie hałasu w strefie emisji

Ocenia się, że rozwiązanie to przy odpowiedniej głębokości wykopu oraz wykończeniu skarp wykopu (trawa, dodatkowa zieleń a w przypadku murów oporowych elementy dźwiękochłonne) może zmniejszać emisję hałasu o wartość do 15 dB (maksymalny efekt jak w przypadku zastosowania ekranów akustycznych) i więcej w zależności od konfiguracji terenu oraz lokalizacji chronionych obiektów. Możliwość zastosowania tego rozwiązania związana jest zagospodarowaniem otoczenia, poziomem wód gruntowych oraz ewentualnie od intensywności i głębokości istniejącego uzbrojenia podziemnego. Podobny efekt (nieco mniejszy niż w przypadku drogi w wykopie) można uzyskać w przypadku wyniesienia niwelety drogi na obiekt wyposażony w ekrany akustyczne. Elementem ekranującym (poza ekranami akustycznymi) w wielu przypadkach staje się sama konstrukcja obiektu. Należy jednak zwrócić uwagę, że większość obiektów musi być wyposażona w urządzenia dylatujące, które same mogą stać się źródłem dodatkowej emisji hałasu.

Wpływ pochylenia podłużnego drogi na hałas notowany jest od około 2% [170] – emisja hałasu wzrasta wraz z wielkością pochylenia podłużnego i prędkością pojazdów. Efekt ten notowany jest głównie dla pojazdów jadących w jednym kierunku (w typowych sytuacjach, w przybliżeniu dla około 50% pojazdów). Szacuje się, że emisja hałasu wzrasta około 0,5–1,0 dB na 1% dodatkowego pochylenia [170]. Zmiana spadku podłużnego niwelety jest rozwiązaniem rzadko stosowanym z uwagi na problemy zagospodarowania otoczenia drogi, uzbrojenia terenu i ewentualnego występowania wód gruntowych.

Ze względu na duże nakłady dla tego typu rozwiązań zwłaszcza w miastach decyzje o ich zastosowaniu powinny być podejmowane jedynie w przypadku możliwości uzyskania wysokich wartości redukcji hałasu. Często są to rozwiązania, które są wykonywane głównie z powodu przebudowy fragmentu układu komunikacyjnego. Mogą one być powiązane z innymi rozwiązaniami ograniczającymi hałas drogowy jak np. wprowadzenie drogi w wykop, gdzie skarpy wykopów (lub mury oporowe) stanowią również rozwiązanie chroniące przed hałasem. W takich sytuacjach należy szczególnie rozważyć możliwość poruszania się osób niepełnosprawnych i dostępność służb ratowniczych (ekran akustyczny na murze oporowym w rozwiązaniach miejskich nie powinien być stosowany bez rozwiązania szybkiego dostępu służb ratowniczych do drogi).

W rozwiązaniach miejskich podobnie jak w przypadku strefowania zabudowy i stosowania zabudowy osłaniającej może występować lokalne zwiększenie zanieczyszczeń powietrza spalinami samochodowymi.

Optymalizacja efektywności komunikacji

Rozwiązanie to należy do grupy działań związanych ze zmianą przyzwyczajeń w korzystaniu z samochodu osobowego. Do zadań w ramach optymalizacji efektywności komunikacji publicznej należy np. optymalizacja rozkładu jazdy komunikacji publicznej i inne działania, które tworzą atrakcyjność i konkurencyjność w stosunku do samochodu

osobowego [219]. Rozwiązanie to jest trudno ocenić z uwagi na możliwą redukcję hałasu jednak jego wpływ jest związany ze zmniejszeniem natężenia ruchu samochodów osobowych (tabl. 5.4).

Planowanie i zarządzanie parkingami

Rozwiązania te mają przede wszystkim na celu zmianę zachowań kierowców i ograniczenie ruchu w określonych obszarach oraz ograniczenie ruchu w związku z poszukiwaniem wolnych miejsc parkingowych. Jest to jedno z lepszych rozwiązań jakie może być stosowane w obszarach, gdzie konieczne jest zmniejszenie emisji hałasu (tereny zabudowy mieszkaniowej, rejony szpitali itp.). Rozwiązania te, aby były skuteczne wymagają wprowadzenia skutecznej polityki parkingowej.

Do najlepszych rozwiązań w tym zakresie należy zaliczyć systemy *Park and Ride* (parkuj i jedź) [216, 217], gdzie po zaparkowaniu pojazdu na parkingu zlokalizowanym najlepiej poza intensywną zabudową mieszkalną (granice miast, dzielnic) możliwe jest dalsze przemieszczanie się przy wykorzystaniu komunikacji zbiorowej. Istotne w tym przypadku są koszty podróży, które przeważnie związane są z kosztami parkowania i innymi składnikami [218] – w przypadku systemów *Park and Ride* koszty przejazdu komunikacją publiczną powinny być zintegrowane z kosztami parkowania. Równie ważna jest polityka cenowa za parkowanie zwłaszcza w centrach miast i obszarach o intensywnym zagospodarowaniu. Niestety w warunkach krajowych elastyczne kształtowanie cen za parkowanie jest nadal ograniczone przez obowiązujące przepisy, które narzucają maksymalną stawkę za określony czas parkowania.

Redukcja hałasu związana jest z ograniczeniem natężenia ruchu – w zależności od wielkości tego ograniczenia redukcja hałasu może wynieść do 3 dB (głównie w miejscach koncentracji ruchu drogowego w rejonie parkingów).

Organizacja ruchu – spowolnienie i ukierunkowanie ruchu

W przypadku tego rozwiązania wystąpić mogą wszystkie możliwe efekty redukcji hałasu opisywane na początku tego rozdziału, gdzie pokazano przykładowy wpływ zmian natężenia ruchu (tabl. 5.4), ograniczenia ruchu ciężarowego (tabl. 5.5), zmian prędkości (tabl. 5.6), stylu jazdy (tabl. 5.7). Organizacja ruchu jako rozwiązanie chroniące przed hałasem związana jest przede wszystkim ze spowolnieniem ruchu oraz zmianą jego przebiegu (ukierunkowaniem ruchu) gdzie niezwykle istotnym jest znajomość natężenia ruchu, prędkości pojazdów i struktury rodzajowej w potoku pojazdów [36, 225].

W praktyce nie jest to rozwiązanie, które stosowane jest wyłącznie dla potrzeb ochrony przed hałasem (bardzo rzadkie przypadki) – przeważnie stosuje się je dla rozwiązania szeregu różnych problemów związanych np. z przepustowością i warunkami ruchu, poprawą stanu bezpieczeństwa ruchu drogowego itp.

5.2. Zmniejszenie hałasu w strefie emisji

Do podstawowych rozwiązań w zakresie organizacji ruchu, które mogą być powiązane są z ochroną przed hałasem drogowym należą:

- **Hierarchizacja sieci dróg.** Rozwiązanie to dotyczy głównie obszarów miejskich. Celem hierarchizacji dróg w przypadku ograniczeń hałasu jest przede wszystkim wskazanie dróg i przeniesienie na nie głównych potoków ruchu – najlepiej tranzytowego i ciężkiego. W ramach hierarchizacji może nastąpić wskazanie obszarów, gdzie powinno nastąpić uspokojenie ruchu i wyznaczenie obszarów ciszy. Rozwiązania te ze względu na swoje skomplikowanie wynikające z konieczności uporządkowania wielu zagadnień dotyczących już istniejącego zagospodarowania powinny towarzyszyć przede wszystkim planom ochrony środowiska przed hałasem. W istniejącej zabudowie zastosowanie tego rozwiązania jest procesem długoterminowym i wymagającym skoordynowania wielu dokumentów planistycznych, programów, polityk itp. Rozwiązanie to jest związane także z planowaniem przestrzennym oraz odpowiednim kształtowaniem sieci ulic w skali miasta oraz osiedli mieszkaniowych [191].

W ramach tych działań dla osiedli mieszkaniowych zalecana jest m.in.: ochrona przed ruchem tranzytowym, segregacja ruchu pieszego od samochodowego, równomierność obciążenia ruchem, Redukcja hałasu w tym przypadku na niektórych połączeniach drogowych może wynosić nawet kilkanaście decybeli (w przypadku eliminacji większości pojazdów na połączeniu i wprowadzeniu elementów uspokojenia ruchu).

- **Zmiany w kształtowaniu natężenia ruchu pojazdów.** Od wielkości natężenia ruchu zależy wielkość emisji hałasu. W praktyce nie jest możliwe wprowadzenie takiej stałej organizacji ruchu (opartej tylko na oznakowaniu), która ograniczałaby wielkość natężenia ruchu wszystkich kategorii pojazdów od poziomu hałasu (choć technicznie rozwiązania takie są możliwe). Takie rozwiązanie jest możliwe do zastosowania częściowo w przypadku dróg dojazdowych i lokalnych występujących na osiedlach. Możliwe jest tam ograniczenie natężenia ruchu pojazdów wyłącznie do mieszkańców jednak i to nie gwarantuje, że w szczycie ruchu porannego lub popołudniowego nie będzie dochodziło do znacznej emisji hałasu od pojazdów mieszkańców. W pozostałych przypadkach jest to możliwe dzięki systemom zarządzania ruchem opisywanym w kolejnym punkcie.

Pośrednie ograniczenie liczby pojazdów jest możliwe poprzez odpowiednią hierarchizację sieci dróg (opisywaną powyżej) oraz wyraźne wydzielenie układu ulic podstawowych (ruchowych) i uzupełniających (dojazdowych i lokalnych) w miastach. W takich sytuacjach możliwe jest kształtowanie natężeń ruchu na niektórych połączeniach [135]. Wymaga to jednak odpowiednich sposobów i środków organizacji ruchu związanych z pozyskiwaniem danych o ruchu i aktywnym sterowaniem ruchem na większych obszarach miasta. Redukcja hałasu w przypadku tego rodzaju rozwiązań jest zbliżona do opisywanej wcześniej hierarchizacji ruchu.

- **Zmiany w strukturze potoku pojazdów.** Rozwiązania związane ze strukturą pojazdów w potoku ruchu dotyczą przede wszystkim wyłączenia ruchu wybranych grup pojazdów z niektórych arterii np. ograniczeń czasowych poruszania się pojazdów ciężkich (zwłaszcza w porze nocy). Ograniczenia te dotyczą głównie grupy pojazdów ciężkich i motocykli, jako najbardziej hałaśliwych pojazdów w potoku ruchu [69]. Wyłączenia z ruchu oraz ograniczenia czasowe ruchu pojazdów hałaśliwych możliwe jest dzięki działaniom z zakresu odpowiedniej organizacji ruchu podobnie jak w przypadku działań związanych z natężeniem ruchu pojazdów.
- **Ograniczenia prędkości.** Rozwiązanie to jest jednym z częściej zalecanych w ochronie przed hałasem. W praktyce krajowej rozwiązanie to sporadycznie jest stosowane w celu ochrony przed hałasem. W większości przypadków ograniczenia prędkości realizuje się za pomocą odpowiedniego oznakowania odcinków dróg, na których stosowane są te ograniczenia. Problemem jest jednak skuteczność tego rodzaju rozwiązań z uwagi na faktyczne możliwości uzyskania redukcji prędkości [59]. W jednym z pilotażowych badań wykonywanym przez autora, w którym testowano tego typu rozwiązanie (ograniczenie prędkości w nocy – rys. 5.5) nie uzyskano zadowalających rezultatów w zakresie ograniczenia prędkości i poziomu hałasu – w zdecydowanej większości kierowcy nie dostawali prędkości do ograniczenia. Przyczyną takiego stanu był zbyt krótki czas obowiązywania ograniczenia, zbyt duża liczba znaków w jednym miejscu oraz przede wszystkim fakt ograniczenia prędkości na dwujezdniowej ulicy, na której istnieje możliwość rozwijania dużych prędkości. Ponadto dodatkowe oznakowanie ograniczające prędkość w godzinach 22⁰⁰–6⁰⁰ nie posiadało jakichkolwiek dodatkowych informacji o przyczynach ograniczenia (ze względu na hałas drogowy). W większości krajów, gdzie stosowane jest tego typu rozwiązanie umieszcza się dodatkową tabliczkę informującą o powodzie tego ograniczenia związanego z hałasem drogowym – rys. 5.6. Wynika to niejednokrotnie z ignorowania przez kierowców oznakowania i ograniczonych działań Policji. O wiele skuteczniejszym jest zastosowanie punktowe fotoradarów oraz pomiary odcinkowe prędkości, które związane są z sankcjami dla kierowców w przypadku przekraczania dopuszczalnej prędkości. Niestety rozwiązania te w praktyce stosowane są jedynie w działaniach związanych z poprawą stanu bezpieczeństwa ruchu drogowego. Zastosowanie tego rodzaju rozwiązania nie tylko zabezpiecza użytkowników drogi, ale przede wszystkim ludzi żyjących w otoczeniu drogi. Rozwiązanie to może być łączone – np. z nocnymi ograniczeniami ruchu ciężarowego. Połączenie tych rozwiązań w wielu sytuacjach może być wystarczające i wymaga niewspółmiernie mniejszych kosztów niż np. zabezpieczenie polegające na zastosowaniu ekranów akustycznych (przykład taki przedstawiono w rozdz. 7). Przykład redukcji hałasu z uwagi na ograniczenie prędkości podano w tabl. 5.6

5.2. Zmniejszenie hałasu w strefie emisji



Rys. 5.5. Pilotażowe ograniczenia prędkości w okresie nocy z uwagi na hałas drogowy

Źródło: opracowanie własne



Rys. 5.6. Przykład ograniczenia prędkości na autostradzie do 100 km/h w porze nocy z uwagi na hałas drogowy (Niemcy)

Źródło: opracowanie własne

5. Ocenia i charakterystyka rozwiązań drogowych ...

- **Płynność ruchu.** Rozwiązania związane z płynnością ruchu z punktu widzenia ochrony przed hałasem związane są efektem jak najmniejszej liczby zatrzymań i ruszań pojazdów. Efekt ten osiągany jest poprzez stosowanie odpowiednich sposobów sterowania ruchem w miastach i poza nimi zwłaszcza w trakcie godzin szczytu komunikacyjnego, czasowych koncentracji ruchu (np. ruch rekreacyjny, masowe imprezy itp.). Płynność ruchu w obszarach miejskich jest związana również ściśle z zanieczyszczeniami powietrza od pojazdów. Utrzymanie płynności w sieci dróg ma również na celu poprawę przepustowości i przede wszystkim odpowiednich warunków ruchu dla użytkowników sieci drogowej. Osiągane to jest m.in. poprzez stosowanie zaawansowanych technik sterowania ruchem. Płynność ruchu nierozzerwalnie jest związana ze stylem jazdy kierowców i w przypadku agresywnego stylu jazdy należy się spodziewać bardzo niekorzystnych efektów związanych z hałasem – przykład zwiększenia poziomu hałasu podano w tabl. 5.7.

Punktami newralgicznymi w sieci drogowej, gdzie dochodzi do największych ograniczeń płynności ruchu są skrzyżowania drogowe [43, 71, 239]. Odpowiednie sterowanie ruchem może zapewnić redukcję hałasu w skrajnych przypadkach powyżej 9 dB [17, 133, 134, 229, 230, 231, 241] (przypadki związane ze zmianami sposobów sterowania ruchem na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną). Mniejszą redukcję jednak bardzo istotną z punktu widzenia ochrony przed hałasem otrzymuje się po zastosowaniu rond, gdzie ruch powinien odbywać się płynnie (bez zatrzymań) [238] – redukcja hałasu w przypadku rond w stosunku do innych rozwiązań skrzyżowań wynosi w tym przypadku 3–5 dB [16, 28] – przykład ronda w którym wyspa środkowa pełni rolę ekranu akustycznego pokazano na rys. 5.7.



Rys. 5.7. Przykład ronda z wyspą środkową pełniącą rolę ekranu akustycznego (Niemcy)

Źródło: opracowanie własne

Powyższe efekty trudno jest uzyskać poprzez odpowiedni sposób oznakowania dróg przy użyciu oznakowania (pionowego i poziomego). Najczęściej do zaawansowanych metod sterowania ruchem wykorzystywane są systemy opisywane w kolejnym punkcie.

Systemy zarządzania i kierowania ruchem

Rozwiązania te nazywane też inteligentnymi systemami transportowymi (ang. *Intelligent Transportation Systems – ITS*) dają możliwość znacznego ograniczenia niekorzystnego wpływu transportu na środowisko [30, 39]. Efekt ten uzyskiwany jest dzięki zmianom w kształtowaniu potoku ruchu i sposobach jego poruszania się (płynność ruchu, prędkość) przy wykorzystaniu telematyki drogowej i coraz częściej systemów pokładowych w pojazdach. Obszary zastosowania *ITS* kluczowe z punktu widzenia ochrony środowiska to przede wszystkim:

- zarządzanie natężeniem ruchu i strukturą rodzajową ruchu (optymalizacja wykorzystania infrastruktury),
- zarządzanie dostępnością dróg,
- promowanie wykorzystania bardziej ekologicznych środków transportu,
- kontrola prędkości (w tym wpływ na styl jazdy).

Jak można zauważyć systemy *ITS* są narzędziem, które umożliwia uzyskanie efektów opisywanych powyżej w części dotyczącej organizacji ruchu. Ze względu na szersze możliwości tych systemów wydzielono je do kolejnej grupy rozwiązań mogących mieć wpływ na kształtowanie hałasu w otoczeniu dróg. Zarządzanie natężeniem ruchu mające na względzie środowiskową optymalizację wykorzystania infrastruktury drogowej to przede wszystkim działania, które zmierzają do ograniczenia zatłoczenia i bardziej racjonalnego rozłożenia obciążenia ruchem w ramach sieci drogowej. W ten sposób zmniejsza się liczba pojazdów, które generują zanieczyszczenia, a jednocześnie tworzy się mniej zatorów i poprawia się płynność ruchu, dzięki czemu maleje również emisja hałasu oraz szkodliwych substancji, jak również zmniejsza się zużycie paliwa. Zarządzanie natężeniem ruchu umożliwia również elektroniczny system poboru opłat za korzystanie z infrastruktury. Jest on stosowany głównie na autostradach, ale również w niektórych centrach europejskich miast i na odcinkach dróg przebiegających przez obszary cenne środowiskowo. Znaczących efektów z uwagi na ochronę przed hałasem nie uzyska się jedynie poprzez zwykłe (statyczne) oznakowanie dróg. Efekt rozkładu ruchu uzyskuje się w systemach sterowania ruchem za pomocą znaków o zmiennej treści (VMS) przy wspomaganiu systemami informacji drogowej w czasie rzeczywistym, które przekazują komunikaty kierowcom, a także w niedalekiej przyszłości bezpośrednio do urządzeń pokładowych w pojazdach. Prośrodowiskowe zastosowanie mają również systemy zarządzania parkingami, gdyż zmniejszają niepotrzebne przejazdy pojazdów, których kierowcy poszukują miejsc do parkowania co opisywano wcześniej. Bardziej racjonalny rozkład ruchu umożliwia też nawigacja satelitarna, planery podróży oraz systemy zarządzania logistyką i dostawami, które umożliwiają wybór odpowiedniej trasy.

5. Ocenia i charakterystyka rozwiązań drogowych ...

Zarządzanie dostępnością infrastruktury drogowej to kontrolowanie możliwości korzystania z dróg przez pojazdy. Zakazy poruszania się określonych kategorii pojazdów dotyczą przede wszystkim pojazdów ciężkich, które wywierają najbardziej niekorzystny wpływ na środowisko. Niezależnie od innych czynników, niedopuszczanie do przejazdu takich pojazdów przez tereny akustycznie i środowiskowo wrażliwe oznacza duże korzyści ekologiczne i zdrowotne dla mieszkańców. ITS mają szerokie zastosowanie głównie w automatycznym egzekwowaniu zakazów ruchu pojazdów. Dużą skuteczność wykazuje połączone stosowanie wag bezzatrzymaniowych (ang. *Weight in Motion*), urządzeń identyfikujących kategorię pojazdu, znaków o zmiennej treści nakazujących objazd lub zakazujących wjazdu oraz fotoradarów rejestrujących łamanie zakazu. Z korzyścią dla środowiska stosowana jest również kontrola wjazdu (ang. *Ramp Metering*), która przeciwdziała nadmiernemu zagęszczeniu pojazdów na danym odcinku drogi.

Oprócz automatycznych urządzeń egzekwujących zakaz wjazdu możliwe jest również fizyczne uniemożliwienie dostępu do obszarów wrażliwych, które całkowicie eliminuje tranzytowy ruch pojazdów i związany z nimi zwiększenie emisji hałasu. Są to instalacje, które fizycznie uniemożliwiają wjazd do pewnych stref, za wyjątkiem wybranych (niezbędnych) pojazdów.

Systemy ITS znajdują również wykorzystanie głównie poprzez systemy sterowania ruchem zapewniające priorytet środkom transportu miejskiego, w tym pierwszeństwo w przejeździe przez skrzyżowania oraz dynamiczne sterowanie pasami ruchu dla autobusów. Możliwe są także działania wspomagające: wydajne systemy informujące o możliwościach i udogodnieniach korzystania z urządzeń *Park and Ride*, połączeń różnych środków komunikacji (multimodalność), wspólnych przystankach, przesiadkach, godzinach odjazdów, czasie przejazdu itp.

Kontrola prędkości skutecznie pomaga zapewnić ekologiczną jazdę (ang. *Eco-Driving*). Polega ona przede wszystkim na płynnym stylu jazdy (unikanie gwałtownych przyspieszeń i hamowań) i jeździe na niskich obrotach silnika. Prowadzenie pojazdów w sposób przyjazny dla środowiska ma przede wszystkim na celu zmniejszenie tych emisji, które są zależne od sposobu jazdy, głównie CO₂ i hałasu oraz niższe zużycie paliwa. Powszechnie stosowanym systemem ITS jest automatyczne egzekwowanie prędkości za pomocą fotoradarów i znaków o zmiennej treści. Szczególną skutecznością odznacza się opisywana już wcześniej odcinkowa kontrola prędkości (ang. *Section Control*), gdyż oprócz egzekwowania przepisowej prędkości zapewnia bardziej jednostajny styl jazdy. Odcinkowa kontrola prędkości jest jednak możliwa tylko na fragmentach dróg pozbawionych zjazdów, dlatego w warunkach miejskich z uwagi na mnogość skrzyżowań można stosować kaskadową kontrolę fotoradarową. Oprócz tego w niektórych pojazdach jest już wprowadzane inteligentne dostosowanie prędkości. Dzięki temu urządzeniu, które bazuje na mapach z naniesionymi wartościami prędkości dopuszczalnej, pojazd sam zapobiega łamaniu ograniczeń prędkości przez kierowcę.

5.2. Zmniejszenie hałasu w strefie emisji

Z punktu widzenia ochrony przed hałasem największe znaczenie i najpowszechniejsze zastosowanie mają:

- zarządzanie natężeniem ruchu i strukturą rodzajową ruchu,
- zarządzanie dostępnością dróg,
- kontrola prędkości.

Każdy ruch pojazdów silnikowych generuje hałas. Zarządzanie natężeniem ruchu przyszłości (obecnie w praktyce pojawiają się pierwsze praktyczne próby głównie dotyczące zanieczyszczeń powietrza) za pomocą znaków o zmiennej treści umożliwia zmniejszenie obciążenia ruchem odcinków dróg wymagających ochrony przed hałasem poprzez przekierowanie części pojazdów na trasy alternatywne. ITS umożliwiają zarządzanie natężeniem ruchu w sposób dynamiczny i przekierowanie ruchu na mniej obciążone odcinki dróg i trasy, na których ruch pojazdów powoduje mniejsze szkody środowiskowe. Uruchamianie objazdów i tymczasowe wyłączanie pasów ruchu może mieć miejsce w zależności od natężenia ruchu, pory dnia i roku, a także w określone dni. Aby lepiej przygotować na to kierowców ostrzeżenia może przekazywać system informacji o ruchu drogowym. Równie skutecznym rozwiązaniem może być zastosowanie systemu pomiarowego zamontowanego na elewacji budynku i w przypadku znacznego wpływu hałasu na obiekt wyświetlanie stosownych komunikatów – przykład takiego rozwiązania przedstawiono na rys. 5.8.



Oznaczenia:

- 1 – system pomiarowy hałasu
- 2 – tablica zmiennej treści (VMS) wyświetlająca odpowiedni komunikat o ograniczeniu prędkości ze względu na zbyt duży poziom hałasu
- 3 – nawierzchnia drogowa redukująca hałas
- 4 – ekrany akustyczne z zasilaniem fotowoltaicznym

Rys. 5.8. Przykładowy system ITS wspomagający ograniczenie poziomu hałasu w pobliżu budynku mieszkalnego

Źródło: [207]

Równie ważną rolę w zakresie ochrony przed hałasem może spełniać elektroniczny pobór opłat, który poprzez zmniejszenie liczby pojazdów oddziałuje korzystnie na emisję hałasu i klimat akustyczny w otoczeniu dróg. Z ekonomicznego punktu widzenia największe emocje wzbudza obecnie pobór opłat za wjazd do centrów miast, przejazd autostradami, tunelami i obiektami mostowymi. Jednak z punktu widzenia ochrony przed hałasem bardziej istotne są pobierane elektronicznie opłaty za przejazd przez obszary środowiskowo cenne oraz opłaty za wjazd i parkowanie w centrach miast i obszarach tradycyjnie zatłoczonych. Korzystne kształtowanie klimatu akustycznego za pomocą ITS jest również możliwe poprzez dynamiczne zarządzanie opłatami: różnicowanie wysokości opłat ze względu na kategorię pojazdu, określone dni, pory dnia czy pory roku. Zarządzanie dostępnością dróg i zakazy poruszania się określonych kategorii pojazdów dotyczą przede wszystkim pojazdów szczególnie hałaśliwych, które wywierają najbardziej niekorzystny wpływ na klimat akustyczny: ciężarówek i motocykli. Również zarządzanie dostępnością odbywa się w sposób dynamiczny i można je uzależnić od zmiennych, takich jak określony dzień, pora dnia lub roku.

W ten sposób można np. wprowadzić zakaz ruchu pojazdów ciężarowych na odcinku drogi w pobliżu dzielnicy mieszkaniowej w nocy. Redukcja hałasu dla tego rodzaju rozwiązań w zależy od przyjętej strategii sterowania ruchem i szacuje się, że może ona wahać się 2–9 dB (głównie skrzyżowania).

Uspokojenie ruchu drogowego

Rozwiązanie to w praktyce można zakwalifikować do grupy rozwiązań należących do organizacji ruchu. W większości przypadków rozwiązanie to wymaga poza zastosowaniem rozwiązań organizacji ruchu niekiedy również wprowadzenia systemów ITS. Z uwagi jednak na szczególną rolę jaką rozwiązania te mogą odegrać w obszarach miejskich w zakresie ochrony przed hałasem drogowym wydzielono jako osobne rozwiązanie. Zgodnie z zasadami uspokojenia ruchu przestrzeń publiczna powinna funkcjonować jako harmonijna całość, zaspokajając potrzeby mieszkańców oraz interes publiczny a także równoważyć cele rozwojowe wynikające między innymi z wymagań [25]:

- bezpieczeństwa ruchu drogowego,
- ładu przestrzennego, w tym urbanistyki i architektury,
- związanych z walorami architektonicznymi i krajobrazowymi,
- ochrony środowiska,
- ochrony zabytków oraz dóbr kultury,
- ochrony zdrowia, bezpieczeństwa osób i mienia,
- w zakresie zaspokojenia szczególnych potrzeb osób niepełnosprawnych i starszych,
- związanych z walorami ekonomicznymi przestrzeni.

Stan ten osiągany jest zarówno przez odpowiednie planowanie przestrzenne, metody i środki fizyczne uspokojenia ruchu jak i odpowiednie ukształtowanie otoczenia drogi.

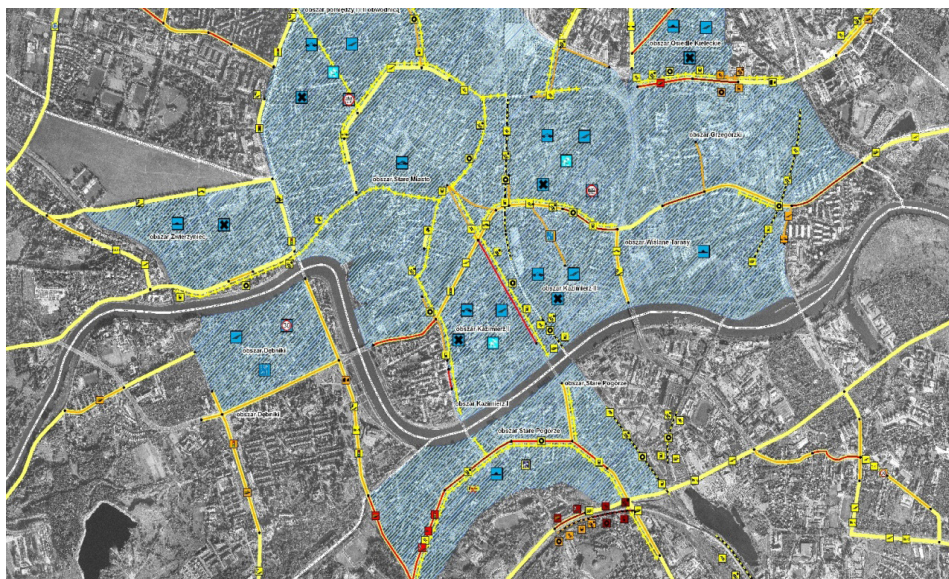
5.2. Zmniejszenie hałasu w strefie emisji

Twórcami i prekursorami uspokojenia ruchu są Holendrzy, którzy konsekwentnie przekształcają swoją sieć drogową nie tylko w zakresie rozbudowy autostrad, ale i tworzenia nowego ładu przestrzennego w miastach. Przykład przebiegu drogi krajowej w Holandii w centrum miejscowości, gdzie zastosowano uspokojenie ruchu i ograniczenie prędkości do 30 km/h przedstawiono na rys. 5.9.



Rys. 5.9. Przykład uspokojenia ruchu przy przejściu drogi krajowej przez małą miejscowość w Holandii
Źródło: opracowanie własne

W tego rodzaju rozwiązaniach mieszczą się praktycznie wszystkie dotychczas opisywane rozwiązania poczynwszy od właściwego planowania przestrzennego do zastosowania systemów ITS, ponieważ jedną z głównych cech uspokojenia ruchu jest działanie na większych obszarach lub wybranych ciągach dróg. Rozwiązania te powinny być stosowane powszechnie w programach ochrony środowiska przed hałasem ze względu na to, że dotyczą one większych obszarów lub ciągów dróg oraz pozwalają na przyjęcie krótko- i długoterminowych strategii zmian realizowanych w ciągu wielu lat. Przekształcenia większych obszarów wymagają współpracy wielu specjalistów i mogą być z powodzeniem stosowane również w ramach rewitalizacji miast. Wymagają one jednak znacznych środków i akceptacji społecznej (najlepiej w ramach konsultacji społecznych). Przykład możliwości takiego działania przedstawiono na rys. 5.10 dla centrum Krakowa. Program w tym zakresie nie uzyskał akceptacji – ostatecznie realizowany jest bardzo podobny program zorientowany na inne zagadnienia, którego realizacja i tak powinna spowodować zmniejszenie emisji hałasu.



Rys. 5.10. Przykład fragmentu programu ochrony środowiska przed hałasem dla centrum Krakowa z wykorzystaniem metod i środków uspokojenia ruchu

Źródło: opracowanie własne

Przykładem wykorzystania uspokojenia ruchu w Polsce [105] może być zrealizowany pierwszy kompletny projekt uspokojenia ruchu w dzielnicy Włostowice, w Puławach (nazywany także Miasteczkiem Holenderskim w Puławach) w 2009 r. Był to pierwszy projekt w obszarze obejmującym praktycznie całą dzielnicę mieszkaniową. W ramach projektu wykorzystano podstawowe etapy analiz uspokojenia ruchu, czyli:

- funkcjonalną hierarchizację sieci drogowej,
- zarządzanie dostępnością (m.in. wskazanie likwidacji niektórych skrzyżowań),
- strefowanie prędkości (w rzeczywistości polega to na zaprojektowaniu prędkości na każdej ulicy),
- zastosowanie technicznych środków uspokojenia ruchu (wyniesione skrzyżowania, progi z najazdami sinusoidalnymi, pasy rozdzielające jezdnie, zakrzywione przebiegi jezdni, bramy wjazdowe ograniczające prędkość, słupy autobusowe itd.).

Należy zwrócić uwagę, że fizyczne środki uspokojenia ruchu analizowane są dopiero na końcu i stosowane jedynie w miarę potrzeb w przeciwieństwie do powszechnie stosowanych rozwiązań, które związane są z zastosowaniem pojedynczych progów zwalniających (często powodujących jeszcze większe problemy związane z emisją hałasu oraz drgań a nawet bezpieczeństwem ruchu drogowego) – przykłady takie pokazano na rys. 5.11 i 5.12).

5.2. Zmniejszenie hałasu w strefie emisji



Rys. 5.11. Przykład progów zwalniających o różnej wysokości powodujących dodatkową emisję hałasu oraz problemy związane z drganiami

Źródło: opracowanie własne

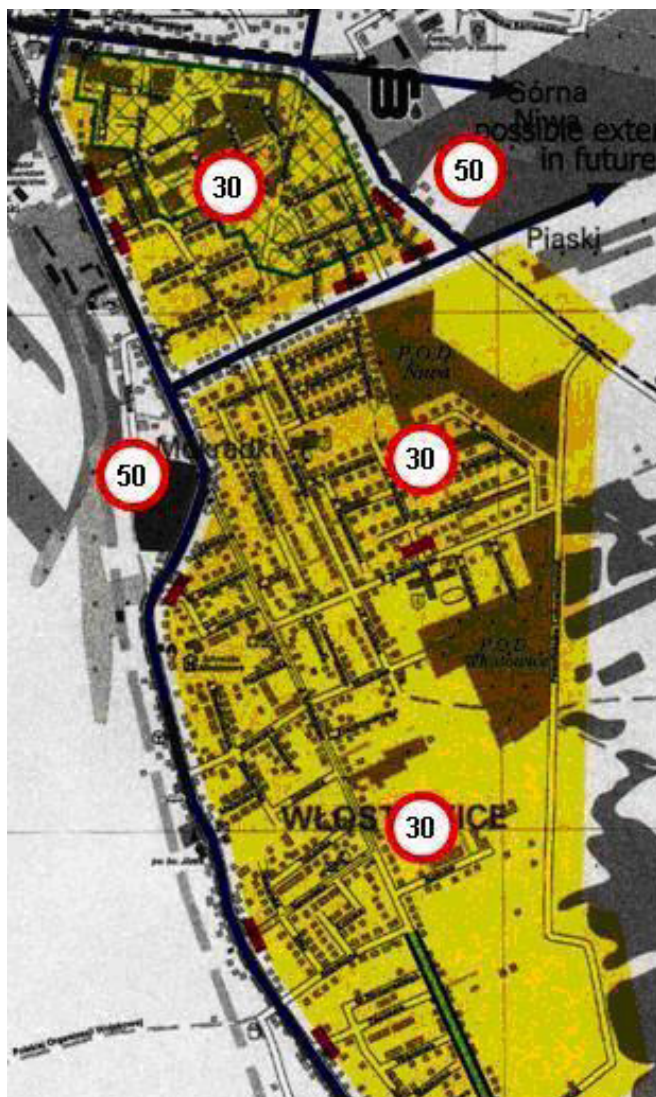


Rys. 5.12. Przykład nieprawidłowego zastosowania progu zwalniającego przed skrzyżowaniem z niewidocznym znakiem pionowym

Źródło: opracowanie własne

5. Ocenia i charakterystyka rozwiązań drogowych ...

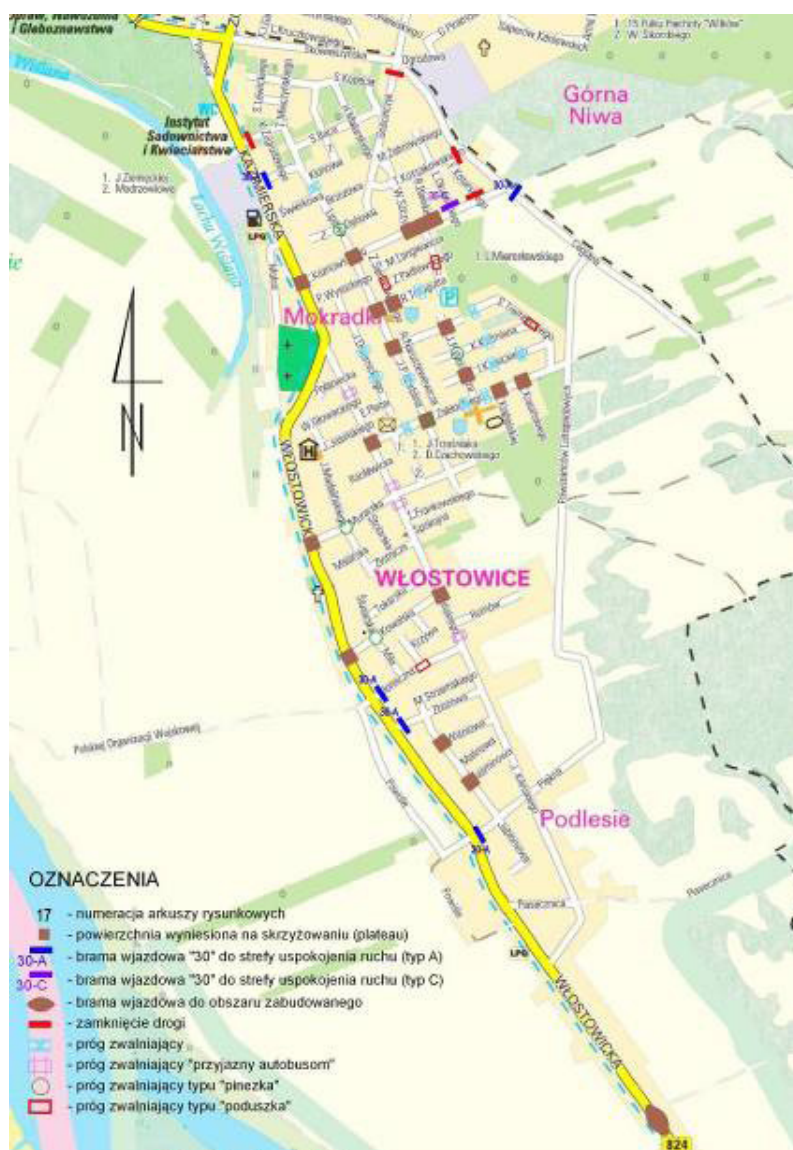
Celem podstawowym projektu w Puławach była poprawa stanu bezpieczeństwa ruchu drogowego na drodze wojewódzkiej oraz w osiedlu mieszkaniowym oraz poprawa ładu przestrzennego. Na rys. 5.13 przedstawiono zakres projektowanych prędkości w osiedlu oraz na drodze wojewódzkiej nr 824 (DW-824) natomiast na rys. 5.14 pokazano lokalizację i rodzaje środków technicznych uspokojenia ruchu.



Rys. 5.13. Zakres uspokojenia ruchu wraz z projektowanymi prędkościami w dzielnicy Włostowice w Puławach oraz na DW-824

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [105]

5.2. Zmniejszenie hałasu w strefie emisji



Rys. 5.14. Środki techniczne uspokojenia ruchu w Miasteczku Holenderskim w Puławach

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [105]

Jak można zauważyć projekt miał charakter kompleksowy a od końca budowy (listopad 2009 r.) nie zanotowano poważniejszych wypadków drogowych w obszarze ruchu uspokojonego [25]. Od 2013 r. prowadzone są przez autora badania związane hałasem drogowym zwłaszcza wzdłuż głównych dróg obszaru (m.in. DW-824) [22, 26, 31]. Wy-

5. Ocenia i charakterystyka rozwiązań drogowych ...

niki potwierdzają założenia związane z zarówno zachowaniami kierowców i stylem jazdy – spokojna jazda z założoną w projekcie prędkością. Pomimo dużych wartości natężeń ruchu (powyżej 15000 pojazdów/dobę) na DW-824 w żadnym z analizowanych miejsc nie stwierdzono przekroczeń dopuszczalnych prędkości oraz wartości dopuszczalnych poziomu hałasu. Jednym z elementów, który nie jest uwzględniany lub jest pomijany w projektach to kształt najazdu i zjazdu z progów i powierzchni wyniesionych. W rozwiązaniach Miasteczka Holenderskiego uzyskana redukcja w strefie ruchu uspokojonego wyniosła od 3 dB do ponad 7 dB (różnica pomiędzy przekrojem przed strefą ruchu uspokojonego i w rejonie jednego z urządzeń uspokojenia ruchu). Uzyskane wyniki uznaje się za bardzo dobre jak dla rozwiązań drogowych, których celem podstawowym jest poprawa stanu bezpieczeństwa ruchu drogowego. Dalsze analizy wskazały również, że żaden z używanych modeli obliczeniowych w opracowaniach środowiskowych (w tym francuski model obliczeniowy NMPB Routes-96) nie dał wiarygodnych wyników obliczeń. Każdy wynik obliczeń w stosunku do wyników pomiarów był zawyżony nawet o 7 dB. Na wynik ten na pewno wpływa styl jazdy oraz same rozwiązania, jak np. najazdy i zjazdy w ramach progów zwalniających i powierzchni wyniesionych, które mają kształt sinusoidalny na długości co najmniej 3 m (w większości przypadków stosuje się je jako krótkie najazdy i zjazdy o trójkątnym lub trapezowym kształcie) – rys. 5.15.



Rys. 5.15. Typowy najazd i zjazd stosowany w przypadku progów oraz powierzchni wyniesionych w Miasteczku Holenderskim w Puławach

Źródło: opracowanie własne

5.2. Zmniejszenie hałasu w strefie emisji

W przypadku osiedla istotnym elementem jest ograniczenie prędkości do 30 km/h, ustanowienie wszystkich skrzyżowań jako równorzędnych (świadome wymuszenie uwagi kierowców) oraz ograniczenie ruchu ciężkiego do 2,5 tony z wykorzystaniem charakterystycznych bram wjazdowych do strefy zamieszkania – rys. 5.16.



Rys. 5.16. Wjazd do strefy mieszkaniowej 30 km/h w Miasteczku Holenderskim w Puławach

Źródło: opracowanie własne

W przypadku prawidłowo zastosowanych rozwiązań uspokojenia ruchu można przyjąć, że przeciętna wartość redukcji hałasu wynosi 3–7 dB i więcej przypadku lokalnych problemów z hałasem drogowym.

Ograniczenie hałasu wzdłuż dróg – ekrany akustyczne, zabudowa osłaniająca, zielen

Rozwiązanie to wiąże się z dodatkowymi działaniami inwestycyjnymi i zajęciem terenu oraz wyjściem poza bezpośrednią strefę emisji. Z uwagi na to, że rozwiązania te w większości przypadków zlokalizowane są w bezpośrednim sąsiedztwie drogi i ich celem jest ograniczenie poziomu hałasu „u źródła” zostały one uznane jako rozwiązania zmniejszające hałas w strefie emisji. Urządzenia te pomimo podobnego sposobu działania charakteryzują się różnymi stopniami redukcji hałasu drogowego [253].

Ekran akustyczny

Jest to obecnie najpopularniejsze i dotychczas najpowszechniej stosowane rozwiązanie ochrony przed hałasem na polskich drogach. Rozwiązanie to zaczęto stosować w Polsce na masową skalę w połowie lat dziewięćdziesiątych XX w. W 2013 r. tylko przy samych drogach krajowych było wybudowanych 1009 km ekranów akustycznych, o średniej wysokości 4,1 km, powierzchni 4,14 km² i szacowanym koszcie około 2,9 mld zł [40]. Blisko 50% długości tych ekranów zostało zbudowanych w tej samej technologii (ekran pochłaniający w charakterystycznym zielonym kolorze). Stworzyło to swoistą monokulturę w przestrzeni polskich dróg powodując przy okazji niebezpieczny efekt monotonii drogowej [60] oraz ograniczenia widoczności w pobliżu skrzyżowań i wjazdów oraz zakłócenia widokowe w krajobrazie. Zastosowanie ekranów akustycznych na tak dużą skalę było również skutkiem kontroli zasadności ich stosowania [258].

Rozwiązanie to jednak dobrze zastosowane i spełniające określone zasady jest jednak urządzeniem w niektórych przypadkach jedynym możliwym do zastosowania – zwłaszcza przy niewielkiej ilości miejsca i zabudowie chronionej zlokalizowanej w niewielkiej odległości od drogi. Zagadnienie stosowania ekranów akustycznych z punktu widzenia akustyki zostało opisane bardzo szczegółowo w [1, 19, 20, 51, 53, 103, 112, 126, 127, 128, 170, 198, 227, 228].

Do podstawowych zasad jakie powinny być uwzględnione w stosowaniu ekranów akustycznych należą [1, 19, 20, 179, 207, 223, 226, 252]:

- **Efektywność akustyczna** – maksymalna redukcja hałasu prawidłowo zastosowanego ekranu akustycznego może wynosić 15 dB a w przypadku kombinacji wału ziemnego i ekranu akustycznego do 25 dB. Możliwość stosowania wału ziemnego jest jednak często bardzo ograniczona ze względu na konieczność pozyskania dodatkowego terenu. W rzeczywistości skuteczność ekranów akustycznych jest mniejsza ze względu na szereg zjawisk (ugięcie fali dźwiękowej na krawędzi ekranu, geometrię ekranu, przerwy ze względu na wjazdy do posesji [250] itp.) – w wielu przypadkach można uzyskać bardzo niewielką redukcję hałasu. Do podstawowych błędów w przypadku braku efektywności ekranów akustycznych można zaliczyć: niewłaściwą geometrię ekranu (długość, wysokość), otwory (przerwania) na wjazdy, przejścia, chodniki powodujące brak ciągłości ekranu, niewłaściwą lokalizację (np. zbyt dalekie odsunięcie od drogi). Z efektywnością akustyczną wiąże się bezpośrednio możliwość ograniczenia wpływu hałasu drogowego na zdrowie ludzi. Czynniki te jako jeden z podstawowych powinien być uwzględniany w analizach programów ochrony środowiska przed hałasem i innych opracowaniach środowiskowych. Efektywność akustyczna zastosowanych ekranów akustycznych podlega wielu zasadom projektowania [42, 100, 247] oraz badaniom in-situ po wybudowaniu [97, 159] najczęściej podczas wykonywania analiz porealizacyjnych lub przeglądów ekologicznych.

- **Efektywność ekonomiczna** – czynnik związany z kosztami rozwiązania, który jest zbyt rzadko lub w ogóle nie jest rozpatrywany w decyzjach o zastosowaniu ekranów akustycznych. Często dochodzi do sytuacji, kiedy ekran (budowa i jego utrzymanie) są o wiele droższe niż pojedyncza chroniona posesja. Urządzenia te są stosunkowo drogie w budowie oraz eksploatacji co jest ich wadą [80, 200]. Efekt ten opisano w kolejnych rozdziałach.
- **Względy konstrukcyjne i materiałowe** – w większości przypadków ekran akustyczny jest uznawany jako konstrukcja inżynierska, która powinna spełniać szereg wymogów formalnych dla tego typu urządzeń (posadowienie, obciążenia, odpowiednie przekroje i użycie materiałów itd.) [140]. Z uwagi na bardzo gwałtowny rozwój pojazdów elektrycznych oraz zagadnień pozyskiwania energii niezwykle ważne staje się takie projektowanie ekranów akustycznych, które umożliwią montaż urządzeń fotowoltaicznych lub będą z nimi bezpośrednio zintegrowane [86].
- **Trwałość techniczna i akustyczna.** Dobór ekranów akustycznych w zależności od warunków w jakich będą eksploatowane jest czynnością niezwykle ważną. Od niej będą zależały dalsze koszty eksploatacji, częstotliwość zabiegów utrzymaniowych, remontów, wymian itd. Szybkie niszczenie będzie także powodowało ograniczenie trwałości akustycznej (zdolności do utrzymania parametrów akustycznych w czasie). Ekran akustyczny zlokalizowany w bezpośrednim sąsiedztwie drogi jest narażony na szereg czynników powodujących jego przyspieszoną destrukcję – działanie wody z substancjami do zimowego utrzymania dróg, spaliny oraz uszkodzenia mechaniczne. Trwałość techniczna zależna jest również od materiałów stosowanych w budowie ekranów akustycznych [111].
- **Koordinacja z innymi urządzeniami wyposażenia dróg.** Ekran jako urządzenie wymagające w większości przypadków posadowienia na fundamencie (najczęściej pale) nie może kolidować z urządzeniami uzbrojenia podziemnego. Z kolei część naziemna nie może kolidować z elementami wyposażenia dróg jakim jest oznakowanie pionowe. Częste błędy tego rodzaju występują w przypadku braku koordynacji pomiędzy zespołami projektowymi podczas przygotowywania projektów branżowych.
- **Bezpieczeństwo ruchu i użytkowników.** Ekran akustyczny (w postaci jednolitej ściany) jako urządzenie zlokalizowane często w pobliżu skrajni drogowej ze swoją sztywną konstrukcją jest uznawany za rozwiązanie pogarszające warunki bezpieczeństwa ruchu. Stąd w przypadku jego stosowania niezbędne jest wprowadzenie dodatkowych urządzeń ograniczających skutki kolizji i wypadków (bariery, poduszki zderzeniowe itp.). Dodatkowo każdy dłuższy ekran powinien być wyposażony w wyjścia ewakuacyjne skonstruowane w ten sposób, aby wyjście było możliwe tylko od strony drogi. Należy także zwrócić uwagę na sytuację użytkowników (pieszych, rowerzystów), którzy w przypadku stosowania zakładek przy przejściach dla

pieszych i przystankach autobusowych w przypadku złych rozwiązań poruszają się w przestrzeni osłoniętej i zupełnie niewidocznej z innych stron. Może to powodować sytuacje niebezpieczne związane z kradzieżami, rozbojami itp.

- **Przewietrzalność w otoczeniu ekranu.** Podczas projektowania należy zwrócić uwagę na efekt związany z możliwym stagnowaniem zanieczyszczonych mas powietrza w rejonie ekranu.
- **Oświetlenie i doświetlenie otoczenia ekranu.** Miejsca w otoczeniu ekranu akustycznego w przypadku chodników, dróg rowerowych, przystanków autobusowych, przejść dla pieszych powinny być oświetlone, a w miejscach szczególnie niebezpiecznych dodatkowo doświetlone oraz monitorowane.
- **Względy krajobrazowe, estetyczne i kompozycyjne.** W większości przypadków ekrany akustyczne są bardzo rzadko projektowane z uwzględnieniem krajobrazu oraz zasad estetyki. Niebezpieczny efekt monotonii drogowej może zostać przełamany poprzez odpowiedni dobór i świadome projektowanie ekranów nie tylko z użyciem koloru, ale również i formy, zmiany kompozycji oraz materiałów [46, 88, 95, 96].
- **Możliwości budowy, montażu.** Budowa ekranów akustycznych w przypadku nowych dróg jest zadaniem stosunkowo prostym. Inna sytuacja występuje w przypadku dobudowy ekranów do istniejących dróg. Wiąże się to z pełnym lub częściowym wyłączeniem odcinków dróg z eksploatacji i dużymi utrudnieniami dla kierowców. W niektórych sytuacjach budowa ekranów akustycznych niezależnie czy droga jest nowobudowana czy istniejąca mogą wystąpić istotne problemy związane się również z zagadnieniami konstrukcyjnymi i utrzymaniowymi [149].
- **Eksplotacja i utrzymanie.** Eksploatacja i utrzymanie ekranów akustycznych powinny być analizowane już na etapie projektowania. Od tych analiz będzie zależała w dużym stopniu trwałość techniczna i akustyczna oraz koszty utrzymania. W ramach projektowania należy również uwzględnić problemy konserwacji, wymiany niektórych elementów oraz problemy związane z zatrzymaniami ruchu podczas koniecznych napraw i zabiegów utrzymaniowych.
- **Akceptacja społeczna.** W wielu przypadkach można zauważyć, że ekrany akustyczne mogą powodować skrajne emocje (za i przeciwko ekranom akustycznym) wśród mieszkańców oraz przedsiębiorców [102]. W praktyce każda decyzja o budowie ekranów akustycznych powinna być poprzedzona konsultacjami społecznymi. W niektórych przypadkach wskazane jest przygotowanie rozwiązań wariantowych zabezpieczeń oraz przygotowanie informacji dla ludności o skutkach wpływu hałasu na zdrowie. Obecny stan prawny uniemożliwia w przypadku wydanej decyzji środowiskowej zamianę ekranów akustycznych na inne rozwiązania – dlatego tym bardziej decyzja o zastosowaniu ekranów akustycznych musi być decyzją poprzedzoną analizami związanymi z powyższymi zasadami.

Zabudowa osłaniająca

Jednym z najskuteczniejszych rozwiązań jest zabudowa osłaniająca, która nie jest przeznaczona do czasowego lub stałego przebywania ludzi. Najczęściej są to różnego rodzaju obiekty takie jak: garaże, obiekty handlowe i usługowe o podwyższonej izolacyjności ścian i osłon [179, 223, 250]. Przykłady takich obiektów pokazano na rys. 5.17 i rys. 5.18.



Rys. 5.17. Przykład zabudowy osłaniającej osiedle mieszkaniowe w Holandii – garaże z dodatkowym wałem ziemnym i ograniczeniem prędkości

Źródło: opracowanie własne



Rys. 5.18. Przykład zabudowy osłaniającej osiedle mieszkaniowe w Krakowie

Źródło: opracowanie własne

Redukcja hałasu w przypadku takich rozwiązań może osiągać ponad 20 dB. Rozwiązanie to związane jest również ze strefowaniem zabudowy, gdzie po zabudowie osłaniającej można zastosować jeszcze dodatkowe obiekty o charakterze np. usługowym i dopiero zabudowę mieszkalną.

Zieleń – pasy zieleni izolacyjnej

Rozwiązanie to jest często zalecane w opracowaniach środowiskowych pomimo jego niewielkiej skuteczności związanej z redukcją hałasu. Wartość redukcji hałasu w większości przypadków zastosowania zieleni wynosi 0,5–5 dB [15, 51, 170, 253]. Najprostszy sposób określania redukcji związany jest z szerokością pasa zieleni, gdzie spadek hałasu wynosi około 0.5 dB na 1 m szerokości gęstej zieleni (żywoplotu) – nie więcej jednak niż 5 dB [170]. Lepsze w tłumieniu hałasu są krzewy i drzewa iglaste (mniej odporne na działanie spalin) niż liściaste.

Pasy zieleni pełnią jednocześnie rolę filtra chroniącego przed niektórymi zanieczyszczeniami powietrznymi oraz pyłem pochodzącym z dróg w wyniku m.in. zjawiska fito-remediacji oraz inne funkcje [78, 162, 163, 206].

Nawierzchnie drogowe

Stan i rodzaj nawierzchni to jeden z czynników mających znaczący wpływ na kształtowanie emisji hałasu drogowego. Przejeżdżający samochód jest źródłem generującym hałas, który można podzielić na dwie grupy elementarnych źródeł składowych [35]:

- źródła główne – hałas pracującego silnika i zespołu napędowego, hałas tocących się kół po nawierzchni drogi,
- źródła poboczne – hałas aerodynamiczny powstający ze względu na zawirowania powietrza wokół pojazdu w trakcie jego ruchu, hałas luźno zamocowanych elementów pojazdu oraz ładunku (głównie pojazdy ciężarowe).

Największe znaczenie na kształtowanie hałasu w otoczeniu drogi (emisję mają źródła główne). Hałas generowany przez tą grupę źródeł rośnie wraz z prędkością. Przyjmuje się, że do około 50 km/h dominującym jest hałas pochodzący głównie od silnika pojazdu natomiast powyżej tej prędkości dominuje hałas toczenia kół po nawierzchni drogowej [12, 112, 144, 205] – w niektórych badaniach i rodzajach nawierzchni efekt redukcji obserwowany jest również przy niższych prędkościach [70, 125]. Ten rodzaj hałasu jest związany z dwoma grupami zjawisk [49, 202]: mechanicznymi (drgania opony i jej elementów) oraz aerodynamicznymi (związane z dynamiką ośrodka gazowego w obszarze styku opony z nawierzchnią). Zjawiska te a zwłaszcza mechaniczne są silnie związane z prędkością pojazdu – dokładniejszy opis tych zjawisk podano w [35].

Działania w zakresie stanu i rodzaju nawierzchni z punktu widzenia ochrony przed hałasem w ostatnich latach nabierają coraz większego znaczenia i zaczynają one stanowić alternatywę dla ekranów akustycznych. Rozwiązanie polegające na stosowaniu nawierzchni redukujących hałas jest również stosowane w ochronie nie tylko ludzi, ale i ptaków (z uwagi na dużą śmiertelność ptaków w zderzeniach z ekranami akustycznymi – zwłaszcza przezroczystymi). Stosowanie nowych rodzajów nawierzchni jest coraz powszechniejsze w różnych krajach [45, 108, 122, 124, 125, 174, 179, 207, 245] – również w Polsce podejmowanych jest wiele badań i prób zastosowania różnych rodzajów nawierzchni [35, 67, 109, 110, 172, 173, 215]. Nawierzchnie drogowe pełnią szczególną rolę w ruchu drogowym i muszą być projektowane w taki sposób, aby spełniały przede wszystkim wymagania bezpieczeństwa i komfortu użytkowników.

W związku z tym powinny one charakteryzować się odpowiednią przyczepnością, równością oraz powinny zapewniać skuteczne odprowadzanie wody z powierzchni jezdni. Ponadto nawierzchnie te mogą pełnić bardzo znaczącą rolę w redukcji hałasu w strefie emisji pod warunkiem zachowania wymienionych powyżej cech.

Nawierzchnie mające cechy redukujące hałas drogowych (popularnie nazywane również cichymi nawierzchniami) można podzielić na dwie zasadnicze grupy [35]:

- otwarte (porowate),
- zamknięte (o zamkniętej strukturze).

5. Ocenia i charakterystyka rozwiązań drogowych ...

Powyższy podział dotyczy głównie nawierzchni bitumicznych jednakże nawierzchnie betonowe można zakwalifikować w tym przypadku do nawierzchni o zamkniętej strukturze (przy zastosowaniu różnych metod wykończenia powierzchni [220, 221]).

Za nawierzchnie porowate uważa się takie, w których zawartość wolnych przestrzeni (porów) w warstwie ścieralnej jest większa od 15%. Dzięki tej własności, powietrze na styku opony i jezdni zostaje „wciskane” wewnątrz warstwy ścieralnej, co powoduje redukcję hałasu toczenia nawet o 6.5 dB w przypadku samochodów osobowych oraz o około 4.5 dB w przypadku samochodów ciężarowych [213]. Mechanizm redukcji hałasu przez te nawierzchnie polega także na pochłanianiu części hałasu pochodzącego od korpusu przejeżdżającego samochodu [202]. Dzięki swojej charakterystycznej konstrukcji umożliwiają one także skuteczne odprowadzanie wody do wnętrza nawierzchni, a następnie pod nią, na pobocze drogi. W przypadku tych nawierzchni spadki poprzeczne jezdni powinny wynosić 2,5%. Na krawędziach jezdni należy zapewnić swobodny spływ wód opadowych.

Konstrukcje nawierzchni porowatych nie są w Polsce powszechnie stosowane i wraz z coraz większą liczbą informacji z nimi związanych [192] przewiduje się, że mogą nie być wykorzystywane tak jak w krajach o łagodniejszym klimacie (np. Holandia, Włochy). Wiąże się to z problematycznym utrzymaniem w okresie zimy (brak możliwości stosowania typowych mieszanek do posypywania dróg) oraz efektem utraty właściwości redukowania pochłaniania dźwięku już po kilku latach ich użytkowania (obserwacje autora wskazują, że utrata redukcji hałasu to początkowo nawet 1,5–2,0 dB na rok). Jest to spowodowane zatykaniem wolnych przestrzeni przez zanieczyszczenia generowane przez pojazdy – czyszczenie tych nawierzchni powinno być wykonywane raz na około 2–3 lata co generuje dodatkowe koszty [174]. Proces zaatykania porów przebiega szybciej na drogach o niższych prędkościach ponieważ nie zachodzi zjawisko samooczyszczania – polega ono na wrywaniu zanieczyszczeń z porów przez koła pojazdów poruszających się z dużą prędkością. Dodatkowo nawierzchnie te zużywają się szybciej na skutek niszczenia przez pojazdy ciężkie zwłaszcza w miejscach gdzie występują duże siły ścinające (rejony skrzyżowań, przystanków autobusowych itp.). Ponadto nawierzchnie porowate pod wpływem oblodzenia charakteryzują się zbyt niskimi właściwościami poślizgowymi, co ma wpływ na pogorszenie bezpieczeństwa kierowców i użytkowników dróg [202]. Mogą także występować inne efekty, starzenia nawierzchni porowatych, które są ściśle powiązane z oddziaływaniem ciepła pochodzącego bezpośrednio od promieni słonecznych. W specyficznych zakresach temperatur warstwa wiążąca topi się i może zatkać puste przestrzenie w niższych partiach i pogorszyć tym samym efekt redukcji hałasu [106]. Trwałość tych nawierzchni określana jest na około 10 lat [174] jednak w warunkach krajowych jest ona niższa. W Holandii wytrzymałość konstrukcyjną tego typu nawierzchni określa się jako trzy czwarte wytrzymałości tradycyjnej mieszanki mineralno-asfaltowej [174]. Warstwy ścieralne z asfaltów porowatych charakteryzują się natomiast mniejszą

5.2. Zmniejszenie hałasu w strefie emisji

podatnością na tworzenie kolein. Nawierzchnie wykonane w tej technologii mają także wiele pozytywnych cech dla bezpieczeństwa użytkowników drogi. Na drogach z zastosowanym asfaltem porowatym nie występuje zjawisko aquaplaningu. Dzięki porowatej strukturze woda jest szybko odprowadzana z powierzchni jezdni. Zjawisko to również dobrze wpływa na widoczność podczas opadów deszczu. Przejeżdżające pojazdy nie tworzą za sobą efektu chmury wody, która ogranicza widoczność innym użytkownikom drogi. Asfalty porowate w czasie opadów atmosferycznych mają o wiele lepszą przyczepność niż tradycyjne nawierzchnie asfaltowe [192].

W przypadku suchej nawierzchni przyczepność jest na podobnym poziomie. Należy jednak pamiętać, że warstwa ścieralna wykonana z asfaltów porowatych przez pierwsze miesiące użytkowania ma o wiele gorszą przyczepność niż inne nawierzchnie. Jest to spowodowane lepszem otaczającym kruszywo. Przez ten okres można stosować oznakowanie informujące o niebezpieczeństwie z tym związanym i prowadzić zabiegi neutralizujące negatywne oddziaływanie [174].

Nawierzchnie bitumiczne szczelne, mogą także charakteryzować się właściwościami redukującymi hałas. Udział wolnych przestrzeni w konstrukcjach tego typu jest zdecydowanie mniejszy (nie większy niż około 4%). W przeciwieństwie do nawierzchni porowatych, dużą zaletą tego typu nawierzchni jest ich łatwiejsze utrzymanie. Dodatkowo nawierzchnie szczelne nie tracą wraz z czasem użytkowania tak szybko jak nawierzchnie porowate właściwości redukujących hałas (trwałości akustycznej). Są one także bardziej trwałe i odporne na działanie czynników atmosferycznych. Przykładem nawierzchni szczelnych stosowanych w Polsce mogą być np. nawierzchnie asfaltowe z mastyksu grysoowego np.: SMA 5 lub SMA 8, które charakteryzują się redukcją hałasu toczenia do około 4 dB w porównaniu do nawierzchni typowych SMA 11 [64], przy czym wartości te są uzyskane na podstawie pomiarów wykonywanych metodą statystycznego pomiaru podczas przejazdu określoną w normie [161]. W przypadku równoważnego poziomu dźwięku wartości redukcji hałasu w stosunku do typowej nawierzchni SMA 11 wynoszą maksymalnie 2–3 dB [35] (w analizach prowadzonych od 31.12.2018 r. zgodnie z [48] nawierzchnią referencyjną będzie SMA 11 w wieku 2–7 lat). Należy jednak zwrócić uwagę, że odniesienie wartości redukcji hałasu po przebudowie do stanu przed przebudową nawierzchni może przynosić nawet wartości ponad 7 dB [35].

Właściwości redukujące hałas toczenia można osiągnąć w tych nawierzchniach poprzez zmianę wielkości maksymalnej kruszywa. W tym celu w nawierzchniach bitumicznych stosuje się odpowiedni proces przesiewania ziarna oraz dodatkowo można także zmieniać temperaturę przy ich wykonywaniu. Dzięki tym zabiegom uzyskuje się odpowiednią strukturę powierzchni drogi. Udział hałasu spowodowany oddziaływaniem ziaren stanowiących makrotekturę jest zależny od typów pojazdów [65]. Nawierzchnia zoptymalizowana akustycznie dla lekkich samochodów może powodować większe oddziaływania akustyczne powstające przy przejazdach samochodów ciężarowych. Hałas toczenia powstający na styku nawierzchni i opony można także ograniczyć

5. Ocenia i charakterystyka rozwiązań drogowych ...

poprzez unikanie w makroteksturze nawierzchni dużych nierówności (tzw. *peaks*) [201]. Jeżeli jednak nawierzchnia jest zbyt równa i gładka zredukowany jest przepływ powietrza w miejscu styku nawierzchni z kołami pojazdów, co z kolei prowadzi do wzmocnienia efektu rogu (takie ukształtowanie geometryczne w miejscu wejścia i wyjścia opony ze styku z nawierzchnią, które przypomina kształtem tubę głosową i działa w podobny sposób) i w konsekwencji do zwiększenia hałasu toczenia [35]. Z tego względu, przy projektowaniu nawierzchni bitumicznych szczelnych należy brać pod uwagę obydwa te efekty. W przypadku samochodów ciężkich, bardziej szorstka nawierzchnia może powodować redukcję poziomu hałasu oraz zmniejszać różnice pomiędzy hałaśliwością opon różnego typu. Należy także wspomnieć, że hałas toczenia zwiększa się na nawierzchniach równych i gładkich w przypadku ruchu z poślizgiem w związku z występowaniem efektu „*stick-slip*” (związany z poślizgiem towarzyszącym ruchowi tocznemu koła pojazdu oraz drgania opasania i ścian bocznych opony) [92, 202].

Do nawierzchni szczelnych należą także nawierzchnie betonowe. Cechą charakterystyczną tych nawierzchni jest ich trwałość, którą określa się na min. 20–30 lat. Nawierzchnie te charakteryzują się dużą wytrzymałością na odkształcenia i powstawanie kolein. Argumentem, który może potwierdzić wytrzymałość nawierzchni betonowych jest fakt, że są one stosowane na lotniskach i drogach obciążonych bardzo dużym ruchem [220]. W przypadku nawierzchni betonowych procesy utrzymaniowe są mniej wymagające niż w przypadku technologii asfaltów porowatych. Podstawowymi problemami w przypadku nawierzchni betonowych są: odpowiednie utrzymanie i monitorowanie szczelin (dylatacji) oraz stanu tekstury warstwy ścieralnej. Jednym z istotniejszych parametrów mających wpływ na poziom hałaśliwości nawierzchni betonowych jest tekstura (makrotekstura), którą nadaje się w trakcie ich wykonywania. Wraz z upływem czasu i eksploatacją drogi tekstura ta niszczeje. Powierzchnia staje się przez to śliska i głośniejsza z uwagi na intensyfikację zjawisk aerodynamicznych i mechanicznych opisanych w [202]. Zmiana parametrów szorstkości wpływa także na pogorszenie przyczepności opon samochodowych do powierzchni drogi. W tym celu konstrukcja powinna mieć odpowiednią teksturę. Przez okres eksploatacji tekstura ta ulega niszczeniu (jej poprawa polega na odpowiednim szlifowaniu nawierzchni).

Postęp technologiczny jaki ma obecnie miejsce powoduje, że hałaśliwość niektórych rodzajów nawierzchni betonowych jest bardzo zbliżona do typowych nawierzchni asfaltowych [68] a nawet mniejsza [7]. Dotyczy to nawierzchni betonowych o specjalnych sposobach wykończenia nawierzchni – np. odkryte kruszywo w górnej warstwie dzięki zastosowaniu środków opóźniających hydratację cementu, zastosowanie odpowiedniego teksturowania nawierzchni (ang. *grinding*).

Wielkość redukcji hałasu dla wszystkich rodzajów nawierzchni drogowych w czasie (trwałość akustyczna) jest w dużym stopniu uzależniona od ich utrzymania [35, 66].

Zastosowanie nawierzchni o właściwościach redukujących poziom hałasu oraz często już sama jej wymiana z reguły powoduje poprawę stanu klimatu akustycznego. Redukcja

5.2. Zmniejszenie hałasu w strefie emisji

ta jest jednak różna w zależności od właściwości samej nawierzchni, jak i charakterystyki ruchu czy konstrukcji samochodów.

Istnieje kilka rodzajów klasyfikacji (głośności) nawierzchni drogowych z punktu widzenia hałaśliwości. Najważniejsze krajowe, które mogą być pomocne w ocenie rozwiązań to klasyfikacja Prof. J. Ejsmonta i Prof. W. Gardziejczyka [61, 62, 63, 132] (tabl. 5.9) oraz Prof. D. Sybilskiego [213] (tabl. 5.10).

Tabl. 5.9. Klasyfikacja głośności nawierzchni Prof. J. Ejsmonta i Prof. W. Gardziejczyka

Klasa/symbol	Wartość poziomu dźwięku [dB (A)]		Rodzaje warstw ścieralnych
	$L_i^{1)}$	CPXI (80) ²⁾	
Nawierzchnie ciche NC	<73,0	<93,5	- pojedyncze warstwy porowate o uziarnieniu kruszywa ≤ 10 mm (np. PA8), - podwójne warstwy porowate, - nawierzchnie poroelastyczne.
Nawierzchnie o zredukowanej hałaśliwości ZH	73,0-75,9	93,5-96,4	- SMA i betony asfaltowe o uziarnieniu <10 mm (np. SMA5, SMA8, AC5, AC8), - bardzo cienkie warstwy bitumiczne (dywaniki bitumiczne) o uziarnieniu kruszywa <10 mm (np. BBTM8), - pojedyncze warstwy porowate o uziarnieniu kruszywa >10 mm (np. PA11).
Nawierzchnie o normalnej hałaśliwości NH	76,0-78,9	96,5-99,4	- SMA o uziarnieniu kruszywa 10–16 mm (np. SMA 11), - Bardzo cienkie warstwy bitumiczne o uziarnieniu > 10 mm, - betony asfaltowe o uziarnieniu kruszywa 10–16 mm (np. AC11), - betony cementowe o optymalnym teksturuowaniu z akustycznego punktu widzenia.
Nawierzchnie o podwyższonej hałaśliwości PH	79,0-81,9	99,5-102,4	- powierzchniowe utrwalenia, - uszkorznione nawierzchnie typu SMA, - SMA i betony asfaltowe o uziarnieniu ≥ 16 mm, - klasyczne betony cementowe, - betonowa kostka brukowa przy optymalnych układach połączeń.
Nawierzchnie o nadmiernej hałaśliwości NNH	$\geq 82,0$	$\geq 102,5$	- kostka kamienna, - betonowa kostka brukowa bez optymalizacji połączeń, - betony cementowe poprzecznie rowkowane.

¹⁾ Maksymalny poziom dźwięku A od przejazdu statystycznego pojazdu osobowego z prędkością 80 km/h wg metody SPB

²⁾ Indeks zgodny z metodą CPXI (przejazd z prędkością 80 km/h)

Źródło: [61, 62, 63, 132]

5. Ocenia i charakterystyka rozwiązań drogowych ...

Tabl. 5.10. Klasyfikacja głośności nawierzchni Prof. D. Sybilskiego

Klasa hałasowości nawierzchni	Typy warstwy ścieralnej
Cicha	BA5, BA8
	SMA5, SMA8
	MNU8 (GUFI)
	BAP (COLSOFT)
Normalna	MNU11
	SMA11
	BA11
Główna	BC
	CWZ

Oznaczenia: BA (beton asfaltowy), SMA (mieszanka mastykowo-grysowa), MNU (mieszanka o nieciągłym uziarnieniu), BAP (beton asfaltowy porowaty), CWZ (cienka warstwa na zimno – *slurry seal*), BC (beton cementowy). Cyfry przy symbolach nawierzchni określają maksymalny rozmiar ziaren kruszywa.

Źródło: [213]

Należy zwrócić uwagę, że obie klasyfikacje praktycznie dotyczą głównie dróg zamiejscowych. W przypadku dróg w obszarze zabudowanym należy mieć na uwadze, że na dużej części ulic prędkość dopuszczalna nie powinna przekraczać 50 km/h w dzień i 60 km/h w nocy. Efekt redukcji hałasu może mieć zatem mniejsze wartości – chyba, że wykorzystywane są większe prędkości dla ulic stanowiących układ podstawowy ulic z zadaniami przeprowadzenia ruchu tranzytowego (ulice wyższych klas technicznych). Badania hałasowości nawierzchni w większości przypadków potwierdzają powyższe klasyfikacje [132].

W związku z rosnącą liczbą pojazdów hybrydowych i elektrycznych oraz ciągłą wymianą potoku pojazdów na nowsze problem i rozwiązania związane z ochroną przed hałasem drogowym będą dotyczyły przede wszystkim nawierzchni drogowych. Ich rozwój zależy od wielu czynników związanych m.in. z możliwością ich stosowania, warunkami atmosferycznymi, możliwościami utrzymania i ich trwałością techniczną, trwałością akustyczną [171, 203, 222].

W tabl. 5.11 zestawiono rozwiązania drogowe i środki zabezpieczające przed hałasem drogowym wraz z określeniem stopnia wpływu na uwarunkowania ekonomiczne, społeczne, środowiskowe i techniczne. W wielu przypadkach opisywanych powyżej rozwiązań ich zalety i wady są podobne do rozwiązań stosowanych w etapie pierwszym, czyli kiedy jest zalecane unikanie emisji hałasu.

5.2. Zmniejszenie hałasu w strefie emisji

Tabl. 5.11. Rozwiązania drogowe i środki zabezpieczające przed hałasem drogowym wraz ze stopniem ich wpływu na wybrane uwarunkowania w zakresie zmniejszania emisji hałasu w strefie emisji

Uwarunkowania	Przebudowa wysokościowa dróg	Optymalizacja efektywności komunikacji	Planowanie i zarządzanie parkingami	Organizacja ruchu – spowolnienie i ukierunkowanie ruchu	Systemy zarządzania i kierowania ruchem	Uspokojenie ruchu drogowego	Ograniczenie hałasu wzdłuż dróg			Nawierzchnie drogowe
							Ekran akustyczne	Zabudowa o ślaniająca	Zielen	
Ekonomiczne										
Koszty budowy/zastosowania	5-7	3-7	3-7	3-7	5-9	5-7	5-7	5-7	5-7	5-7
Koszty utrzymania i remontów	3-7	3-7	3-7	3-5	5-7	5-7	5-7	1-5	5-7	5-7
Społeczne										
Preferencje akceptacja społeczna	3-5	5-7	1-5	3-7	3-7	5-7	3-7	5-9	7-9	5-7
Przestrzeń publiczna	3-5	3-5	5-7	5-7	5-7	5-9	5-9	5-7	5-9	1-3
Warunki poruszania się niepełnosprawnych	3-7	3-7	5-7	5-7	3-7	5-9	5-9	3-7	3-5	3-5
Środowiskowe										
Zanieczyszczenia powietrza	3-5	5-7	5-7	5-7	5-7	3-7	5-7	3-7	5-9	1-5
Wibracje i drgania	1-5	1-5	1-5	1-5	1-3	3-7	1-3	1-3	1	3-7
Rośliny i zwierzęta	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3	5-7	1-3	1-5	1-3
Wody	3-7	1-3	1-3	1-3	1-3	3-7	1-3	1-3	1	1-5
Zmiany krajobrazu i estetyka	3-7	1-3	5-7	3-7	3-7	5-9	5-9	2-7	5-9	1-3
Dobra materialne	3-5	1-3	1-3	1-3	1-3	3-7	3-7	3-5	1-3	1-9
Dobra kultury	3-5	1-3	1-3	1-3	1-3	3-7	3-7	3-5	1-3	1-3
Kumulacja oddziaływań	3-5	3-5	3-7	3-7	3-7	3-7	3-7	3-7	1-5	1-5
Techniczne										
Redukcja hałasu	3-7 (do 15 dB)	3-5 (do 3 dB)	3-5 (do 3 dB)	1-7 (0,5-9 dB)	3-7 (2-9 dB)	3-7 (3-7 dB)	3-7 (do 15 dB)	5-9 ponad 20 dB	3-5 (do 5 dB)	3-7 (2-9 dB)
Bezpieczeństwo ruchu drogowego	3-5	3-5	3-5	5-7	5-9	5-7	5-9	3-5	1-5	5-7
Trwałość techniczna	3-5	3-5	3-7	3-7	3-7	5-7	5-9	5-7	1-5	5-7
Trwałość akustyczna	5-9	3-5	3-7	5-7	3-7	5-7	3-7	5-7	3-7	5-7
Przepustowość i warunki ruchu	3-7	5-7	5-7	3-7	5-9	5-7	1-5	1-3	1-3	1-5
Względy konstrukcyjne, technologiczne i materiałowe	5-7	1-3	5-7	3-5	3-5	5-7	5-7	5-7	1-5	5-7
Warunki budowy i montażu	5-7	3-5	5-7	3-5	3-7	3-7	5-9	5-7	3-5	5-7
Warunki użytkowania i utrzymania	5-7	5-7	5-7	5-7	5-7	5-7	5-9	1-5	5-9	5-7

¹⁾ Oznaczenia dla stopnia wpływu rozwiązania:

1 – obojętny (brak wpływu), 3 – mały (niewielki), 5 – duży, 7 – bardzo duży, 9 – całkowity.

Źródło: opracowanie własne

Zalety:

- Uzyskanie trwałych efektów związanych nie tylko z ograniczeniem poziomu hałasu, ale również innych uciążliwości w przypadku przebudów dróg, uspokojenia ruchu oraz budowy obiektów niemieszkalnych w bezpośrednim otoczeniu drogi. W ramach przebudowy powinien być w założeniach do takiego projektu określony prognozowany efekt redukcji hałasu.
- Możliwość tworzenia obszarów ciszy w przypadku większych przebudów oraz uspokojenia ruchu w większych obszarach.
- Podniesienie rangi, popularności i atrakcyjności komunikacji zbiorowej.
- Uzyskanie płynności ruchu po zastosowaniu systemów ITS oraz zmianach organizacji ruchu, która znacząco wpływa na redukcję hałasu.
- Uporządkowanie problemów parkingowych. Redukcja hałasu nastąpi tylko w sytuacjach, kiedy nastąpi koncentracja parkowania na wyznaczonych parkingach (np. *Park and Ride*) przy jednoczesnym ograniczeniu poruszania się pojazdów w określonym obszarze w związku z poszukiwaniem miejsc parkingowych.
- Podporządkowanie przestrzeni publicznej pieszym, osobom niepełnosprawnym poruszającym się na wózkach, rowerzystom i innym użytkownikom korzystających z innych form poruszania się w określonych ciągach ulic przy przebudowach oraz w większych obszarach po zastosowaniu uspokojenia ruchu.
- Zmiany w sposobie poruszania się wpływające na poprawę kondycji i stanu zdrowia ludzi.
- Możliwość tworzenia nowej jakości przestrzeni publicznej w określonych ciągach drogowych lub obszarach (dotyczy uspokojenia ruchu).
- Poprawa jakości krajobrazu (sytuacja ta nie dotyczy zastosowania ekranów akustycznych, które nie są projektowane przy uwzględnieniu efektów krajobrazowych i estetycznych).
- Separacja różnych użytkowników i poprawa bezpieczeństwa ruchu drogowego zwłaszcza w obszarach uspokojenia ruchu.
- Poprawa stanu nawierzchni nie tylko z uwagi na oddziaływania akustyczne.
- Łatwiejsze określenie możliwej redukcji hałasu niż w przypadku etapu unikania emisji hałasu.

Wady:

- Krótkotrwałe uciążliwości związane z przebudowami arterii, realizacją urządzeń ITS.
- Wysokie koszty przebudów, parkingów (np. podziemnych) zwłaszcza w terenach o dużej intensywności zamieszkania.
- Wysokie koszty urządzeń i instalacji związanych z systemami zarządzania ruchem.
- Pogorszenie stanu klimatu akustycznego obszaru w przypadku nieprzemyślanych rozwiązań – niedostosowanych do celów redukcji hałasu.
- Początkowa niechęć mieszkańców oraz użytkowników komercyjnych terenu (sklepy, restauracje itp.).

5.3. Przeniesienie hałasu ze strefy emisji

Przeniesienie hałasu ze strefy emisji należy do jednych ze skuteczniejszych sposobów ochrony przed hałasem. Opiera się ono głównie na zjawisku znacznego ograniczenia lub eliminacji ruchu drogowego z istniejących dróg. Należy zwrócić uwagę, że tego rodzaju rozwiązania stosowane są dopiero wtedy, kiedy nie jest możliwe uzyskanie pożądaných efektów przy wykorzystaniu dwóch wcześniejszych grup środków (etapów), tj. unikania emisji i zmniejszenia hałasu w strefie emisji. W przypadku wcześniejszego etapu zmniejszenia hałasu w strefie emisji zbliżonym rozwiązaniem do opisywanego w tym rozdziale jest organizacja ruchu – spowolnienie i głównie ukierunkowanie ruchu.

Przeniesienie hałasu ze strefy emisji dotyczy zarówno działań inwestycyjnych związanych z budową lub dobudową nowych połączeń lub ich fragmentów oraz zmianami w organizacji ruchu. Rozwiązanie to podobnie jak to opisywane w poprzednim rozdziale wykorzystuje efekty redukcji hałasu opisywane na początku tego rozdziału, które są związane z ograniczeniami natężenia ruchu (tabl. 5.4), ograniczeniami ruchu ciężarowego (tabl. 5.5) oraz zmianami prędkości (tabl. 5.6), a także częściowo stylem jazdy (tabl. 5.7). Do najważniejszych rozwiązań drogowych i środków ograniczających poziom hałasu drogowego w zakresie przeniesienia hałasu ze strefy emisji należą:

- **Budowa obwodnic i nowych połączeń.** Budowa obwodnic i nowych połączeń związana jest przede wszystkim z poprawą warunków ruchu, stanu bezpieczeństwa oraz stanu środowiska (przede wszystkim ograniczeniem zanieczyszczeń powietrza oraz hałasu drogowego) [22, 24, 69, 72, 80, 135, 191, 207, 226, 232, 240]. Rozwiązanie to eliminuje znaczącą część ruchu i ewentualnie określone grupy pojazdów (przede wszystkim tranzyt pojazdów ciężkich). Budowa obwodnic i nowych połączeń może powodować także problemy w innych miejscach, ponieważ przeniesienie ruchu spowoduje także przeniesienie emisji hałasu. Prawdłowo zaprojektowana obwodnica powinna uwzględniać niektóre elementy z rozwiązań związanych z unikaniem emisji hałasu (np. planowanie przestrzenne, odpowiednie odległości, strefowanie zabudowy). Bardzo istotnym elementem w ochronie przed hałasem dla tego rozwiązania jest zachowanie odpowiedniego bilansu terenów o obniżonej emisji hałasu do nowych terenów, w których ta emisja zostanie przeniesiona [242]. Głównymi kryteriami wyboru tego rozwiązania powinny być te, które związane są ze zdrowiem ludzi oraz zanieczyszczoną hałasem powierzchnią terenu oraz chronionymi budynkami (rozd. 3). W programach ochrony środowiska rozwiązanie to będzie związane przeważnie z wieloletnimi planami inwestycyjnymi jakie tworzą miasta i mogą one być uwzględnione zarówno w perspektywie krótkoterminowej jak i długoterminowej [23]. Rozwiązanie to wiąże się zwykle ze znacznymi kosztami oraz dłuższym okresem realizacji. W przypadku, jeśli nowe rozwiązanie przebiega w pobliżu istniejącej zabudowy będzie ono potencjalnym źródłem konfliktów spo-

łecznych. Pozostająca sieć drogowa a zwłaszcza drogi pełniące do tej pory funkcje tranzytowe (w mieście) powinny podlegać uspokojeniu ruchu oraz innym przekształceniom, ponieważ skuteczność tych rozwiązań z punktów widzenia redukcji hałasu może okazać się zbyt niska – w takich sytuacjach może wystąpić efekt ruchu wzburzonego [219]. Prawidłowo ukształtowana sieć po wprowadzeniu nowych elementów połączeń lub obwodnicy może powodować redukcję hałasu w granicach około 3-9 dB. Efektem dodatkowym będzie ograniczenie emisji zanieczyszczeń powietrza i innych uciążliwości związanych z ruchem drogowym (np. drgań i wibracji).

- **Przeniesienie i połączenie ruchu na niektórych połączeniach związane głównie z organizacją ruchu.** Rozwiązanie to należy do grupy metod związanych ze zmianami organizacji ruchu, których celem jest przeniesienie ciężkości emisji hałasu (również zanieczyszczeń powietrza) na inne połączenia drogowe [23]. Funkcjonowanie tego rozwiązania oraz sposób jego wykonania są takie jak w przypadku zmian organizacji ruchu opisywanych w poprzednim rozdziale. Różni się ono jednak tym, że jest ono wykonywane głównie dla celów związanych z ograniczeniem hałasu. Uzupełnieniem tego rozwiązania mogą być dodatkowo ograniczenia związane z prędkością pojazdów. Szacuje się, że redukcja hałasu w przypadku tego rozwiązania związana ze zmianami w natężeniach ruchu i jego strukturze powinna wynosić około 2–9 dB.
- **Punktowe przebudowy geometrii drogi.** Rozwiązanie to związane jest z działaniami inwestycyjnymi na określonych odcinkach dróg. Z reguły działania takie są podejmowane z uwagi na konieczność przeniesienia źródła emisji lub niektórych źródeł emisji hałasu w przypadkach, kiedy występuje duży wpływ hałasu na niewielkich przestrzeniach (punktowo). Niezbędne są wówczas lokalne zmiany przebiegu drogi, ograniczenie liczby pasów ruchu, przeniesienie skrajnych pasów ruchu i przystanków autobusowych np. na torowisko tramwajowe zlokalizowane w środku przekroju ulicy [17]. Redukcja hałasu w przypadku tych rozwiązań ma charakter punktowy lub na niewielkich odcinkach dróg i może ona wynosić od 1–4 dB.

W tabl. 5.12 zestawiono rozwiązania drogowe i środki zabezpieczające przed hałasem drogowym w przypadku przeniesienia hałasu ze strefy emisji wraz z określeniem stopnia wpływu na uwarunkowania ekonomiczne, społeczne, środowiskowe i techniczne.

5.3. Przeniesienie hałasu ze strefy emisji

Tabl. 5.12. Rozwiązania drogowe i środki zabezpieczające przed hałasem drogowym wraz ze stopniem ich wpływu na wybrane uwarunkowania w zakresie przeniesienia hałasu ze strefy emisji

Uwarunkowania	Budowa obwodnic i nowych połączeń	Przeniesienie i połączenie ruchu na niektórych połączeniach związane głównie z organizacją ruchu	Punktowe przebudowy geometrii drogi
Ekonomiczne			
Koszty budowy/zastosowania	5–9	3–5	3–7
Koszty utrzymania i remontów	3–7	3–5	3–5
Społeczne			
Preferencje i akceptacja społeczna	3–9	3–7	3–7
Przestrzeń publiczna	3–9	3–7	3–7
Warunki poruszania się niepełnosprawnych	3–7	3–7	3–5
Środowiskowe			
Zanieczyszczenia powietrza	5–7	5–7	1–5
Wibracje i drgania	3–7	3–7	3–5
Rośliny i zwierzęta	3–7	1–3	1–3
Wody	3–7	1–3	1–3
Zmiany krajobrazu i estetyka	3–7	3–7	3–5
Dobra materialne	3–7	3–5	1–3
Dobra kultury	3–7	3–5	1–3
Kumulacja oddziaływań	3–7	3–7	3–5
Techniczne			
Redukcja hałasu	5–9 (3–9 dB)	3–7 (2–9 dB)	3–5 (1–4 dB)
Bezpieczeństwo ruchu drogowego	5–7	3–7	3–5
Trwałość techniczna	3–7	3–7	3–7
Trwałość akustyczna	5–7	3–7	3–7
Przepustowość i warunki ruchu	5–7	3–7	3–5
Względy konstrukcyjne, technologiczne i materiałowe	3–7	1–3	3–5
Warunki budowy i montażu	3–7	3–5	3–5
Warunki użytkowania i utrzymania	5–7	3–5	3–5

¹⁾ Oznaczenia dla stopnia wpływu rozwiązania:

1 – obojętny (brak wpływu), 3 – mały (niewielki), 5 – duży, 7 – bardzo duży, 9 – całkowity.

Źródło: opracowanie własne

5.4. Rozwiązania i środki ochrony w strefie imisji hałasu z chronionymi obiektami

W ostatniej kolejności powinny analizowane rozwiązania oraz metody i środki stosowane poza strefą emisji hałasu. Rozwiązania te w aktualnym systemie prawnym praktycznie nie są uwzględniane poza szczególnym przypadkiem, kiedy obiekt mieszkalny zlokalizowany jest w granicach pasa drogowego. Wówczas dopuszczona jest ochrona bezpośrednia obiektu za pomocą różnych środków i metod. Rozwiązania te pomimo tego, że mogą być bardzo efektywne akustycznie w większości przypadków nie zapewniają pełnej ochrony przed hałasem dla otoczenia chronionych obiektów a również niekiedy ich części. Większość metod i środków opisywanych w niniejszym rozdziale powinno być stosowane przez projektantów obiektów mieszkalnych zgodnie z zasadami i obowiązującymi przepisami technicznymi dla tych obiektów [142, 197, 198]. Z uwagi na to, że rozwiązania te należą do grupy nie związanej bezpośrednio z rozwiązaniami drogowymi poniższy opis ograniczono jedynie do podstawowych informacji. Do najważniejszych rozwiązań drogowych oraz metod i środków ograniczających poziom hałasu drogowego w strefie imisji należą:

- **Metody i środki techniczne ograniczające hałas stosowane dla ochrony terenów oraz chronionych obiektów**, do których można zaliczyć:
 - **Ogrodzenia.** Ogrodzenia posesji w wielu przypadkach mogą pełnić poza swoją podstawową funkcją również rolę urządzenia ochrony przed hałasem. Obowiązywać mogą w tym przypadku zasady i metody projektowania jak w przypadku ekranów akustycznych. Istotną sprawą jest kompozycja i forma takiego ogrodzenia, które powinno być zintegrowane z otoczeniem oraz posesją i obiektem. Niestety w Polsce brak jest odpowiednich rozwiązań prawnych dzięki którym możliwe byłoby wybudowanie ogrodzenia spełniającego także funkcję zabezpieczającą przed hałasem i przekazanie go do dalszego użytkowania przez właścicieli bez obowiązku dalszego utrzymania przez zarządzającego drogą. Redukcja hałasu w przypadku tego rodzaju zabezpieczenia może być podobna jak w przypadku ekranów akustycznych i w dużym stopniu zależy on od wysokości, długości oraz lokalizacji względem chronionego terenu i/lub obiektu a także użytych materiałów do budowy. Szacuje się, że redukcja może wynosić do 15 dB.
 - **Ekran na elewacji.** Jest to jedno z rozwiązań chroniących wewnątrz przed hałasem drogowym, które może być stosowane zarówno dla obiektów istniejących jak i nowobudowanych [14]. Zastosowanie tego rodzaju ekranu polega na tym, że przed elewacją budynku w pewnej odległości lub w ramach budynku wykonywana jest konstrukcja, w której zamontowany jest przeźroczysty ekran (stały, przesuwany) lub inny (np. elewacja z użyciem paneli z zielenią). Taki sposób zabezpieczenia powoduje, że duża część fali dźwiękowej jest zatrzymywana na ekranie (przesłonie). W przypadku budynków istniejących podstawowym problemem do

5.4. Rozwiązania i środki ochrony w strefie imisji ...

rozwiązania poza samą konstrukcją przesłony jest rozwiązanie problemów wentylacji wewnątrz budynku oraz warunków związanych z ewakuacją ludzi z obiektu. Istotne jest także w projektowaniu tego rodzaju zabezpieczeń uwzględnienie warunków przeciwpożarowych. Rozwiązania tego rodzaju stosowane są wtedy, kiedy izolacyjność przegród jest wystarczająca a problem ochrony przed hałasem związany jest zbyt małą izolacyjnością okien, drzwi (w niektórych przypadkach przewodów wentylacyjnych). Redukcja hałasu w przypadku zastosowania tego rodzaju rozwiązań wynosi ponad 20 dB [14].

- **Wymiana stolarki okiennej i izolacja ścian budynków.** Rozwiązanie to ma również za zadanie ograniczenia hałasu drogowego docierającego do wnętrza budynku [14, 80, 207]. Może ono polegać tylko na wymianie stolarki okiennej o podwyższonej izolacyjności akustycznej jak również zastosowanie izolacji ścian (również dachów) przy użyciu odpowiednich materiałów. W przypadku zastosowania wymiany stolarki okiennej niezbędne jest rozwiązanie problemów związanych z odpowiednią wentylacją pomieszczeń. Redukcja hałasu w przypadku tego rodzaju rozwiązań może wynosić ponad 20 dB (w zależności od użytych materiałów oraz rodzaju okien i stosowanych w nich systemów wentylacji).
- **Zmiana funkcji pomieszczeń w budynku lub zmiana funkcji całego budynku.** Zalecany w niektórych opracowaniach sposób, który wymaga wielu dodatkowych analiz oraz konsultacji społecznych [14]. W praktyce często jest to mało realne rozwiązanie do zastosowania. Poza zmianą funkcji niezbędne są często dodatkowe prace wynikające z konieczności dostosowania obiektu do nowej funkcji.
- **Planowanie lub zmiana funkcji pomieszczeń w budynkach.** Rozwiązanie to może być stosowane zarówno dla budynków nowych jak i istniejących. W przypadku nowych budynków odpowiednie rozmieszczenie pomieszczeń jest wymagane przez obowiązujące przepisy techniczne dotyczące obiektów mieszkalnych – Dział IX „Ochrona przed hałasem i drganiami” [142]. Spełnienie tych wymagań zapewnia odpowiednią jakość akustyczną budynków, która zależy w pierwszej kolejności od prawidłowych rozwiązań architektonicznych pod względem akustycznym a dopiero w dalszej kolejności od prawidłowych rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych [51, 139]. W przypadku obiektów mieszkalnych od strony drogi o dużym natężeniu ruchu powinny być lokalizowane pomieszczenia typu łazienki, kuchnie, klatki schodowe, pomieszczenia gospodarcze [197, 198].
- **Lokalizacja budynków względem siebie oraz względem drogi.** Rozwiązanie polegające na lokalizacji budynków względem siebie oraz względem istniejących dróg jest niezwykle ważne w przypadku projektowania nowych osiedli mieszkaniowych [80, 197, 198, 204 207]. Niewłaściwa lokalizacja budynków może spowodować, że hałas drogowy może być szczególnie dotkliwie odczuwalny przez mieszkańców z uwagi na dodatkowe odbicia fali dźwiękowej od elewacji budynków. Rozwiązania

5. Ocenia i charakterystyka rozwiązań drogowych ...

są związane z niektórymi metodami opisywanymi dla etapu I – unikania emisji hałasu (planowanie przestrzenne, strefowanie zabudowy, odpowiednia odległość budynków od drogi). Szczególnym przypadkiem rozwiązania, w którym można wykorzystać lokalizację budynków względem siebie mogą być domknięcia (ekrany) ścian szczytowych dla budynków zlokalizowanych prostopadle w stosunku do drogi w postaci konstrukcji specjalnych – przykład pokazano na rys. 5.19.



Rys. 5.19. Przykład domknięcia ścian szczytowych ekranem akustycznym (Holandia)

Źródło: opracowanie własne

Jest to rozwiązanie rzadko stosowane, lecz efektywnie ograniczające hałas w sąsiedztwie budynków mieszkalnych oraz w obszarze osiedla. Problemem w zastosowaniu tego rozwiązania jest przeważnie konieczność zmiany organizacji ruchu w ramach osiedla oraz ograniczenie liczby zjazdów, co równocześnie może mieć pozytywne konsekwencje w przypadku problemów bezpieczeństwa ruchu przy włączaniu sieci osiedlowej do ulic wyższych klas technicznych.

W tabl. 5.13 zestawiono rozwiązania drogowe i środki zabezpieczające przed hałasem drogowym wraz z określeniem stopnia wpływu na uwarunkowania ekonomiczne, społeczne, środowiskowe i techniczne.

5.4. Rozwiązania i środki ochrony w strefie imisji ...

Tabl. 5.13. Rozwiązania oraz metody i środki zabezpieczające przed hałasem drogowym wraz ze stopniem ich wpływu na wybrane uwarunkowania w zakresie strefy imisji hałasu z chronionymi budynkami

Uwarunkowania	Metody i środki techniczne ograniczające hałas stosowane dla ochrony terenów oraz chronionych obiektów			Zmiana funkcji pomieszczeń w budynku lub zmiana funkcji całego budynku	Planowanie lub zmiana funkcji pomieszczeń w budynkach	Lokalizacja budynków względem siebie oraz względem drogi
	Ogrodzenia	Ekrany na elewacji	Wymiana stolarki okiennej i izolacja ścian budynków			
Ekonomiczne						
Koszty budowy/zastosowania	3–7	5–7	3–7	5–9	3–7	5–7
Koszty utrzymania i remontów	1–3	3–7	3–7	3–7	3-5	5–7
Społeczne						
Preferencje i akceptacja społeczna	5–9	3–7	5–7	5–9	1–5	5–7
Przestrzeń publiczna	5–7	1	1	1-3	1	
Warunki poruszania się niepełnosprawnych	1–3	1	1	1	1–3	3–7
Środowiskowe						
Zanieczyszczenia powietrza	1–3	1	1	1	1	1–5
Wibracje i drgania	1	1	1	1	1	1
Rośliny i zwierzęta	1–5	1	1	1	1	1
Wody	1	1	1	1	1	1
Zmiany krajobrazu i estetyka	3–7	1–5	1–3	1–5	1–3	3–7
Dobra materialne	1-3	1	1	1–5	1	1–3
Dobra kultury	1-3	1	1	1–5	1	1–3
Kumulacja oddziaływań	1-3	1	1	1	1	1–5
Techniczne						
Redukcja hałasu	3–7 (do 15 dB)	5–9 (ponad 20 dB)	5–9 (ponad 20 dB)	9	5–9	5–7
Bezpieczeństwo ruchu drogowego	1-3	1	1	1	1	3–7
Trwałość techniczna	5–7	3-7	3-7	3-7	5–9	3–7
Trwałość akustyczna	5–7	5–7	5–7	5–9	5–9	5–7
Przepustowość i warunki ruchu	1	1	1	1	1	1-5
Względy konstrukcyjne, technologiczne i materiałowe	5–7	5–7	3–7	5–9	5–7	3–7
Warunki budowy i montażu	3–7	5–7	3–7	5–9	3–7	5–7
Warunki użytkowania i utrzymania	3–7	3–7	3–7	5–9	3–7	3–7

¹⁾ Oznaczenia dla stopnia wpływu rozwiązania:

1 – obojętny (brak wpływu), 3 – mały (niewielki), 5 – duży, 7 – bardzo duży, 9 – całkowity.

Źródło: opracowanie własne

5. Ocenia i charakterystyka rozwiązań drogowych ...

Powyższe rozwiązania są związane bezpośrednio z kształtowaniem obiektu oraz jego lokalizacją względem innych i względem drogi. Uzależnione one są w dużej mierze od znajomości przez projektanta (architekta) wpływu ruchu na poziom hałasu oraz wiedzy na temat metod możliwych do zastosowania w samym obiekcie (mających na celu ograniczenie wpływu hałasu na ludzi). W praktyce metody te powinny być zawsze rozpatrywane a do analiz mogą posłużyć mapy akustyczne, jeśli obiekty będą zlokalizowane w pobliżu dróg i ulic o dużych natężeniach ruchu drogowego.

Zalety:

- Możliwość zabezpieczenia wszystkich pomieszczeń i ludzi w nich przebywających, którzy mogą być narażeni na szkodliwe oddziaływanie hałasu.
- Możliwość uzyskania ciekawych form obiektu poprzez konieczność odpowiedniego kształtowania elewacji i użycia właściwych materiałów budowlanych.
- Poprawa stanu bezpieczeństwa ruchu drogowego i ładu przestrzennego dzięki wprowadzeniu rozwiązań porządkujących ruch w ramach osiedla mieszkaniowego – w przypadku konieczności połączenia ścian szczytowych w budynkach zlokalizowanych prostopadle do arterii.

Wady:

- Brak możliwości lub częściowa ochrona przed hałasem drogowym otoczenia obiektów mieszkalnych.
- Gorsze warunki oświetlenia i nasłonecznienia niektórych pomieszczeń w obiektach ze względu na zmianę ich położenia w ramach budynku.
- Wysokie koszty zmian zwłaszcza już w istniejących budynkach.
- Możliwość pogorszenia warunków wentylacji i stworzenie przez to dodatkowych zagrożeń (pleśń, grzyby) w budynkach dodatkowo izolowanych i z wymienianą stolarką okienną.

W rozdziale tym przedstawiono, oceniono i scharakteryzowano rozwiązania oraz środki ochrony przed hałasem drogowym głównie w zależności od lokalizacji źródła hałasu i odbiorcy. Cztery podstawowe grupy rozwiązań polegające na: unikaniu emisji hałasu, zmniejszeniu emisji hałasu w strefie emisji, przeniesieniu hałasu ze strefy emisji oraz zastosowaniu odpowiednich rozwiązań i środków w strefie imisji mogą stanowić podstawę w analizach dotyczących zabezpieczania ludzi przed niekorzystnym wpływem hałasu na zdrowie. Istotne, aby w analizach tych wykonać przegląd możliwych do zastosowania rozwiązań w kolejności od możliwości unikania emisji aż do strefy imisji – zasada doboru rozwiązań i środków chroniących przed hałasem drogowym od źródła (emisji) do odbiorcy (imisji). Każda z tych grup i poszczególnych rozwiązań ma swoje zalety jak i wady. Zastosowanie rozwiązań i środków w ramach różnych grup zależy od wielu kryteriów, które mogą mieć różne znaczenie w analizowanych przypadkach. Kryteria doboru rozwiązań i środków ochrony przed hałasem powinny stanowić jednak podstawę we wszelkiego rodzaju analizach. Większość skutecznych i efektywnych rozwiązań będzie związana z wyborem jednocześnie kilku środków, które mogą pochodzić z różnych grup – w praktyce są to rozwiązania i środki wzajemnie się uzupełniające, które stanowią o ostatecznym efekcie i redukcji hałasu drogowego.

6. Modelowanie decyzji dotyczących wyboru rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym

W planowaniu i projektowaniu dróg podstawowym elementem zwłaszcza w ramach prac koncepcyjnych jest wariantowanie inwestycji głównie z punktu widzenia jej lokalizacji. Wymagają tego przede wszystkim przepisy ochrony środowiska [143, 244] oraz niejednokrotnie procedury wewnętrzne zarządców dróg. W przypadku zagadnień ochrony środowiska głównym celem wariantowania jest znalezienie optymalnych lokalizacji i rozwiązań głównie ze względu na ochronę środowiska. W przypadku inwestorów jednym z ważniejszych celów jest optymalizacja kosztów. Pogodzenie często sprzecznych celów różnych interesariuszy (inwestor, urzędy wydające opinie i pozwolenia, mieszkańcy) w tego typu projektach jest zadaniem często niezwykle trudnym. Wymaga ono zarówno narzędzi, jak i metod wspomagających. W analizach występuje bardzo wiele czynników, uwarunkowań i kryteriów wzajemnie wykluczających się, gdzie podjęcie decyzji jest niezwykle trudne. W zakresie inwestycji drogowych (głównie dróg krajowych) w Polsce wykorzystywane są różnego rodzaju metody porównania i wyboru wariantów [24, 232, 233, 234, 235, 236].

Wybór metod i urządzeń ochrony przed hałasem drogowym w programach ochrony środowiska przed hałasem różni się w stosunku do opracowań środowiskowych dla nowych inwestycji (raporty o oddziaływaniu przedsięwzięć na środowisko). W przypadku decyzji środowiskowych dla większych inwestycji przepisy wymagają analiz co najmniej dwóch wariantów rozwiązań i wariantu dla stanu istniejącego wykonywanych z dosyć dużym poziomem szczegółowości. Programy mają charakter planistyczny i w wielu sytuacjach zawierają wskazanie możliwego do zastosowania rozwiązania lub rozwiązań (wariantów) bez większej liczby szczegółów, które porównywane są ze stanem istniejącym (wariant dla stanu istniejącego). Poziom szczegółowości programu opisuje rozporządzenie w sprawie wymagań stawianych programom ochrony środowiska przed hałasem [182]. Podobne analizy wykonuje się w opracowaniach kontrolnych (analizy porealizacyjne, przeglądy ekologiczne), gdzie jeśli okaże się, że należy wprowadzić rozwiązanie ochronne wówczas powstaje co najmniej jedno rozwiązanie. Są to już jednak opracowania o dużej szczegółowości w zakresie rozwiązań technicznych jednak i w tych opracowaniach należy się spodziewać choćby ze względów kosztów i często skomplikowania technicznego rozwiązań wariantowych.

Praktycznie każde opracowanie, gdzie wprowadzane są nowe rozwiązania (inwestycyjne) powinno zawierać analizę wariantów z możliwością wyboru rozwiązań optymalnych, gdzie wybór wariantu powinien zależeć od szeregu kryteriów. Praktycznie w każdej sytuacji wyboru metod i środków przed hałasem drogowym konieczne jest uwzględnienie szeregu uwarunkowań i kryteriów. Każda metoda i środek ochrony przed hałasem

drogowym powinna spełniać podstawowe wymagania (wpływ na zdrowie ludzi, bezpieczeństwo ruchu drogowego, koszty itp.) co spowoduje, że rozwiązania te będą realne do wykonania i efektywne – optymalne. W wielu sytuacjach są do tego niezbędne metody oceny i wyboru oraz zastosowane kryteria. W początkowych etapach planowania rozwiązań, jak to ma miejsce w programach ochrony środowiska przed hałasem będzie się liczyła wiedza ekspercka i specjalistyczna, która wynika z doświadczeń osób wspomagających podejmowanie decyzji – na tych etapach wystarczy wówczas zastosowanie analiz uproszczonych i skal opisowych do spełnienia powyższych uwarunkowań i kryteriów.

W rozdziale tym zebrano wszystkie dotychczas opisane informacje na temat metod ochrony przed hałasem, uwarunkowań i kryteriów ich wyboru, metod oceny z punktu widzenia możliwości ich wykorzystania w opracowaniach środowiskowych. Wszystkie te informacje zostały zebrane tak, aby stanowiły pomoc w analizach podczas postępowania przy wyborze optymalnych rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym. Wskazane do zastosowania analizy w wielu miejscach zawierają szereg uproszczeń. Dodatkowo podano założenia w przyjętej wielokryterialnej metodzie wspomagającej podejmowanie decyzji, która stanowi model decyzyjny wyboru rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem.

Pomimo tego, że dalszy opis schematu wykorzystania modelu jest głównie ukierunkowany na programy ochrony środowiska przed hałasem, to może być on również stosowany w innych opracowaniach środowiskowych. Większość elementów tego modelu było badanych i testowanych na różnych przykładach – ze względu na objętość opracowania wprowadzono przykład, który reprezentuje jeden z bardziej charakterystycznych przypadków wyboru rozwiązań ochrony przed hałasem (rozdz. 7). Przykład ten oparty jest na realnych wynikach jednego z programów ochrony środowiska przed hałasem.

6.1. Uwarunkowania i kryteria w planowaniu i projektowaniu dróg oraz w wyborze metod i środków ochrony przed hałasem drogowym

Współczesne budownictwo drogowe musi spełniać wiele uwarunkowań. Ze względu na jego charakter, oraz z uwagi na wiele potrzeb i funkcji publicznych powinno się wymagać rozwiązań zgodnych z zasadami zrównoważonego rozwoju, które spełniają uwarunkowania gospodarcze w tym techniczno-ekonomiczne, społeczne i środowiskowe. O rozwiązaniach spełniających zasady zrównoważonego rozwoju można też mówić, że są rozwiązaniami zrównoważonymi. W planowaniu i projektowaniu inwestycji drogowych pojawia się szereg czynników, które często modyfikują uwarunkowania zrównoważonego rozwoju. Czynniki te mogą być związane zarówno z kosztami, jak i możliwościami technicznymi budowy, sprzeczne z interesem społecznym itd. Do czynników tych należy również presja czasu. Podjęcie szybkiej decyzji co do wyboru lokalizacji inwestycji, technologii budowy, czy danego rozwiązania bez analizy uwarunkowań i wielu danych z reguły związane jest z wieloma błędami. Szybka decyzja podjęta bez głębszej analizy

praktycznie zawsze jest decyzją, która ma niewiele związku z rozwiązaniami zrównoważonego rozwoju. Tania, szybko zaprojektowana i zrealizowana inwestycja w większości przypadków będzie w przyszłości drogim w utrzymaniu obiektem, który często będzie konfliktowy społecznie i mający negatywny wpływ na zdrowie ludzi i środowisko przyrodnicze. W dużej mierze o powodzeniu powstania zrównoważonej inwestycji decyduje coraz częściej nie tylko wariantowanie jej lokalizacji, ale również wariantowanie niektórych rozwiązań w ramach jednego wariantu. Projektowanie dróg i urządzeń drogowych to zadanie złożone. Dotychczasowa praktyka wskazuje, że bardzo rzadko analizowane są łącznie kryteria społeczne, środowiskowe i ekonomiczne tworzące podstawę zrównoważonego rozwoju. Uwzględnienie w planowaniu i projektowaniu czynników: gospodarczych (techniczno-ekonomicznych), społecznych oraz środowiskowych daje podstawę do twierdzenia, że są to rozwiązania zrównoważone. Dotyczy to praktycznie wszystkich elementów środowiska. W przypadku hałasu drogowego kryteria doboru rozwiązań drogowych w terenach wrażliwych akustycznie powinny opierać się również na opisanych wcześniej trzech filarach zrównoważonego rozwoju. Rozpatrywanie rozwiązań ochrony przed hałasem tylko ze względu na wartości dopuszczalne lub wskaźniki wpływu na zdrowie ludzi może prowadzić do rozwiązań niepełnych a nawet błędnych. Programy ochrony środowiska przed hałasem są opracowaniami bliższymi planowaniu niż projektowaniu, gdzie powstają konkretne szczegóły techniczne rozwiązań. Dlatego też wyniki *POSPH* powinny być pewnego rodzaju wytycznymi związanymi z redukcją hałasu drogowego w dalszych działaniach inwestycyjnych. Aby osiągnąć zrównoważone rozwiązania niezbędne jest określenie uwarunkowań oraz kryteriów wyboru metod i środków ochrony przed hałasem.

6.1.1. Uwarunkowania i kryteria w projektowaniu i budowie dróg

W planowaniu i projektowaniu inwestycji drogowych niezbędne jest dotrzymanie wielu uwarunkowań i kryteriów dzięki którym powinno się uzyskać rozwiązania optymalne (zrównoważone). W budownictwie drogowym praktycznie, odkąd rozpoczęto planowanie inwestycji wprowadzano uwarunkowania dotyczące dalszych działań. Początkowo uwarunkowania te opisywały materiały o charakterze zaleceń, instrukcji i wytycznych, np. [254, 255]. Rolę tą zaczęły pełnić z końcem lat dziewięćdziesiątych XX wieku rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych dotyczącym dróg i obiektów inżynierskich [181]. W ramach tych rozporządzeń uwzględniono zagadnienia ochrony środowiska w tym ochrony przed hałasem. Niestety do roku 2015 (zmiana rozporządzenia [180]) w ramach tych przepisów, jako najważniejszy środek ochrony przed hałasem uważano ekran akustyczny – m.in. następstwem tego były znaczące błędy w ochronie przed hałasem.

Po zebraniu i analizie dostępnych materiałów w postaci powyżej opisanych wytycznych i rozporządzeń oraz na podstawie własnych doświadczeń w planowaniu i projektowaniu dróg do najważniejszych uwarunkowań i kryteriów należy zaliczyć:

- **Techniczne i ruchowe**, które powinny:
 - gwarantować wymagany poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego,
 - umożliwić realizację przypisanych drodze funkcji,
 - zapewnić wymagany poziom swobody ruchu przy uwzględnieniu przewidywanego (prognozowanego) natężenia ruchu i jego struktury rodzajowej,
 - zachować jednorodność geometryczną na możliwie długich odcinkach (dotyczy głównie dróg zamiejskich),
 - zapewniać pełną dostępność niepełnosprawnym z wykorzystaniem urządzeń obsługi ruchu dla tych użytkowników.
- **Ekonomiczne**, które powinny:
 - uwzględniać wariantowanie i analizy ekonomiczne – powinny zawierać porównanie kosztów (inwestycyjnych, utrzymaniowych, eksploatacyjnych, środowiskowych itd.). Podstawowymi wskaźnikami efektywności ekonomicznej są: wskaźnik efektywności (B/C), zdyskontowana korzyść netto inwestycji (NPV) i wewnętrzna stopa zysku (IRR).
 - przy dużych inwestycjach powinny być stosowane analizy wielokryterialne, które umożliwią spełnienie kryteriów zrównoważonego rozwoju (techniczno-ekonomicznych, społecznych i środowiskowych),
 - w ramach inwestycji, jeśli jest taka potrzeba uwzględniać etapowanie, które będą miały jak najmniejszą liczbę straconych prac, materiałów itp.
- **Środowiskowe**, które obejmują: warunki gruntowo-wodne, ukształtowania terenu, krajobrazowe i klimatyczne oraz warunki życia człowieka. Przy kształtowaniu drogi należy dążyć do:
 - ograniczenia negatywnego wpływu drogi i ruchu na środowisko (człowieka i przyrodnicze),
 - ograniczenia negatywnego wpływu otoczenia na warunki i bezpieczeństwo ruchu drogowego,
 - prawidłowego gospodarowania zasobami przyrody w tym ochrony gruntów rolnych i leśnych,
 - ochrony zabytków, parków narodowych i krajobrazowych oraz innych cennych obiektów zagospodarowania terenu.
- **Estetyki**, które spełnia się przez świadome kształtowanie obrazu drogi i jej otoczenia. Warunki estetyki powinny być uwzględnione w projektowaniu i w szczególności powinny obejmować:
 - geometryczne kształtowanie elementów drogi,
 - zagospodarowanie pasa drogowego,
 - kształtowanie otoczenia drogi,

- prawidłowe kształtowanie funkcji i formy zabezpieczeń środowiskowych w tym rozwiązań chroniących przed hałasem drogowym.
- **Utrzymywanie**, które powinny być uwzględniane już na etapie projektowania, gdzie powinno się uwzględniać zarówno koszty utrzymania, a także uciążliwości związane z pracami utrzymaniowymi. Ze względu na utrzymanie drogi zaleca się:
 - wykorzystanie naturalnych form terenu, aby zmniejszyć koszty odśnieżania i zwalczania śliskości zimowej, a także ograniczenie ingerencji w naturalny system odwodnienia i układu wód podziemnych,
 - unikanie prowadzenia drogi po terenie ze względu na potencjalne problemy geotechniczne, które mogą być przyczyną niespodziewanego wzrostu kosztów utrzymania (słabe grunty, osuwiska itp.),
 - odpowiednie kształtowanie przestrzenne drogi, aby zminimalizować zastosowanie urządzeń zabezpieczenia ruchu (bariery ochronne) i ochrony środowiska (ekrany akustyczne),
 - stosowanie rozwiązań, które zapewnią stosowanie standardowego sprzętu utrzymaniowego oraz jego dostępność do drogi i elementów jej wyposażenia.
- **Wynikające z prawa miejscowego oraz porozumień międzynarodowych.** Uwarunkowania te zapewniają, że zarówno w sieci ulic oraz dróg, a także w sieci dróg międzynarodowych spełnione są odpowiednie parametry drogi oraz jej wyposażenie w urządzenia obsługi i usprawnienia ruchu, a także warunki kształtowania rozwiązań oraz zabudowy (dzięki m.in. miejscowym planom zagospodarowania terenu).

Jak wynika z powyższego zestawienia w planowaniu i projektowaniu dróg i urządzeń drogowych wykorzystywany jest szeroki zbiór uwarunkowań i kryteriów. Tempo wzrostu motoryzacji i wykorzystania środków pomocowych z UE w ostatnich latach oraz nowe przepisy, a także dotąd nie spotykane przypadki oraz skala zagadnień w inwestycjach dotycząca głównie uwarunkowań przyrodniczych spowodowały znaczące problemy w realizacji tych inwestycji. Powyższe uwarunkowania dotyczące planowania i projektowania dróg pozostają nadal niezmiennie i aktualne. Mogą być one wykorzystywane nawet w sytuacjach, kiedy konieczne jest podejmowanie decyzji związanych z doбором urządzeń ochrony środowiska, a w tym metod i środków ochrony przed hałasem drogowym.

6.1.2. Kryteria i analizy rekomendowane przez WHO

Kryteria WHO związane z analizami hałasu dotyczą przede wszystkim wpływu hałasu na zdrowie człowieka [74, 76, 77]. Wskaźniki wpływu hałasu na zdrowie (nazywane również dalej wskaźnikami zdrowotnymi) i ocena wpływu hałasu na zdrowie ludzi to podstawowe kryteria jakimi kieruje się ta organizacja – wskaźniki te opisano w rozdz. 3. Wskaźniki zdrowotne WHO powinny być używane w wielu analizach do wyboru wariantów rozwiązań ochronnych. Wyniki tych analiz bezpośrednio wskazują na człowieka i efekty niekorzystnego wpływu hałasu na niego.

Dodatkowo WHO wskazuje na konieczność wykonywania analiz typu koszt-zysk (ang. *cost-benefit*) [77], które są istotnymi elementami procedur stosowanymi w przygotowaniu różnego rodzaju strategii. W praktyce Komisji Europejskiej tego typu analizy są obowiązkowe natomiast w Polsce wykonywane są częściej w programach ochrony środowiska przed hałasem natomiast (opis w kolejnym punkcie) w znikomym w pozostałych opracowaniach środowiskowych.

W analizach korzyść-zysk możliwe są do wykorzystania dwie metody [77, 120, 246]: wycena warunkowa (ang. *Contingent Valuation*) oraz wyceny hedoniczne. Wyceny hedoniczne wykorzystują dane z rynku nieruchomości – pozwala to na stwierdzenie, że nieruchomości eksponowane na wyższe wartości hałasu mają niższe wartości niż podobne budynki eksponowane na niższe wartości hałasu. Na tej podstawie oszacowano [77], że ceny domów tracą 0,5% swojej wartości za każdy decybel ponad $L_{DWN}=50-55$ dB.

Jednym z istotniejszych elementów tych analiz jest oszacowanie korzyści. W opracowaniach ekspertów europejskich w zakresie analiz kosztów i korzyści zaleca się [77, 246] przyjmowanie wartości 25 euro na gospodarstwo domowe na jeden decybel na rok powyżej hałasu $L_{DWN}=50-55$ dB (obowiązuje dla wartości nie większych niż $L_{DWN}=70-75$ dB). Przyjęcie wartości 25 euro dla oszacowania zysku wprowadzenia cichszych opon wskazała np., że korzyści dla społeczeństwa mogą wynieść 43–123 mld euro w okresie 2010–2022 [243]. Wartość 25 euro jest obecnie krytykowana za zbyt niską wartość i uśrednienie w stosunku do krajów UE [58] i szereg krajów ustala własną wartość korzyści w analizach kosztów i korzyści.

W dotychczasowych zaleceniach WHO brak jest wskazania na jednoznacznie określone kryteria dotyczące korzyści i kosztów z realizacji metod i urządzeń ochrony przed hałasem. Podane jednak zalecenia mogą w tego typu analizach skutecznym (i jednocześnie prostym) narzędziem w wyborze urządzeń chroniących środowisko przed hałasem. Najważniejsze kryteria WHO, jakie powinny być wykorzystywane w programach ochrony środowiska przed hałasem i innych opracowaniach środowiskowych to przede wszystkim wskaźniki zdrowotne.

6.1.3. Kryteria i analizy stosowane w krajowych programach ochrony środowiska przed hałasem i opracowaniach środowiskowych

Dotychczas stosowane kryteria w programach ochrony środowiska przed hałasem zorientowane są przede wszystkim z uwagi na ich skuteczność i koszty. W programach tych dominują przede wszystkim analizy efektywności i wskaźniki dla przyjętych rozwiązań ochronnych. Rzadko stanowią one kryteria wyboru rozwiązań, a stanowią jedynie prognozę wyników przyjęcia konkretnych rozwiązań oraz w niektórych sytuacjach podsumowanie związane z potencjalnymi korzyściami, jakie przyniosą przyjęte rozwiązania. Brak jest jednak w tych programach analiz związanych z wariantowaniem i analizą, które rozwiązania mogą przynieść najlepsze efekty. Większość z bada-

nych programów ochrony środowiska przed hałasem dla miast można skupić w jednym celu – pytaniu: jaki efekt ochrony przed hałasem zostanie uzyskany po przyjęciu zestawu działań dla sieci ulic, na które wyrażą zgodę ich zarządcy?

Kryteria rozwiązań ochrony przed hałasem stosowane do tej pory w programach reprezentowane są przez różnego rodzaju wartości, wskaźniki i współczynniki:

- **Wartości ograniczenia poziomu hałasu dla poszczególnych ulic bądź ich fragmentów** – przykładem może być program ochrony środowiska przed hałasem dla Warszawy. Dla znanych wartości przekroczeń wartości dopuszczalnych hałasu zakładane są wartości redukcji hałasu przy użyciu konkretnych (realnych do zastosowania) metod ochrony.
- **Analiza punktów o istotnie podwyższonych poziomach hałasu** (ang. *hot spots*). Gorące punkty to takie miejsca lub obszary, gdzie występują szczególnie wysokie wartości przekroczeń poziomów dopuszczalnych poziomu hałasu. W warunkach krajowych analizy takich miejsc są wykonywane na podstawie wyników map imisji hałasu oraz innych danych dotyczących rozkładu hałasu na elewacjach. W programach ochrony środowiska przed hałasem miejsca takie są wskazywane również na podstawie zgłoszeń od mieszkańców, jakie przekazywane są do administracji ochrony środowiska oraz zarządców dróg (często prowadzące do działań kontrolnych i przeglądów ekologicznych). Tego rodzaju analizy wykonywane były m.in. w przypadku map akustycznych i programów ochrony środowiska dla Krakowa.
- **Wartości lub zakresu wartości wskaźnika M dla realizacji wszystkich zalecanych metod i środków ochrony przed hałasem** (jego dokładny opis podano w rozdz. 3.3.3) – przykładem mogą być programy ochrony środowiska dla Krakowa. Przy takim podejściu jako kryterium ustalane są priorytety do realizacji dla terenów o wartościach od najwyższego do najniższego (najczęściej przyjmują postać przedziałów wartości wskaźnika z nazwami: priorytet bardzo wysoki, wysoki itp.) – zgodnie z zapisami przepisów w jaki sposób powinien być wykorzystywany wskaźnik M . Często priorytety określone dla konkretnych przedziałów wartości wskaźnika M są powiązane z kosztami metod i środków ochrony przed hałasem. To podejście to umożliwia również przyjęcie priorytetów działań (optymalizację) dla zakładanej wartości budżetu na ochronę – wówczas wtórnie określone są priorytety z uwzględnieniem przedziałów wartości dla wskaźnika M .
- **Efektywność ekologiczna rozwiązania.** Kryterium to wykorzystuje wartości wskaźnika M . Nie uwzględnia ono kosztów. Dzięki wyliczanemu w tym kryterium wskaźnikowi istnieje możliwość porównania rozwiązań ochronnych – wówczas im wyższa wartość wskaźnika tym rozwiązanie jest lepsze. Kryterium to było stosowane np. w programach ochrony środowiska przed hałasem dla Bydgoszczy i Białegoostoku. Wskaźnik efektywności ekologicznej E_{ekol} obliczany jest według wzoru:

$$E_{ekol} = \frac{M - M'}{M} \cdot 100 \quad [\%] \quad (6.1)$$

gdzie:

- M – wartość wskaźnika przed realizacją programu ochrony środowiska przed hałasem,
- M' – wartość wskaźnika po realizacji programu ochrony środowiska przed hałasem.
- **Efektywność ekonomiczna rozwiązania.** Określenie tego kryterium jest możliwe po obliczeniu wskaźnika skuteczności rozwiązania. Wskaźnik określa skuteczność rozwiązania, która jest wprost proporcjonalna do ludności zamieszkującej dany obszar i do stopnia redukcji hałasu po zastosowaniu określonego rozwiązania. Skuteczność S wyrażana jest wzorem:

$$S = m \cdot \Delta L \quad (6.2)$$

gdzie:

- m – liczba osób zamieszkujących dany obszar,
- ΔL – wartość redukcji poziomu hałasu na danym obszarze po zastosowaniu rozwiązania ochronnego.

Dzięki porównaniu kosztu przyjętego rozwiązania do jego skuteczności otrzymywana jest kosztochłonność rozwiązania KCH :

$$KCH = \frac{k}{S} \quad (6.3)$$

gdzie:

- k – koszt inwestycji,
- S – skuteczność rozwiązania.

Zgodnie z założeniami tego kryterium kosztochłonność rozwiązania ma wskazywać, ile kosztować będzie redukcja hałasu i 1 dB w przeliczeniu na jednego mieszkańca. Dzięki wskaźnikowi kosztochłonności rozwiązania można wskazać najlepsze rozwiązania, które przy nakładzie najmniejszych środków spowodują największą redukcję hałasu obejmując jak największą liczbę osób. Współczynnik określający efektywność ekonomiczną rozwiązania E_{ekon} oblicza się za pomocą wzoru:

$$E_{ekon} = \frac{1}{KCH} \quad (6.4)$$

gdzie: oznaczenia jak wyżej.

Wartość tego współczynnika przyjmuje największe wartości dla najbardziej efektywnych ekonomicznie rozwiązań.

Kryterium to było stosowane np. w programach ochrony środowiska przed hałasem dla Bydgoszczy i Białegostoku.

- **Wskaźnik korzyści społecznych.** Dzięki powiązaniu wskaźnika efektywności ekologicznej E_{ekol} i współczynnika efektywności ekonomicznej E_{ekon} możliwe jest określenie tzw. wskaźnika korzyści społecznych WKS, który zapisywany jest jako wzór:

$$WKS = E_{ekol} \cdot E_{ekon} \quad (6.5)$$

Najwyższe wartości tego wskaźnika dla przyjętych rozwiązań są najbardziej korzystne społecznie.

Różnice w podejściu do wskaźników wymienionych powyżej występują w związku z brakiem zaleceń zarówno krajowych, jak i europejskich. Jak można zauważyć żadne z powyższych kryteriów nie odnosi się bezpośrednio do wpływu hałasu na zdrowie, co najwyżej pośrednio poprzez porównanie do wartości dopuszczalnych hałasu lub przekroczeń tych wartości.

Powyższe kryteria nie są stosowane w opracowaniach środowiskowych innych niż programy ochrony środowiska przed hałasem. W opracowaniach typu raport o oddziaływaniu na środowisko, analiza porealizacyjna, przegląd ekologiczny zdecydowanie ważniejszym kryterium jest spełnienie wartości dopuszczalnych L_{AeqD} , L_{AeqN} (rozdz. 3.2). W przypadku większych inwestycji drogowych kryteria polegające na spełnieniu wartości dopuszczalnych są porównywane w ramach analiz wyboru wariantów rozwiązań – głównie lokalizacyjnych. Wartości dopuszczalne hałasu reprezentowane są przez wskaźnik jakim jest równoważny poziom dźwięku A , $L_{Aeq,T}$ wyrażony wzorem [155]:

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_a^2(t)}{p_o^2} dt \right] \text{ [dB]} \quad (6.6)$$

gdzie:

- t_1 – początek czasu uśredniania,
- t_2 – koniec czasu uśredniania,
- p_A – wartość chwilowa ciśnienia akustycznego A , mierzonego sygnału akustycznego,
- p_o – ciśnienie akustyczne odniesienia, 20 μ MPa.

Należy dodatkowo wspomnieć o innych wskaźnikach, które zalecane są w stosowaniu przy realizacji map akustycznych i innych opracowań środowiskowych [91, 101, 126, 242, 250]. Jednym z istotniejszych jest niestosowany w analizowanych programach ochrony środowiska przed hałasem w pierwszej i drugiej rundzie sporządzania map aku-

stycznych, wskaźnik zagrożonej hałasem komunikacyjnym ludności miasta (dzielnicy) $LMZH_k$ [91]:

$$LMZH_k = \frac{\sum_{i=1}^n [l_{xi} \cdot d_{xi} \cdot p_{xi} \cdot GZ_{xi}]}{L_{m(O)}} [\%] \quad (6.7)$$

gdzie:

- l_{xi} – długość ulic miasta (dzielnicy) o poziomie hałasu większym od dopuszczalnego [m],
- d_{xi} – przeciętna szerokość terenu wzdłuż ulic objętych oddziaływaniem hałasu o poziomie większym od dopuszczalnego [m],
- p_{xi} – procent ludności zamieszkałej w pomieszczeniach od strony hałaśliwej ulicy (będącej źródłem hałasu) [%],
- G_{Zxi} – gęstość zaludnienia miasta (dzielnicy),
- $L_{m(O)}$ – ludność miasta (dzielnicy).

6.1.4. Analizy CBA i CEA

W programach ochrony środowiska przed hałasem i innych opracowaniach środowiskowych wykonywanych w krajach europejskich dominują poza kryteriami zdrowotnymi określonymi przez WHO kryteria ekonomiczno-zdrowotne (nazywane dalej dla uproszczenia kryteriami ekonomicznymi), które powiązane są ściśle z kryteriami zdrowotnymi. Kryteria ekonomiczne oparte są głównie na wskaźnikach kosztów i korzyści. W analizach tych wychodzi się z prostego założenia, że zarówno dla osób decydujących, jak i dla całego społeczeństwa ważne jest jak najlepsze wykorzystanie dostępnych środków. U podstaw stosowanych kryteriów wyboru rozwiązań ochrony przed hałasem jest wiedza, że pieniądze na te rozwiązania są zwykle ograniczone, a stosowanie np. ekranów akustycznych jest związane z wysokimi kosztami. Dodatkowo Dyrektywa END traktowana jest jako narzędzie zarządzania hałasem i umożliwia tworzenie długofalowych strategii walki z hałasem. Kluczowym wyzwaniem w zarządzaniu hałasem w innych krajach europejskich zgodnie z kryterium ekonomicznym jest zrównoważenie kosztów, jakie powoduje hałas dla społeczeństwa z kosztami poniesionymi na rzecz ochrony przed hałasem. Aby zachować tę równowagę i podejście konieczne jest zastosowanie różnego rodzaju analiz i wskaźników. Najczęściej stosowanymi są analizy efektywności kosztowej (*ang. cost-effectiveness analysis* – CEA) oraz analizy kosztów i korzyści (*ang. cost-benefit analysis* – CBA) [58].

Analizy CEA najlepiej nadają się do nadawania priorytetów działania w celu zmniejszenia poziomu hałasu (np. w gorących punktach – *hot spots*). Takimi priory-

tetami można wyróżnić różne dzielnice mieszkaniowe, w których istnieje potrzeba zmniejszenia hałasu lub oceny, jaki środek redukujący hałas jest najbardziej opłacalny w danym obszarze itp.

Analiza kosztów i korzyści *CBA* uwzględnia bardziej holistyczne podejście niż analiza efektywności kosztowej *CEA* poprzez rozszerzenie jej zakresu analizy na wszystkie skutki przyjętych rozwiązań. Celem *CBA* jest osiągnięcie jak najlepszych wyników w zakresie wydatkowania środków, w porównaniu z kosztem przyjętych rozwiązań. Wykonanie analizy *CBA* jest o wiele trudniejsze i wymagające niż analizy *CEA* ze względu na to, że wszystkim istotnym efektom należy przypisać wartości pieniężne. Powoduje to różnego rodzaju trudności związane z wyceną (monetyzacją) skutków zdrowotnych takich jak dokuczliwość, zaburzenia snu itp. Część krajów europejskich podjęła próbę określenia tych wartości (głównie są to badania dotyczące gotowości zapłaty za uniknięcie skutków zdrowotnych oddziaływania hałasu). Wyceny te bardzo jednak się różnią pomiędzy tymi krajami i trudno jest znaleźć koszt wspólny przy porównaniach oraz analizach skutków działania Dyrektywy *END*. Przykładowo wycena kosztów dla pojedynczego gospodarstwa domowego dla poziomu hałasu 55 dB różni się o około 100% dla Danii, Holandii, Szwecji i Wielkiej Brytanii, a przy 65 dB różnica ta dla tych samych krajów wynosi już 800% [58]. W wielu krajach wartości takich nie oszacowano, a wskazywana wartość 25 euro za 1 decybel na rok, na gospodarstwo domowe w [246] uznawana jest obecnie za mało wiarygodną [58]. Wartość ta jest jednak nadal przyjmowana i zalecana do stosowania w krajach Unii Europejskiej zwłaszcza w zakresie ocen i przy wyborze metod i środków ochrony przed hałasem. W 2006 r. ukazał się raport z programu badawczego HEATCO w którym zawarto koszty transportu w tym hałasem dla poszczególnych krajów [84]. Pomimo krytyki związanej z metodologią badań i wynikami tego projektu jego wyniki znalazły się w procedurach analiz finansowych wielu krajów. Dotyczy to również polskiej Niebieskiej księgi Jaspers, która ukazała się w 2015 r. [137] – wspomaga ona wykonywanie analiz *CBA* dla inwestycji drogowych, które dofinansowane są z funduszy europejskich. W podręczniku tym znalazły się również zalecenia obliczania kosztów związanych z hałasem oraz analizy *CBA*.

Brak jednolitego sposobu podejścia do szacowania kosztów i korzyści oraz ich zróżnicowanie w poszczególnych krajach europejskich powodują, że wskaźniki kosztów i korzyści są analizowane w różny sposób. Różne jest też podejście do zaleceń i wytycznych w programach ochrony środowiska przed hałasem i w innych opracowaniach środowiskowych. Poniżej w tabl. 6.1 zestawiono dla wybranych krajów europejskich wskaźniki stosowane w analizach hałasu (większość stosowana jest również w innych opracowaniach), stosowane sposoby zabezpieczeń oraz typowe formalne narzędzia dla redukcji hałasu.

Tabl. 6.1. Zestawienie wskaźników stosowanych w analizach hałasu stosowane w programach ochrony środowiska przed hałasem i innych opracowaniach środowiskowych wraz ze sposobami zabezpieczeń i typowymi narzędziami formalnymi dla redukcji hałasu w wybranych krajach Europy

Kraj	Wskaźniki stosowane w analizach hałasu	Sposoby zabezpieczeń przed hałasem	Typowe narzędzia formalne dla redukcji hałasu
Flandria/ Belgia	–	Nawierzchnia, ekrany akustyczne, ograniczenia prędkości, lokalizacja drogi, izolacje elewacji.	Wartości dopuszczalne hałasu L_{den} w zakresie 60–65 dB. Używane także wartości dopuszczalne L_{Aeq}
Irlandia	Ocena i analiza CBA jako część wczesnego planowania strategicznego.	Odpowiednia odległość budynków od drogi, nawierzchnia, ograniczenia prędkości, płynność ruchu.	Celem jest osiągnięcie 60 dB w 15 lat po rozpoczęciu działań w programie ochrony środowiska przed hałasem.
Wielka Brytania	Zalecenia dotyczące modelowania i oceny transportu, w tym CBA.	Nawierzchnie, wały ziemne, ekrany akustyczne, izolacje elewacji tylko jeśli spełnione są kryteria zawarte w przepisach dotyczących izolowania obiektów.	–
Dania	Wskaźnik CEA jest używany dla większości przypadków wybieranych środków redukujących hałas. Współczynnik narażenia na hałas NEF (<i>ang. Noise Exposure Factor</i>) jest podstawą analiz CBA i CEA. Ceny w analizach bazują na wartościach domów i wpływie na zdrowie.	Odpowiednia odległość budynków od drogi, droga w wykopie, ekrany akustyczne, nawierzchnia, izolacje elewacji.	Dla nowych dróg wartość dop. L_{den} wynoszą 58 dB, dla rozbudowywanych dróg L_{den} wynosi 63 dB.
Norwegia	Analiza CBA jest wykonywana na podstawie podręcznika do tego typu analiz. Koszt hałasu przyjęto wg wstępnej oceny ekspertów na poziomie 12400 NOK ₂₀₀₅	Ekrany akustyczne, izolacje elewacji i wymiana okien, nawierzchnie redukujące hałas tylko na odcinkach testowych.	Wewnątrz budynku poniżej 45 dB. L_{den} równe 65 dB dla obiektów mało wrażliwych na hałas. Wartość L_{den} równa 55 dB wymagana jest w ocenie dla nowych obiektów.
Szwecja	Analiza oddziaływania hałasu – narzędzie oparte na programie Excel obliczające hałas i wpływ środków ochrony dla inwestycji lub przebudowy sieci drogowej.	Odpowiednia odległość budynków od drogi, ekrany akustyczne, droga w wykopie, izolacje elewacji, tunele w większych miastach.	Zalecenia dla nowych budynków: 30 dB wewnątrz ($L_{Aeq,24h}$), 45 dB wewnątrz (L_{max} w nocy), 55 dB na zewnątrz ($L_{Aeq,24h}$), 70 dB patio/taraszy (L_{max})
Hamburg (jako Land)/ Niemcy	Analiza CBA nie jest wykorzystywana przy wyborze środków ochrony przed hałasem. Hałas (wielkość hałasu) jest jednym z kryteriów analizy CBA dla projektów infrastrukturalnych.	Nawierzchnie, ekrany akustyczne, izolacje elewacji, ekrany w otoczeniu budynku, ograniczenia prędkości, płynność ruchu.	Zalecenia dla nowych budynków i zmian w nich. Zalecenia dla nowej i przebudowywanej infrastruktury. Program ochrony przed hałasem.

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [58]

Jak wynika z powyższego zestawienia zróżnicowanie w podejściu do analiz hałasu i metod wyboru w różnych krajach europejskich jest bardzo duże. W praktyce nie ma jednej procedury czy modelu, który zapewniają jednolite standardy analiz CBA i CEA. Przykłady obliczeń CBA i CEA stosowane w innych krajach można znaleźć w raporcie CEDR [58]. W ramach analiz metod stosowanych w analizach CBA i CEA w krajach europejskich wobec bardzo dużego ich zróżnicowania i podejścia przedstawiciele CEDR w raporcie z marca 2017 r. [58] wskazali na możliwość zastosowania metod prowadzenia tych analiz. Uznano, że analiza kosztów i korzyści CBA, jak i analiza efektywności CEA są przydatnymi narzędziami do oceny programów ochrony środowiska przed hałasem (w opinii autora analizy te mogą być równie przydatne w innych opracowaniach środowiskowych). Analiza efektywności kosztowej CEA to technika, która odnosi się do kosztów programu ochrony środowiska, do jego kluczowych wyników lub korzyści. Pełna analiza kosztów i korzyści CBA wymaga tego, aby krok po kroku, próbując porównywać koszty z wartością pieniężną wszystkich (lub większości) wielu korzyści programu (np. dodatkowo z uwagi na zanieczyszczenia powietrza, wypadki itp.). Wymaga ona jednak wielu danych oraz wartości różnych wskaźników (a także procedur) i w warunkach polskich może być stosowana o wiele rzadziej w programach ochrony środowiska niż w innych opracowaniach, gdzie zwykle analizowane są rozwiązania wariantowe i dostępna jest większość danych szczegółowych.

6.1.5. Analiza CEA

CEDR w raporcie [58] zaleca stosowanie analizy kosztów-efektywności CEA (*ang. cost-effectiveness analysis*), jako podstawowego narzędzia w analizach, których celem jest porównanie wpływu na zdrowie ludzi i kosztów zastosowanych urządzeń ochrony środowiska. Dotyczy to szczególnie sytuacji, kiedy zarządzający drogą posiada określony budżet na zabezpieczenia oraz miejsca, w których należy dokonać wyboru rodzaju sposobu ochrony przed hałasem (*hot spots*). W przypadku braku procedur wykonywania analiz CEA, CEDR w krajach członkowskich zaleca [58] stosowanie prostej metody opartej na porównaniu całkowitych kosztów środków redukujących hałas z dokuczliwością hałasu w analizowanym obszarze przed i po zastosowaniu tych środków przy uwzględnieniu wariantów rozwiązań. Uzyskiwany jest w ten sposób wskaźnik efektywności kosztowej (*ang. Cost-Effectiveness Ratio – CER*), który można przedstawić za pomocą ogólnego wzoru:

$$CER = \frac{\text{Całkowity koszt rozwiązania}}{\text{Jednostki efektywności}} \quad (6.8)$$

Jednostki efektywności są miarą (konkretną wartością), istotną dla celów programu ochrony środowiska przed hałasem. W przypadku np. uznania jako priorytetu liczby domów narażonych na hałas, jednostkami efektywności będzie liczba domów, dla których zredukowano hałas. Dzięki temu można określić wartość „jednego euro za jednostkę

efektywności”. Wyniki te można porównywać następnie pomiędzy różnymi wariantami przyjętych rozwiązań ograniczających hałas.

W ramach szczegółowych zaleceń [58] zaproponowano następujący sposób wykonania uproszczonej analizy CEA:

- **Krok 1:** Obliczyć dla każdego wariantu całkowite koszty środka lub środków ograniczających hałas.
- **Krok 2a:** Obliczyć dla każdego wariantu rozwiązań liczbę osób (mieszkańców) narażonych na poziom hałasu L_{DWN} równy lub większy niż 45 dB przed zastosowaniem środków ograniczających hałas.
- **Krok 2b:** Obliczyć dla każdego wariantu liczbę osób (mieszkańców) narażonych na poziom hałasu L_{DWN} równy lub większy niż 45 dB po realizacji środków ograniczających hałas.
- **Krok 3a:** Obliczyć dla każdego wariantu rozwiązań, dla sytuacji przed realizacją środków ograniczających hałas całkowitą liczbę osób dotkniętych wysoką dokuczliwością hałasu dla osób narażonych na poziom hałasu L_{DWN} równy lub większy niż 45 dB. Liczbę tych osób można uzyskać dzięki iloczynowi liczby osób (Krok 2a) i procentu osób dotkniętych wysoką dokuczliwością hałasu (wzór 3.2, rozdz. 3.1.1), które zamieszkują w obszarze, gdzie poziom hałasu L_{DWN} jest równy lub większy niż 45 dB.
- **Krok 3b:** Obliczyć dla każdego wariantu rozwiązań, dla sytuacji po realizacji środków ograniczających hałas całkowitą liczbę osób dotkniętych wysoką dokuczliwością hałasu dla osób narażonych na poziom hałasu L_{DWN} równy lub większy niż 45 dB. Liczbę tych osób można uzyskać dzięki iloczynowi liczby osób (Krok 2b) i procentu osób dotkniętych wysoką dokuczliwością hałasu (wzór 3.2, rozdz. 3.1.1), które zamieszkują w obszarze, gdzie poziom hałasu L_{DWN} jest równy lub większy niż 45 dB.
- **Krok 4:** Obliczyć dla każdego wariantu rozwiązania, dla osób dotkniętych wysoką dokuczliwością hałasu różnicę przed (Krok 3a) i po (Krok 3b) zastosowaniu środków ograniczających hałas.
- **Krok 5:** Obliczyć dla każdego wariantu rozwiązania współczynnik efektywności kosztowej CER (ang. *cost-effectiveness ratio*), który definiowany jest jako: iloraz całkowitych kosztów do różnicy liczby osób dotkniętych wysoką dokuczliwością hałasu przed i po zastosowaniu środków ograniczających hałas.

Najlepszym wariantem rozwiązania, które jest najbardziej efektywne kosztowo jest to, które ma najniższy współczynnik efektywności kosztowej CER. Warto zwrócić uwagę, że w przypadku tej metody zakłada się, że rozwiązanie jest prawidłowe ze względów technicznych. Brak jest natomiast w niej powiązania wszystkich istotnych uwarunkowań, które wskazują, że urządzenia ochronne zostały prawidłowo dobrane. Należy zwrócić jednocześnie uwagę, że wskazywany do analiz współczynnik efektywności kosztowej (CER) obliczany, jako iloraz kosztów (nakładów) do efektywności, jako wartości różni-

cy zmniejszenia przyjętego priorytetu (efekt) nie jest tym samym co efektywność, która zgodnie z regułami ekonomii jest określana jako iloraz efektu do nakładów [149]. Dodatkowo zdaniem autora do kosztów (nakładów) powinno się uwzględnić poza kosztami budowy (wprowadzenia) rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem także koszty utrzymania, remontów i wymiany. Może to mieć bardzo duże znaczenie zwłaszcza w takich przypadkach jak ekrany akustyczne, które zlokalizowane blisko drogi muszą być niekiedy często wymieniane (ich trwałość z reguły nie przekracza 3–5 lat).

Podobnie jak analiza *CEA*, analiza *CBA* również korzysta z kosztów i korzyści programu jednak o wiele szerzej uwzględniając inne efekty (oddziaływania i ich efekty). Celem *CBA* jest osiągnięcie jak najlepszych wyników w zakresie wydatkowania środków, w porównaniu z kosztem przyjętych rozwiązań. Stąd analiza *CBA* jest analizą bardziej kompleksową niż *CEA*, rozszerzając zakres analizy w celu uwzględnienia wszystkich skutków dla osób objętych danym rozwiązaniem. W analizie tej można ująć efekty zanieczyszczeń powietrza, zmian klimatu, wypadków drogowych itd. Warunkiem jest jednak, aby każdemu analizowanemu efektowi przypisać wartość pieniężną co może być trudne ze względu na brak danych. Celem *CBA* jest osiągnięcie jak najlepszych wyników w kategoriach pieniężnych w porównaniu do kosztów. Odejmując koszty od korzyści uzyskuje się korzyści netto z zakładanych rozwiązań. W warunkach polskich możliwa jest do wykonania taka analiza [84, 137] jednak w programach ochrony środowiska przed hałasem wykonanie jej może być w praktyce niemożliwe ze względu na brak danych np. o wielkości emisji zanieczyszczeń do powietrza od niektórych substancji, liczbie wypadków itp.

6.1.6. Zintegrowana efektywność ekonomiczna, ekologiczna i społeczna

Decyzje, jakie podejmowane są obecnie przy wyborze rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem opierają się poza utartym poglądem, że ekran akustyczny jest niemal jedynym „właściwym” rozwiązaniem również na przesłankach związanych z obowiązującymi przepisami (standard jakości środowiska, który powinien być dotrzymany na granicy pasa drogowego). Równie ważnymi czynnikami są znajomość metod ochrony i ich możliwości, jak i czas oraz dostępne środki na projektowanie i wykonanie. Decyzje te niejednokrotnie są oparte na pojedynczych kryteriach z niewielkim udziałem innych równie ważnych, jak np. dalsze ich utrzymanie. W większości analiz poza rozwiązaniami skutecznymi niezbędne jest uwzględnienie również innych kryteriów wyboru. Ogólne uwarunkowania i kryteria w projektowaniu dróg podano w podrozdziale 6.1.1. Wskazują one na czynniki, które powinny być brane pod uwagę w czasie planowania i projektowania dróg – mogą być one również wykorzystywane w doborze urządzeń chroniących przed hałasem drogowym. Ze względu na bardzo dużą grupę uwarunkowań i kryteriów oraz stosowanych wskaźników nie jest możliwe jednoznaczne wskazanie, które z nich są lepsze czy też ważniejsze. Decyzje związane z wyborem wariantu konkretnego rozwiązania powinny być oparte na jasnych kryteriach i wskaź-

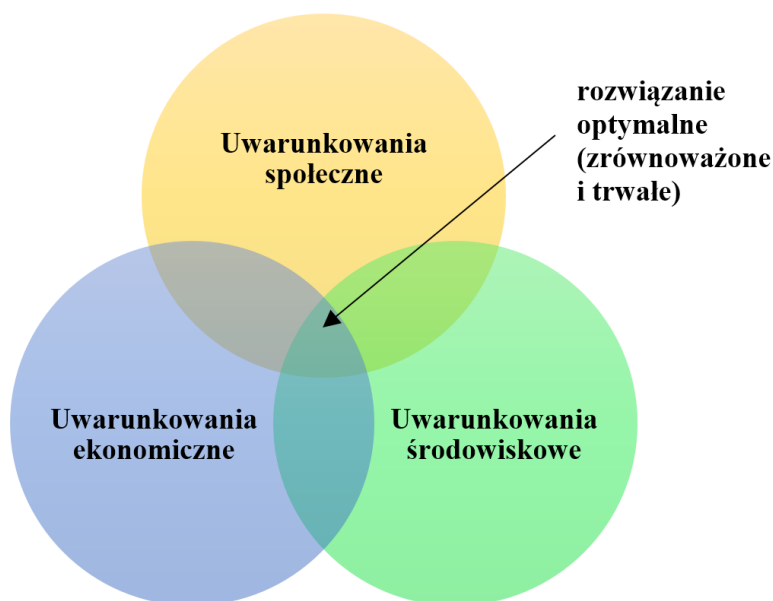
nikach oraz poprzedzającej analizę, strategii z wyraźnie określonym celem lub celami. Dotychczas obserwowane działania zorientowane są w wielu przypadkach na uzyskanie konkretnych decyzji administracyjnych (np. związanych z lokalizacją drogi) i często ich celem staje się możliwość uzyskania tej decyzji bez względu na szersze uwarunkowania inwestycji. W przypadku wyboru rozwiązań chroniących w programach ochrony środowiska przed hałasem celem jest często wykonanie samego opracowania, które uzyska poparcie (często wyłącznie polityczne) w głosowaniu nad uchwałą wprowadzającą ten program. Efektem mierzalnym programów wykonywanych w kolejnych rundach powinien być stopień ich realizacji (trudno jest się doszukać tych informacji w sporządzonych do tej pory programach). W przypadku rozwiązań chroniących przed hałasem w innych opracowaniach (zwłaszcza raportach o oddziaływaniu przedsięwzięcia na środowisko) brak strategii i realnego celu często związany jest z koniecznością całkowitego zabezpieczenia środowiska przed hałasem. Z reguły powoduje to szereg problemów z podjęciem decyzji o tak kosztownych inwestycjach. Próby ograniczania kosztów zabezpieczeń z kolei mogą być przyczyną problemów uzyskiwania decyzji administracyjnych związanych z realizacją inwestycji. Takie działanie często powoduje bardzo duże zwiększenie wartości inwestycji, zwłaszcza kiedy nie jest to nowa droga a przebudowa np. polegająca na wymianie nawierzchni (koszt zabezpieczeń akustycznych może być wówczas wielokrotnie większy niż wartość robót). Wobec powyższego, aby decyzja co do wyboru urządzeń była optymalna i spełniała zarówno uwarunkowania społeczne, ekonomiczne i środowiskowe musi być ona oparta nie na określonych zasadach przy wykorzystaniu metod oceny i kryteriach z nimi związanych.

Decyzje o wyborze rozwiązań drogowych i środków chroniących przed hałasem powinny być oparte na zasadach zrównoważonego i trwałego rozwoju, które często nazywane są również ekorozwojem. Nie wchodząc w szczegóły i dyskusję na temat definicji ekorozwoju dla potrzeb tych rozważań i analiz przyjęto za Prof. F. Piontkiem [151], że przez zrównoważony i trwały rozwój (ekorozwój) rozumie się: ***kształtowanie i poprawę jakości życia współczesnych i przyszłych pokoleń poprzez właściwe kształtowanie proporcji między poszczególnymi rodzajami kapitału: ekonomicznym, ludzkim i przyrodniczym.***

Takie podejście nie tylko do wyboru wariantów lokalizacyjnych drogi, ale i do rozwiązań chroniących przed hałasem powoduje, że powinny być to rozwiązania optymalne z punktu widzenia ekonomicznego, społecznego i środowiskowego – decyzja o ich zastosowaniu staje się decyzją zgodną z zasadami zrównoważonego i trwałego rozwoju. Analizując powyższą definicję na przykładzie dwóch wariantów: zastosowania ekranów akustycznych w otoczeniu odcinka drogi i uspokojenia ruchu na tym odcinku można dojść do wniosku, że wynik nie będzie już tak jednoznaczny, jak to miało miejsce przy wyborze rozwiązań ochronnych do tej pory. Ekran akustyczny, które są szybkie w montażu i nie zajmujące wiele dodatkowego miejsca, ale równocześnie trudne w utrzymaniu oraz o niewielkiej trwałości, dodatkowo mogą przyczyniać się do pogorszenia bez-

6.1. Uwarunkowania i kryteria w planowaniu ...

pieczeństwa ruchu drogowego (np. brak widoczności na skrzyżowaniach) trudno jest porównać i zdecydować o ich wyborze wobec uspokojenia ruchu, którego celem poza poprawą stanu środowiska jest zorientowane przede wszystkim na poprawę bezpieczeństwa ruchu drogowego, poprawę ładu przestrzennego w tym uczynienie otoczenia drogi bardziej przyjaznego dla człowieka. Ocena tego rozwiązania przez pryzmat kapitału ekonomicznego, ludzkiego i przyrodniczego (zgodnie z definicją zrównoważonego i trwałego rozwoju) powoduje, że konieczne jest uwzględnienie zasady zgodności [151], która mówi, że jaka natura podmiotu ocenianego taka ocena rodzaju efektywności, metodyka oceny i mechanizmy oddziaływania. Jeśli założy się zatem, że rozwiązanie chroniące przed hałasem ma nie tylko chronić przed hałasem, ale równocześnie spełniać wiele innych uwarunkowań (np. bezpieczeństwo ruchu drogowego) to ocena efektywności tego rozwiązania nie może być zorientowana wyłącznie ze względu na ograniczenie poziomu hałasu, a metodyka oceny poza oceną z punktu widzenia hałasu musi zawierać również inne efekty. Mechanizmy oddziaływania (środki ochrony) muszą być zorientowane nie tylko wyłącznie na ograniczenie hałasu. Na rys. 6.1 pokazano schematycznie ideę wyboru optymalnego rozwiązania drogowego i środków ochrony przed hałasem, które uwzględniają efekt zrównoważonego i trwałego rozwoju.



Rys. 6.1. Idea wyboru optymalnego rozwiązania drogowego i środków ochrony przed hałasem

Źródło: opracowanie własne

Zgodnie z zasadą zgodności od rodzaju ocenianego podmiotu zależy ocena rodzaju efektywności. Wyróżnia się dwa rodzaje efektywności: ekonomiczną i społeczną [151]. Efektywność społeczną E_s można zapisać za pomocą wzoru [151]:

$$E_s = \frac{K_s}{N_s} \quad (6.9)$$

gdzie:

- K_s – efekt społeczny – korzyści społeczne (pozagospodarcze),
- N_s – nakład ponoszony na uzyskanie efektu społecznego lub korzyści pozagospodarczych.

W ramach efektywności społecznej należy jeszcze wyróżnić efektywność ekologiczną E_{ekol} którą można zapisać za pomocą wzoru [151]:

$$E_{ekol} = \frac{S_e}{N_e} \quad (6.10)$$

gdzie:

- S_e – efekt ekologiczny (bezpośredni i pośredni, w tym straty ekologiczne, które nie wystąpiły w wyniku poniesionych nakładów ekologicznych N_e),
- N_e – nakład (ekologiczny) ponoszony na uzyskanie efektu ekologicznego.

Efekt ekologiczny S_e może być analizowany jako oszacowanie efektu oddziaływania-skutek na podstawie wskaźników wskazujących stan przed i po zastosowaniu urządzeń ochronnych (wskaźnik M, wysoka dokuczliwość, wysokie zaburzenia snu, liczba domów i powierzchnia terenów w zakresie ponad dopuszczalnego oddziaływania hałasu). W takich sytuacjach S_e często przyjmowany jest jako różnica pomiędzy korzyścią i kosztami (stratami) i różnica ta nie może być mniejsza od zera (korzyści powinny przewyższać koszty). W przypadku bardzo kosztownych zabezpieczeń przed hałasem oraz perspektywą ciągłego zmniejszania się emisji hałasu w związku ze zmianami jakości parku samochodowego (nowsze pojazdy, nowe konstrukcje z alternatywnym napędem) [21] nie można się z tym do końca zgodzić. Dlatego najlepiej jest analizować pełną postać wzoru powyższego wzoru 6.10. Stwierdzenie to uzasadniają badania empiryczne [149], z których wynika, że opłacalne ekonomicznie jest eliminowanie tylko 60–90% strat ekologicznych – nakłady ponoszone na pozostałe 10–40% wartości strat są wyższe od ewentualnych efektów i nieopłacalne. W przypadku hałasu drogowego eliminowanie nawet 60% strat ekologicznych może być mało realne zwłaszcza na początku działań – głównie ze względu na ponoszone koszty.

Wykonanie oceny dla obu rodzajów efektywności (społecznej i ekologicznej) może mieć charakter jakościowy jak i częściowo ilościowy. Wynik tych ocen w dużej części będzie zależał od przyjętych priorytetów (celów) oraz odpowiednio stosowanych kryteriów i wskaźników. Cele w tych ocenach powinny być przede wszystkim powiązane zarówno z kryteriami (standardami) środowiskowymi w przypadku ochrony przed hałasem (dopuszczalne poziomy hałasu), jak i kryteriami społecznymi (np. wysoka dokuczliwość

hałasu, bezpieczeństwo ruchu itp.). Zaleca się, aby przy ustalaniu celów i kryteriów stosować ich hierarchizację, która w [151] jest wskazywana jako obowiązująca zasada. Zgodnie z [151] w przypadku efektywności społecznej (i związanej z nią ekologicznej) ważna jest zasada, że stopień realizacji przyjętych celów jest nadrzędny w stosunku do nakładu na ich realizację. Ta zasada nie może być traktowana dosłownie, jak to ma miejsce obecnie przy wyborze wariantów (lokalizacji drogi, urządzeń ochrony środowiska itp.) ponieważ obowiązuje także zasada zabraniająca marnowania wydatkowanych środków (należy je wręcz oszczędzać). Wzięcie pod uwagę tych dwóch zasad daje efekt powiązania efektywności społecznej, ekologicznej i ekonomicznej⁸. Zrealizowanie zasad nadrzędności celu do wydatkowanych środków i jednocześnie ich niemarnowania jest możliwe dopiero wtedy, kiedy analizowane są co najmniej dwa nowe warianty rozwiązań. Stąd dla celu (priorytetu) zmniejszenia wpływu hałasu na zdrowie ludzi poprzez zmniejszenie emisji hałasu można przyjąć warianty, gdzie analizowane będą przykładowe rozwiązania polegające na zastosowaniu:

- ekranów akustycznych,
- nawierzchni redukującej hałas,
- zmienionej organizacji ruchu,
- uspokojenia ruchu.

Przyjęty w ten sposób wariant uzasadnia wydatkowanie nakładów dla realizacji celu, jakim jest zmniejszenie wpływu hałasu na zdrowie ludzi. Z kolei minimalizacja nakładów na realizację elementów składowych tego wariantu zapewnia efektywność ekonomiczną z punktu widzenia efektywności społecznej w tym ekologicznej. W tej sytuacji analiza i przyjmowanie jako jedynego kryterium np. kosztu poniesionego na ograniczenie hałasu o 1 dB nie ma uzasadnienia i może nawet prowadzić do błędów decyzyjnych. Aby jednak rozwiązanie można było być traktowane jako optymalne (zrównoważone i trwałe) konieczne jest zintegrowanie efektywności społecznej i ekologicznej (jako jej składowej) z efektywnością ekonomiczną. Efektywność ekonomiczna E_e wyrażana jest za pomocą wzoru [151]:

$$E_e = \frac{P}{N} \geq r \quad (6.11)$$

gdzie:

- P – efekt (ekonomiczny),
- N – nakład ponoszony na uzyskanie efektu ekonomicznego,
- r – kryterium odniesienia – np. stopa procentowa (rynek pieniężny) lub średnia stopa zysku (w gospodarce).

⁸ Zgodnie z rozporządzeniem dotyczącym zakresu programu ochrony środowiska przed hałasem [182] w programie należy ocenić efektywność ekologiczną i ekonomiczną zadań (celów) we wzajemnym ich powiązaniu (par. 6, pkt 3 [182], rozdz. 2.1.2). W przypadku raportów o oddziaływaniu przedsięwzięcia na środowisko należy porównać oddziaływania wariantów (art. 66, ust. 1, pkt 6a [143]),

W przypadku efektywności ekonomicznej zarówno efekt, jak i nakład są mierzalne i osiągają określoną wartość, która powinna być odniesiona do konkretnego kryterium. Poza podanymi powyżej kryteriami finansowymi dla kryterium odniesienia r mogą to być normy prawne wykorzystujące różnego rodzaju kryteria. Efektywność ta wpływa na wzrost gospodarczy. Należy zwrócić uwagę, że do oceny efektywności ekonomicznej przeważnie używana jest opisywana powyżej metoda CBA, która uwzględnia przede wszystkim efekty ekologiczne i społeczne [150]. Dzieje się tak w przypadku inwestycji niekomercyjnych (analizowane tutaj przypadki należą właśnie do takich). W przeciwnym razie nie byłaby spełniona zasada zgodności: charakter ocenianego podmiotu (inwestycji) – rodzaj efektywności – metoda oceny.

W zrównoważonym rozwoju przy zintegrowaniu celów ekonomicznych, ekologicznych i społecznych wzór na zintegrowaną efektywność ekonomiczną, ekologiczną i społeczną E_{ees} przyjmuje ogólną postać [151]:

$$E_{ees} = E_e + E_{ekol} + E_s = \frac{P + S_e + K_s}{N + N_e + N_s} \geq K_r \quad (6.12)$$

gdzie:

- K_r – teoretycznie przyjęte kryteria odniesienia, tj. stopa procentowa na rynku pieniężnym, średnia stopa zysku, a także obowiązujące unormowania prawne dotyczące kapitału ludzkiego, przyrodniczego oraz ochrony szeroko rozumianych wartości pozaekonomicznych,
- pozostałe oznaczenia jak w powyższych wzorach.

W praktyce do oceny efektywności różnego rodzaju inwestycji bezpośrednio nie stosuje się wyróżnionych powyżej rodzajów efektywności [151] choćby ze względu na analizowane niekomercyjne rozwiązania. Stosuje się natomiast procedury, metodyki i wskaźniki, które powinny być oparte na opisywanej wcześniej zasadzie zgodności (w zależności od rodzaju efektywności – metoda oceny). Tego rodzaju analizy nazywane są rachunkiem sozoeconomicznym, który jest zbiorem określonych procedur postępowania wykorzystujących właściwe metody oraz uwzględniające odpowiednie kryteria w celu ukazania wielowariantowej opłacalności proponowanych rozwiązań [151]. Rachunek sozoeconomiczny zapewnia tym samym wdrażanie rozwoju zrównoważonego i trwałego. Jednocześnie należy zwrócić uwagę, że rachunek ten nie stanowi jednoznacznego narzędzia i kryterium do podejmowania decyzji o wyborze konkretnego wariantu czy też rozwiązania. Co więcej w większości przypadków nie uwzględnia on wielu aspektów technicznych, które zwłaszcza na etapie planowania i projektowania koncepcyjnego mogą nie być możliwe do zmonetyzowania a mogą być użyte kryteria jakościowe w ocenie. Efekt ten opisano w kolejnym rozdziale.

6.1.7. Oszacowanie efektywności zintegrowanej

Metoda CBA będąc właściwą do oceny efektywności ekonomicznej E_e w pewnym zakresie jest metodą oceny zintegrowanej efektywności ekonomicznej, ekologicznej i społecznej E_{ees} dla projektów inwestycyjnych [150]. Dlatego też zastosowanie analizy CBA będzie wiązało się tak jak już wspomniano z metodą zintegrowanej efektywności E_{ees} . Za taką metodę można uznać metody opisywane w powyższym rozdziale stosowane w Niebieskiej księdze Jaspers [137] oraz wyniki programu badawczego HEATCO [84]. Niebieska księga Jaspers w zakresie analiz dla hałasu drogowego powstała na bazie programu HEATCO. W wynikach programu HEATCO (nazywana dalej metodą HEATCO) w celu wyliczenia kosztów hałasu zaleca się ich stosowanie dla każdej osoby narażonej na hałas (wysoka dokuczliwość hałasu) na podstawie danych określonych dla konkretnego kraju. W metodzie HEATCO i kosztach hałasu zostały uwzględnione łączne oddziaływanie od:

- dokuczliwości hałasu (wskaźnik wysokiej dokuczliwości hałasu), jakiej doświadczają pojedyncze osoby,
- wpływu na zdrowie, który jest związany z długotrwałym narażeniem na hałas (przede wszystkie skutki zdrowotne związane ze stresem, nadciśnieniem i zawałem mięśnia sercowego).

Przyjęto, że oba czynniki są od siebie niezależne, tj. potencjalne długoterminowe ryzyko zdrowotne nie jest brane pod uwagę w dokuczliwości hałasu. Koszty hałasu dla roku 2002 na osobę dotkniętą wysoką dokuczliwością zostały przygotowane dla większości krajów europejskich w tym także dla Polski. W metodzie HEATCO rekomendowane są obliczenia kosztów hałasu w ramach analizy społeczno-ekonomicznej w kolejnych krokach⁹:

- **Krok 1:** Obliczenie liczby osób narażonych na poszczególne poziomy ekspozycji hałasu (wysoka dokuczliwość) dla poszczególnych wariantów analiz (w tym dla wariantu istniejącego). W przypadku analiz w programach ochrony środowiska należy obliczyć liczbę osób narażonych na hałas w przedziałach co 5 dB – zgodnie z wymaganiami dla map akustycznych.
- **Krok 2:** Przygotowanie tabeli współczynników kosztów poprzez zwiększenie ich wartości zgodnie ze wzrostem PKB per capita (na osobę) na każdy rok analizy. W metodzie HEATCO zaleca się zwiększenie wartości pieniężnych kosztów na przyszłe lata w oparciu o domyślny współczynnik elastyczności w stosunku do wzrostu PKB per capita na poziomie 1,0 (w przypadku zbyt wysokich kosztów zaleca się przyjąć 0,7). W Niebieskiej księdze Jaspers [137] zaleca się przyjęcie współczynnika elastyczności 0,8 [137].

⁹ Do oryginalnego opisu wprowadzono zmiany i wyniki obliczeń mające na celu praktyczne wykorzystanie metody HEATCO (dla roku 2016).

6. Modelowanie decyzji dotyczących wyboru ...

Biorąc pod uwagę wzrost PKB per capita w Polsce od roku 2002 wartość kosztów hałasu KH_x w roku x (przyszła wartość pieniądza) można obliczyć na podstawie wzoru [9]:

$$KH_x = KH_{2002} \cdot (1 + r)^n \quad (6.13)$$

gdzie:

- KH_{2002} – wartość kosztów hałasu w 2002 r.,
- r – współczynnik elastyczności (stopa procentowa) – przyjęto wartość 0,6 dla lat 2002–2016 na podstawie średniego wzrostu PKB per capita [251],
- n – liczba lat (liczba okresów) – przyjęto 14 lat (lata 2002–2016).

Wartości kosztów hałasu dla roku 2002 i 2009 podano w tabl. 6.2.

Tabl. 6.2. Koszty hałasu na jedną osobę w roku 2002 i 2016

$L_{DWN}^{1)}$ [dB]	Koszt w 2002 r. ²⁾ [euro/osoba/rok]	Koszt w 2016 r. ²⁾ [euro/osoba/rok]
43	2	4,52
44	2	4,52
45	3	6,78
46	3	6,78
47	3	6,78
48	4	9,04
49	4	9,04
50	4	9,04
51	5	11,30
52	5	11,30
53	6	13,57
54	6	13,57
55	6	13,57
56	7	15,83
57	7	15,83
58	8	18,09
59	8	18,09
60	9	20,35
61	9	20,35

6.1. Uwarunkowania i kryteria w planowaniu ...

$L_{DWN}^{1)}$ [dB]	Koszt w 2002 r. ²⁾ [euro/osoba/rok]	Koszt w 2016 r. ²⁾ [euro/osoba/rok]
62	10	22,61
63	10	22,61
64	11	24,87
65	12	27,13
66	12	27,13
67	13	29,39
68	13	29,39
69	14	31,65
70	14	31,65
71	35	79,13
72	39	88,18
73	42	94,96
74	45	101,74
75	48	108,52
76	51	115,31
77	54	122,09
78	57	128,87
79	60	135,65
80	64	144,70
81	67	151,48

¹⁾ Podane wartości są większe lub równe.

²⁾ Koszty hałasu z uwzględnieniem parytetu siły nabywczej (*ang. Purchasing Power Parity – PPP*)

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [84]

- Należy zwrócić uwagę, że w przypadku prognoz hałasu w kolejnych latach emisja hałasu od pojedynczych pojazdów może spadać [21] i wyniki analiz mogą być zawyżone. Efekt aktualnej emisji będzie już uwzględniany od roku 2018 po wprowadzeniu nowej metody obliczeniowej zgodnie z Dyrektywą [48].

- **Krok 3:** Obliczenie oddziaływania (poprzez obliczenie iloczynu liczby osób w danym zakresie ekspozycji hałasu i wartości wskaźnika wysokiej dokuczliwości dla danego zakresu ekspozycji – wzór 3.2) i kosztów (poprzez obliczenie iloczynu kosztu dla osoby z tabl. 6.2 i liczby osób ekspozycyjnych na hałas o wysokiej dokuczliwości) dla wszystkich wariantów (oznaczane często jako C – ang. *cost*). Obliczenia te wykonywane są na podstawie wyników map akustycznych. W przypadku innych opracowań środowiskowych obliczenia w tym kroku mogą zostać wykonane na podstawie zaleceń Niebieskiej księgi Jaspers [137], gdzie wykorzystywana jest dokuczliwość hałasu oraz zakres przedziałów emisji opartych na wskaźniku L_{Aeq} .
- **Krok 4:** Obliczenie różnicy kosztów pomiędzy kosztami dla wariantu w stanie istniejącym a kosztami poszczególnych wariantów. Zgodnie z Niebieską księgą Jaspers [137] różnica kosztów obliczona w tym kroku stanowi korzyść (efekt) społeczno-ekonomiczną (*netto*) dla kosztów hałasu (oznaczana często jako B – ang. *benefit*), która również uwzględnia efekt ekologiczny. Wartość tej różnicy w stosunku do wartości kosztów dla stanu istniejącego wyrażona w procentach proponuje się uznać jako wskaźnik zintegrowanej efektywności ekonomicznej, ekologicznej i społecznej E_{es} .

- **Krok 5:** Raport kosztów i oddziaływań (różnica pomiędzy liczbą osób dotkniętych wysoką dokuczliwością w wariancie istniejącym i poszczególnych wariantów).

Należy zauważyć, że podana procedura dotyczy jedynie kosztów hałasu i należy traktować ją jako duże uproszczenie, ponieważ każda inwestycja może powodować szereg dodatkowych kosztów. W przypadku bardziej skomplikowanych inwestycji (złożonych rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających) konieczna może być analiza CBA uwzględniająca dalsze koszty i korzyści. Analiza ta z reguły dotyczy poza hałasem drogowym takich czynników wpływających na koszty i korzyści jak [137]:

- rodzaj użytkowników pojazdów,
- eksploatacja pojazdów,
- zmniejszenie liczby wypadków,
- emisja zanieczyszczeń do powietrza,
- zmiany klimatu.

Możliwości wykonania tych analiz będzie jednak uzależnione od wielu danych, których zwłaszcza dla programów ochrony środowiska z reguły nie przygotowuje się i nie posiada. Stąd w dalszej części opisu i badań wskazane zostaną dodatkowe możliwości analiz wpływu na wybór rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem przy wykorzystaniu dodatkowej metody.

Powyższe uwarunkowania jako kryteria doboru urządzeń zostaną użyte w dalszych opisach i badaniach.

6.2 Analityczny proces hierarchiczny AHP – założenia ogólne do modelu decyzyjnego w zakresie wyboru rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem

Opisany dalej model dotyczący wyboru rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem oparto na następujących założeniach:

- Model został zbudowany na podstawie analitycznego procesu hierarchicznego AHP.
- Dla potrzeb modelu stworzono grupy kryteriów i odpowiadające im subkryteria – możliwe jest jednak wprowadzenie dodatkowych elementów pod warunkiem zachowania zasad budowy struktury hierarchicznej (opis zasad podano w dalszej części).
- Model składa się w ramach struktury hierarchicznej z czterech poziomów: celu decyzyjnego, trzech grup kryteriów (społecznego, środowiskowego i technicznego, odpowiadającym kryteriom podkryteriów oraz wariantów rozwiązań.
- Ocena (porównania parami) powinna być wykonana przez grupę specjalistów i ewentualnie projektantów związanych z rozwiązaniami drogowymi.
- Model może być wykorzystywany we wszystkich rodzajach analiz i opracowaniach środowiskowych, gdzie stosowane są co najmniej dwa warianty rozwiązań.
- Model umożliwia wybór optymalnego wariantu rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym z uwzględnieniem kryteriów ilościowych i jakościowych.
- Dzięki kryteriom i podkryteriom możliwe jest także prowadzenie innych rodzajów analiz związanych np. z wyborem strategii ochrony przed hałasem a nawet analizą kosztów i korzyści pod warunkiem budowy dwóch niezależnych modeli (korzyści i kosztów). Przypadki te nie zostały opisane w tej monografii.

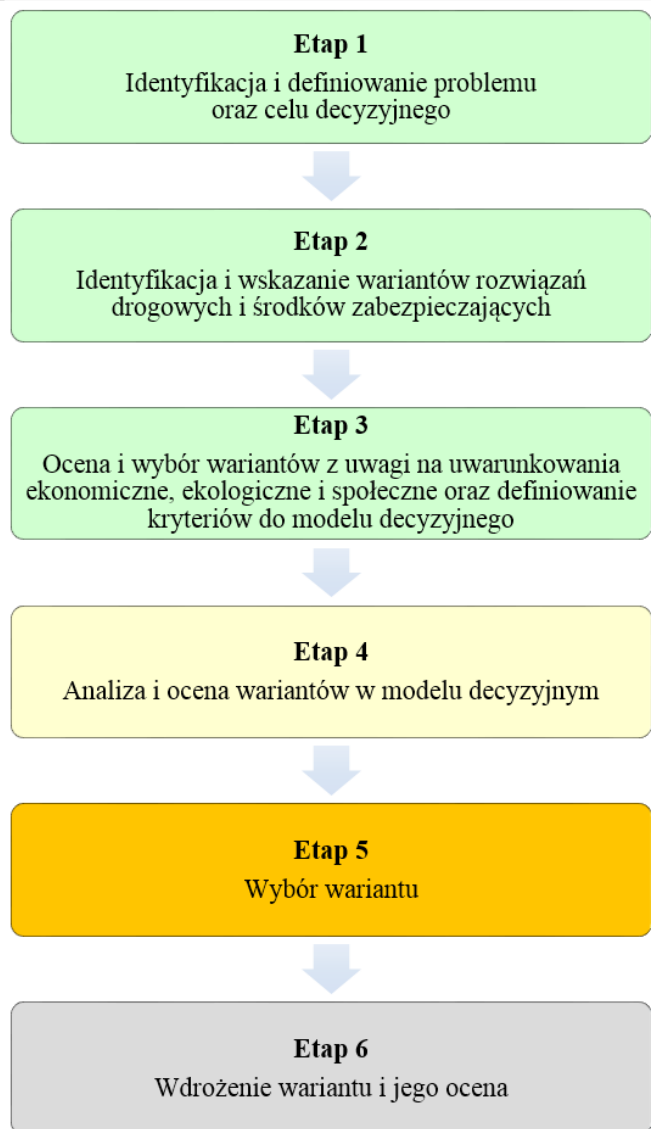
W dalszych częściach tego rozdziału wprowadzono szczegółowy opis zastosowania metody AHP oraz przedstawiono poszczególne etapy budowy struktury hierarchicznej modelu, identyfikacji celu decyzyjnego, wprowadzenia kryteriów i podkryteriów, porównań parami oraz oceny i wyboru wariantów. Każdy rozdział związany z modelem decyzyjnym ma również swoje odzwierciedlenie w przykładzie, dla którego zostały wykonane badania i analizy szczegółowe związane z wyborem optymalnego rozwiązania chroniącego przed hałasem drogowym (rozdz. 7).

6.3. Schemat postępowania w budowie modelu wyboru rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym

Podstawowym zadaniem w metodzie AHP jest budowa modelu decyzyjnego, w którym struktura hierarchiczna umożliwia zebranie w jednym miejscu wszystkich kryteriów wpływających na ostateczną decyzję wyboru wariantu. Na rys. 6.2 przedstawiono ogólny schemat modelu decyzyjnego, którego celem jest wybór optymalnego rozwiązania drogowego i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym.

6. Modelowanie decyzji dotyczących wyboru ...

W kolejnych punktach opisano poszczególne etapy procesu decyzyjnego w kontekście analizowanego zagadnienia, tj. wyboru optymalnych rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym.



Rys. 6.2. Schemat i etapy modelu decyzyjnego wyboru rozwiązania drogowego i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [8, 169]

6.3.1. Identyfikacja i definiowanie problemu oraz celu decyzyjnego – etap 1

Dane przekazywane z opracowanych map akustycznych zawierają poza materiałami graficznymi (klika rodzajów map zagrożenia hałasem) także standardowe dane liczbowe takie jak liczba mieszkańców, obiektów, powierzchnia terenu w poszczególnych przedziałach emisji hałasu. Identyfikacja problemu na podstawie tych danych jest mocno ograniczona i często niewystarczająca. Niezbędna jest również wiedza o terenie oraz samej drodze, dla której wykonywany jest program ochrony środowiska przed hałasem. Zaleca się w tym celu wykonanie wizji w terenie i przegląd terenu oraz podstawowych elementów drogi takich jak stan nawierzchni, otoczenie drogi itp. W przypadku innych opracowań środowiskowych, danych dotyczących terenu i drogi może być o wiele więcej niż w przypadku programów ochrony środowiska przed hałasem. Decyzje jednak w tego typu opracowaniach z reguły dotyczą już o wiele bardziej szczegółowych wariantów rozwiązań i co z tym związane decyzji.

W obu rodzajach opracowań źródłem informacji mogą być formalne i nieformalne konsultacje społeczne a także informacje od zarządcy drogi o miejscach protestów i postulatów mieszkańców (*hot spots*). Wszystkie te dane umożliwiają identyfikację oraz zdefiniowanie problemu oraz celu decyzyjnego.

W pierwszym etapie budowy modelu należy określić co jest faktycznym przedmiotem decyzji. Z reguły tym przedmiotem jest rozwiązanie problemu uciążliwości akustycznych dzięki wyborowi jednego wariantu spośród założonych wariantów ochrony przed hałasem. Należy zwrócić uwagę, że ten sam problem można sformułować na wiele różnych sposobów. Podczas analizy i definiowania problemu decyzyjnego z reguły analizowane są pytania związane z tym problemem. Na przykład:

- Który wariant zabezpieczeń akustycznych będzie najlepszy ze względu na hałas?
- Który wariant zabezpieczeń akustycznych będzie najlepszy ze względu na założone kryteria?

Wprowadzenie metod i urządzeń ochronnych w programie ochrony przed hałasem (również i w innych opracowaniach środowiskowych w części analiz akustycznych) najczęściej rodzi tego typu pytania. Niestety w większości zapadających decyzji pytania te są obecnie albo zbyt uproszczone albo sprowadzają się do jednej konkretnej cechy (kryterium) – głównie rodzaju rozwiązania, które powinno być zastosowane. Aby problem decyzyjny nie był zbyt uogólniony należy sprowadzić go do konkretnej perspektywy, np. mieszkańca, zarządcy drogi, organu wydającego decyzję. Istnieje możliwość przeprowadzenia analizy grupowej (przy udziale różnych stron) jednak z dotychczasowego doświadczenia wynika, że podczas konsultacji społecznych, gdzie występuje wiele grup interesów tego typu analiza może nie przynieść rozstrzygnięcia, a wręcz w wielu przypadkach pogorszyć sytuację niepokoju i emocji społecznych. Analiza taka może być wykonywana jedynie w sytuacji, kiedy poszczególnych zainteresowanych reprezentują pojedyncze osoby lub ich przedstawiciele.

Cel decyzyjny, który nazywany jest również nadrzędnym celem (kryterium) decyzyjnym (*ang. goal*) powinien odpowiadać na pytanie co się chce osiągnąć poprzez rozwiązanie danego problemu decyzyjnego [169].

Stąd powyższe pytania powinny być inaczej sformułowane:

- Który wariant zabezpieczeń akustycznych jest najlepszy dla mieszkańców z uwagi na ich zdrowie?
- Który wariant zabezpieczeń akustycznych jest najlepszy z punktu widzenia techniczno-ekonomicznego oraz minimalizacji wpływu hałasu na zdrowie mieszkańców? Spośród dwóch powyższych pytań pierwsze sugeruje, że w analizie mogą być wzięte pod uwagę jedynie czynniki zdrowotne. Drugie natomiast zwiera zbyt wiele określeń i z góry może wprowadzać subiektywizm do ocen. Dlatego lepszym wydaje się pytanie:
- Który wariant jest optymalny społecznie, ekonomicznie i technicznie dla mieszkańców?

Jak można zauważyć powyższe pytanie nie koncentruje się nad konkretnym problemem i w wielu sytuacjach będzie nadal zbyt ogólne, ponieważ każde rozwiązanie powinno być optymalne ze względu na różnego rodzaju kryteria. Jak w dalszym przykładzie się okaże pytanie to jest faktycznie jeszcze zbyt ogólne, ponieważ, aby zidentyfikować problem należy określić szereg wskaźników związanych z wpływem hałasu drogowego na ludzi, porą największego oddziaływania na ludzi itp.

Należy pamiętać, że pytanie może być zadane równie dobrze z perspektywy administracji ochrony środowiska, jak i zarządcy drogi. Decydem co do środków i możliwości jest z reguły zarządca drogi i on powinien mieć podstawowy wpływ na propozycje rozwiązań w programach ochrony przed hałasem i innych opracowaniach środowiskowych. Decyzja nie może być jednak podejmowana tylko ze względu na środki finansowe, czy czas realizacji, ale i również wpływ hałasu na zdrowie ludzi.

Określenie celu decyzyjnego może być bardzo skomplikowanym zadaniem i może ono wymagać w niektórych przypadkach dodatkowych analiz. W praktyce, aby prawidłowo zidentyfikować i sformułować problemy i cel decyzyjny niezbędny może być na tym etapie udział specjalistów (ekspertów). W metodzie AHP zaleca się, aby specjalistami były osoby posiadające wiedzę merytoryczną i doświadczenie. W przypadku wyboru rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym powinni to być przedstawiciele kilku specjalności w zależności od liczby problemów i zagadnień, jakie ujawniają się podczas wstępnych analiz. W zespole takim powinni się znaleźć specjaliści budownictwa drogowego i akustyki (wliczając w ten zespół przedstawicieli zarządców dróg, administracji ochrony środowiska i zamawiającego program ochrony środowiska przed hałasem lub inne opracowanie środowiskowe). W zależności od problemów wpływających na sformułowanie celu decyzyjnego mogą to być jeszcze specjaliści związani z: inżynierią ruchu drogowego (organizacją ruchu i systemami ITS), bezpieczeństwa ruchu drogowego, transportu, konstrukcji budowlanych, architektury

6.3. Schemat postępowania w budowie modelu ...

krajobrazu itd. Rola specjalisty (eksperta) w modelu decyzyjnym jest bardzo ważna i jego opinie oraz oceny są zdecydowanie stawiane wyżej niż intuicyjne oceny niespecjalistów [169], którzy często jeszcze są bardzo mocno związani emocjonalnie z problemem. Specjaliści, którzy biorą udział w definiowaniu celu i później analizie powinni być obiektywni – jest to niezwykle trudne ze względu na wiele czynników powodujących różnego rodzaju subiektywne opinie i oceny w przypadku niektórych rozwiązań ochronnych (np. oceny co do zastosowania różnego rodzaju nawierzchni, ekranów akustycznych, technologii itp.). W przypadku prowadzących analizy powinni oni mieć na względzie subiektywizm oceny i reagować w sytuacjach, kiedy opinie i decyzje będą miały tego typu charakter.

W celu prawidłowej identyfikacji problemu i sformułowania celu decyzyjnego powinno się wykonać analizę wskaźników dotyczących oddziaływania hałasu na ludzi i otoczenie dla stanu istniejącego (dalej nazywanego także wariantem istniejącym i oznaczanym jako W0) podanych w tabl. 6.3 i na rys. 6.3.

Tabl. 6.3. Zestawienie wskaźników dotyczących oddziaływania hałasu na ludzi i otoczenie

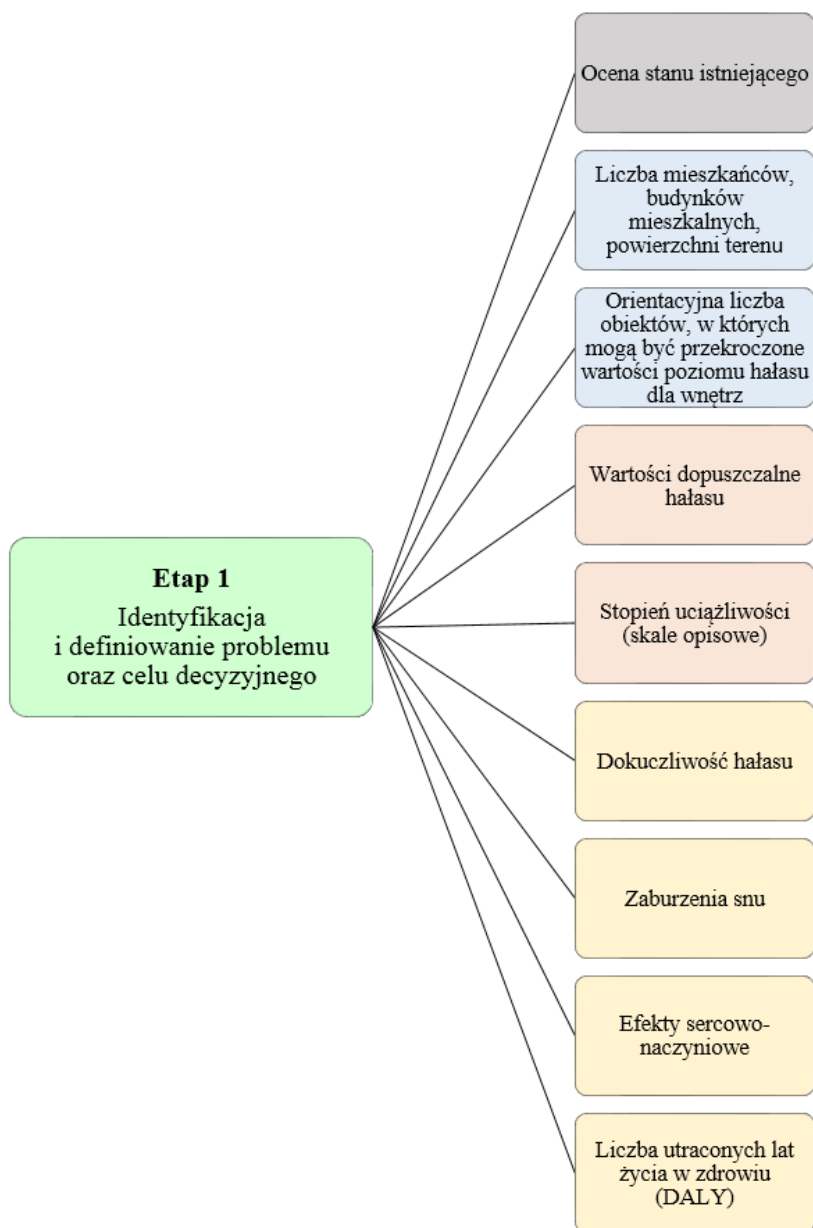
Wskaźnik	Uwagi
Wskaźniki opisowe	
Ocena stanu istniejącego	Podstawą oceny stanu istniejącego jest wizja w terenie, która powinna być wykonana bez względu na to, czy decyzja będzie podejmowana dla nowej inwestycji czy istniejącego obiektu (drogi, skrzyżowania itd.). W przypadku istniejących obiektów drogowych możliwe jest wykonanie ankiety nt. dokuczliwości hałasu drogowego, preferowanych metod ochrony przed hałasem (jak np. w [35]), poziomu konfliktu wywołanego nadmiernym hałasem itd.
Wskaźniki techniczne dla obiektów i terenu	
Liczba mieszkańców, budynków mieszkalnych, powierzchni terenu	Zestawienie należy wykonać dla określonych przedziałów imisji hałasu z jednoczesnym wskazaniem granicy przekroczeń wartości dopuszczalnych zgodnych z obowiązującymi przepisami. Zestawienie i wskazanie granicy wartości dopuszczalnych powinno być wykonane w przedziałach imisji hałasu co 5 dB (lub mniejszych) w zakresach uwzględniających wartości dopuszczalne dla pory doby (programy ochrony środowiska przed hałasem) lub dnia (inne opracowania) oraz pory nocy – podobnie jak w przypadku wymagań dla map akustycznych. Wartości dopuszczalne hałasu podano w tabl. 3.5.
Orientacyjna liczba obiektów, w których mogą być przekroczone wartości poziomu hałasu dla wewnątrz	Jest to całkowita liczba obiektów zlokalizowanych w obszarze od 60 dB i więcej dla pory doby i pory nocy. Przyjęto zgodnie z zapisami rozdz. 3.2 oraz wartościami dopuszczalnymi hałasu wewnątrz pomieszczeń [152] (tabl. 3.6), że poziom hałasu nie może przekroczyć 40 dB. Zgodnie z opisywanym w rozdz. 3.2 efektem pozostawiania otwartych okien można orientacyjnie przyjąć, że średnia różnica wewnątrz i na zewnątrz budynku wynosi 21 dB [138].

6. Modelowanie decyzji dotyczących wyboru ...

Wskaźnik	Uwagi
Wskaźniki związane ze spełnieniem wymagań formalnych i uciążliwości dla ludzi	
Wartości dopuszczalne hałasu	Zaleca się wskazanie granicy, od której zaczynają obowiązywać zgodnie z [141] (tabl. 3.5).
Stopień uciążliwości	Zaleca się wskazanie zakresu uciążliwości wg skali opisowej zawartej w tabl. 3.10
Wskaźnik zagrożonej hałasem ludności obszaru miasta (dzielnicy)	Wskaźnik można wyznaczyć na podstawie wzoru 6.7
Wskaźniki określające wpływ na zdrowie ludzi	
Dokuczliwość hałasu	Procent i liczba osób narażonych na dokuczliwość D (wzór 3.1) i wysoką dokuczliwość WD (wzór 3.2).
Zaburzenia snu	Procent i liczba osób narażonych na zaburzenia snu ZS (wzór 3.4) i wysokie zaburzenia snu WZS (wzór 3.5).
Zaburzenia snu	Procent przebudzeń PP – w przypadku, jeśli jest dostępny poziom ekspozycyjny dźwięku w pomieszczeniu SEL_{in} (poziom ciśnienia akustycznego w ciągu 1 s) – obliczane wg wzoru 3.6,
Efekty sercowo-naczyniowe	Ryzyko względne wystąpienia zawału mięśnia sercowego OR (wzór 3.7) – w przypadku analizy wyników mapy akustycznej w programach ochrony środowiska przed hałasem należy uwzględnić zależność pomiędzy L_{Aeq} a L_{DWN} (wzór 3.8).
Liczby utraconych lat życia w zdrowiu – wskaźnik DALY	Obliczenie tego wskaźnika można wykonać na podstawie wskazań w rozdz. 3.3.1 i 3.3.2. Z uwagi na charakter i wydźwięk tego wskaźnika powinno się go używać do szacowania wartości tylko dla dużych obszarów [77]. Zaleca się szacowanie tego wskaźnika dopiero po ukazaniu się ostatecznej wersji załącznika III do zmienionej Dyrektywy <i>END</i> [47], kiedy ustalone zostaną ostateczne postacie wzorów oraz wartości współczynników.

Źródło: opracowanie własne

W praktyce w większości programów ochrony przed hałasem i niektórych opracowaniach środowiskowych kończy się na tym etapie analizę i dokonuje często wyboru jedynego założonego rozwiązania. Wskazane powyżej wskaźniki z reguły będą wykazywały korzystniejsze wartości niż w przypadku wariantu dla stanu istniejącego.



Rys. 6.3. Wskaźniki służące do identyfikacji oraz definiowania problemu i celu decyzyjnego dla wariantu istniejącego

Źródło: opracowanie własne

6.3.2. Identyfikacja i wskazanie wariantów rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających – etap 2

Identyfikacja i wybór rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających powinna być oparta na wynikach etapu 1 dla stanu (wariantu) istniejącego. Praktycznie od celu decyzyjnego (strategii) będą zależały przyjęte warianty rozwiązań. Inne będą warianty związane z działaniami ochrony przed hałasem w przypadku, kiedy dla odcinka drogi w najbliższych latach przewidywana jest budowa obwodnicy a inna, kiedy ta obwodnica jest celem działań. Innym przykładem może być wybór wariantów rozwiązań, kiedy celem jest ochrona przed hałasem przede wszystkim w porze nocy. Prawidłowe określenie wariantów jest bardzo istotne zwłaszcza w programach ochrony środowiska przed hałasem, gdy w najbliższych latach będzie realizowanych dużo nowych inwestycji drogowych zarówno w miastach jak i na drogach zamiejskich. Przy wyborze wariantów rozwiązań można wykorzystać schemat postępowania jak na rys. 5.3 i na podstawie opisu rozwiązań i środków ochrony przed hałasem sklasyfikowanych i opisanych w rozdz. 5.

Liczba wariantów do dalszych analiz nie powinna być zbyt duża a ponadto powinny być one realne i dla każdego z nich powinno się określić te wartości wskaźników jak dla stanu istniejącego w etapie 1. Liczba wariantów będzie wpływała bardzo istotnie na czas wykonania analiz i koszty opracowania. Zbyt duża liczba wariantów w metodzie *AHP* może prowadzić do skomplikowania oceny i w ostateczności problemów i błędów w podjęciu decyzji. Określenie redukcji przyjętych wariantów dzięki metodzie *AHP* nie wymaga posiadania tylko ścisłych kryteriów jakościowych – może być to analiza prowadzona w początkowych fazach, określona zgrubnie np. na podstawie informacji podanych w rozdz. 5. Taka ocena i wyniki mogą być mało precyzyjne jednak wskazują one wariant lub warianty preferowane dla których wykonane zostaną dalsze szczegółowe analizy. W trakcie określania wariantów rozwiązań może okazać się konieczna praca zespołu ekspertów reprezentujących kilka branż, którzy zdecydują o wyborze rodzaju wariantów do dalszych analiz. W przypadku konieczności wyboru wariantów rozwiązań powinno się wykonać dla każdego z nich następujące obliczenia:

- Liczby ludności zagrożonej w przyjętych zakresach emisji hałasu. Najczęściej zakresy te przyjmuje się co 5 dB jednak w przypadku analiz szczegółowych zakresy te mogą mieć mniejszą wartość.
- Wskaźników jak w etapie 1 (rozdział powyżej), jak dla wariantu istniejącego – tabl. 6.3 i rys. 6.3.

Wartości poszczególnych wskaźników uzyskane dla poszczególnych wariantów wskazują na warianty preferowane z punktu widzenia przede wszystkim wpływu hałasu na zdrowie ludzi. W przypadku porównania stanu istniejącego (wariantu zerowego) i jednego wariantu rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem nie ma konieczności prowadzenia dalszych analiz i etapów związanych z modelem *AHP*. Należy jednak w takiej sytuacji rozważyć, czy jest to faktycznie jedyne rozwiązanie nie tylko z punktu widzenia zdrowia ludzi, ale także z uwagi na kryteria techniczne i środo-

6.3. Schemat postępowania w budowie modelu ...

wiskowe. Jeśli rozważania te doprowadzą do przekonania, że kryteria te odgrywają rolę w rozwiązaniu wówczas należy wprowadzić dodatkowy wariant rozwiązań lub warianty i wykonać dalsze etapy modelu decyzyjnego.

W etapie 2 powinno nastąpić zdefiniowanie głównie z uwagi na zdrowie ludzi i uciążliwości hałasu wariantów rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem. W etapie 3 nastąpi po dodatkowych analizach dla wszystkich wariantów ostateczny wybór wariantów ocenianych w modelu decyzyjnym.

6.3.3. Ocena i wybór wariantów z uwagi na uwarunkowania ekonomiczne, ekologiczne i społeczne oraz definiowanie kryteriów do modelu decyzyjnego – etap 3

W dotychczasowych rozwiązaniach związanych z ochroną przed hałasem dominuje przeważnie jednoczynnikowy (jednokryterialny) sposób podejmowania decyzji. Tym kryterium są głównie uwarunkowania związane bezpośrednio z wartościami dopuszczalnymi hałasu. Faktycznym kryterium stosowanym w programach ochrony środowiska przed hałasem jest w wielu przypadkach kryterium ekonomiczne (nakłady na realizację zabezpieczeń) i pośrednio wskaźniki związane z wpływem na zdrowie ludzi (głównie próby ograniczania emisji hałasu w najtrudniejszych miejscach – *hot spots*).

W proponowanym schemacie postępowania związanym z wyborem rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym w pierwszej kolejności należy poddać analizie wszystkie warianty z uwagi wskaźniki dotyczące oddziaływania hałasu na ludzi i otoczenie zgodnie z zapisami tabl. 6.3 – podobnie jak w etapie 2 wariant w stanie istniejącym. Ponadto dla każdego wariantu należy wykonać analizę wskaźników CBA i CEA, które pełnią rolę kryterium zintegrowanej efektywności ekonomicznej, ekologicznej i społecznej – zgodnie z tabl. 6.4.

Kryterium zintegrowanej efektywności zwłaszcza w ramach analizy CBA wskaże dzięki wskaźnikowi C/B efektywność zintegrowaną danego wariantu, przy czym korzyści danego wariantu powinny przewyższać koszty, czyli $C/B > 1$. Wariant spełniający to kryterium można uznać za zasadny do realizacji z punktu widzenia ekonomicznego oraz społecznego i może on zostać zakwalifikowany do dalszej analizy i oceny. Z kolei analiza efektywności kosztowej CER wskaże w przypadku każdego wariantu koszt jednostkowy przyjętych rozwiązań na np. jednego mieszkańca. Koszty te mogą się różnić zasadniczo pomiędzy wariantami i na tym etapie stanowią drugi element kryterium wyboru wariantu do dalszych analiz i oceny. Dzięki analizie wskaźników dotyczących oddziaływania hałasu na ludzi i otoczenie oraz analizie CBA i CEA można dokonać wyboru (preselekcji) wariantów, które najlepiej spełniają funkcje związane z ochroną ludzi przed hałasem i równocześnie są optymalne kosztowo. Warianty te mogą być poddane dalszej analizie i ocenie z punktu widzenia innych kryteriów, które zostaną opisane w dalszej części tego rozdziału. Wskaźniki dotyczące oddziaływania hałasu na ludzi i otoczenie oraz kryterium zintegrowanej efektywności ekonomicznej, ekologicznej i społecznej stanowią za-

6. Modelowanie decyzji dotyczących wyboru ...

tem kryterium wstępnej selekcji wariantów i efektem tych analiz powinien być wybór wariantów najkorzystniejszych z uwagi na ochronę ludzi, terenów oraz koszty i efekty ochrony. W tym miejscu należy zauważyć, że wybrane warianty niekoniecznie mogą być wariantami, które są akceptowane społecznie, będą spełniały inne uwarunkowania środowiskowe oraz będą spełniały szereg trudnych uwarunkowań technicznych. Zdaniem autora wstępny wybór wariantów powinien wskazać co najmniej na dwa warianty (lub więcej) tak, aby dzięki dodatkowej ocenie możliwe stało się stwierdzenie, że rozwiązanie jest optymalne również technicznie. Jednocześnie analiza *CBA* i *CEA* nie uwzględnia innych aspektów (kryteriów) społecznych i środowiskowych, które mogą być skuteczną przeszkodą w wyborze ostatecznego rozwiązania. Dlatego też wyboru wariantów nie powinno się ostatecznie dokonywać na tym etapie tylko należy go kontynuować.

Tabl. 6.4. Zestawienie wskaźników dla kryterium zintegrowanej efektywności ekonomicznej, ekologicznej i społecznej

Kryterium	Wskaźnik	Uwagi
Zintegrowana efektywność ekonomiczna, ekologiczna i społeczna	Wskaźnik zintegrowanej efektywności ekonomicznej, ekologicznej i społecznej E_{ees} uzyskiwany na podstawie analizy <i>CBA</i> – związany z szerszymi analizami dotyczącymi strategii działania (w zalecanej postaci może być także użyty w porównaniu przyjętych rozwiązań).	Analiza <i>CBA</i> , której efektem jest wskaźnik E_{ees} powinna być wykonana zgodnie z opisem zawartym w rozdz. 6.1.7.
Korzyści-koszty	Wskaźnik B/C (współczynnik korzyści do kosztów).	Uwaga jak wyżej. Wartości B/C mogą przyjmować następujące wartości: • $B/C < 1$ – koszty przewyższają korzyści – należy rozważyć sens stosowania wariantu rozwiązań, • $B/C = 1$ – korzyści równe kosztom – wariant ma sens stosowania • $B/C > 1$ – korzyści przewyższają koszty – wariant jest uzasadniony do zastosowania
Koszty-efektywność	Współczynnik efektywności kosztowej CER związany głównie z porównaniem przyjętych rozwiązań.	Analiza <i>CEA</i> , której efektem jest współczynnik efektywności kosztowej CER powinna być obliczana zgodnie z opisem zawartym w rozdz. 6.1.5.

Źródło: opracowanie własne

6.3. Schemat postępowania w budowie modelu ...

Aby wybrane warianty w wyniku analizy wskaźników dotyczących oddziaływania hałasu na ludzi i otoczenie oraz analizy CBA i CEA można było poddać dalszej ocenie i wyborowi w metodzie AHP konieczne jest stworzenie dla tych rozwiązań listy kryteriów. Zastosowanie metody AHP umożliwia wprowadzenie wielu dodatkowych kryteriów oceny wariantów. W zależności od rodzaju wykonywanego opracowania środowiskowego kryteria te mogą mieć postać ilościową lub jakościową. Kryteria te opisano już szczegółowo we wcześniejszych rozdziałach. Na podstawie wykonanej analizy możliwych do zastosowania w dalszej ocenie kryteriów oraz doświadczeń przy wyborze rozwiązań i środków ochrony przed hałasem wybrano najczęściej występujące w typowych przypadkach. Poniżej zebrano i zgrupowano poszczególne kryteria i podkryteria oraz wskaźniki dla potrzeb dalszej oceny w modelu decyzyjnym AHP. Do podstawowych kryteriów, które powinno się rozważyć na kolejnym etapie analizy i oceny wariantów należą:

- **Kryterium społeczne** – względy społeczne (kryterium użytkowników otoczenia drogi). Listę elementów (podkryteriów) podano w tabl. 6.5.
- **Kryterium środowiskowe** – oddziaływania środowiskowe i oddziaływania skumulowane. Listę elementów (podkryteriów) podano w tabl. 6.6. W tabeli tej podano również przykładowe odniesienia związane z wpływem niektórych rozwiązań ochrony przed hałasem na zasoby środowiska.
- **Kryterium techniczne**. Listę elementów (podkryteriów) podano w tabl. 6.7.

Tabl. 6.5. Zestawienie podkryteriów i wskaźników dla kryterium Społecznego

Podkryteria	Wskaźnik	Uwagi
Preferencje i akceptacja społeczna	Skala opisowa lub ilościowa (w przypadku np. badań ankietowych).	W przypadku prowadzonych konsultacji społecznych.
Przestrzeń publiczna	Skala opisowa lub ilościowa (np. powierzchnia wyłączona do ruchu pieszych, długość dróg rowerowych itp.).	Przestrzeń publiczna w analizie i ocenie powinna wyrażać jakość rozwiązań dla mieszkańców otoczenia drogi – funkcjonalność, komfort, poczucie bezpieczeństwa itp.
Warunki poruszania się osób niepełnosprawnych	Skala opisowa lub ilościowa (np. liczba barier uniemożliwiających się poruszanie osób niepełnosprawnych itp.).	Warunki te powinny określać swobodę poruszania się osób niepełnosprawnych oraz dostępność dla nich otoczenia drogi. Rozwiązanie powinno stwarzać jak najlepsze warunki poruszania się osób niepełnosprawnych.

Źródło: opracowanie własne

Tabl. 6.6. Zestawienie podkryteriów i wskaźników dla kryterium Środowiskowego^{1,2)}

6. Modelowanie decyzji dotyczących wyboru ...

Podkryteria	Wskaźnik	Uwagi
Zanieczyszczenie powietrza	Skala opisowa lub ilościowa (wartości konkretnych zanieczyszczeń powietrznych CO ₂ , NO _x itp.).	Zwiększenie wartości może nastąpić przy braku płynności ruchu. Powinno się dążyć do minimalizacji oddziaływania.
Wibracje i drgania	Skala opisowa lub ilościowa (ocena wpływów dynamicznych na obiekty i ludzi [153, 154]).	Mogą występować przy niewłaściwie zaprojektowanych i wykonanych urządzeniach uspokojenia ruchu (progi zwalniające) oraz złym stanie nawierzchni i pokryw studzienek w jezdni. Powinno się dążyć do minimalizacji oddziaływania.
Wpływ na rośliny i zwierzęta	Skala opisowa lub ilościowa (np. ocena wpływu na ptaki [73]).	Ekrany akustyczne mogą powodować efekt barierowy dla zwierząt i zwiększenie śmiertelności ptaków. Powinno się dążyć do minimalizacji oddziaływania.
Wpływ na wody	Skala opisowa lub ilościowa (np. wartości zawiesiny ogólnej).	Powinno się dążyć do minimalizacji oddziaływania.
Wpływ na grunty rolne i leśne	Skala opisowa lub ilościowa (np. metale ciężkie).	Powinno się dążyć do minimalizacji oddziaływania.
Zmiany krajobrazu i estetyka	Skala opisowa lub ilościowa.	Ekrany akustyczne mogą powodować znaczącą ingerencję w krajobraz. Powinno się dążyć do minimalizacji oddziaływań.
Wpływ na dobra materialne	Skala opisowa lub ilościowa (np. liczba obiektów przeznaczonych do rozbiórki).	Powinno się dążyć do minimalizacji oddziaływań.
Wpływ na dobra kultury	Skala opisowa lub jakościowa.	
Kumulacja oddziaływań	Skala opisowa lub ilościowa (np. zwiększenie emisji poziomu hałasu lub zanieczyszczeń spowodowanych rozwiązaniem).	Powinno się dążyć do minimalizacji oddziaływań.

¹⁾ Informacje nt. większości stosowanych wskaźników ilościowych zawarte są w [24, 232, 233, 234, 235, 236] oraz w obowiązujących rozporządzeniach dla niektórych oddziaływań.

²⁾ Kryteria używane w opracowaniach innych niż programy ochrony środowiska.

Źródło: opracowanie własne

Tabl. 6.7. Zestawienie podkryteriów i wskaźników dla kryterium Technicznego

6.3. Schemat postępowania w budowie modelu ...

Podkryteria	Wskaźnik	Uwagi
Bezpieczeństwo ruchu drogowego	Skala opisowa lub ilościowa (liczba wypadków przed i po wprowadzeniu rozwiązania itp.).	Niektóre rozwiązania drogowe i środki zabezpieczające mogą mieć bardzo istotny wpływ na bezpieczeństwo ruchu (np. ekrany jako ograniczenie widoczności, nowe nawierzchnie, jako wpływ na poprawę stanu bezpieczeństwa itp.). Powinno się dążyć do maksymalizacji poprawy brd.
Trwałość techniczna	Skala opisowa lub ilościowa (np. czas do remontu lub czas do wymiany)	Każde rozwiązanie wymaga remontów i ewentualnie innych zabiegów włącznie z wymianą. Powinno się dążyć do maksymalizacji trwałości.
Trwałość efektów akustycznych w czasie (trwałość akustyczna)	Skala opisowa i ilościowa (np. wartość zmniejszenia wyjściowej redukcji poziomu hałasu dla danego rozwiązania w ciągu każdego roku eksploatacji)	Niektóre rozwiązania jak np. nawierzchnie porowate cechują się uratą zdolności redukcji hałasu w czasie. Powinno się dążyć do uzyskiwania jak największej trwałości.
Wypełnienie przepisów lokalnych i technicznych	Skala opisowa związana ze stopniem wypełnienia zapisów przepisów i umów.	Niektóre rozwiązania mogą nie być możliwe do zastosowania z uwagi na warunki techniczne dla dróg i obiektów [180, 181].
Przepustowość i warunki ruchu, płynność ruchu	Skala opisowa lub ilościowa (np. wartość przepustowości i poziomy swobody ruchu).	Do określenia na podstawie analiz inżynierii ruchu (np. na podstawie [60, 85]). Powinno się dążyć do jak najlepszych wartości.
Względy konstrukcyjne (np. posadowienie)	Skala opisowa związana głównie z trudnościami posadowienia drogi lub urządzenia ochrony przed hałasem (np. ekran akustyczny) i ilościowa (jako koszty).	Może być uwzględnione w kosztach całkowitych.
Względy technologiczne i materiałowe	Skala opisowa związana z możliwością zastosowania określonych materiałów i technologii oraz ilościowa (jako koszty).	Może być uwzględnione w kosztach całkowitych.
Warunki budowy i montażu	Skala opisowa lub ilościowa związana z możliwością wykonywania prac budowlanych i montażu (np. szybkość montażu, prace bez wyłączania odcinków z ruchu)	
Warunki użytkowania i utrzymania	Skala opisowa lub ilościowa związana z możliwością prowadzenia utrzymania za pomocą standardowych metod i procedur, odbywaniem się ruchu w sposób płynny i nieprzerywany.	

Źródło: opracowanie własne

W poszczególnych tabelach podano w opisie wskaźnika także rodzaj danych (jako-

ściowe – opisowe, ilościowe) jakie mogą być stosowane w kolejnym etapie analizy. Takie podejście ułatwia przygotowanie informacji do porównania kryteriów i podkryteriów parami, gdzie poza danymi ilościowymi można zastosować skale opisowe (jedna z najważniejszych cech metody *AHP*). Brak niektórych informacji ilościowych można uzupełnić opinią eksperta – nie może ona jednak być źródłem spekulacji, które mogłyby doprowadzić do oczekiwanego wyniku wyboru. Dodatkowe informacje na temat skal przyjmowanych w metodzie *AHP* zostaną podane w kolejnym rozdziale.

Do dalszych analiz (oceny rozwiązań – etap 4) należy przyjąć tylko te kryteria i podkryteria dzięki, którym będzie możliwa ocena wariantów rozwiązań. Ich dobór w znacznej mierze uzależniony jest od charakteru tych rozwiązań. W wielu sytuacjach jako wskaźnik dla danego wariantu może posłużyć skala opisowa jak to ma miejsce w przypadku kryteriów środowiskowych – tabl. 6.6. Wymaga to jednak znajomości poszczególnych oddziaływań i najczęściej niezbędne jest skorzystanie z wiedzy specjalistów i projektantów zajmujących się urządzeniami infrastruktury ochrony środowiska. W przypadku, kiedy wybór rozwiązania następuje w raporcie o oddziaływaniu przedsięwzięcia na środowisko większość oddziaływań może być reprezentowana przez wskaźniki ilościowe.

Powyższe kryteria mogą być stosowane zarówno w programach ochrony środowiska przed hałasem, jak i innych opracowaniach środowiskowych, gdzie niezbędne są decyzje związane z wyborem rozwiązań chroniących przed hałasem drogowym. Powyższy zestaw kryteriów może nie zawierać wszystkich elementów (podkryteriów) mających wpływ na wybór rozwiązania zwłaszcza w sytuacjach indywidualnych i specyficznych, jakie mogą wystąpić w np. miastach. Lista podkryteriów może być wówczas dowolnie modyfikowana – powinna ona jednak zachowywać zasady dotyczące budowy modelu decyzyjnego (opisane w dalszej części). Zasadą wyboru podkryteriów zwłaszcza środowiskowych i technicznych do dalszej oceny wariantów powinna być analiza polegająca na określeniu czynników, które mogą zaistnieć w przypadku wyboru konkretnych rozwiązań ochronnych. Dla tak wybranych podkryteriów w dalszej ocenie konieczne będzie określenie stopnia wpływu, który jest uzależniony od przyjętego rozwiązania ochronnego. Trudnością jak już wspomniano w stosowaniu takiej złożonej lisy kryteriów może być konieczność współpracy specjalistów, którzy powinni wyrazić swoje zdanie i wnieść wkład do podejmowanej decyzji. Na podstawie powyższej listy kryteriów i podkryteriów nie jest jeszcze możliwy wybór wariantów rozwiązań bez dalszej oceny opisanej dla etapu 4.

Poniżej na rys. 6.4 przedstawiono schemat postępowania przy wstępnym wyborze wariantów oraz określaniu dla nich kryteriów i podkryteriów oceny.

6.3. Schemat postępowania w budowie modelu ...

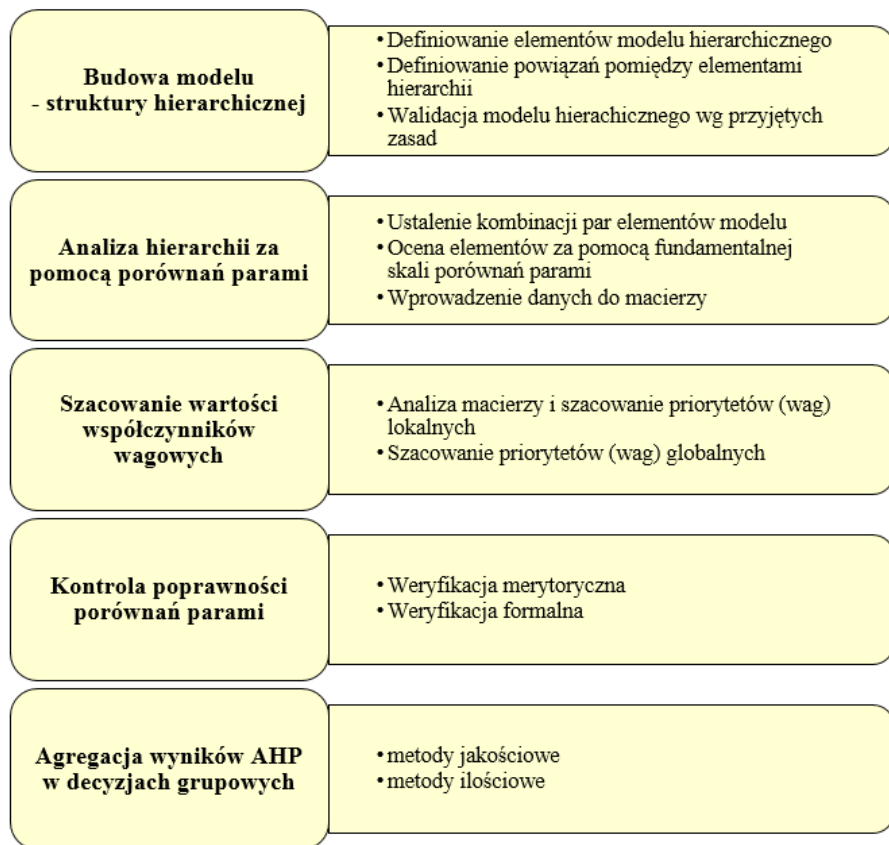


Rys. 6.4. Schemat postępowania przy wyborze wariantów oraz definiowaniu kryteriów i podkryteriów do dalszej oceny

Źródło: opracowanie własne

6.3.4. Analiza i ocena wariantów w modelu decyzyjnym – etap 4

Analiza i ocena wariantów na tym etapie wiąże się z użyciem metody *AHP*. Po określeniu celu decyzyjnego, wyborze wariantów rozwiązań oraz kryteriów i podkryteriów oceny możliwa jest dalsza analiza i wybór wariantu. Na rys. 6.5 pokazano schemat postępowania i oceny wariantów rozwiązań w ramach analizy *AHP*.



Rys. 6.5. Schemat postępowania dla oceny wariantów przy wykorzystaniu metody *AHP*

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [169]

Poniżej omówiono poszczególne kroki powyższego schematu postępowania dla oceny wariantów przy wykorzystaniu metody *AHP*.

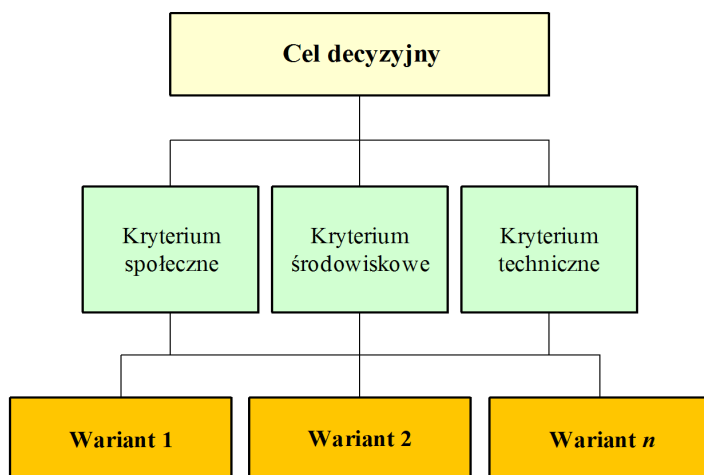
Model, którego celem jest ocena i wybór określonego wariantu rozwiązania jest próbą odzwierciedlenia złożonej rzeczywistości. Faktycznie model może odzwierciedlać jedynie fragment tej rzeczywistości przy uwzględnieniu najistotniejszych jego fragmentów. Ze względu na dużą liczbę rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem, różny sposób ich funkcjonowania w terenie, zmienne kryteria oceny wariantów

6.3. Schemat postępowania w budowie modelu ...

tów trudno jest na tym etapie formułować procedurę postępowania – o wiele prościej jest przygotować model zgodnie z określonym schematem. Model w takiej sytuacji daje możliwość oceny w trakcie podejmowania decyzji o wyborze konkretnego wariantu rozwiązań. Nie jest możliwe podjęcie prawidłowej decyzji z punktu widzenia zdefiniowanych wcześniej kryteriów jedynie na podstawie prostej obserwacji i analizy. Podejmowane w ten sposób większość decyzji skutkuje obecnie błędnymi rozwiązaniami opartymi na dwóch założeniach: ceny i braku możliwości stworzenia realnej strategii działania czy zastosowania określonego rozwiązania. Zastosowanie metody *AHP* umożliwia zebranie wszelkich elementów składających się na decyzję w strukturę hierarchicznego modelu. Konstruowanie struktury hierarchicznej w modelu polega na określeniu składowych tego problemu, ich grupowaniu w jednorodne zbiory, a następnie porządkowaniu tych zbiorów na odpowiednich poziomach i zgodnie z łączącymi je relacjami [169] – strukturę taką pokazano na rys. 4.5. Bardzo istotną sprawą w modelu jest dobór kryteriów, które będą najlepiej opisywały (oceniały) główny cel. Kryteria te zostały sformułowane w poprzednim rozdziale jednak lista ich nie jest zamknięta ze względu na różne przypadki i sytuacje jakie często występują w rzeczywistości. Dobór kryteriów jest jednym z najważniejszych fragmentów prac nad modelem i w razie problemów należy skorzystać z pomocy specjalistów i projektantów z doświadczeniem w podobnych tego przypadkach.

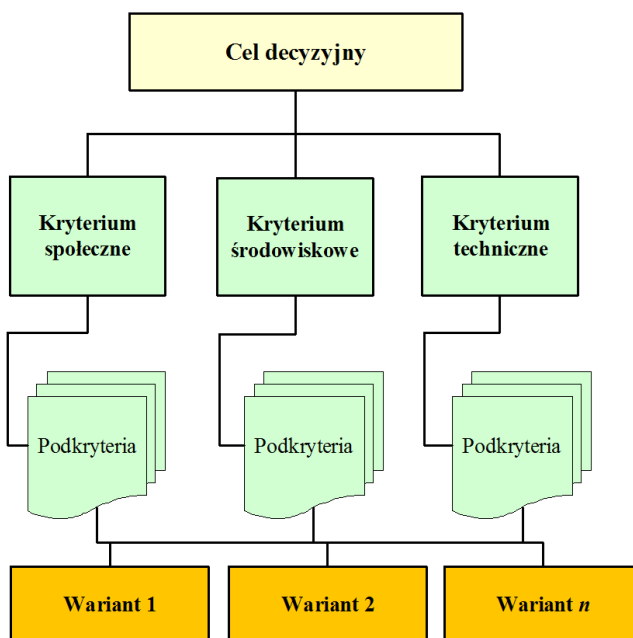
Zgodnie z zasadami model *AHP* powinien być tak skonstruowany, aby jego elementy składowe były ułożone w hierarchii od ogółu do szczegółu. Najwyżej położone elementy mają największe znaczenie dla procesu decyzyjnego. Jest to tzw. hierarchia dominacji [169], której rolą jest możliwość oceny wpływu elementów położonych niżej na elementy położone wyżej. Siła tego wpływu jest oceniana dzięki porównaniu parami elementów z niższego poziomu na elementy wyższego poziomu przy zastosowaniu przeważnie dziewięciostopniowej skali liczbowej (stosowane mogą być różne skale jednak dziewięciopunktowa jest rozwiązaniem podstawowym).

W procesie oceny przewagi niższych elementów nad wyższymi zawsze celowi decyzyjnemu przypisuje się wartość równą 1 lub 100%. Wartość ta dzielona jest na kryteria, które wpływają na cel decyzyjny. Otrzymywane są wówczas wagi dla poszczególnych kryteriów. Im wyższa wartość takiej wagi tym większe dane kryterium ma wpływ na badane zjawisko (cel nadrzędny). W rozbudowanych strukturach hierarchicznych może być stosowanych kilka poziomów elementów (kryteriów). Zbytne rozbudowanie modelu nie ma jednak większego sensu ze względu na pracochłonność analizy i mało praktyczne znaczenie. Jednocześnie pod kryteriami umieszczane są w strukturze hierarchicznej warianty rozwiązań, które dla modelu stanowią warianty decyzyjne (alternatywy). Na rys. 6.6 przedstawiono uproszczony model hierarchicznej struktury elementów z jedną warstwą kryteriów natomiast na rys. 6.7 z warstwą kryteriów i podkryteriów (czteropoziomowa struktura hierarchiczna), które wprowadzono do analizy w tym etapie.



Rys. 6.6. Model hierarchicznej struktury danych z jedną warstwą kryteriów

Źródło: opracowanie własne



Rys. 6.7. Hierarchiczna struktura z warstwą kryteriów i podkryteriów w modelu decyzyjnym rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym

Źródło: opracowanie własne

6.3. Schemat postępowania w budowie modelu ...

W większości przypadków model decyzyjny powinien składać się z warstw kryteriów i podkryteriów ze względu na lepsze odwzorowanie sytuacji związanej z podjęciem decyzji. Taki poziom złożoności jest najczęściej wykorzystywany w procesach podejmowania decyzji.

Poprawna struktura hierarchiczna modelu powinna spełniać następujące podstawowe zasady [169]:

- **Kompletność** – uwzględnienie w modelu wszystkich istotnych elementów. Kompletność daje możliwość wiarygodnego odwzorowania rzeczywistości. Elementy modelu muszą zawierać wiarygodne dane. Często w modelu decyzyjnym może występować opinia interesariuszy danego projektu (rozwiązania). Brak uwzględnienia tego elementu w modelu (jako element kryterium społecznego uwzględniono akceptację i preferencje społeczne) może spowodować, że decyzja będzie mało realna do wykonania. W modelu należy dobrać tyle elementów, aby model nie był zbyt ubogi (wówczas nie odzwierciedla rzeczywistości) lub nie był zbyt skomplikowany (spowoduje brak czytelności). Często wybór czynników powinien się wiązać z dodatkowymi konsultacjami i pracą specjalistów oraz projektantów. Wymagać to będzie dużo zaangażowania oraz czasu jednak spowoduje to, że dzięki modelowi uzyska się decyzję, która nie jest oparta jak obecnie na głównie na kwestiach czasowych i finansowych.
- **Nazewnictwo (nomenklatura)** – właściwe doprecyzowanie nazw poszczególnych elementów. Należy zwrócić uwagę, aby elementy w miarę możliwości były określane i nazywane ze względu na cel, którym zwykle jest osiągnięcie określonego stanu (redukcja hałasu w ciągu nocy, zmniejszenie liczby mieszkańców zagrożonych hałasem w okresie doby itp.).
- **Niepowtarzalność elementów** (brak redundancji) – dwa lub więcej kryteria lub podkryteria nie powinny się na siebie nakładać. W takich przypadkach należy usunąć nakładające się elementy. Zasada ta jest powiązana z zasadą niezależności elementów.
- **Od ogółu do szczegółu** – umieszczenie zbiorów elementów (kryteriów, podkryteriów, wariantów) na właściwych poziomach. Na samym dole struktury powinny znajdować się warianty rozwiązań, które są najbardziej szczegółowym elementem hierarchii. Jednocześnie kryteria powinny być porównywalne względem celu decyzyjnego, podkryteria względem kryteriów, warianty względem podkryteriów. Zasada ta jest spełniona, jeżeli element położony wyżej w hierarchii może być traktowany jako wspólna właściwość względem, której można porównać elementy poniżej tego elementu. Przykładem może być kryterium techniczne i jego elementy (podkryteria). Kryterium to określa zbiór właściwości technicznych rozwiązania, gdzie elementy te można porównywać między sobą – np. trwałość techniczną i trwałość akustyczną (zdolność do utrzymywania redukcji hałasu w czasie). Oba elementy określają właściwości techniczne i można je porównywać między sobą – np. wraz

z czasem eksploatacji nawierzchni drogowej trwałość techniczna może się pogorszyć jednak dla różnych rodzajów nawierzchni różny będzie stopień trwałości akustycznej (nawierzchnie porowate vs. nawierzchnie szczelne).

- **Niezależność elementów** – zapewnienie, że elementy w poszczególnych grupach (kryteriach, podkryteriach) nie są ze sobą powiązane. Najlepszym sprawdzeniem niezależności elementów może być to kiedy możliwa jest ocena spełnienia wariantu względem danego podkryterium bez względu na to jak ten wariant jest oceniany względem innych podkryteriów. Powoduje to wówczas, że oceniający koncentruje się jedynie na jednej właściwości wariantu bez potrzeby rozważania dodatkowych. Zasada ta spowodowała odpowiednie ukształtowanie kryteriów i podkryteriów w poprzednim rozdziale tak, aby podkryteria w ramach poszczególnych kryteriów były niezależne względem siebie (stąd np. szczegółowe rozbicie kryterium ekologicznego na poszczególne oddziaływania). Zależność elementów nie powinna występować w obrębie tych samych grup (kryteriów, podkryteriów) natomiast może występować i bardzo często występuje pomiędzy elementami znajdującymi się na różnych poziomach struktury modelu (pomiędzy celami i kryteriami, kryteriami i subkryteriami). Założenie o niezależności jest dosyć teoretyczne ze względu na to, że większość elementów danej grupy (niezależnie od rodzaju analizowanych zagadnień) jest i tak ze sobą w jakiś sposób powiązana – np. opisywany przykład powyżej z nawierzchnią i dwoma rodzajami trwałości, gdzie oczywiste jest, że trwałość akustyczna jest powiązana z trwałością techniczną. Dlatego podczas budowy modelu i zwłaszcza kryteriów oraz podkryteriów należy dążyć do zminimalizowania powiązań między elementami mając na uwadze, że powiązań tych nie da się całkowicie wyeliminować.
- **Odpowiednia liczba elementów** (podkryteriów) w poszczególnych grupach (kryteriach). W zasadzie kompletności zawarto konieczność rzetelnego i realnego opisu modelu, który nie będzie zbyt ubogi i zbyt rozbudowany. W ramach kryteriów opisanych w poprzednim rozdziale wskazano cztery główne kryteria, które zawierają od trzech do dziewięciu podkryteriów. Przy doborze liczby kryteriów i podkryteriów powinno się uwzględniać obserwacje psychologów (George A. Miller [131]), którzy stwierdzili ludzie mają ograniczoną zdolność od interpretacji danych – są w stanie przetworzyć jednocześnie średnio siedem elementów informacji. Reguła 7 ± 2 nazywana liczbą Millera została przyjęta przez twórcę metody AHP jako podstawowa zasada przy budowie struktury hierarchicznej. Stąd podczas budowy modelu decyzyjnego powinno się dobrać te podkryteria, które są niezbędne do oceny wariantów (model nie musi zawierać wszystkich podkryteriów, które zostały podane w poprzednim rozdziale). Podobnie liczba wariantów nie powinna być zbyt liczna. Dlatego wskaźniki stosowane w ramach zintegrowanej efektywności mogą stanowić kryterium dopuszczające warianty do dalszej analizy i oceny – niektóre warianty z niezadowolającymi wynikami (efektywnością) mogą być odrzucane.

Jednocześnie należy zwrócić uwagę na rolę wariantu zerowego w budowie modelu decyzyjnego. Wariant ten zdaniem autora nie powinien być uwzględniany w ocenie i brany pod uwagę w modelu decyzyjnym w przypadku, jeśli uznano, że nie jest on alternatywą dla pozostałych wariantów i musi nastąpić zmiana (np. przebudowa) poprzez wybór któregoś rozwiązania drogowego i środków zabezpieczających przed hałasem. W przypadku, jeśli rozważa się czy pozostać przy stanie istniejącym, czy zastosować jakieś rozwiązanie (rzadkie przypadki) wówczas należy w modelu decyzyjnym uwzględnić wariant związany ze stanem istniejącym.

- **Jednorodność (homogeniczność) elementów** – dobór w grupach (kryteriach) według podobieństwa. W metodzie *AHP* zaleca się, aby kryteria znacząco od siebie się różniły natomiast elementy (podkryteria) kryteriów powinny być jednolite, podobne do siebie. W zalecanych kryteriach i podkryteriach w poprzednim rozdziale starano się zapewnić zasadę jednorodności jednak wiele ich w wyborze zależy od tego o ile się one różnią między sobą. Twórca metody *AHP* stwierdza, że obiekty nie powinny się różnić między sobą więcej niż jeden rząd wielkości – nie jest praktycznie możliwe porównanie między sobą elementów bardzo małych i bardzo dużych. Zachowanie takiego podejścia do jednorodności w modelu wyboru wariantów rozwiązań chroniących przed hałasem byłoby trudne, gdyby np. wprowadzić do kryteriów bezpośrednio koszty rozwiązań. Efekty uzyskiwane najprostszymi (tanimi środkami) mogą być takie same jak bardzo skomplikowanymi – np. ograniczenie ruchu ciężkiego za pomocą zmiany organizacji ruchu i ten sam efekt, który może być uzyskany za pomocą ekranów akustycznych. Na wybór wariantu wpływały będą jednak jeszcze inne podkryteria i jedynie koszty nie może przesądzać o wyborze wariantu. Stąd kryteria i podkryteria, które mogły spowodować brak jednorodności (jak np. koszty rozwiązań) wprowadzono do pierwszego etapu wyboru wariantów do dalszych analiz i wyeliminowano je ze struktury modelu. Dlatego też jako homogeniczność w przypadku modelu decyzyjnego polegającego na wyborze rozwiązania chroniącego przed hałasem należy bardziej rozumieć zestaw podobnych do siebie, niepowtarzających się właściwości cech (podkryteriów) należących do tej samej grupy kryteriów a w przypadku wariantów cechą jednorodności będzie to, że są one w stanie spełnić ten sam cel decyzyjny.

Walidacja modelu decyzyjnego (struktury hierarchicznej) wyboru rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem będzie polegała na porównaniu tego modelu z rzeczywistością. Walidacja w tym przypadku będzie polegała głównie na sprawdzeniu spełnienia powyżej opisanych zasad. Najlepiej, gdyby odbyła się ona przy udziale interesariuszy programu ochrony środowiska przed hałasem (głównie specjalistów). Jest to również ostatni moment przed wykonaniem oceny, aby ponownie przeanalizować czy cel decyzyjny został określony prawidłowo. W przypadku skomplikowanego przypadku i struktury hierarchicznej oraz tam, gdzie wchodzi w rachubę do wydatkowania znaczące środki finansowe powinny odbyć się badania i analizy pilotażowe (wstępne) ele-

mentów struktury i celu decyzyjnego. Badania takie można oprzeć na pytaniach w liście sprawdzającej zarówno sam cel jak i spełnienie wyżej podanych zasad [169]. Celem tych badań będzie ewentualna korekta zawartości i struktury modelu decyzyjnego.

Przygotowanie struktury hierarchicznej modelu decyzyjnego jest pierwszym krokiem i przygotowaniem do dalszych analiz. W kolejnym kroku (w jednym z trudniejszych w metodzie *AHP*) analizowane są poprzez porównanie parami elementy, które zostały wprowadzone do poszczególnych grup – kryteriów, podkryteriów i wariantów. Porównania te wykonywane są dzięki dziewięciostopniowej skali twórcy metody [194, 196], gdzie określana jest danej parze przewaga jednego z elementów i stopień tej przewagi. Po wykonaniu porównań parami następuje szacowanie wag dla poszczególnych grup i elementów.

W metodzie *AHP* w porównaniu parami wykorzystuje się założenia i wyniki obserwacji dotyczące właściwości ludzkiego umysłu. Potrafi on sobie poradzić z oszacowaniem danej cechy i stopnia jej intensywności poprzez porównania parami bez dodatkowych badań i wielu danych. Pomaga w tym zdobyte doświadczenie, co może być wykorzystywane zwłaszcza na tym etapie w pracy ze specjalistami i projektantami. Proces porównania parami jest czynnością często żmudną i wymagającą poza doświadczeniem w danej specjalności, dużej koncentracji. Dlatego struktury hierarchiczne nie powinny być zbyt rozbudowywane a czas pracy specjalisty w trakcie porównania parami nie powinien trwać dłużej niż 20 minut [169]. W modelu decyzyjnym dotyczącym wyboru rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem występują, co można było zauważyć podczas identyfikowania kryteriów i podkryteriów, że część z nich ma charakter ilościowy (mierzalny) a część jakościowy (niemierzalny w niektórych sytuacjach). Dzięki metodzie *AHP* możliwe jest ich połączenie w jednym modelu. W trakcie porównania elementów parami wykorzystywana jest jak już wcześniej wspomniano skala dziewięciostopniowa – jest to skala dwubiegunowa służąca do porównania elementów (kryteriów, podkryteriów, wariantów) posiadających wspólną właściwość oraz nadawania tym elementom stopni przewagi. Stopnie przewagi przeważnie posiadają określenia werbalne – np. 1 to takie samo znaczenie, 9 całkowita przewaga jednego elementu nad drugim. W tabl. 6.8 zaproponowano w jaki sposób można dokonywać porównania parami elementów przy użyciu arkusza (kwestionariusza). W niektórych przypadkach możliwe jest użycie rozbudowanej skali do siedemnastu punktów (punkty pośrednie po obu stronach skali to: 2, 4, 6, 8).

W rozdz. 5 w ramach określania stopnia wpływu opisywanych rozwiązań na różne uwarunkowania w stosunku do stanu istniejącego (w którym nie zastosowano takich rozwiązania) użyto głównej skali (1, 3, 5, 7, 9). Ma to na celu wspomaganie oceny parami proponowanych rozwiązań w modelu dotyczącym wyboru rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem. Oczywiście jest, że proponowane stopnie wpływu mogą się różnić w zależności od sytuacji terenowej i przypadku – należy je każdorazowo dokładnie przeanalizować.

6.3. Schemat postępowania w budowie modelu ...

Tabl. 6.8. Arkusz porównania parami elementów modelu wyboru rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym

Element	Która z cech jest ważniejsza przy wyborze elementu i w jakim stopniu?									Element
	całkowita	bardzo duża	duża	mała (niewielka)	jednakowe znaczenie	mała	duża	bardzo duża	całkowita	
	9	7	5	3	1	3	5	7	9	
Element 1										Element 2
...										...
Element n										Element n+1

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [169]

Należy też zwrócić uwagę, że określenie stopnia przewagi jednego z elementów oparte jest w metodzie AHP na zasadzie wzajemności (odwrotności). Powoduje to, że jeśli element (*i*) ma większy stopień przewagi nad elementem (*j*) i relacji tej zostanie przypisana liczba a_{ij} , to w relacji odwrotnej, czyli elementowi (*j*) w stosunku do obiektu (*i*) przypisywana jest wartość $1/a_{ij}$. Ma to bardzo duże znaczenie podczas dalszej analizy.

Kolejność analizy podczas porównania parami elementów przebiega wstępująco (od dołu do góry struktury hierarchicznej) względem elementu macierzystego położonego o poziom wyżej. Oznacza to, że występują następujące rodzaje porównań:

- kryteria porównywane są względem celu decyzyjnego,
- podkryteria porównywane są względem kryteriów,
- warianty porównywane są względem podkryteriów lub kryteriów (jeśli dane kryterium nie ma podkryterium – w tworzonej modelu dotyczącym wyboru rozwiązań ochrony przed hałasem nie zaleca się takich uproszczeń).

Kierunek analizy oparty jest w metodzie AHP na aksjomacie syntezy, który stanowi o zależności elementu położonego na niższym poziomie od elementu nadrzędnego. Liczbę porównań n_p parami pomiędzy elementami można wyrazić za pomocą wzoru [169]:

$$n_p = \frac{n \cdot (n-1)}{2} \quad (6.14)$$

gdzie:

- n – liczba elementów w ramach danej grupy (kryteria, podkryteria, warianty).

Po skompletowaniu porównań parami elementy tych porównań są wprowadzane do macierzy **A** – macierze porównań parami. Przykład takiej macierzy przedstawiono w tabl. 6.9.

Tabl. 6.9. Przykładowa macierz porównania parami z wagami (priorytetami)

Kryterium	Kryterium 1	Kryterium 2	Kryterium 3	Waga (priorytet) w_i
Kryterium 1	1	3	1/3	w_1
Kryterium 2	1/3	1	1/7	w_2
Kryterium 3	3	7	1	w_3

Źródło: opracowanie własne

Wyniki porównań parami z poszczególnych arkuszy należy wpisać do macierzy zgodnie z układem wiersz-kolumna, przy czym wystarczy wpisać wartości do górnej części macierzy a pozostałą jej część uzupełnić wykorzystując zasadę odwrotności. Wynikiem porównań i dalszych obliczeń będą po wykonaniu analizy wagi lokalne i globalne (priorytety) – w_i . Poniżej podano ogólny opis uzyskiwania wag (priorytetów) w_i na podstawie [169, 195].

Macierz porównań parami A jest macierzą kwadratową o wymiarze $n \times n$ (gdzie n to liczba elementów macierzy porównań parami):

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

Własnością charakterystyczną macierzy A jest to, że porównanie tego samego elementu zawsze daje wynik 1. Dlatego na przekątnej macierzy znajdują się zawsze wartości 1, czyli:

$$a_{ij} = 1 \text{ dla } i=j \quad (6.16)$$

Ponadto porównanie elementu i z elementem j macierzy jest zawsze odwrotnie symetrycznie (zasada odwrotności):

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (6.17)$$

W związku z powyższym macierz A porównań parami przyjmuje postać:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

6.3. Schemat postępowania w budowie modelu ...

Na podstawie obliczeń uzyskuje się współczynniki wagowe w_i (wagi, priorytety), które wskazują na znaczenie (stopień dominacji) poszczególnych elementów w macierzy. Jednocześnie wyrażają one preferencje przyznane elementem przez oceniającego. Większa wartość wagi wskazuje na większe znaczenie elementu, np. kryterium, podkryterium, wariantu. Wagi przyjmują wartości od 0 do 1 (ich suma wynosi 1):

$$w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1 \wedge w_i \geq 0 \quad (6.19)$$

Wyznaczenie wartości wag jest możliwe tylko wówczas, jeśli macierz A ma odpowiednią jakość (zgodność) co oznacza, że powinna zachodzić zależność:

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \quad (6.20)$$

oraz z której wynika, że:

$$a_{ij} \cdot \frac{w_j}{w_i} = 1 \quad (6.21)$$

Stąd macierz A zapisaną wg wzoru 6.15 można przedstawić jako:

$$A = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

Wykorzystując zapis skalarny oraz wzór 6.21 otrzymuje się następującą zależność:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot \frac{w_j}{w_i} = n \Leftrightarrow \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot w_j = n \cdot w_i \quad (6.23)$$

Wykorzystując rachunek macierzowy prawą stronę powyższego równania 6.23 można zapisać jako:

$$Aw = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = n \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = nw \quad (6.24)$$

W praktyce rzadko kiedy uzyskuje się w pełni zgodną macierz – stąd wyznaczany jest wektor względnych wartości wag jako rozwiązanie równania macierzowego. Dlatego też macierz porównań parami A zapisuje się jako:

$$Aw = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = cw \quad (6.25)$$

gdzie:

- c – stała,
- w – wektor własny macierzy
- A – poszukiwane wartości współczynników wagowych (priorytetów).

Wyznaczenie wag możliwe jest za pomocą kilkukrotnego mnożenia macierzy, tj. podnoszenia macierzy A do kolejnych potęg ($A^2, A^4, A^8, \dots$ – niektóre specjalistyczne programy komputerowe korzystają z potęgi 512). Po mnożeniu macierzy A wyznaczone są wartości współczynników wagowych, które otrzymuje się poprzez sumowanie wartości w wierszach macierzy i normalizowanie tych wartości polegające na podzieleniu otrzymanej sumy z wiersza przez sumę wartości ze wszystkich wierszy. Następnie sprawdzane są różnice wartości współczynników wagowych otrzymane w dwóch kolejnych obliczeniach (iteracjach). Jeżeli uzyskuje się małą różnicę (np. 0,001) iterację można przerwać a ostatnie otrzymane wartości współczynników wag uznaje się za ostateczne. Oprócz metody mnożenia macierzy możliwe jest też wyznaczenie wartości współczynników wagowych za pomocą średniej geometrycznej a także średniej arytmetycznej. W metodzie średniej arytmetycznej jako pierwszą czynność wykonuje się normalizację wszystkich elementów macierzy. Polega ona na tym, że każdy pojedynczy element danej kolumny macierzy dzieli się przez sumę elementów tej kolumny. Następnie oblicza się średnią arytmetyczną każdego wiersza znormalizowanych danych. Otrzymane wartości to współczynniki wagowe (priorytety) poszczególnych elementów. Wyznaczenie wag za pomocą średnich daje wyniki przybliżone w stosunku do mnożenia macierzy, jednakże dokładność ta przy nieskomplikowanych strukturach jest wystarczająca. Jednocześnie w praktyce obliczenie to jest najłatwiejsze (nie jest konieczna znajomość rachunku macierzowego) i najszybsze. W dalszej części (przykładzie) stosowana jest metoda średniej arytmetycznej, która jest wystarczająco dokładna w praktycznych modelach decyzyjnych. Poza wskazaniem współczynników wagowych w_i w postaci wartości od 0 do 1 często przedstawia się je też jako tzw. priorytety idealne, gdzie poszczególne współczynniki wagowe w_i^* oblicza się wg wzoru:

$$w_i^* = \frac{w_i}{w_{\max}} \quad (6.26)$$

gdzie:

- $w_{\max}$ – maksymalna wartość spośród wszystkich uzyskanych współczynników wagowych.

6.3. Schemat postępowania w budowie modelu ...

Jak już wspomniano wcześniej macierz par porównań A powinna mieć odpowiednią jakość. W przypadku metody *AHP* istnieje możliwość weryfikacji poprawności (jakości) porównań parami elementów. Zaleca się [169], aby sprawdzenie obejmowało weryfikację merytoryczną oraz weryfikację formalną. Weryfikacja merytoryczna to przede wszystkim sprawdzenie czy wyniki mają sens. Weryfikacja to polega głównie na obserwacji wartości współczynników wagowych (priorytetów) i stwierdzeniu ich sensu lokalnie i globalnie (w całym modelu).

W niektórych sytuacjach możliwe jest wykrycie błędu modelu, który może być efektem wadliwej budowy, błędnego wprowadzania danych do macierzy itp. Weryfikacja formalna sprowadza się do analizy związanej ze sprawdzeniem wszystkich macierzy porównań czy są one zgodne – wewnętrznie spójne (wewnętrznie niesprzeczne). Nie sprawdza się macierzy o wymiarze 2×2 (macierz taka jest wewnętrznie spójna). W metodzie *AHP* jest stosowany tzw. współczynnik zgodności CR , którego wartości powinno się podawać wraz ze współczynnikami wagowymi.

W równaniu 6.25 symbolem c oznaczono stałą. Równanie to ma rozwiązanie wtedy, gdy stała ta jest największą wartością wektora własnego λ_{max} macierzy porównań parami A [195]. Równanie 6.25 można zapisać jako:

$$Aw = \lambda_{max} \cdot w \quad (6.27)$$

Wartość λ_{max} powinna być porównana z liczbą n elementów macierzy A . W zależności od wartości λ_{max} :

- λ_{max} jest równa n , to macierz A jest w pełni zgodna – wyniki analizy mogą być wykorzystywane do dalszych obliczeń,
- λ_{max} jest niewiele większa od n , to macierz A jest w niewielkim stopniu wewnętrznie sprzeczna – wyniki mogą być wykorzystywane do dalszych obliczeń,
- λ_{max} jest znacznie większa od n – macierz A jest wewnętrznie sprzeczna – wyniki analizy nie mogą być dalej wykorzystywane do dalszych obliczeń.

W celu wyznaczenia wartości λ_{max} oraz oszacowania czy jest ona niewiele, czy znacznie większa od n w pierwszej kolejności należy oszacować jej wartość dla macierzy A . W dalszym opisie przytoczono sposób szacowania λ_{max} tylko na podstawie średniej arytmetycznej. W ramach tego oszacowania jako pierwsze należy wartości każdego elementu macierzy pomnożyć przed odpowiadający jej współczynnik wagowy. Następnie należy zsumować wartości elementów macierzy wierszami. Poszczególne sumy należy podzielić przez odpowiadające im współczynniki wagowe a następnie obliczyć średnią arytmetyczną wszystkich wierszy. Otrzymany wynik jest wartością λ_{max} .

W drugiej kolejności należy obliczyć tzw. indeks zgodności CI za pomocą wzoru:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (6.28)$$

Ostatecznie należy wyznaczyć współczynnik zgodności CR za pomocą wzoru:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6.29)$$

gdzie:

- RI – tablicowana wartość zależna od porównywanej liczby elementów n – tabl. 6.10.

Tabl. 6.10. Wartość RI w zależności od liczby porównywanych elementów n

n	2	3	4	5	6	7
RI	0,00	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [169]

W ostatnim kroku wartość współczynnika zgodności CR należy porównać z wartością graniczną. Twórca metody Saaty [196] wskazał jako wartość graniczną 0,10. Jeżeli wartość CR jest mniejsza lub równa od 0,1 wówczas można stwierdzić, że porównania w macierzy wykonano prawidłowo a decyzje podjęte na podstawie modelu będą poprawne. Powyżej tej wartości granicznej wynik spowoduje, że decyzja może być niewiarygodna i błędna – macierz jest niespójna i niskiej jakości). Często stosowane są bardziej rygorystyczne wartości graniczne [169]:

- 0,05 dla $n=3$,
- 0,08 dla $n=4$,
- 0,10 dla $n \geq 5$.

W ramach weryfikacji nie można manipulować porównaniami parami, co ma na celu sztuczne obniżenie współczynnik zgodności CR .

Weryfikacja wyników może zawierać także dodatkowo analizę wrażliwości, która polega na sprawdzeniu jaki wpływ ma zmiana elementu macierzy na współczynnik zgodności CR . Weryfikacja ta pozwala na określenie w jakim stopniu zmiana porównania parami danego elementu powoduje zmianę ostatecznych wyników.

Ostatnim elementem schematu postępowania podczas oceny wariantów (rys. 6.4) jest agregacja wyników AHP w decyzjach podejmowanych grupowo. Analizy tego rodzaju jak wybór rozwiązania drogowego i środków zabezpieczających przed hałasem zdaniem autora powinny być prowadzone przy udziale specjalistów różnych branż (o czym już wcześniej niejednokrotnie wspomniano). Ze względu również na charakter zagadnienia agregacja powinna być prowadzona na etapie porównań parami poszczególnych elementów.

Agregacja ocen może być prowadzona na dwa sposoby jako [169]:

- agregacja indywidualnych osądów podczas dokonywania porównań parami realizowana wspólnie przez grupę,
- agregacja indywidualnych priorytetów, która polega na łączeniu ostatecznych wartości priorytetów pozyskanych od niezależnych respondentów.

W przypadku oceny rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem w proponowanym podwójnym procesie wyboru (najpierw wybór wariantów najlepiej zabezpieczających przed hałasem lub ograniczających wpływ hałasu) a później ocena i wybór wariantu ostatecznego (metoda *AHP*), trudno jest zrealizować drugą metodę agregacji. W tym przypadku praca specjalistów dokonujących wyboru w praktyce może zaczynać się już podczas analiz i wstępnego wyboru rozwiązań (wariantów) optymalnych z uwagi na ograniczenie wpływu hałasu na zdrowie ludzi. W ramach pracy grupy możliwe jest stosowanie behawioralnych metod agregacji wyników (przy wykorzystaniu różnego rodzaju metod prowadzenia dyskusji – np. burza mózgów itp.) oraz metod matematycznych [169]. W ramach zrealizowanego przykładu (rozdz. 7) wykorzystano pracę specjalistów, którzy w pracy zawodowej tworzą zespół i w związku z tym wykorzystano pierwszą metodę agregacji oraz opisywane powyżej metody. Z wykonanych badań i obserwacji wynika, że najlepiej sprawdza się wspólne podejmowanie decyzji (osiąganie konsensusu w wyniku dyskusji) w ocenie par elementów modelu.

Aby jednak można było jednoznacznie stwierdzić, jaki rodzaj współpracy grupy jest efektywny i poprawny niezbędne są dalsze badania.

6.3.5. Wybór wariantu – etap 5

Wybór wariantu na podstawie przygotowanego modelu i wyników oceny staje się o wiele łatwiejszy. Decyzja ostateczna powinna jednak pozostawać po stronie decydenta. Należy zwrócić szczególną uwagę na to, że model decyzyjny i wyniki osiągnięte z niego nie są celem a jedynie narzędziem w procesie decyzyjnym. W wielu sytuacjach szczególnych możliwa jest budowa innej postaci modelu niż ta, którą przedstawiono w monografii. Możliwy jest również wybór innej metody analizy.

6.3.6. Wdrożenie wariantu i jego ocena – etap 6

Etap wdrożenia i ocena rozwiązań w rzeczywistości to bardzo ważny element całego procesu należącego do procesu inwestycyjnego w drogownictwie. W praktyce poznanie cech obiektu po realizacji i porównanie ich do założeń to poza niekiedy wymogiem formalnym „lekcja na przyszłość”. Wymogiem formalnym może być wykonanie analizy porealizacyjnej lub na dalszym etapie eksploatacji obiektu przeglądu ekologicznego zgodnie z obowiązującymi przepisami.

6.4. Zalety i wady modelu

Do podstawowych zalet modelu decyzyjnego dotyczącego wyboru rozwiązań i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym należą:

- Model może być wykorzystywany nawet przy braku danych ilościowych co do niektórych kryteriów – wystarczą kryteria określone jakościowo, np. za pomocą skal (uciążliwości, wpływu na zdrowie itp.). Metoda *AHP* jako jedna z nielicznych umożliwia stosowanie kryteriów ilościowych i jakościowych. Większość innych metod wymaga danych w tych samych jednostkach, aby możliwe stało się ich porównanie.
- Model może być wykorzystywany dwustopniowo – w pierwszym podejściu wybierane są warianty spełniające kryteria zdrowotne i ekonomiczne natomiast w drugim pozostałe kryteria dotyczące zagadnień społecznych, środowiskowych i technicznych.
- Model jest elastyczny i uniwersalny – można go modyfikować, rozszerzać i skracać w zależności od niezbędnych kryteriów i wariantów rozwiązań.
- Zaletą modelu jest zastosowanie kryteriów uwzględniających zasady zrównoważonego rozwoju.
- Model w zdecydowanej większości daje konkretne odpowiedzi związane z wariantami analizowanych rozwiązań.

Do wad modelu decyzyjnego dotyczącego wyboru rozwiązań i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym można zaliczyć:

- W przypadku braku kryteriów ze wskaźnikami ilościowymi wprowadzane są wskaźniki jakościowe (opisowe). Taki sposób oceny oparty na kryteriach jakościowych może być obciążony subiektywizmem oceny. Rozwiązaniem tego problemu jest wprowadzenie do określenia w programach ochrony środowiska przed hałasem specjalistów i projektantów rozwiązań drogowych środków zabezpieczających, którzy np. w wyniku burzy mózgów określą zarówno elementy kryteriów jak i stopień wpływu przyjętych rozwiązań na nie.
- Istnieje możliwość manipulacji zwłaszcza w zakresie porównania parami elementów. Efekt ten można wyeliminować wprowadzając konieczny udział kilku niezależnych ekspertów.
- Model może być wrażliwy nawet na niewielkie zmiany wartości macierzy porównań. Niezbędna jest doświadczenie w tego rodzaju analizach od prowadzącego prace zespołu specjalistów. Niezbędna jest również duża koncentracja podczas porównania elementów modelu parami.

7. Przykład zastosowania modelu decyzyjnego wyboru rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem

Badania modelu przy tak wielu danych i zmiennych można wykonać i testować na różnego rodzaju przykładach i przypadkach w nich występujących. W poniższym przykładzie wykorzystano zalecenia i schemat postępowania podany w powyższym rozdziale. Do badań funkcjonowania modelu decyzyjnego przyjęto przykład dla typowej sytuacji, która może mieć miejsce w realizacji praktycznie każdego programu ochrony środowiska przed hałasem (część danych pochodzi z rzeczywistego programu ochrony środowiska) oraz w ramach innych opracowań środowiskowych, gdzie występują analizy akustyczne i problem wyboru rozwiązań zabezpieczających. W ramach analiz wykonano porównanie możliwości ograniczenia emisji hałasu drogowego, jakie daje z jednej strony zastosowanie technicznych środków ochrony (ekranów akustycznych) oraz alternatywnie, wykorzystanie innych rozwiązań drogowych, które mogą w skuteczny sposób ograniczyć poziom hałasu w otoczeniu odcinka drogi.

7.1. Analiza w zakresie identyfikacji i definiowania problemu oraz celu decyzyjnego – etap 1

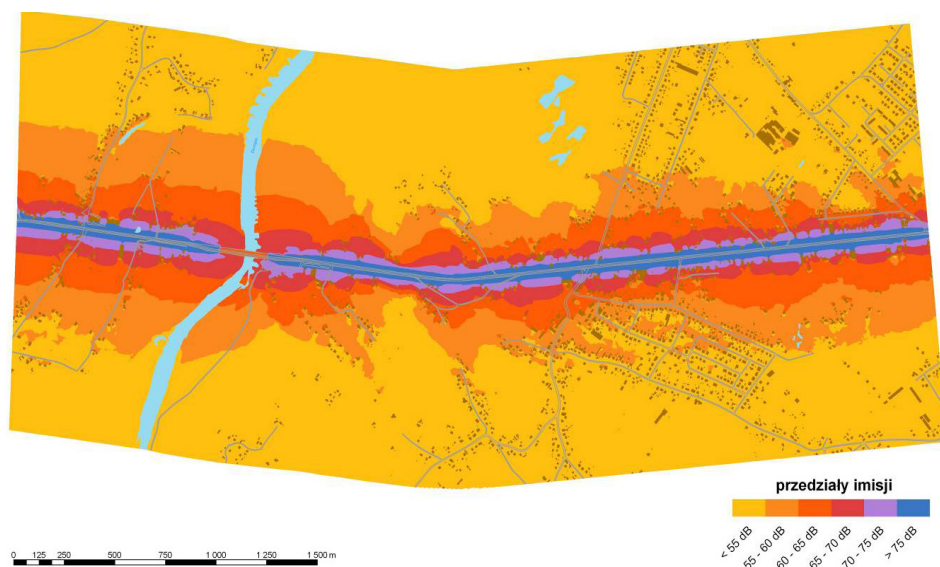
W przykładzie uwzględniono wyniki analiz akustycznych wykonanych w ramach opracowania map akustycznych dla dróg krajowych o natężeniu ruchu powyżej 16 400 pojazdów na dobę oraz wybrane elementy programu ochrony środowiska przed hałasem. Do analiz został wybrany odcinek drogi krajowej klasy GP o długości 4,54 km przebiegający w bliskim sąsiedztwie zabudowy mieszkaniowej o zróżnicowanej intensywności zabudowy i charakteryzujący się dużym stopniem negatywnego oddziaływania akustycznego na otoczenie. Na analizowanym odcinku drogi wybudowanych jest już w stanie istniejącym 500 m ekranów akustycznych o wysokości 3,0 m.

Odcinek zlokalizowany jest na dojeździe do miasta (ok. 120 tys. mieszkańców) – cechuje duże obciążenie ruchem (ŚDR na poziomie 21800 pojazdów/dobę) i znaczący udział w ruchu pojazdów ciężkich (19,7% w skali doby, 30,8% w porze nocy). Jednocześnie ograniczona dostępność drogi (brak wjazdów, skrzyżowań) powoduje, że na przeważającej długości analizowanego odcinka nie występują ograniczenia prędkości, w związku z czym prędkość dopuszczalna wynosi 90 km/h i jest ona wykorzystywana przez kierowców (z licznymi jej przekroczeniami).

Efektom tak określonych warunków lokalizacyjno-ruchowych jest bardzo znacząca uciążliwość akustyczna analizowanego odcinka, wyrażająca się zarówno znacznym zasięgiem przebiegu izofon o wysokich wartościach natężenia hałasu – mapę emisji hałasu dla wskaźnika L_{DWN} przedstawiono na rys. 7.1. W tabl. 7.1 podano podstawowe informacje o liczbie osób znajdujących się w poszczególnych zakresach emisji hałasu

7. Przykład zastosowania modelu decyzyjnego ...

(zasięgach ekspozycji hałasu) oraz wartości wskaźnika M . W tabl. 7.2 podano informacje nt. liczby budynków, powierzchni terenu w poszczególnych zakresach emisji hałasu. Z uwagi na dalsze analizy, zakres emisji hałasu w tabl. 7.1 i tabl. 7.2 odniesiono orientacyjnie do wartości dopuszczalnych dla tego terenu oraz do stopnia uciążliwości i zalecanych strategii i celów ogólnych (zalecane w tabl. 3.10). Podanie liczby budynków w poszczególnych zakresach emisji hałasu umożliwiło także oszacowanie liczby budynków we wnętrzach, których może dochodzić do przekroczeń wartości dopuszczalnych hałasu powyżej 40 dB. Powyższe dane zostały przygotowane na podstawie wybranych (większości) zaleceń i warunków podanych w rozdz. zawartych w tabl. 6.3 dla etapu 1.



Rys. 7.1. Mapa emisji hałasu w otoczeniu analizowanego odcinka drogi dla wskaźnika L_{DWN}

Źródło: opracowanie własne

7.1. Analiza w zakresie identyfikacji (...) – etap 1

Tabl. 7.1. Liczba mieszkańców oraz wartość wskaźnika *M* w poszczególnych zakresach imisji hałasu dla stanu istniejącego

Zakres imisji hałasu [dB]	Wartość dopuszczalna hałasu [dB]	Stopień uciążliwości hałasu	Strategia i cel ogólny działania	Mieszkańcy				Wskaźnik <i>M</i>
				[osoby]	[%]	[osoby]	[%]	[-]
Doba								
<45		<52 mały	Długookresowa (zapobieganie)	762	25,5	1870	62,6	
45–50		52-62 średni						
50–55								
55–60								
60–65	68	62-70 duży	Krótkookresowa (prewencja)	527	17,6	1118	37,4	1435
65–70		>70 b. duży		340	11,4			
70–75				215	7,2			
>75				36	1,2			
Suma:				2988	100,0	2988	100,0	
Pora nocy								
<40		<52 mały	Długookresowa (zapobieganie)	1178	39,4	1178	39,4	
40–45		52-62 średni						
45–50								
50–55								
55–60	59	62-70 duży	Krótkookresowa (prewencja)	915	30,6	1810	60,6	3135
60–65				462	15,5			
65–70				293	9,8			
>70		>70 b. duży		129	4,3			
Suma:				2988	100,0	2988	100,0	

Źródło: opracowanie własne

7. Przykład zastosowania modelu decyzyjnego ...

Tabl. 7.2. Liczba budynków, powierzchnia terenu w poszczególnych zakresach emisji hałasu dla oraz liczba budynków, dla których może wystąpić przekroczenie wartości dopuszczalnych hałasu w ich wnętrzu dla stanu istniejącego

Zakres emisji hałasu [dB]	Wartość dopuszczalna hałasu [dB]	Stopień uciążliwości hałasu	Strategia i cel ogólny działania	Budynki		Możliwe przekroczenia wart. hałasu 40 dB w budynku	Powierzchnia terenu			
				[budynki]	[%]		[budynki]	[km²]	[%]	
Doba										
<45		<52 mały	Długookresowa (zapobieganie)	153	24,2		5,4	59,3		
45–50		52-62 średni	Średniookresowa (redukcja)	229	36,2		1,6	17,6		
50–55				62-70 duży	Krótkookresowa (prewencja)		109	17,2	1	11,0
55–60							77	12,2	0,5	5,5
60–65	68	>70 b. duży	56			8,9	0,3	3,3		
65–70			8	1,3	0,3	3,3				
70–75			Suma:		632	100,0	–	9,1	100,0	
>75										
Pora nocy										
<40		<52 mały	Długookresowa (zapobieganie)	239	37,8		6,2	68,1		
40–45		52-62 średni	Średniookresowa (redukcja)	189	29,9		1,4	15,4		
45–50				62-70 duży	Krótkookresowa (prewencja)		99	15,7	0,8	8,8
50–55							70	11,1	0,3	3,3
55–60	59	>70 b. duży	33			5,2	0,2	2,2		
60–65			2	0,3	0,2	2,2				
65–70			Suma:		632	100,0	–	9,1	100,0	
70–75										

Źródło: opracowanie własne

7.1. Analiza w zakresie identyfikacji (...) – etap 1

Zgodnie z obowiązującym rozporządzeniem [141] dla terenu o tym charakterze zabudowy i jej funkcji przyjęto wartości dopuszczalne hałasu dla pory doby 68 dB i dla pory nocy 59 dB – otoczenie drogi zostało sklasyfikowane jako tereny zabudowy mieszkalnej wielorodzinnej i zamieszkania zbiorowego oraz jako tereny mieszkaniowo-usługowe. Ze względu na zagrożenie zdrowia ludzi i zalecenia związane z przyjmowaniem strategii ochrony przed hałasem (strategia krótkookresowa – prewencja) większość dalszych analiz odnoszona jest do wartości dla całej doby 60 dB i pory nocy 50 dB.

Z informacji zawartych w tabl. 7.1 wynika, że dla pory doby (wskaźnik L_{DWN}) 37,4% osób zamieszkających w obszarze analizy (1118 spośród 2988 osób) narażonych jest na hałas przekraczający wartość 60 dB (co stanowi duży i bardzo duży stopień uciążliwości hałasu), a w odniesieniu do pory nocy (wskaźnika L_N) aż 60,6% analizowanej populacji (1810 osób) podlega oddziaływaniu hałasu o natężeniu powyżej 50 dB. Problemem w tym przypadku jest bardzo duży procent osób narażonych na bardzo duży i duży stopień uciążliwości na hałas w porze nocy (ponad 60% wszystkich mieszkańców). Czy faktycznie można uznać ten problem za najważniejszy? Wskażają to jeszcze wyniki dodatkowych analiz dla pozostałych wskaźników.

Z informacji zawartych w tabl. 7.2 wynika, że w blisko 40% budynków (250 budynków) może występować przekroczenie wartości dopuszczalnych hałasu 40 dB. W porze nocy wartość ta zmniejsza się do 16,7% (105 budynków). Jednocześnie w otoczeniu tych budynków występuje duży i bardzo duży stopień uciążliwości hałasu. Dane te są wyłącznie orientacyjne jednak pokazują charakter uciążliwości i wskazują na problem „rozlewania” się hałasu na znacznej powierzchni terenu. Dla stopnia uciążliwości dużego i bardzo dużego powierzchnia zanieczyszczonego hałasem terenu to 2,1 km², czyli 23,1% całej analizowanej powierzchni.

Kolejnym elementem identyfikacji problemu i jego definiowania oraz celu koniecznych działań jest określenie wartości wskaźników wpływu hałasu na zdrowie ludzi opisanych w tabl. 6.3. Na podstawie głównie danych o liczbie mieszkańców w poszczególnych zakresach emisji hałasu oszacowano wartości wskaźników wpływu hałasu na zdrowie ludzi:

- dokuczliwość D – tabl. 7.3
- wysoka dokuczliwość WD – tabl. 7.4,
- zaburzenia snu ZS – tabl. 7.5,
- wysokie zaburzenia snu WZS – tabl. 7.6,
- wskaźnik utraconych lat życia w zdrowiu $DALY$ – tabl. 7.7.

Ze względu na ograniczoną ilość miejsca w tabelach podano jedynie wyniki obliczeń.

7. Przykład zastosowania modelu decyzyjnego ...

Tabl. 7.3. Wartości wskaźnika dokuczliwości hałasu *D* dla stanu istniejącego

Zakres emisji hałasu [dB]	Wartość dopuszczalna hałasu [dB]	Stopień uciążliwości hałasu	Strategia i cel ogólny działania	Mieszkańcy	Dokuczliwość <i>D</i>				
				[osoby]	[osoby]	[%]	[osoby]	[%]	
Doba									
<45	68	<52 mały	Długookresowa (zapobieganie)	762	107	13,7	344	44,0	
45–50		52–62 średni	Średniookresowa (redukcja)						
50–55									
55–60									
60–65		62–70 duży	Krótkookresowa (prewencja)	527	160	20,5	438	56,0	
65–70		>70 b. duży		340	140	17,9			
70–75				215	116	14,8			
>75				36	22	2,8			
Suma:				2988	782	100,0	782	100,0	

Źródło: opracowanie własne

Tabl. 7.4. Wartości wskaźnika wysokiej dokuczliwości hałasu *WD* dla stanu istniejącego

Zakres emisji hałasu [dB]	Wartość dopuszczalna hałasu [dB]	Stopień uciążliwości hałasu	Strategia i cel ogólny działania	Mieszkańcy	Wysoka dokuczliwość <i>WD</i>					
				[osoby]	[osoby]	[%]	[osoby]	[%]		
Doba										
<45		<52 mały	Długookresowa (zapobieganie)	762	38	10,9	130	37,4		
45–50		52-62 średni								
50–55			Średniookresowa (redukcja)	1108	92	26,5				
55–60										
60–65	68	62–70 duży	Krótkookresowa (prewencja)	527	69	19,8	218	62,6		
65–70					340	69			19,8	
70–75					215	66			19,0	
>75		>70 b. duży			36	14			4,0	
Suma:				2988	348	100,0	348	100,0		

Źródło: opracowanie własne

7.1. Analiza w zakresie identyfikacji (...) – etap 1

Tabl. 7.5. Wartości wskaźnika zaburzeń snu ZS dla stanu istniejącego

Zakres emisji hałasu [dB]	Wartość dopuszczalna hałasu [dB]	Stopień uciążliwości hałasu	Strategia i cel ogólny działania	Mieszkańcy	Zaburzenia snu ZS		
				[osoby]		[%]	
Pora nocy							
<40		<52 mały	Długookresowa (zapobieganie)	1178	131	131	26,9
40–45			Średniookresowa (redukcja)				
45–50							
50–55	59	52–62 średni	Krótkookresowa (prewencja)	915	140	356	73,1
55–60				462	94		
60–65		62-70 duży		293	76		
65–70				129	42		
70–75		>70 b. duży		11	4		
Suma:				2988	487	487	100,0

Źródło: opracowanie własne

Tabl. 7.6. Wartości wskaźnika wysokich zaburzeń snu WZS dla stanu istniejącego

Zakres emisji hałasu [dB]	Wartość dopuszczalna hałasu [dB]	Stopień uciążliwości hałasu	Strategia i cel ogólny działania	Mieszkańcy	Wysokie zaburzenia snu WZS		
				[osoby]		[%]	
Pora nocy							
<40		<52 mały	Długookresowa (zapobieganie)	1178	53	53	23,7
40–45							
45–50			Średniookresowa (redukcja)				
50–55	59	52–62 średni	Krótkookresowa (prewencja)	915	61	171	76,3
55–60				462	45		
60–65		62-70 duży		293	39		
65–70				129	23		
70–75		>70 b. duży		11	3		
Suma:				2988	224		

Źródło: opracowanie własne

7. Przykład zastosowania modelu decyzyjnego ...

Tabl. 7.7. Wartości wskaźnika straconych lat życia w zdrowiu *DALY* dla stanu istniejącego

Zakres emisji hałasu [dB]	Stopień uciążliwości	Strategia i cel ogólny działania	Mieszkańcy	DALY _D	DALY _{ZS}	DALY _{MI}	DALY				
			[osoby]	[lat/rok]			[lat/rok]				
Doba								35			
<45	<52 mały	Długookresowa (zapobieganie)	762	2							
40–45											
45–50	52–62 średni								Średniookresowa (redukcja)	1108	3
50–55											
55–60	62–70 duży	Krótkookresowa (prewencja)	527	1							
60–65			340	1							
65–70	>70		215	1							
70–75	b. duży		36								
Suma:			2988	8							
Pora nocy											
<40	<52 mały	Długookresowa (zapobieganie)	1178		4	0					
40–45											
45–50		Średniookresowa (redukcja)					Krótkookresowa (prewencja)		915	3	0
50–55	52–62 średni	462	2		0						
55–60		293	1		7						
60–65	62–70 duży	129	0		10						
65–70		11	0		0						
70–75	>70 b. duży		0		0						
Suma:			2988			10		17			

Oznaczenia:

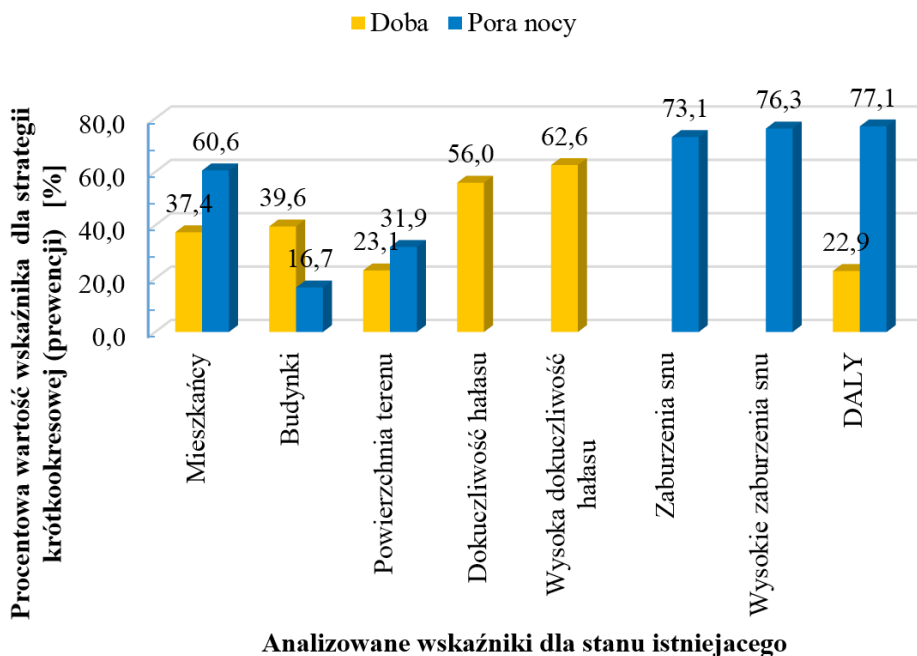
DALY_D – wartość wskaźnika dla dokuczliwości hałasu

DALY_{ZS} – wartość wskaźnika dla zaburzeń snu

DALY_{MI} – wartość wskaźnika dla zaburzeń sercowo-naczyniowych

Źródło: opracowanie własne

Zebranie i analiza wszystkich wskaźników w celu określenia problemu i celu działań w niektórych przypadkach może sprawiać problemy ze względu na znaczną liczbę danych. Należy pamiętać, że określenie problemu a następnie strategii działania głównie powinno opierać się na wpływie hałasu na zdrowie człowieka. Aby wskazać problem i wybrać cel dalszego działania zebrano wszystkie dotychczasowe wyniki dla stanu istniejącego na rys. 7.2. Wartości procentowe dla poszczególnych wskaźników obliczono dla dużego i bardzo dużego stopnia uciążliwości dla pory doby oraz średniego, dużego i bardzo dużego stopnia uciążliwości dla pory nocy. Zakresy te w powyższych tabelach odpowiadają zalecanej krótkookresowej strategii (prewencji).



Analizowane wskaźniki dla stanu istniejącego

Rys. 7.2. Procentowe wartości wskaźników dla określenia strategii krótkookresowej (działań prewencyjnych)

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie powyższego wykresu można stwierdzić, że głównym problemem jest oddziaływanie hałasu na ludzi w nocy. Świadczą o tym bardzo wysokie wartości wskaźników dotyczących liczby mieszkańców, zaburzeń i wysokich zaburzeń snu oraz wskaźnika *DALY*, który tutaj został przedstawiony oddzielnie dla doby i pory nocy. Spośród współczynników dotyczących okresu doby również dwa z nich: dokuczliwość i wysoka dokuczliwość (określane tylko dla całej doby) wskazują na wysokie wartości. Można uznać, że problemem dodatkowym jest także wpływ hałasu na ludzi w okresie całej doby jednak w stopniu mniejszym niż porze nocy.

Cel decyzyjny związany ze wstępnym wyborem wariantów rozwiązań w tym przypadku powinien odpowiadać na pytanie: Który wariant rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem jest optymalny głównie ze względu na porę nocy w krótkookresowym (prewencyjnym) działaniu? Słowo „optymalny” na tym etapie oznacza rozwiązanie z uwagi na kryterium zintegrowanej efektywności ekonomicznej, ekologicznej i społecznej (rozdz. 6.3.1) natomiast krótkookresowe działanie oznacza strategię krótkookresową. Przyjęta strategia działania jak w większości programów ochrony środowiska jest związana z działaniami krótkookresowymi (prewencją) w perspektywie najbliższych lat – do kolejnej rundy wykonywania map akustycznych

i programów ochrony środowiska przed hałasem. Należy zwrócić uwagę, że tak precyzyjnie określony cel będzie w dużym stopniu ograniczał zastosowanie szeregu wariantów rozwiązań i środków zabezpieczających przed hałasem.

7.2. Identyfikacja i wskazanie wariantów rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających – etap 2

Jednym ze sposobów przeciwdziałania hałasowi drogowemu i najczęściej stosowanym w polskiej praktyce jest budowa ekranów akustycznych. W analizowanym przypadku dla uzyskania pożądanego efektu w postaci znaczącego ograniczenia skali uciążliwości akustycznej należałoby, do istniejących 500 m ekranów o wysokości co najmniej 3 m, dobudować dodatkowo 4155 m ekranów i to po obu stronach drogi (praktycznie cały odcinek drogi znalazłby się w otoczeniu ekranów akustycznych). Takie rozwiązanie zostało zaproponowane w zrealizowanym programie ochrony środowiska przed hałasem dla tego odcinka drogi. Dlatego pierwszym wariantem jest w dalszej analizie i badaniach wariant polegający na budowie ekranów akustycznych. Wariant ten oznaczono jako „*POSPH*”. Poza znaczącymi nakładami na realizację zabezpieczeń w postaci ekranów akustycznych (w analizowanym przypadku szacunkowy koszt budowy proponowanych ekranów akustycznych wyniósłby około 12,5 mln złotych) stosowanie tego rodzaju zabezpieczeń nie zawsze jest możliwe technicznie (brak miejsca, zbyt duża liczba zjazdów i skrzyżowań), a coraz częściej również bywa społecznie i środowiskowo nieakceptowalne (izolacja przestrzenna terenów mieszkaniowych, zaburzenie warunków krajobrazowych, estetyki miejsca itp.).

Znając cel decyzyjny możliwy jest wstępny dobór (preselekcja) odpowiednich do niego rozwiązań. Zadanie to ułatwia schemat zalecanego postępowania podany na rys. 5.3. Analizując możliwości unikania emisji hałasu (I krok) możliwe jest odpowiednie zarządzanie transportem towarowym, czyli w tym przypadku ograniczeniem liczby pojazdów ciężarowych. Z uwagi na przyjęty cel decyzyjny ograniczenie to powinno dotyczyć pory nocy. Oczywiście w skali miasta przyjęcie takiego rozwiązania będzie oznaczało, że ruch ten musi być skierowany na inne drogi. W przykładzie tym przyjęto dla uproszczenia założenie, że jest możliwe skierowanie ruchu pojazdów ciężarowych w porze nocy na drogi alternatywne bez szkody dla innych użytkowników terenów ich otaczających.

Z wielu doświadczeń wiadomo, że może być to działanie nie do końca skuteczne (głównie ze względu na wielkość redukcji hałasu) dlatego przy braku innych rozwiązań w ramach kroku I (unikanie emisji hałasu) przyjęto dodatkowo, że w kroku II (zmniejszanie hałasu w strefie emisji) w krótkookresowym działaniu możliwe są do zastosowania zmiany w organizacji ruchu, które będą polegały na spowolnieniu ruchu i jego ukierunkowaniu. Oznacza to ograniczenie prędkości dla wszystkich pojazdów w okresie całej doby (uwzględnienie dodatkowego celu związanego ze wskaźnikami dokuczliwości hałasu w ciągu doby) i przekierowaniem ruchu ciężarowego na inne trasy w okresie nocy. Przy

7.2. Identyfikacja i wskazanie wariantów (...) – etap 2

tak przyjętych założeniach co do wyboru rozwiązań drogowych ograniczających hałas na odcinku drogi nie jest możliwe na tym etapie określenie skuteczności tych działań. Dlatego przyjęto kilka wariantów rozwiązań, dla których wykonano obliczenia emisji i imisji poziomu hałasu (zgodnie z metodykami i zaleceniami jak dla map akustycznych) – tak jak wcześniej dla stanu istniejącego. Warianty, które analizowano to:

- **POSPH** – wariant wprowadzony i przyjęty w programie ochrony środowiska przed hałasem, który zawiera jako środek zabezpieczający przed hałasem budowę kolejnych ekranów akustycznych (łącznie 4155 m ekranu akustycznego o wysokości 3,0 m za kwotę 12,5 mln zł).
- **W1a i W1b** – dwa warianty, dla których przyjęto ograniczenie prędkości dopuszczalnej na analizowanym odcinku odpowiednio do 70 km/h (W1A) i 50 km/h (W1b). Tego rodzaju zabezpieczenia, aby były skuteczne nie powinny być realizowane wyłącznie za pomocą znaków drogowych. Dla tych wariantów przyjmuje się zarówno zastosowanie oznakowania drogowego (wartość około 5000 zł na kilometr) oraz system zarządzania ruchem sprzężony z odcinkowym pomiarem prędkości) za kwotę około 300 000 zł w którym możliwe jest karanie kierowców za przekroczenia prędkości¹⁰. Szacuje się, że wartość tych wariantów wynosi po około 0,33 mln zł.
- **W2** – założono ograniczenie poziomu natężenia ruchu o 30% w skali całej doby (możliwe częściowe przekierowanie ruchu na trasę alternatywną za pomocą znaków zmiennej treści i systemów informacji dla podróżnych). Kwotę takiego systemu oszacowano na około 1,0 mln zł.
- **W3a i W3b** – w wariantach tych założono ograniczenie udziału pojazdów ciężkich w strukturze ruchu: do 30% wartości wyjściowej w wariantcie W3a i całkowitą eliminację pojazdów ciężkich w strukturze ruchu w porze nocy (wariant W3b). W tym przypadku również zastosowanie systemu, jak w wariantcie W2 za taką samą kwotę 1,0 mln zł.
- **W4** – w wariantcie tym założono jednocześnie zastosowanie działań w postaci ograniczenia prędkości dopuszczalnej do 50 km/h i zakaz ruchu pojazdów ciężkich w porze nocy (połączenie wariantu W1b i W3b) – za pomocą systemu podobnie jak w wariantcie W2 za kwotę około 1,0 mln zł.

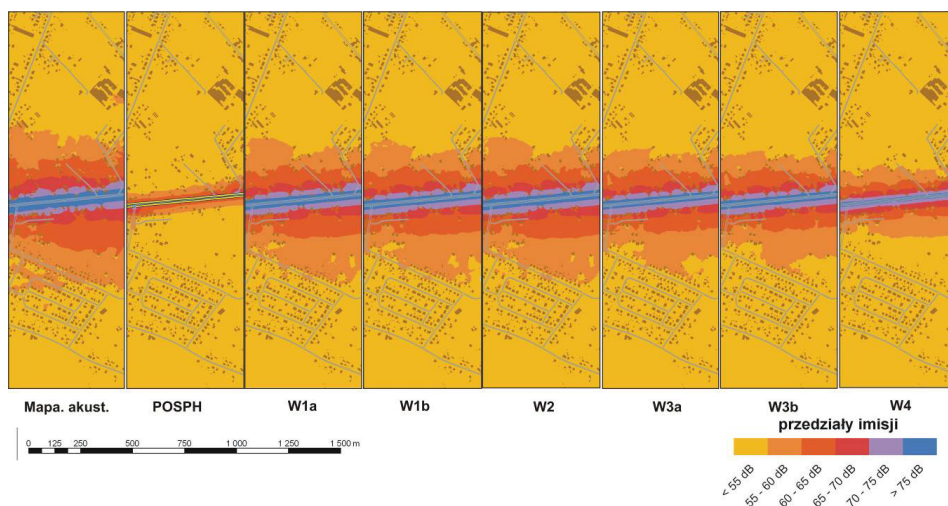
Należy zwrócić uwagę, że proponowane środki polegające na zmianach organizacji ruchu i wykorzystaniu systemów ITS mogą być bardzo efektywnie wykorzystywane. Większość analizowanych miast w Polsce dla których realizowane są programy ochrony środowiska przed hałasem posiada już systemy zarządzania ruchem ITS. Aby uzyskać dodatkowe rezultaty związane z zarządzaniem hałasem drogowym niezbędne jest wprowadzenie dodatkowych strategii sterowania, często bardzo prostych w realizacji. Wymaga to jednak koordynacji wielu zagadnień dla jakich wykorzystywane są systemy ITS.

¹⁰ Obecnie systemy takie zorientowane są wyłącznie na poprawę stanu bezpieczeństwa ruchu.

7.3. Ocena i wybór wariantów z uwagi na uwarunkowania ekonomiczne, ekologiczne i społeczne oraz definiowanie kryteriów do modelu decyzyjnego (wybór wariantów rozwiązań) – etap 3

W etapie 3 postępowania związanego z wyborem rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym powinien nastąpić wybór wariantów do dalszej analizy z uwagi na wskaźniki dotyczące oddziaływania hałasu na ludzi i otoczenie oraz kryterium zintegrowanej efektywności ekonomicznej, ekologicznej i społecznej. Następnie powinno nastąpić zdefiniowanie kryteriów do dalszej analizy (rys. 6.4) i oceny wybranych wariantów (etap 4). Przed wyborem wariantów do dalszej oceny zostały wykonane obliczenia wartości poszczególnych wskaźników dla wszystkich wariantów (włącznie z wariantem dla stanu istniejącego). Ze względu na znaczną objętość wyników pośrednich poniżej zostaną przedstawione jedynie wyniki końcowe wartości wybranych (najistotniejszych) wskaźników dla poszczególnych wskaźników i wariantów rozwiązań z wariantem dla stanu istniejącego (W0) włącznie.

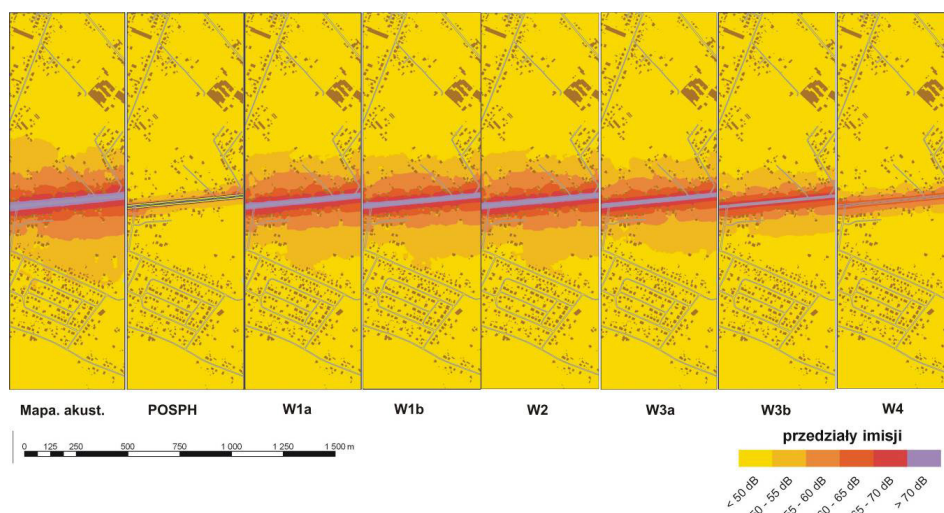
Analizę wskaźników dotyczących oddziaływania hałasu na ludzi i otoczenie wykonano na podstawie zaleceń zawartych w tabl. 6.3. Na rys. 7.3 przedstawiono mapę imisji hałasu dla wszystkich wariantów dla fragmentu odcinka – jest to fragment jednej z map akustycznych, która umożliwia wizualną ocenę zagrożenia hałasem w danym obszarze.



Rys. 7.3. Mapa imisyjna hałasu w otoczeniu wybranego odcinka drogi dla wszystkich wariantów rozwiązań – wskaźnik L_{DWN}

Źródło: opracowanie własne

7.3. Ocena i wybór wariantów z uwagi (...) – etap 3



Rys. 7.4. Mapa imisyjna hałasu w otoczeniu wybranego odcinka drogi dla wszystkich wariantów rozwiązań – wskaźnik L_N

Źródło: opracowanie własne

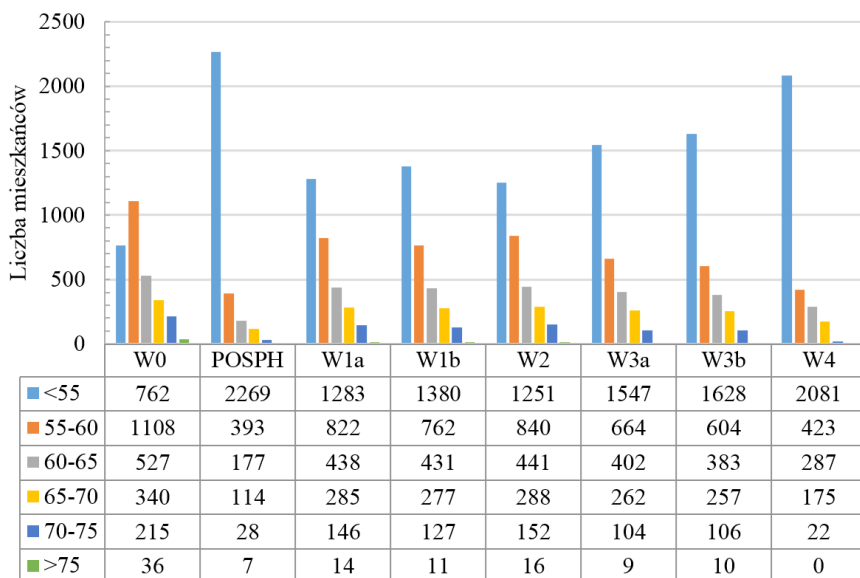
Na rys. 7.5 przedstawiono liczbę mieszkańców objętych poszczególnymi zakresami emisji hałasu dla całego obszaru i poszczególnych wariantów. Na rys. 7.6 przedstawiono liczbę mieszkańców objętych poszczególnymi zakresami emisji hałasu dla przyjętej krótkookresowej strategii działań oraz dla wszystkich wariantów, a w tabl. 7.8 zmiany procentowe w liczbie mieszkańców dla poszczególnych wariantów.

Tabl. 7.8. Procentowa wartość zmiany liczby mieszkańców w obszarze objętym strategią krótkookresową w stosunku do stanu istniejącego dla wszystkich wariantów

Wariant	Zmiana liczby mieszkańców [%]	
	Doba	Pora nocy
POSPH	70,8	72,2
W1a	21,0	24,8
W1b	24,3	27,6
W2	19,8	24,3
W3a	30,5	37,3
W3b	32,4	54,3
W4	56,7	79,6

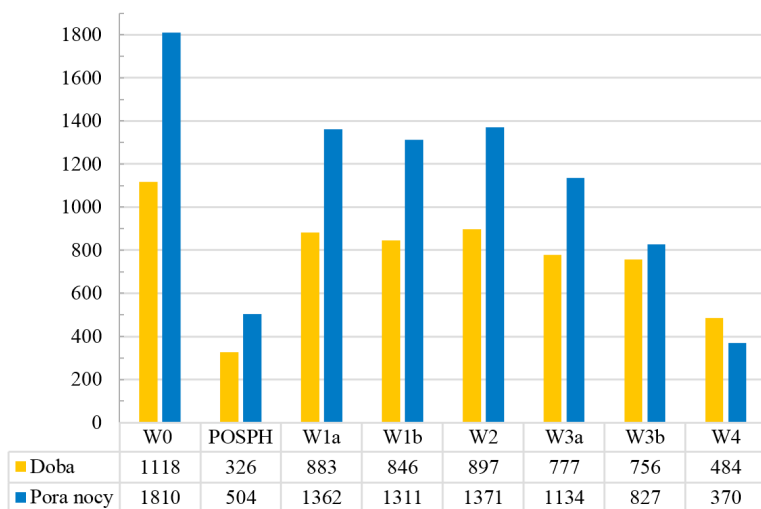
Źródło: opracowanie własne

7. Przykład zastosowania modelu decyzyjnego ...



Rys. 7.5. Liczba mieszkańców objętych poszczególnymi zakresami emisji hałasu dla wszystkich wariantów

Źródło: opracowanie własne



Rys. 7.6. Liczba mieszkańców objętych poszczególnymi zakresami emisji hałasu dla przyjętej krótkookresowej strategii działań dla wszystkich wariantów

Źródło: opracowanie własne

7.3. Ocena i wybór wariantów z uwagi (...) – etap 3

Na podstawie powyższych wyników należy stwierdzić, że spośród wszystkich wariantów najmniejsza liczba mieszkańców, jaka pozostaje w strefie znaczącego wpływu hałasu, występuje dla wariantów POSPH (ekrany akustyczne) oraz W4 (ograniczenie prędkości do 50 km/h i wyłączenie z ruchu pojazdów ciężkich w porze nocy). Dla okresu doby wyraźnie lepszy jest wariant POSPH natomiast dla pory nocy wariant W4.

W tabl. 7.9 zebrano wartości wskaźnika ΔM zgodnie z zaleceniami zawartymi w tabl. 6.5.

Tabl. 7.9. Procentowa zmiana wskaźnika M przed i po zastosowaniu rozwiązań chroniących przed hałasem dla wszystkich wariantów

Wariant	Pora doby			Pora nocy		
	M	M'	ΔM	M	M'	ΔM
	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]	[%]
W0	1435	-	-	3135	-	-
POSPH		296	79,4		632	79,8
W1a		937	34,7		1963	37,4
W1b		840	41,4		1808	42,3
W2		978	31,8		1989	36,5
W3a		730	49,1		1361	56,6
W3b		738	48,6		742	76,3
W4		287	80,0		156	95,0

Oznaczenia:

M – wartość wskaźnika dla stanu istniejącego (wzór 3.17),

M' – wartość wskaźnika po zastosowaniu rozwiązań dla danego wariantu,

ΔM – procentowa zmiana pomiędzy wartością wskaźnika dla stanu istniejącego i po wprowadzeniu wariantu rozwiązań chroniących przed hałasem (wzór 6.1).

Źródło: opracowanie własne

Jak można zauważyć procentowa zmiana wskaźnika ΔM osiąga najlepsze wartości dla wariantu W4 (95% zmiany w okresie nocy i 80% dla doby) oraz wariantu POSPH (79,8% dla pory nocy i 79,4% dla doby). Wysoką wartość wykazuje także wariant W3b zwłaszcza dla pory nocy, gdzie zmiana procentowa wynosi 76,3%. Podobną przewagę wariantów POSPH i W4 można zauważyć w przypadku wyników analizy wykonanej dla przyjętej krótkookresowej strategii działań związanej z liczbą budynków i powierzchnią terenu pozostających w strefie powyżej 60 dB (doba) i 50 dB (pora nocy), liczby budynków, w których może być przekroczona wartość 40 dB w ich wnętrzach – tabl. 7.10 i 7.11.

7. Przykład zastosowania modelu decyzyjnego ...

Tabl. 7.10. Liczba budynków i powierzchnia terenu dla wszystkich wariantów

Wariant	Liczba budynków		Liczba budynków, w których może być przekroczona wartość 40 dB		Powierzchnia terenu [km ²]	
	doba	pora nocy	doba	pora nocy	doba	pora nocy
<i>W0</i>	250	393	250	105	2,1	2,9
<i>POSPH</i>	78	124	78	21	0,9	1,5
<i>W1a</i>	201	300	201	79	1,5	2,3
<i>W1b</i>	193	289	193	75	1,4	2,7
<i>W2</i>	204	302	204	80	1,6	2,3
<i>W3a</i>	181	254	181	61	1,3	2
<i>W3b</i>	175	190	175	29	1,3	1,4
<i>W4</i>	118	91	118	1	0,8	0,6

Źródło: opracowanie własne

Tabl. 7.11. Zmiana procentowa liczby budynków i powierzchni terenu dla wszystkich wariantów

Wariant	Budynki		Budynki, w których może być przekroczona wartość 40 dB		Powierzchnia terenu	
	doba	pora nocy	doba	pora nocy	doba	pora nocy
<i>POSPH</i>	68,8	68,4	68,8	80,0	57,1	48,3
<i>W1a</i>	19,6	23,7	19,6	24,8	28,6	20,7
<i>W1b</i>	22,8	26,5	22,8	28,6	33,3	6,9
<i>W2</i>	18,4	23,2	18,4	23,8	23,8	20,7
<i>W3a</i>	27,6	35,4	27,6	41,9	38,1	31,0
<i>W3b</i>	30,0	51,7	30,0	72,4	38,1	51,7
<i>W4</i>	52,8	76,8	52,8	99,0	61,9	79,3

Źródło: opracowanie własne

Powyższe wartości dotyczące kryterium społecznego do tej pory w większości programów ochrony środowiska przed hałasem stanowiły podstawę do podejmowania decyzji o przyjęciu rozwiązania i środkach ochrony przed hałasem drogowym (poza nimi głównym kryterium były koszty). W tym przypadku trudno jest podjąć decyzję, który z wariantów jest lepszy (*POSPH* czy *W4*). W wielu przypadkach bez wizji w terenie, bez analizy *CBA* i *CEA*, oraz innych kryteriów podejmowane są decyzje, które nie zawsze są decyzjami prawidłowymi. W ten sposób została prawdopodobnie podjęta decyzja o budowie ekranów akustycznych, które zinwentaryzowano podczas wizji w terenie w trakcie realizacji programu ochrony środowiska przed hałasem, dla którego analizowany jest ten odcinek drogi.

7.3. Ocena i wybór wariantów z uwagi (...) – etap 3

W trakcie dalszej analizy wykonano obliczenia wskaźników związanych bezpośrednio z wpływem hałasu na zdrowie ludzi dla przyjętej strategii krótkookresowej, tj. poziomu hałasu dla doby 60 dB i dla pory nocy 50dB (z wyłączeniem wskaźnika *DALY*, który został obliczony dla całego zakresu emisji hałasu):

- dokuczliwość hałasu *D* – tabl. 7.12
- wysoka dokuczliwość hałasu *WD* – tabl. 7.13,
- zaburzenia snu *ZS* – tabl. 7.14,
- wysokie zaburzenia snu *WZS* – tabl. 7.15,
- wskaźnik utraconych lat życia w zdrowiu *DALY* – tabl. 7.16.

Ze względu na ograniczoną ilość miejsca podano jedynie wyniki obliczeń dla wszystkich wariantów rozwiązań.

Tabl. 7.12. Liczba mieszkańców dotkniętych i chronionych przed dokuczliwością hałasu dla wszystkich wariantów

Wariant	Liczba mieszkańców dotkniętych dokuczliwością hałasu	Liczba mieszkańców chronionych przed dokuczliwością hałasu	Procent mieszkańców chronionych przed dokuczliwością hałasu
W0	438	-	-
POSPH	122	316	72,1
W1a	338	100	22,8
W1b	321	117	26,7
W2	345	93	21,2
W3a	292	146	33,3
W3b	287	151	34,5
W4	172	266	60,7

Źródło: opracowanie własne

Tabl. 7.13. Liczba mieszkańców dotkniętych i chronionych przed wysoką dokuczliwością hałasu dla wszystkich wariantów

Wariant	Liczba mieszkańców dotkniętych wysoką dokuczliwością hałasu	Liczba mieszkańców chronionych przed wysoką dokuczliwością hałasu	Procent mieszkańców chronionych przed wysoką dokuczliwością hałasu
W0	218	-	-
POSPH	60	158	72,5
W1a	167	51	23,4
W1b	157	61	28,0
W2	170	48	22,0
W3a	142	76	34,9
W3b	139	79	36,2
W4	81	137	62,8

Źródło: opracowanie własne

7. Przykład zastosowania modelu decyzyjnego ...

Tabl. 7.14. Liczba mieszkańców dotkniętych i chronionych przed zaburzeniami snu dla wszystkich wariantów

Wariant	Liczba mieszkańców dotkniętych zaburzeniami snu	Liczba mieszkańców chronionych przed zaburzeniami snu	Procent mieszkańców chronionych przed zaburzeniami snu
<i>W0</i>	675	-	-
<i>POSPH</i>	98	577	85,5
<i>W1a</i>	267	408	60,4
<i>W1b</i>	257	418	61,9
<i>W2</i>	270	405	60,0
<i>W3a</i>	435	240	35,6
<i>W3b</i>	154	521	77,2
<i>W4</i>	63	612	90,7

Źródło: opracowanie własne

Tabl. 7.15. Liczba mieszkańców dotkniętych i chronionych przed zaburzeniami snu dla wszystkich wariantów

Wariant	Liczba mieszkańców dotkniętych wysokimi zaburzeniami snu	Liczba mieszkańców chronionych przed wysokimi zaburzeniami snu	Procent mieszkańców chronionych przed wysokimi zaburzeniami snu
<i>W0</i>	310	-	-
<i>POSPH</i>	47	263	84,8
<i>W1a</i>	129	181	58,4
<i>W1b</i>	123	187	60,3
<i>W2</i>	130	180	58,1
<i>W3a</i>	197	113	36,5
<i>W3b</i>	73	237	76,5
<i>W4</i>	29	281	90,6

Źródło: opracowanie własne

Duża liczba wskaźników w przypadku tej analizy sprawia, że może być ona mało czytelana. Stąd wyniki dla poszczególnych wskaźników zebrano na rys. 7.7 (okres doby) i na rys. 7.8 (pora nocy). Odniesieniem zmian jest wariant dla stanu istniejącego *W0* a wartości procentowe oznaczają procentowe zmniejszenie (redukcję) wskaźnika z uwagi na dany wariant rozwiązań. Z tego porównania wyłączono wskaźnik *DALY*, który wiąże okres doby z porą nocy.

7.3. Ocena i wybór wariantów z uwagi (...) – etap 3

Tabl. 7.16. Wskaźnik DALY dla wszystkich wariantów

Warianty	$DALY_D$	$DALY_{ZS}$	$DALY_{MI}$	$DALY$	Zmniejszenie DALY	
	[lat/rok]				[%]	
W0	8	10	17	35	-	-
POSPH	7	9	0	16	19	54,3
W1a	7	9	8	24	11	31,4
W1b	7	9	7	23	12	34,3
W2	7	9	8	24	11	31,4
W3a	8	10	5	23	12	34,3
W3b	7	9	1	17	18	51,4
W4	7	10	0	17	18	51,4

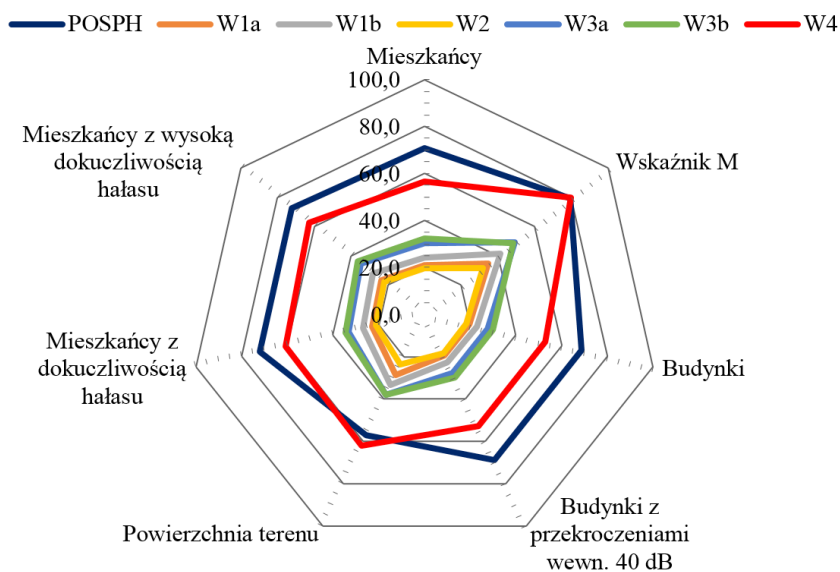
Oznaczenia:

$DALY_D$ – wartość wskaźnika dla dokuczliwości hałasu

$DALY_{ZS}$ – wartość wskaźnika dla zaburzeń snu

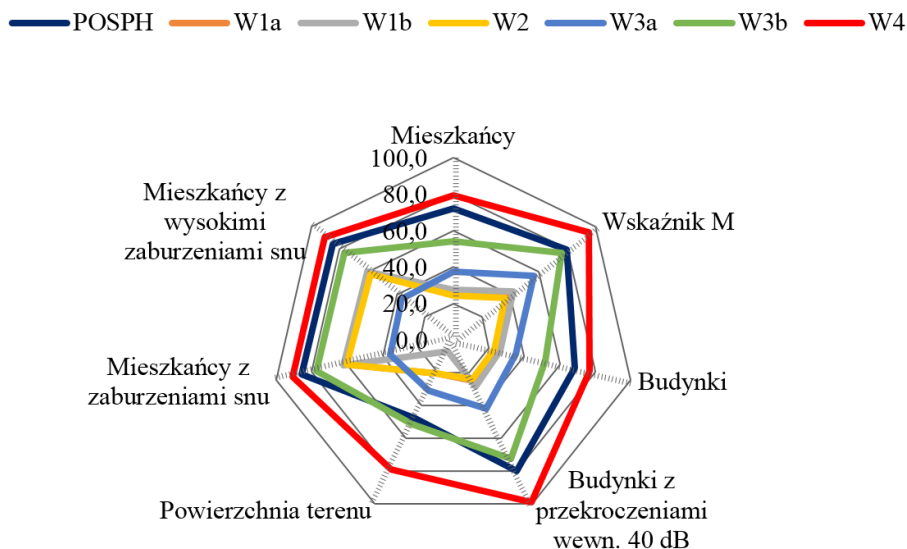
$DALY_{MI}$ – wartość wskaźnika dla zaburzeń sercowo-naczyniowych

Źródło: opracowanie własne



Rys. 7.7. Zestawienie procentowej redukcji wybranych wskaźników podkryteriów dla wszystkich wariantów w stosunku do stanu istniejącego (W0) – okres doby

Źródło: opracowanie własne



Rys. 7.8. Zestawienie procentowej redukcji wybranych wskaźników podkryteriów dla wszystkich wariantów w stosunku do stanu istniejącego (W0) – pora nocy

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie powyższego zestawienia należy stwierdzić, że większość wskaźników związanych z oddziaływaniem hałasu na ludzi i otoczenie przyjmuje najkorzystniejsze wartości dla wariantu POSPH dla okresu doby natomiast dla pory nocy dla wariantu W4.

W przypadku analiz CBA i CEA zostały obliczone następujące wskaźniki (na podstawie rozdz. 6.3.3, tabl. 6.4):

- Zintegrowanej efektywności ekonomicznej, ekologicznej i społecznej – wskaźnik *Eees* na podstawie analizy CBA – tabl. 7.17.
- Korzyści-koszty – wskaźnik *B/C* na podstawie analizy CBA – tabl. 7.17.
- Koszty-efektywność – wskaźnik *CER* na podstawie analizy CEA – tabl. 7.18 i 7.19.

7.3. Ocena i wybór wariantów z uwagi (...) – etap 3

Tabl. 7.17. Wartości kosztów hałasu *C* i korzyści *B*, zintegrowanej efektywności ekonomicznej, ekologicznej i społecznej *E_{ees}* oraz korzyści-kosztów *B/C* na podstawie analizy CBA dla wszystkich wariantów

Warianty	Koszty hałasu <i>C</i>	Korzyści <i>B</i> z wariantu	Zintegrowana efektywność ekonomiczna, ekologiczna i społeczna <i>E_{ees}</i>	Korzyści-koszty <i>B/C</i>
	[euro/rok]		[%]	[-]
<i>W0</i>	12396	-	-	-
<i>POSPH</i>	3865	8531	68,8	2,21 ¹⁾
<i>W1a</i>	8975	3420	27,6	0,38
<i>W1b</i>	8254	4142	33,4	0,50
<i>W2</i>	9186	3210	25,9	0,35
<i>W3a</i>	7336	5060	40,8	0,69
<i>W3b</i>	7273	5122	41,3	0,70
<i>W4</i>	3928	8467	68,3	2,16 ¹⁾

¹⁾ Oznacza przewagę korzyści nad kosztami – wariant ma sens zastosowania (*B/C*>1)

Źródło: opracowanie własne

Tabl. 7.18. Wartość współczynnika efektywności kosztowej *CER* dla całego obszaru analizy dla wszystkich wariantów

Warianty	Nakłady	Liczba osób narażonych na wysoką dokuczliwość w stanie istniejącym	Liczba osób narażonych na wysoką dokuczliwość po wprowadzeniu wariantu	Liczba osób poza wysoką dokuczliwością	<i>CER</i>
	[zł]	[osób]			[zł/osobę]
<i>W0</i>	-	2988	-	-	-
<i>POSPH</i>	12 500 000	2988	206	2782	4 493
<i>W1a</i>	330 000	2988	299	2689	123
<i>W1b</i>	330 000	2988	289	2699	122
<i>W2</i>	1 000 000	2988	303	2685	372
<i>W3a</i>	1 000 000	2988	274	2714	368
<i>W3b</i>	1 000 000	2988	270	2718	368
<i>W4</i>	1 000 000	2988	220	2768	361

Źródło: opracowanie własne

7. Przykład zastosowania modelu decyzyjnego ...

Tabl. 7.19. Wartość współczynnika efektywności kosztowej CER dla strategii krótkookresowej dla wszystkich wariantów

Warianty	Nakłady	Liczba osób narażonych na wysoką dokuczliwość w stanie istniejącym	Liczba osób narażonych na wysoką dokuczliwość po wprowadzeniu wariantu	Liczba osób poza wysoką dokuczliwością	CER
	[zł]	[osób]			[zł/osobę]
<i>W0</i>	-	218	-	-	-
<i>POSPH</i>	12 500 000	218	60	158	79 114
<i>W1a</i>	330 000	218	167	51	6 471
<i>W1b</i>	330 000	218	157	61	5 410
<i>W2</i>	1 000 000	218	170	48	20 833
<i>W3a</i>	1 000 000	218	142	76	13 158
<i>W3b</i>	1 000 000	218	139	79	12 658
<i>W4</i>	1 000 000	218	81	137	7 299

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie analizy CBA można zauważyć, że tylko dwa warianty dają zintegrowaną efektywność ekonomiczną, ekologiczną i społeczną E_{ees} na zbliżonym poziomie powyżej 68%. Tymi wariantami są: wariant *POSPH* i *W4*. Podobnie wskaźnik B/C przyjmuje wartości powyżej 1,0 dla tych wariantów (dla $B/C > 1$ jest sens stosować wariant). Należy jednak zwrócić uwagę, że efekt ten uzyskano w przypadku wariantu *POSPH* nakładami ponad 12,5-krotnie wyższymi niż w przypadku wariantu *W4*. Analiza efektywności kosztowej CEA została wykonana w dwóch wariantach – pierwszy dla całego analizowanego obszaru (wszyscy mieszkańcy), drugi dla obszaru po założeniu strategii krótkookresowej (mieszkańcy w zakresie oddziaływań dla doby 60 dB i pory nocy 50 dB). Jak można zauważyć w obu przypadkach analiz najniższa (najkorzystniejsza) wartość współczynnika CER występuje w przypadku wariantów *W1a* i *W1b*. Z analizy CBA i dalszych analiz wynika jednak, że są to warianty mało efektywne z punktu widzenia ochrony przed hałasem. Dlatego jako najkorzystniejszy wynik należy uznać wartość współczynnika CER równą 7299 zł/osobę w przypadku wariantu *W4*. Jednocześnie najniekorzystniejszy wynik daje wariant *POSPH*, gdzie zastosowano ekrany akustyczne. Różnica pomiędzy tymi wariantami jest ponad 10-krotna. Należy też uwzględnić fakt, że wartość nakładów na budowę ekranów akustycznych byłaby prawie taka sama jak np. dla budowy na tym odcinku środków fizycznych i rozwiązań uspokojenia ruchu. Analizując wartość współczynnika CER, aby osiągnął on wartość podobną jak w przypadku wariantu *POSPH* (budowa ekranów akustycznych) w wariantcie *W4* można byłoby wykorzystać 10,8 mln zł na rozwiązanie drogowe lub inny środek zabezpieczający przed wpływem

7.3. Ocena i wybór wariantów z uwagi (...) – etap 3

hałasu. Wartość ta będzie jeszcze wyższa, bo aż 13,4 mln zł w przypadku, jeśli w analizie współczynnika *CER* zostanie uwzględniona nie wysoka dokuczliwość jak poprzednio a wysokie zaburzenia snu (jako cel decyzyjny przyjęto przede wszystkim ochronę w porze nocy). Wartości współczynnika *CER* dla wysokich zaburzeń snu pokazano w tabl. 7.20.

Tabl. 7.20. Wartość współczynnika efektywności kosztowej *CER* dla strategii krótkookresowej dla wszystkich wariantów

Warianty	Nakłady	Liczba osób narażonych na wysokie zaburzenia snu w stanie istniejącym	Liczba osób narażonych na wysokie zaburzenia snu po wprowadzeniu wariantu	Liczba osób poza wysokimi zaburzeniami snu	<i>CER</i>
	[zł]	[osób]			[zł/osobę]
<i>W0</i>	-	310	-	-	-
<i>POSPH</i>	12 500 000	310	47	263	47 529
<i>W1a</i>	330 000	310	129	181	1 823
<i>W1b</i>	330 000	310	123	187	1 765
<i>W2</i>	1 000 000	310	130	180	5 556
<i>W3a</i>	1 000 000	310	197	113	8 850
<i>W3b</i>	1 000 000	310	73	237	4 219
<i>W4</i>	1 000 000	310	29	281	3 559

Źródło: opracowanie własne

W analizie wskaźników oddziaływania hałasu na ludzi i otoczenie oraz w przypadku analiz *CBA* i *CEA*, wariant *POSPH* i *W4* są wyraźnie dominującymi wariantami nad pozostałymi. Bezwzględną przewagę w przypadku analizy *CEA* ma wariant *W4*. W tej sytuacji może się wydawać, że w praktyce analiza może być zakończona i powinien zostać wybrany wariant *W4* przy tak znacznych różnicach współczynnika *CER* i bardzo dobrej wartości wskaźnika *B/C*. Takie podejście może być jednak błędne, ponieważ należy uwzględnić wpływ innych kryteriów i poddać wybrane warianty ocenie przy uwzględnieniu tych kryteriów w etapie 4.

Do dalszych analiz ze względu na dominujący ich dominujący charakter nad pozostałymi (w tym wartości $C/B > 1$) wybrano wariant *POSPH* i *W4*.

W drugiej części analizy zostaną wybrane elementy (podkryteria) kryteriów społecznego, środowiskowego i technicznego opisywane w rozdz. 6.3.3 i w tabl. 6.5, 6.6 i 6.7, które zostaną wykorzystane w etapie 4, czyli ocenie wariantów przy użyciu metody *AHP*.

Elementy tych kryteriów nie były uwzględnione w dotychczasowych analizach a ich lista ma wspomóc budowę realnego modelu decyzyjnego.

W przypadku kryterium społecznego do ważnych podkryteriów dla tego charakteru drogi (droga wysokiej klasy technicznej), natężeń ruchu oraz przyjętych rozwiązań należeć mogą wszystkie elementy wymienione w tabl. 6.5, czyli: preferencje i akceptacja społeczna rozwiązań, przestrzeń publiczna oraz możliwość poruszania się osób niepełnosprawnych.

Drugim z kryteriów, który w zależności od rodzaju opracowania środowiskowego może pełnić w procesie decyzyjnym ważniejszą lub mniej ważną rolę jest kryterium ekologiczne. W zależności od stopnia ogólności opracowania środowiskowego kryterium to może być charakteryzowane przez konkretne wartości wskaźników (wskaźniki ilościowe, np. wielkość emisji CO_2 , NO_x) lub opisowo, gdzie wskaźniki powinny być określane na podstawie opinii eksperta w zakresie danego oddziaływania. Określanie jakościowe stopnia oddziaływania wymaga doświadczenia i odrzucenia wielu subiektywnych opinii związanych np. ze stosowaniem ekranów akustycznych, nawierzchni porowatych redukujących hałas itd. W przypadku programów ochrony środowiska przed hałasem w celu określenia elementów (podkryteriów) kryterium środowiskowego wykorzystano elementy (podkryteria) z tabl. 6.6, która zawiera listę oddziaływań mogących wystąpić po wprowadzeniu niektórych rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym. Dodatkowo można wykorzystać zapisy tabel w rozdz. 5, które zawierają wstępną ocenę wpływu (i jego stopnia) określonych rozwiązań w zakresie elementów wszystkich analizowanych kryteriów.

Dla analizowanego przykładu do istotnych elementów kryterium środowiskowego dla wybranych wariantów zaliczono:

- Zanieczyszczenie powietrza. W przypadku zmian w płynności ruchu (poprawa stanu na skutek wprowadzenia zmian w organizacji ruchu) stan zanieczyszczeń powietrza od ruchu samochodowego może ulec poprawie. Podobna poprawa może nastąpić w wyniku wyeliminowania pojazdów ciężkich w porze nocy.
- Zmiany krajobrazu i estetyka. Z uwagi na propozycję wariantu POSPH, który zakłada zastosowanie ekranów akustycznych o wysokości 3 m na praktycznie całej długości analizowanego odcinka może dochodzić do zmian w krajobrazie i pogorszenia estetyki otoczenia drogi. Podobne oddziaływania jednak o mniejszej intensywności mogą wystąpić w przypadku wprowadzenia urządzeń wyświetlających informacje (bramownice z urządzeniami).

Podobnie jak w przypadku kryterium społecznego wprowadzenie elementów kryterium technicznego może być związane ze wskaźnikami ilościowymi jak i jakościowymi. Wprowadzenie wskaźników ilościowych w kryterium technicznym będzie związane także z rodzajem opracowania środowiskowego dla którego wykonywana jest ocena rozwiązań. W przypadku programów ochrony środowiska przed hałasem wprowadzenie kryteriów technicznych możliwe jest na podstawie opinii specjalisty i/lub projektanta

rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym (infrastruktury drogowej i ochrony środowiska). Na tym etapie nie są znane rozwiązania techniczne, materiałowe i technologiczne. Wizja w terenie, przyjęty rodzaj rozwiązań oraz doświadczenie specjalisty są w stanie na tym etapie umożliwić wybór odpowiednich elementów kryterium technicznego. W przypadku raportów o oddziaływaniu przedsięwzięć na środowisko oraz analiz porealizacyjnych i przeglądów ekologicznych możliwe jest wykorzystanie większej liczby danych ilościowych dla tego kryterium. W ramach wyboru elementów (podkryteriów) kryterium technicznego zaleca się wykorzystanie zapisów zawartych w tabl. 6.7. Dodatkowo można wykorzystać zapisy tabel w rozdz. 5, które zawierają wstępną ocenę wpływu (i jego stopnia) określonych rozwiązań w zakresie elementów kryterium technicznego.

Dla analizowanego przykładu jako istotne elementy kryterium technicznego uznano:

- Redukcja hałasu. Pomimo tego, że warianty rozwiązań mają porównywalne wyniki ograniczenia hałasu jednak dla strategii krótkookresowej i celu jakim jest ograniczenie hałasu w nocy warianty rozwiązań będą się różniły od siebie.
- Bezpieczeństwo ruchu drogowego. Wprowadzenie zmian organizacji ruchu polegających na ograniczeniu prędkości oraz ruchu ciężarowego w nocy powinno spowodować odczuwalne skutki w zakresie poprawy stanu bezpieczeństwa ruchu na odcinku drogi. W przypadku ekranów akustycznych można się spodziewać lokalnego pogorszenia stanu brd z uwagi np. na braki widoczności w rejonie skrzyżowań.
- Przepustowość i warunki ruchu. W wyniku ograniczenia prędkości oraz udziału pojazdów ciężarowych poprawie powinny ulec warunki ruchu na odcinku drogi.
- Warunki użytkowania i utrzymania. Każde z proponowanych rozwiązań wymagało będzie właściwego użytkowania i utrzymania. Związane jest z to zarówno z kosztami jak i częstotliwością napraw i remontów, które mogą wpływać na ruch drogowy (brd, płynność itp.).
- Trwałość techniczna. Czynniki ten jest bardzo istotny zarówno z punktu widzenia kosztów wymiany urządzeń jak i możliwości ich funkcjonowania w czasie.
- Trwałość akustyczna. W przypadku ekranów akustycznych (wariant *POSPH* rozwiązań) czynnik ten może być bardzo istotny.

Wszystkie z powyższych elementów związanych z kryterium technicznym na etapie programu ochrony środowiska przed hałasem mogą być reprezentowane przez wskaźniki jakościowe (stopień wpływu tych urządzeń na przyjęte kryterium dla określonego rozwiązania). Istotnym elementem o czym już wielokrotnie wspomniano jest doświadczenie specjalisty lub projektanta w realizacji i monitoringu podobnych rozwiązań w określaniu cech rozwiązań oraz różnic pomiędzy nimi.

W ramach powyższej analizy wybrano poza wariantami rozwiązań również elementy (podkryteria) kryteriów dla przyjętego dotychczas celu decyzyjnego, który jak założono wcześniej powinien odpowiadać na pytanie: ***Który wariant rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem jest optymalny głównie ze względu na porę***

nocy w krótkookresowym (prewencyjnym) działaniu? W ramach tego przykładu wykonano badanie polegające na udziale w ocenie wariantów specjalistów. Jak zauważono już na początku tego badania tak postawiony cel wpłynął początkowo na wyniki oceny. Specjaliści w ocenie kierowali się w dużym stopniu celem związanym z ograniczeniem hałasu w okresie nocy. Tymczasem wybór wariantów optymalnych z uwagi na ograniczenie hałasu w porze nocy nastąpił już wcześniej po określeniu wskaźników wpływu hałasu na ludzi i otoczenie oraz analizie CBA oraz CEA. W tej sytuacji dalsza ocena może dotyczyć jedynie wyboru rozwiązań z punktu widzenia kryteriów i ich elementów, które nie były uwzględnione w dotychczasowej analizie. Tak więc cel decyzyjny na tym etapie (przed budową struktury hierarchicznej modelu decyzyjnego) nie powinien już nawiązywać do ochrony przed hałasem a innych zagadnień, które do tej pory nie były analizowane a mogące mieć wpływ na ocenę i wybór końcowy wariantu. Stąd cel decyzyjny na tym etapie powinien być zmieniony na: **Wybór optymalnego wariantu rozwiązań spełniającego kryteria społeczne, środowiskowe i techniczne.**

Taki sposób prowadzenia analizy powoduje, że w większości sytuacji może być konieczne dwukrotne definiowanie celu – pierwszy raz przed wyborem możliwych do zastosowania wariantów rozwiązań drugi raz przy ocenie wybranych (optymalnych) rozwiązań.

Ostatnim działaniem przed etapem 4 (oceną i wyborem wariantu) jest ostateczne zestawienie kryteriów i podkryteriów oraz wariantów do oceny. Kryteria podobnie jak warianty rozwiązań będą spełniały zasadniczą rolę przy budowaniu modelu decyzyjnego i podejmowaniu ostatecznej decyzji o wyborze jednego rozwiązania. Poniżej zestawiono kryteria i podkryteria z powyższych analiz:

- **Kryterium społeczne:**
 - preferencje i akceptacja społeczna rozwiązań,
 - przestrzeń publiczna,
 - możliwość poruszania się osób niepełnosprawnych,
- **Kryterium środowiskowe:**
 - zanieczyszczenie powietrza,
 - zmiany krajobrazu i estetyka,
- **Kryterium techniczne:**
 - redukcja hałasu,
 - bezpieczeństwo ruchu drogowego,
 - przepustowość i warunki ruchu,
 - warunki użytkowania i utrzymania,
 - trwałość techniczna,
 - trwałość akustyczna.

Powyższa lista kryteriów i podkryteriów będzie jeszcze dokładnie sprawdzona z uwagą na zasady budowy struktury hierarchicznej w kolejnym etapie.

7.4. Analiza i ocena wybranych wariantów(...) – etap 4

Z uwagi na duże dysproporcje związane z możliwościami wpływu na oddziaływanie hałasu na otoczenie drogi wyrażane zwłaszcza przez wskaźniki ilościowe (opisywane wcześniej) do dalszych analiz przyjęto dwa warianty rozwiązań: wariant *POSPH* polegający na dobudowie ekranów akustycznych na analizowanym odcinku drogi oraz wariant W4 polegający na ograniczeniu prędkości do 50 km/h w okresie całej doby i wyeliminowaniu ruchu ciężkiego w porze nocy. W dalszej ocenie nie uwzględnia się już wariantu dla stanu istniejącego (W0). Poziom zagrożenia hałasem na tym odcinku jest na tyle duży, że nie powinno się dalej odkładać decyzji o wprowadzeniu rozwiązań ochronnych dla mieszkańców i nie ma potrzeby wprowadzania do modelu decyzyjnego tego wariantu.

7.4. Analiza i ocena wybranych wariantów rozwiązań i środków zabezpieczających przed hałasem – etap 4

7.4.1. Budowa modelu decyzyjnego

Zgodnie ze schematem podanym na rys. 6.5 w rozdz. 6.3.4. na początku etapu 4 należy zbudować model decyzyjny dzięki któremu będzie możliwa ocena i ostateczny wybór optymalnego wariantu. W analizowanym przykładzie pełny schemat struktury hierarchicznej modelu decyzyjnego powinien składać się z czterech poziomów: celu decyzyjnego, kryteriów i przypisanych do nich podkryteriów oraz wariantów rozwiązań (zgodnie z opisem rozdz. 6.3.4). W poprzednim rozdziale zostały wybrane kryteria i ich elementy składowe (podkryteria). Należy zwrócić uwagę, że analizowany przypadek i tworzony model ma typowy charakter związany z korzyściami – korzyścią jest np. redukcja hałasu i pod tym kątem powinna być budowana struktura modelu. Wprowadzenie elementów kryteriów strat (kosztów) do modelu korzyści może przynieść różne rezultaty końcowe – niekoniecznie poprawne. Zgodnie z opisem zawartym w rozdz. 6.3.4 kryteria powinny możliwie precyzyjnie i realnie opisywać rzeczywistość i proces podejmowania decyzji. Dlatego przed ostatecznym skonstruowaniem modelu ponownie powinno się wykonać przegląd kryteriów i podkryteriów oraz wariantów (rozdz. 6.3.3) oraz potencjalny ich wpływ na przyjęte rozwiązania (rozdz. 5). Zgodnie z tymi zasadami kryteria i podkryteria sprawdzono z uwagi na:

Kompletność. Dla analizowanego przykładu kompletność kryteriów jest wystarczająca do opisu modelu. Największa liczba elementów może występować w kryterium technicznym i może ona być zbyt duża, jeśli uwzględni się wszystkie elementy w porównaniu do pozostałych kryteriów. Nie ma potrzeby zbyt szczegółowego rozbudowywania modelu. Kolejne elementy kryteriów będą jeszcze weryfikowane w poniższych zasadach budowy modelu.

Nazewnictwo (nomenklatura). Nazwy poszczególnych kryteriów powinny być w miarę możliwości określone w stosunku do celu decyzyjnego. Podobnie jak w przy-

7. Przykład zastosowania modelu decyzyjnego ...

padku zasady kompletności nazwy podkryteriów powinny jednoznacznie wskazywać, że jest to model korzyści z uwagi na wybór konkretnego wariantu.

Stąd w zestawie kryteriów i podkryteriów w przykładowym modelu przyjęto następujące nazewnictwo:

- **Społeczne:**
 - preferencje społeczne,
 - przestrzeń publiczna,
 - niepełnosprawni.
- **Środowiskowe:**
 - stan powietrza,
 - krajobraz i estetyka.
- **Techniczne:**
 - redukcja hałasu,
 - brd,
 - przepustowość i warunki ruchu,
 - użytkowanie i utrzymanie,
 - trwałość techniczna,
 - trwałość akustyczna.

W badaniach podczas pracy grupy specjalistów zauważono, że używanie zbyt dużych skrótów nazw podkryteriów może powodować dezorientację. Dlatego podczas porównania parami powinny być przygotowane pełne ich brzmienia i skróty, aby w razie wątpliwości można było do nich się odwołać w każdym czasie. W ramach sprawdzenia zasady nazewnictwa zmieniono także dotychczasowe nazwy wariantów, które lepiej obrazują zastosowane rozwiązania chroniące przed hałasem:

- wariant *POSPH* w strukturze modelu będzie nazywany jako „Ekranu akustyczne”,
- wariant *W4* w strukturze modelu nazywany będzie jako „Organizacja ruchu”.

Niepowtarzalność elementów (brak redundancji). W modelu nie występują elementy powtarzalne zwłaszcza w obrębie kryteriów.

Od ogółu do szczegółu. Zasada ta związana jest z umieszczeniem grup elementów (kryteriów, podkryteriów, wariantów) na właściwych poziomach. Na samym dole struktury powinny znajdować się warianty rozwiązań, które są najbardziej szczegółowym elementem hierarchii. Jednocześnie kryteria powinny być porównywalne względem celu decyzyjnego, podkryteria względem kryteriów, warianty względem podkryteriów. Zasada ta jest spełniona, jeżeli element położony wyżej w hierarchii może być traktowany jako wspólna właściwość względem, której można porównać elementy poniżej tego elementu. Przykładem może być kryterium techniczne i jego elementy (podkryteria). Kryterium to określa zbiór właściwości technicznych rozwiązania, gdzie elementy te można porównywać między sobą – np. trwałość techniczna i trwałość akustyczna. Oba elementy określają właściwości techniczne i można je porównywać między sobą – np. wraz z czasem eksploatacji nawierzchni drogowej trwałość techniczna może się pogorszyć

jednak dla różnych rodzajów nawierzchni różny będzie stopień trwałości akustycznej (nawierzchnie porowate vs. nawierzchnie szczelne). W ramach sprawdzenia struktury tego modelu uznano, że należy zmienić kolejność elementów w ramach kryterium Techniczne na drugie miejsce po redukcji hałasu wprowadzono przepustowość i warunki ruchu, które są pojęciem bardziej ogólnym i zawierającym szersze znaczenie niż pozostałe.

Niezależność elementów. Niezależność elementów polega na zapewnieniu, że elementy w poszczególnych grupach (kryteriach, podkryteriach) nie są ze sobą powiązane. Jak już zapisano wcześniej najlepszym sprawdzeniem niezależności elementów może być to kiedy możliwa jest ocena spełnienia wariantu względem danego podkryterium bez względu na to jak ten wariant jest oceniany względem innych podkryteriów. W przypadku proponowanych kryteriów i podkryteriów zależności takie nie zachodzą.

Odpowiednia liczba elementów (podkryteriów) w poszczególnych grupach (kryteriach). Wszystkie elementy modelu decyzyjnego a zwłaszcza podkryteria spełniają regułę liczby Millera, tj. 7 ± 2 . Maksymalna liczba podkryteriów wynosi 6 w kryterium Techniczne.

Jednorodność (homogeniczność) elementów. Zgodnie z wcześniejszym opisem tej zasady w metodzie AHP zaleca się, aby kryteria znacząco od siebie się różniły natomiast w elementy (podkryteria) kryteriów powinny być jednolite, podobne do siebie. W przypadku analizowanego modelu decyzyjnego przyjęto, że homogeniczność to zestaw podobnych do siebie, niepowtarzających się właściwości cech (podkryteriów) należących do tej samej grupy kryteriów, a w przypadku wariantów cechą jednorodności będzie to, że są one w stanie spełnić ten sam cel decyzyjny. Zestaw elementów w analizowanej strukturze uznano jako jednorodny.

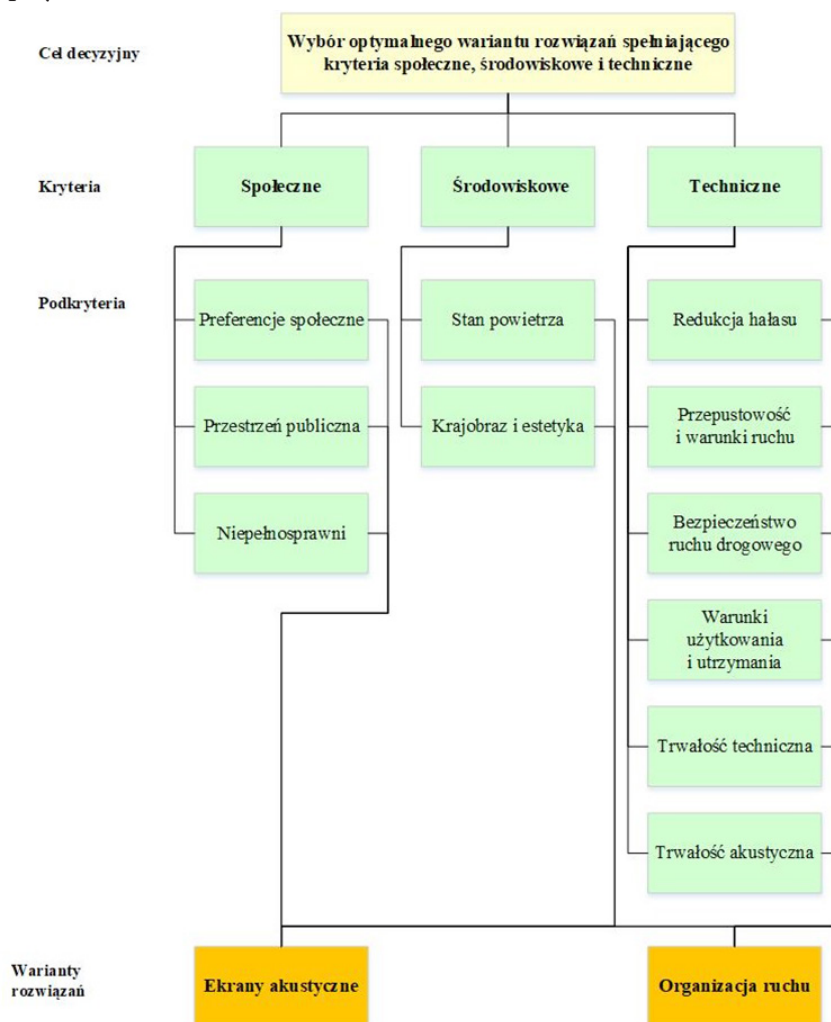
Po sprawdzeniu wszystkich zasad budowy hierarchii modelu ostateczna lista kryteriów i podkryteriów przyjęła następujący zakres i postać:

- **Społeczne:**
 - preferencje społeczne,
 - przestrzeń publiczna,
 - niepełnosprawni.
- **Środowiskowe:**
 - stan powietrza,
 - krajobraz i estetyka.
- **Techniczne:**
 - redukcja hałasu,
 - przepustowość i warunki ruchu,
 - brd,
 - użytkowanie i utrzymanie,
 - trwałość techniczna,
 - trwałość akustyczna.

7. Przykład zastosowania modelu decyzyjnego ...

Zgodnie z zaleceniami związanymi z budową struktury hierarchicznej modelu wykonano także walidację modelu decyzyjnego dla tego przykładu. Walidacja polegała głównie na ponownym sprawdzeniu spełnienia zasad budowy modelu hierarchicznego oraz porównaniu tego modelu z rzeczywistą sytuacją (głównie, czy elementy kryteriów oddają realną sytuację podejmowania decyzji).

Na rys. 7.9 przedstawiono ostateczną strukturę hierarchiczną modelu dla analizowanego przykładu.



Rys. 7.9. Struktura hierarchiczna modelu decyzyjnego dotyczącego wyboru optymalnego wariantu rozwiązań dla analizowanego przykładu

Źródło: opracowanie własne

7.4. Analiza i ocena wybranych wariantów(...) – etap 4

7.4.2. Macierze porównań parami i ocena wariantów

Na podstawie wzoru 6.14 oszacowano, że do wykonania w modelu będą niezbędne 23 porównania par elementów. Porównania parami wykonano grupowo w ramach pracy zespołu pięciu specjalistów ze zróżnicowanym doświadczeniem (3–27 lat doświadczeń, średnio około 15 lat) w zakresie zagadnień dotyczących opracowań środowiskowych i zagadnień związanych z hałasem drogowym.

Obliczenia wartości współczynników wagowych (nazywanych dalej w przykładzie wagami lub priorytetami) wykonano zgodnie z opisem w rozdz. 6.3.4 za pomocą średniej arytmetycznej (obliczenia poprzez mnożenie macierzy wykazały bardzo zbliżone wyniki a różnica pomiędzy wynikami nie przekraczała 7%). W tabl. 7.21 zestawiono pary porównań kryteriów względem celu decyzyjnego natomiast w tabl. 7.22 pokazano macierz porównania parami wraz z wynikami obliczeń wag dla poszczególnych kryteriów.

Tabl. 7.21. Arkusz porównania parami – kryteria względem celu decyzyjnego

Kryterium	Które kryterium jest ważniejsze ze względu na cel decyzyjny (Wybór optymalnego wariantu rozwiązań spełniającego kryteria społeczne, środowiskowe i techniczne) i jaka jest jego przewaga (stopień)?									Kryterium
	całkowita	bardzo duża	duża	mała (niewielka)	jednakowe znaczenie	mała	duża	bardzo duża	całkowita	
	9	7	5	3	1	3	5	7	9	
Społeczne				X						Środowiskowe
Społeczne						X				Techniczne
Środowiskowe								X		Techniczne

Źródło: opracowanie własne

Tabl. 7.22. Macierz porównań parami dla kryteriów wraz z wagami

Kryterium	Społeczne	Środowiskowe	Techniczne	Wagi	Wagi [%]
Społeczne	1	3	1/3	0,2431	24,31
Środowiskowe	1/3	1	1/7	0,0882	8,82
Techniczne	3	7	1	0,6687	66,87
$\lambda_{max}=3,0070$ $CI=0,0035$ $RI=0,52$ $CR=0,0067<0,05$			Suma	1,0000	100,00

Źródło: opracowanie własne

7. Przykład zastosowania modelu decyzyjnego ...

Jak można zauważyć największy wpływ na wybór rozwiązania mają kryteria Techniczne (66,87%), następnie kryterium Społeczne (24,31%) i kryterium Środowiskowe (8,82%). Macierz można uznać za parami zgodną, ponieważ oszacowana wartość współczynnika zgodności spełnia wartość graniczną 0,05.

W tabl. 7.23 zestawiono pary porównań podkryteriów względem kryterium Społeczne natomiast w tabl. 7.24 przedstawiono macierz porównania parami wraz z wynikami obliczeń wag dla poszczególnych podkryteriów.

Tabl. 7.23. Arkusz porównania parami podkryteria względem kryterium Społeczne dla przykładu modelu decyzyjnego

Podkryterium	Które podkryterium jest ważniejsze ze względu na kryterium Społeczne i jaka jest jego przewaga (stopień)?									Podkryterium
	całkowita	bardzo duża	duża	mała (niewielka)	jednakowe znaczenie	mała	duża	bardzo duża	całkowita	
	9	7	5	3	1	3	5	7	9	
Preferencje społeczne			X							Przestrzeń publiczna
Preferencje społeczne						X				Niepełnosprawni
Przestrzeń publiczna									X	Niepełnosprawni

Źródło: opracowanie własne

Tabl. 7.24. Macierz porównań parami dla elementów kryterium Społeczne wraz z wagami lokalnymi i globalnymi

0,2431	Preferencje społeczne	Przestrzeń publiczna	Niepełnosprawni	Wagi	
				Lokalne	Globalne
Preferencje społeczne	1	5	1/3	0,2674	0,0650
Przestrzeń publiczna	1/5	1	1/9	0,0637	0,0155
Niepełnosprawni	3	9	1	0,6689	0,1626
$\lambda_{max}=3,0292$ $CI=0,0146$ $RI=0,52$ $CR=0,0281<0,05$					

Źródło: opracowanie własne

7.4. Analiza i ocena wybranych wariantów(...) – etap 4

Jak można zauważyć największy wpływ na kryterium Społeczne ma podkryterium Niepełnosprawni (66,89%), następnie podkryterium Preferencje społeczne (26,74%) i podkryterium Przestrzeń publiczna (6,37%). W górnym lewym rogu w szarym polu podano równocześnie wartość wagi dla kryterium Społeczne z poprzedniej macierzy. Iloczyn tej wartości z poszczególnymi wagami podkryteriów umożliwił oszacowanie wag globalnych dla tych podkryteriów. Macierz można uznać za parami zgodną, ponieważ oszacowana wartość współczynnika zgodności spełnia wartość graniczną 0,05.

W tabl. 7.25 zestawiono pary porównań podkryteriów względem kryterium Środowiskowe natomiast w tabl. 7.26 przedstawiono macierz porównania parami wraz z wynikami obliczeń wag dla poszczególnych podkryteriów.

Tabl. 7.25. Arkusz porównania parami podkryteria względem kryterium Środowiskowe dla przykładu modelu decyzyjnego

Podkryterium	Które podkryterium jest ważniejsze ze względu na kryterium Środowiskowe i jaka jest jego przewaga (stopień)?									Podkryterium
	całkowita	bardzo duża	duża	mała (niewielka)	jednakowe znaczenie	mała	duża	bardzo duża	całkowita	
	9	7	5	3	1	3	5	7	9	
Stan powietrza		X								Krajobraz i estetyka

Źródło: opracowanie własne

Tabl. 7.26. Macierz porównań parami dla elementów kryterium Środowiskowe wraz z wagami lokalnymi i globalnymi

0,0882	Stan powietrza	Krajobraz i estetyka	Wagi	
			Lokalne	Globalne
Stan powietrza	1	7	0,8750	0,0772
Krajobraz i estetyka	1/7	1	0,1250	0,0110

Źródło: opracowanie własne

Największy wpływ na kryterium Środowiskowe ma podkryterium Stan powietrza (87,50%), następnie podkryterium Krajobraz i estetyka (12,50%). Takiego porównania parami i wyniku należało się spodziewać choćby ze względu na ostatnie problemy miast z zanieczyszczeniami powietrza występującymi zwłaszcza w okresie zimowym. W górnym lewym rogu w szarym polu podano równocześnie wartość wagi dla kryterium Środowisko. Iloczyn tej wartości z poszczególnymi wagami podkryteriów umożliwił oszacowanie wag globalnych dla tych podkryteriów. Macierz o wymiarze 2x2 jest

7. Przykład zastosowania modelu decyzyjnego ...

spójna wewnętrznie stąd nie oszacowuje się współczynnika CR.

W tabl. 7.27 zestawiono pary porównań podkryteriów względem kryterium Techniczne natomiast w tabl. 7.28 przedstawiono macierz porównania parami wraz z wynikami obliczeń wag dla poszczególnych podkryteriów.

Tabl. 7.27. Arkusz porównania parami podkryteria względem kryterium Techniczne dla przykładu modelu decyzyjnego

Podkryterium	Które podkryterium jest ważniejsze ze względu na kryterium Techniczne i jaka jest jego przewaga (stopień)?									Podkryterium
	całkowita	bardzo duża	duża	mała (niewielka)	jednakowe znaczenie	mała	duża	bardzo duża	całkowita	
	9	7	5	3	1	3	5	7	9	
Redukcja hałasu						X				Przepustowość i warunki ruchu
Redukcja hałasu							X ¹⁾			Bezpieczeństwo ruchu drogowego
Redukcja hałasu					X ²⁾					Warunki użytkowania i utrzymania
Redukcja hałasu						X ³⁾				Trwałość techniczna
Redukcja hałasu						X ³⁾				Trwałość akustyczna
Przepustowość i warunki ruchu					X ²⁾					Bezpieczeństwo ruchu drogowego
Przepustowość i warunki ruchu					X					Warunki użytkowania i utrzymania
Przepustowość i warunki ruchu					X					Trwałość techniczna
Przepustowość i warunki ruchu					X					Trwałość akustyczna
Bezpieczeństwo ruchu drogowego				X						Warunki użytkowania i utrzymania
Bezpieczeństwo ruchu drogowego					X					Trwałość techniczna
Bezpieczeństwo ruchu drogowego					X					Trwałość akustyczna
Warunki użytkowania i utrzymania					X ²⁾					Trwałość techniczna
Warunki użytkowania i utrzymania					X ²⁾					Trwałość akustyczna
Trwałość techniczna					X					Trwałość akustyczna

¹⁾ przyjęto wartość 6

²⁾ przyjęto wartość 2

³⁾ przyjęto wartość 4

7.4. Analiza i ocena wybranych wariantów(...) – etap 4

Źródło: opracowanie własne

Tabl. 7.28. Macierz porównań parami dla elementów kryterium Techniczne wraz z wagami lokalnymi i globalnymi

0,6687	Redukcja hałasu	Przepustowość i warunki ruchu	Bezpieczeństwo ruchu drogowego	Warunki użytkowania i utrzymania	Trwałość techniczna	Trwałość akustyczna	Wagi	
							Lokalne	Globalne
Redukcja hałasu	1	1/3	1/6	1/2	1/4	1/4	0,0504	0,0337
Przepustowość i warunki ruchu	3	1	1/2	1	1	1	0,1599	0,1069
Bezpieczeństwo ruchu drogowego	6	2	1	3	1	1	0,2671	0,1786
Warunki użytkowania i utrzymania	2	1	1/3	1	1/2	1/2	0,1095	0,0732
Trwałość techniczna	4	1	1	2	1	1	0,2066	0,1381
Trwałość akustyczna	4	1	1	2	1	1	0,2066	0,1831
$\lambda_{max}=6,0865$ $CI=0,0173$ $RI=1,25$ $CR=0,0138<0,10$								

Źródło: opracowanie własne

Największy wpływ na kryterium Techniczne ma podkryterium Bezpieczeństwo ruchu drogowego (26,71%), następnie podkryterium Trwałość techniczna i Trwałość akustyczna (20,66%) i podkryterium Przepustowość i warunki ruchu (15,99%). W górnym lewym rogu w szarym polu podano równocześnie wartość wagi dla kryterium Techniczne. Iloczyn tej wartości z poszczególnymi wagami podkryteriów umożliwił oszacowanie wag globalnych dla tych podkryteriów. Macierz można uznać za parami zgodną, ponieważ oszacowana wartość współczynnika zgodności spełnia wartość graniczną 0,10. Analiza parami w przypadku tego kryterium zajęła najwięcej czasu specjalistom, co potwierdza, że im większa liczba par elementów do porównania tym zadanie staje się trudniejsze.

W tabl. 7.29 zestawiono pary porównań wariantów rozwiązań względem wszystkich

7. Przykład zastosowania modelu decyzyjnego ...

podkryteriów natomiast w tabl. 7.30–7.41 przedstawiono macierze porównania parami wraz z wynikami obliczeń wag dla poszczególnych wariantów rozwiązań.

Tabl. 7.29. Arkusz porównania parami wariantów rozwiązań względem wszystkich podkryteriów dla przykładu modelu decyzyjnego

Wariant	Który wariant rozwiązań jest ważniejszy ze względu na podkryterium i jaka jest jego przewaga (stopień)?									Wariant
	całkowita	bardzo duża	duża	mała (niewielka)	jednakowe znaczenie	mała	duża	bardzo duża	całkowita	
	9	7	5	3	1	3	5	7	9	
Niepełnosprawni										
Ekrany akustyczne							X			Organizacja ruchu
Przestrzeń publiczna										
Ekrany akustyczne								X		Organizacja ruchu
Preferencje społeczne										
Ekrany akustyczne							X			Organizacja ruchu
Krajobraz i estetyka										
Ekrany akustyczne								X		Organizacja ruchu
Stan powietrza										
Ekrany akustyczne							X			Organizacja ruchu
Trwałość akustyczna										
Ekrany akustyczne					X					Organizacja ruchu
Trwałość techniczna										
Ekrany akustyczne						X				Organizacja ruchu
Warunki użytkowania i utrzymania										
Ekrany akustyczne							X			Organizacja ruchu
Bezpieczeństwo ruchu drogowego										
Ekrany akustyczne						X				Organizacja ruchu
Przepustowość i warunki ruchu										
Ekrany akustyczne			X							Organizacja ruchu
Redukcja hałasu										
Ekrany akustyczne			X							Organizacja ruchu

Źródło: opracowanie własne

7.4. Analiza i ocena wybranych wariantów(...) – etap 4

Tabl. 7.30. Macierz porównań parami wariantów rozwiązań dla podkryterium Niepełnoprawni

Wariant	Ekrany akustyczne	Organizacja ruchu	Wagi	Wagi [%]
Ekrany akustyczne	1	1/5	0,1667	16,67
Organizacja ruchu	5	1	0,8333	83,33
Suma			1,0000	100,00

Źródło: opracowanie własne

Tabl. 7.31. Macierz porównań parami wariantów rozwiązań dla podkryterium Przestrzeń publiczną

Wariant	Ekrany akustyczne	Organizacja ruchu	Wagi	Wagi [%]
Ekrany akustyczne	1	1/7	0,1250	12,50
Organizacja ruchu	7	1	0,8750	87,50
Suma			1,0000	100,00

Źródło: opracowanie własne

Tabl. 7.32. Macierz porównań parami wariantów rozwiązań dla podkryterium Preferencje społeczne

Wariant	Ekrany akustyczne	Organizacja ruchu	Wagi	Wagi [%]
Ekrany akustyczne	1	5	0,8333	83,33
Organizacja ruchu	1/5	1	0,1667	16,67
Suma			1,0000	100,00

Źródło: opracowanie własne

W przypadku preferencji społecznych założono, że mieszkańcy będą o wiele bardziej zdecydowani na dobudowę ekranów akustycznych do już istniejących. W rzeczywistości w trakcie wizji w terenie należy próbować rozpoznać preferencje społeczne w tej sprawie – mogą to być np. badania ankietowe jak w przypadku [35].

Tabl. 7.33. Macierz porównań parami wariantów rozwiązań dla podkryterium Krajobraz i estetyka

Wariant	Ekrany akustyczne	Organizacja ruchu	Wagi	Wagi [%]
Ekrany akustyczne	1	7	0,1250	12,50
Organizacja ruchu	1/7	1	0,8750	87,50
Suma			1,0000	100,00

Źródło: opracowanie własne

7. Przykład zastosowania modelu decyzyjnego ...

Tabl. 7.34. Macierz porównań parami wariantów rozwiązań dla podkryterium Krajobraz i estetyka

Wariant	Ekrany akustyczne	Organizacja ruchu	Wagi	Wagi [%]
Ekrany akustyczne	1	7	0,1250	12,50
Organizacja ruchu	1/7	1	0,8750	87,50
Suma			1,0000	100,00

Źródło: opracowanie własne

Tabl. 7.35. Macierz porównań parami wariantów rozwiązań dla podkryterium Stan powietrza

Wariant	Ekrany akustyczne	Organizacja ruchu	Wagi	Wagi [%]
Ekrany akustyczne	1	1/5	0,1667	16,67
Organizacja ruchu	5	1	0,8333	83,33
Suma			1,0000	100,00

Źródło: opracowanie własne

Tabl. 7.36. Macierz porównań parami wariantów rozwiązań dla podkryterium Trwałość akustyczna

Wariant	Ekrany akustyczne	Organizacja ruchu	Wagi	Wagi [%]
Ekrany akustyczne	1	1	0,5000	50,00
Organizacja ruchu	1	1	0,5000	50,00
Suma			1,0000	100,00

Źródło: opracowanie własne

Tabl. 7.37. Macierz porównań parami wariantów rozwiązań dla podkryterium Trwałość techniczna

Wariant	Ekrany akustyczne	Organizacja ruchu	Wagi	Wagi [%]
Ekrany akustyczne	1	1/3	0,2500	25,00
Organizacja ruchu	3	1	0,7500	75,00
Suma			1,0000	100,00

Źródło: opracowanie własne

Tabl. 7.38. Macierz porównań parami wariantów rozwiązań dla podkryterium Warunki użytkowania i utrzymania

Wariant	Ekrany akustyczne	Organizacja ruchu	Wagi	Wagi [%]
Ekrany akustyczne	1	1/5	0,1667	16,67
Organizacja ruchu	5	1	0,8333	83,33
Suma			1,0000	100,00

Źródło: opracowanie własne

7.4. Analiza i ocena wybranych wariantów(...) – etap 4

Tabl. 7.39. Macierz porównań parami wariantów rozwiązań dla podkryterium Bezpieczeństwo ruchu drogowego

Wariant	Ekrany akustyczne	Organizacja ruchu	Wagi	Wagi [%]
Ekrany akustyczne	1	1/3	0,2500	25,00
Organizacja ruchu	3	1	0,7500	75,00
Suma			1,0000	100,00

Źródło: opracowanie własne

Organizacji ruchu przypisano większy stopień wpływu na bezpieczeństwo ruchu drogowego, ponieważ ekrany lokalnie (w rejonie skrzyżowań) mogą pogarszać widoczność na wlotach podporządkowanych skrzyżowań.

Tabl. 7.40. Macierz porównań parami wariantów rozwiązań dla podkryterium Przepustowość i warunki ruchu

Wariant	Ekrany akustyczne	Organizacja ruchu	Wagi	Wagi [%]
Ekrany akustyczne	1	5	0,8333	83,33
Organizacja ruchu	1/5	1	0,1667	16,67
Suma			1,0000	100,00

Źródło: opracowanie własne

Wybór ekranów akustycznych z tak dużym stopniem przewagi nad organizacją ruchu w przypadku kryterium Przepustowości i warunków ruchu spowodowane jest tym, że dla wysokiej klasy drogi (GP) będzie wymagana dobudowa dróg wzdłuż drogi głównej, których zadaniem będzie zebranie i rozprowadzenie ruchu lokalnego. Tym samym konieczne będzie ograniczenie dostępności do drogi głównej i wjazdu na nią tylko w ściśle określonych miejscach (skrzyżowaniach). Taka sytuacja może spowodować poprawę przepustowości i warunków ruchu na analizowanym odcinku drogi.

Tabl. 7.41. Macierz porównań parami wariantów rozwiązań dla podkryterium Redukcja hałasu

Wariant	Ekrany akustyczne	Organizacja ruchu	Wagi	Wagi [%]
Ekrany akustyczne	1	5	0,8333	83,33
Organizacja ruchu	1/5	1	0,1667	16,67
Suma			1,0000	100,00

Źródło: opracowanie własne

W tabl. 7.42 zebrano wszystkie wagi lokalne i globalne dla poszczególnych podkryteriów. Jak łatwo zauważyć podkryteria: Bezpieczeństwo ruchu drogowego, Niepełnosprawni, Trwałość techniczna i Trwałość akustyczna mają najwyższe wartości współczynników wagowych w analizowanym modelu decyzyjnym.

7. Przykład zastosowania modelu decyzyjnego ...

Tabl. 7.42. Zestawienie wag dla poszczególnych kryteriów i podkryteriów w przykładowym modelu decyzyjnym

Kryteria (waga)	Podkryteria	Wagi (priorytety)	
		Lokalne	Globalne
Społeczne (0,2431)	Preferencje społeczne	0,2674	0,0650
	Przestrzeń publiczna	0,0637	0,0155
Środowiskowe (0,0882)	Niepełnosprawni	0,6689	0,1626
	Stan powietrza	0,8750	0,0772
	Krajobraz i estetyka	0,1250	0,0110
Techniczne (0,6687)	Redukcja hałasu	0,0504	0,0337
	Przepustowość i warunki ruchu	0,1599	0,1069
	Bezpieczeństwo ruchu drogowego	0,2671	0,1786
	Warunki użytkowania i utrzymania	0,1095	0,0732
	Trwałość techniczna	0,2066	0,1381
	Trwałość akustyczna	0,2066	0,1381

Źródło: opracowanie własne

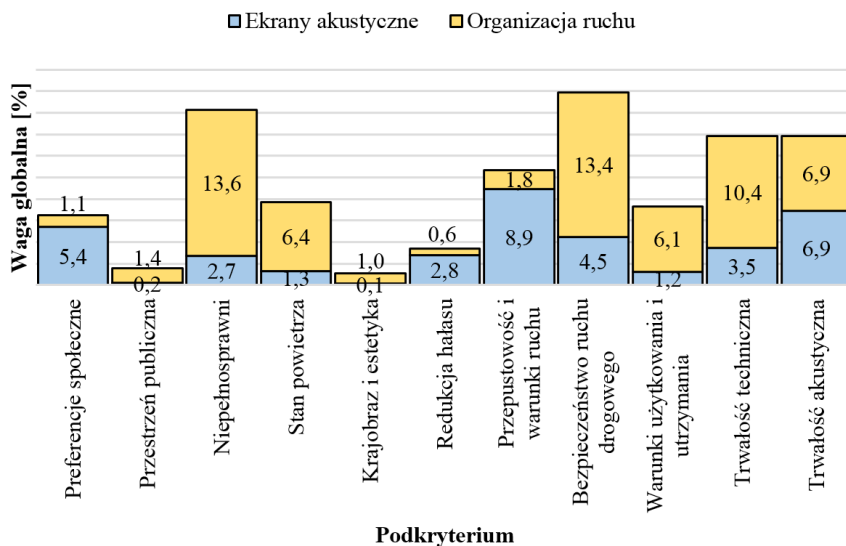
Tabl. 7.43. Zestawienie wag lokalnych i globalnych dla wariantów rozwiązań w przykładowym modelu decyzyjnym

Kryteria	Podkryteria	Wagi		Wagi lokalne [%]		Wagi (priorytety) globalne	
		Lokalne	Globalne	Ekrany akustyczne	Organizacja ruchu	Ekrany akustyczne	Organizacja ruchu
Społeczne 0,2431	Preferencje społeczne	0,2674	0,0650	83,33	16,67	0,0542	0,0108
	Przestrzeń publiczna	0,0637	0,0155	12,50	87,50	0,0019	0,0136
	Niepełnosprawni	0,6689	0,1626	16,67	83,33	0,0271	0,1355
Środowiskowe 0,0882	Stan powietrza	0,8750	0,0772	16,67	83,33	0,0129	0,0643
	Krajobraz i estetyka	0,1250	0,0110	12,50	87,50	0,0014	0,0096
Techniczne 0,6687	Redukcja hałasu	0,0504	0,0337	83,33	16,67	0,0281	0,0056
	Przepustowość i warunki ruchu	0,1599	0,1069	83,33	16,67	0,0891	0,0178
	Bezpieczeństwo ruchu drogowego	0,2671	0,1786	25,00	75,00	0,0447	0,1340
	Warunki użytkowania i utrzymania	0,1095	0,0732	16,67	83,33	0,0122	0,0610
	Trwałość techniczna	0,2066	0,1381	25,00	75,00	0,0345	0,1036
	Trwałość akustyczna	0,2066	0,1381	50,00	50,00	0,0691	0,0691
						0,3751	0,6249
						Suma	1,0000
Priorytety idealne						0,6002	1,0000

Źródło: opracowanie własne

7.4. Analiza i ocena wybranych wariantów(...) – etap 4

W tabl. 7.43 zestawiono ostateczne wyniki uzyskanych współczynników wagowych kryteriów i podkryteriów wagowych dla dwóch wariantów rozwiązań. Suma wartości wag globalnych dla poszczególnych podkryteriów w rozbiu na dwa analizowane rozwiązania daje ostateczny wynik działania modelu decyzyjnego wskazując na wartości wag (priorytetów) dla poszczególnych rozwiązań. Jednocześnie na rys. 7.10 pokazano wartości procentowe wag globalnych dla poszczególnych priorytetów modelu.



Rys. 7.10. Wartości współczynników wagowych (priorytetów) dla wariantów rozwiązań i podkryteriów

Źródło: opracowanie własne

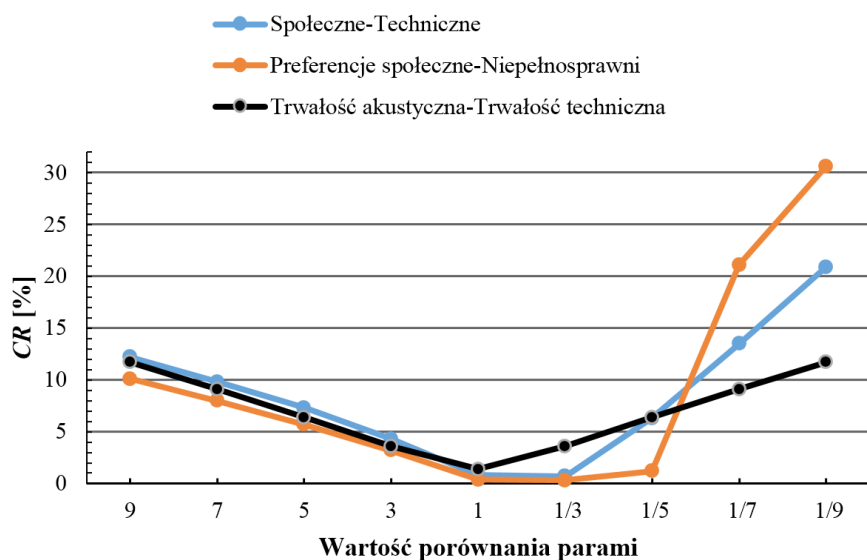
Na podstawie powyższych wyników należy stwierdzić, że w model decyzyjny wskazuje jako lepsze rozwiązanie zastosowanie zmian w organizacji ruchu. Rozwiązanie to uzyskało wynik prawie 62,5% w stosunku do ekranów akustycznych, które uzyskały 37,5%. Sprowadzenie tego wyniku do tzw. priorytetu idealnego (iloraz wartości wagi danego wariantu do maksymalnej wartości wagi) wskazuje na różnice pomiędzy wariantami rozwiązań – ekrany akustyczne w stosunku do organizacji ruchu osiągnęły wartość 60%. Jak można zauważyć na rys. 7.10 praktycznie wszystkie podkryteria w większym czy mniejszym stopniu wskazują na wybór organizacji ruchu jako rozwiązania optymalnego.

7.4.3. Analiza wrażliwości modelu

W ramach analiz wykonano także analizę wrażliwości modelu – jego wybranych elementów. W pierwszej kolejności poddano analizę wrażliwości wpływu zmian porównań parami pomiędzy dwoma kryteriami Społeczne i Techniczne, które w pierwszej fazie po-

7. Przykład zastosowania modelu decyzyjnego ...

równań parami wskazały, że kryterium Techniczne ma bardzo duże znaczenie w modelu decyzyjnym – jego waga wyniosła 66,87% podczas gdy kryterium Społeczne osiągnęło 24,31% (tabl. 7.22). W drugiej kolejności analizie wrażliwości poddano podkryteria Preferencje społeczne i Niepełnosprawni z grupy kryteriów Społeczne. Przypadek ten jest bardzo istotny w warunkach rzeczywistych, gdzie opinia społeczna na temat przyjmowanych rozwiązań jest często bardzo podzielona a nawet zmienna. W trzeciej kolejności badaniu poddano parę podkryteriów Trwałość akustyczna – Trwałość techniczna. Wybór ten został podyktowany tym, że specjaliści w bezpośredniej konfrontacji tych elementów wskazali na ich równość (jednakowe znaczenie). Dzięki temu badaniu dla trzech wybranych par elementów stało się możliwe określenie czy zmiana wartości porównań (oceny) wpłynie istotnie na wynik wyboru rozwiązań. Jako wskaźnik, który może reprezentować wyniki zmian przyjęto współczynnik zgodności CR, który obliczano każdorazowo po zmianie wartości porównań parami dla wybranych elementów – przykładowo dla pary elementów Społeczne – Techniczne zmieniano wynik porównania parami (od 9 do 1/9) i obliczano jednocześnie współczynnik CR oraz sprawdzano końcowe wagi dla dwóch rozwiązań. Wyniki tych analiz przedstawiono na rys. 7.11. i w tabl. 7.44. Należy zaznaczyć, że twórca metody Saaty wskazał, że wartość graniczna dla CR nie powinna przekraczać 10% (ostrzejsze kryteria stosowano w analizie dla poszczególnych macierzy powyżej).



Rys. 7.11. Zmienność współczynnika zgodności CR dla porównań parami wybranych elementów przykładowego modelu decyzyjnego

Źródło: opracowanie własne

Tabl. 7.44. Wartości współczynnika zgodności CR dla wybranych par porównań

Pary porównań	Wartość współczynnika zgodności CR [%] dla różnej wartości oceny porównań parami								
	9	7	5	3	1	1/3	1/5	1/7	1/9
Społeczne-Techniczne	12,2	9,8	7,3	4,3	0,8	0,7 ¹⁾	6,3	13,5	20,9
Preferencje społeczne – Niepełnosprawni	10,1	8,0	5,7	3,2	0,4	0,3 ¹⁾	1,2	21,1	30,6
Trwałość akustyczna – Trwałość techniczna	11,7	9,1	6,4	3,6	1,4 ¹⁾	3,6	6,4	9,1	11,7

¹⁾ wybrana ocena w porównaniu parami.

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie wykonanego badania dla trzech wybranych par elementów modelu decyzyjnego należy stwierdzić, że zmiany oceny przy porównaniu parami mają duży wpływ na wartości współczynnika zgodności CR. Świadczy to o znacznej wrażliwości modelu – zwłaszcza w zakresie porównania podkryteriów Preferencje społeczne – Niepełnosprawni. W każdym jednak przypadku badań nie zmienił się ostateczny wynik związany z wyborem rozwiązań. Zmiany wag dla wariantów rozwiązań dla skrajnych ocen podczas porównania parami przedstawiono w tabl. 7.45.

Tabl. 7.45. Zmiany wag wariantów rozwiązań dla wybranych par porównań i skrajnych ocen porównań parami

Pary porównań	Priorytety (wagi) dla wariantów rozwiązań dla skrajnych ocen porównań parami [%]			
	9		1/9	
	Ekrany akustyczne	Organizacja ruchu	Ekrany akustyczne	Organizacja ruchu
Społeczne-Techniczne	34,2	65,8	38,4	61,6
Preferencje społeczne – Niepełnosprawni	43,9	56,1	36,0	64,0
Trwałość akustyczna – Trwałość techniczna	36,0	64,0	38,4	61,6

Źródło: opracowanie własne

7.5. Wybór wariantu rozwiązań i środków zabezpieczających przed hałasem

W analizowanym przykładzie analizy zwłaszcza w zakresie wpływu hałasu na ludzi oraz analizy CBA wykazały, że warianty rozwiązań są prawie równoważne. Jedynie współczynnik efektywności *CER* jednoznacznie wskazywał na lepsze rozwiązanie, jakim jest organizacja ruchu. Do podjęcia decyzji o wyborze optymalnego rozwiązania było to jednak zbyt mało, ponieważ nie uwzględniono innych ważnych kryteriów. Zbudowany model decyzyjny realnie odzwierciedlił proces podejmowania decyzji. Ostatecznie wyznaczone współczynniki wagowe na podstawie porównań parami wykonane przez grupę specjalistów jednoznacznie wskazały, że lepszym rozwiązaniem jest organizacja ruchu na analizowanym odcinku drogi a nie ekrany akustyczne. Wybrane elementy modelu decyzyjnego do badań wrażliwości również potwierdziły, że pomimo zmian ocen wariant związany z organizacją ruchu jest lepszy. Wobec powyższego rekomendowanym rozwiązaniem jest zmiana organizacji ruchu polegająca na ograniczeniu prędkości na odcinku drogi do 50 km/h i całkowitym wyeliminowaniu ruchu ciężkiego w porze nocy.

8. Podsumowanie

W ramach wykonanych badań i analiz oraz w trakcie przygotowania modelu decyzyjnego stwierdzono wiele problemów, które wymagają jeszcze wielu badań. Do dalszych kierunków badań związanych z planowaniem i projektowaniem rozwiązań drogowych i środków ochrony przed hałasem należą:

- Badania nad wskaźnikami wpływu hałasu drogowego na zdrowie ludzi w warunkach krajowych (przede wszystkim wskaźniki dokuczliwości hałasu, zaburzeń snu, wpływu na układ sercowo-naczyniowy itp.). Badania te powinny umożliwić wprowadzenie w programach ochrony środowiska przed hałasem oraz innych opracowaniach środowiskowych poza oceną stanu poziomu hałasu dopuszczalnego również inne wskaźniki związane są z wpływem hałasu drogowego na zdrowie ludzi. Wskaźniki te powinny powiązane z rodzajem opracowania środowiskowego w przypadku uzyskiwania decyzji środowiskowych i lokalizacyjnych.
- Badania nad ujednoliceniem wskaźników dotyczących wartości dopuszczalnych dla wszystkich rodzajów opracowań środowiskowych – jednolite wskaźniki dla wszystkich rodzajów opracowań środowiskowych.
- Dalsze badania zwłaszcza nad rozwiązaniami drogowymi mającymi wpływ na emisję hałasu. Dotyczy to przede wszystkim rozwiązań związanych z:
 - priorytetami dla komunikacji zbiorowej,
 - planowaniem środków transportu,
 - planowaniem parkowania,
 - odcinkowymi ograniczeniami (kontrolami) prędkości,
 - uspokojeniem ruchu stosowanym w większych obszarach.
- Rozwiązania te coraz częściej stosowane mają duży potencjał nie tylko w zakresie hałasu, ale i w zakresie innych oddziaływań (przede wszystkim zanieczyszczeń powietrza).
- Dalsze badania w zakresie zachodzących zmian parku samochodowego, który ma wpływ na kształtowanie poziomu hałasu oraz innych połączonych z nim oddziaływań, głównie zanieczyszczeń hałasu (efekt kumulacji oddziaływań).
- Analizy i badania związane z okresami prognozowania hałasu i sposobów wyboru rozwiązań i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym zwłaszcza w dłuższych horyzontach czasowych.
- Analizy i badania możliwości wprowadzenia niektórych rozwiązań i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym dopiero po realizacji obiektu drogowego.
- Badania metod analizy kosztów zabezpieczeń akustycznych w powiązaniu z preferencjami zarządców dróg i mieszkańców w celu jak najlepszego ich wykorzystania w analizach korzyści-kosztów (CBA) i kosztów-efektywności stosowanych rozwiązań (CEA).

- Badania możliwości zastosowania w analizach *CBA* i *CEA* poszerzonych analiz kosztów przy zastosowaniu metod związanych z całym okresem funkcjonowania (życia) obiektu i rozwiązań ochrony przed hałasem drogowym (głównie metody *LCA*, *LCC* i *e-LCC*).
- Analizy kosztów jednostkowych rozwiązań drogowych i środków zabezpieczających przed hałasem drogowym i ich zmian w czasie. Koszty te powinny być analizowane systematycznie i utrzymywane w odpowiednich bazach danych.
- Badania nad możliwością zastosowania innych metod *MCDA* do budowy modeli decyzyjnych uwzględniających różne kryteria doboru rozwiązań drogowych (*AHP*/*ANP*, *ELECTRE* itp.).
- Badania nad grupową oceną i modelowaniem oraz podejmowaniem decyzji zwłaszcza w sytuacjach: kiedy występują znaczne konflikty społeczne, o dużych konsekwencjach finansowych itp. Należy poprowadzić badania mające na celu stwierdzenie pracy grupy podczas porównań parami elementów modelu decyzyjnego. Dotyczy to zwłaszcza sytuacji, kiedy grupa wspomagająca decyzję jest grupą niezwiązaną ze sobą zawodowo a np. reprezentującą różne grupy interesariuszy projektu.

Projektowanie, budowa i eksploatacja dróg jest zadaniem wymagającym czasu, kosztownym i wymagającym spełnienia wielu kryteriów. W przypadku rozwiązań i środków związanych z ochroną przed hałasem w większości przypadków kryteria te stosowane są bardzo rzadko. Powoduje to negatywne efekty zarówno z punktu widzenia ekonomicznego, ekologicznego jak i społecznego. Rozwiązania takie nie mają praktycznie żadnego związku z zasadami zrównoważonego rozwoju. Nie powinny być akceptowane zarówno przez inwestorów jak i organy administracji ochrony środowiska. Przedstawione w monografii podejście umożliwia zmianę tego stanu i jednocześnie wprowadza możliwości podejmowania decyzji z równoczesnym uwzględnieniem kryteriów ekonomicznych, ekologicznych i społecznych a także technicznych. Użyte w monografii dane literaturowe oparte na wynikach badań wielu europejskich programów badawczych oraz krajowych analiz dotyczących wpływu hałasu drogowego na zdrowie ludzi mogą być wykorzystywane zarówno w programach ochrony środowiska przed hałasem, jak i innych opracowaniach środowiskowych – na podstawie niektórych z nich uzyskiwane są decyzje o uwarunkowaniach środowiskowych przedsięwzięć będących podstawą dalszych pozwoleń (w tym na realizację inwestycji). Zarówno wskaźniki określające wpływ na zdrowie ludzi jak i analizy ekonomiczne zintegrowane z tym wpływem (analizy *CBA* oraz *CEA* rekomendowane przez *CEDR*) stanowią w proponowanym modelu decyzyjnym pierwszy etap wyboru rozwiązań i środków ochrony przed hałasem drogowym.

Wprowadzenie w drugim kolejnych etapach wyboru rozwiązań modelowania decyzji dzięki metodzie *AHP* umożliwia użycie kryteriów i podkryteriów związanych z zagadnieniami społecznymi, środowiskowymi oraz szerokim wachlarzem zagadnień technicznych. Takie podejście umożliwia wybór rozwiązań zgodnych z zasadami zrównoważo-

8. Podsumowanie

nego rozwoju. Uwzględnienie tak wielu kryteriów w modelowaniu decyzji spowoduje, że rozwiązania będą nie tylko ekonomicznie uzasadnione oraz społecznie akceptowalne, ale równocześnie nie będą powodowały kosztownych problemów dla zarządzających drogą w zakresie ich utrzymania. Nie będą też sprowadzały decyzji co do wyboru zawsze tego samego rozwiązania, często najdroższego i mało efektywnego.

9. Literatura

1. Adamczyk J., *Problemy eksploatacyjne stosowania ekranów akustycznych*. [w:] *I Seminarium „Ochrona środowiska przed hałasem”* (red.) Batko W i in., Kraków, 2013.
2. Adamczyk J., Stryczniewicz L., Kucharski R., *Zagrożenia akustyczne w ruchu drogowym*. [w:] *Wpływ infrastruktury komunikacyjnej na środowisko*, konferencja naukowa. Kraków, 2001.
3. *Adaptation and revision of the interim noise computation methods for the purpose of strategic noise mapping*. European Commission, DG Environment. Final Draft Report, 2003.
4. Alberts W. at al., *Report Factsheets, Colour Proposal END Noise Mapping*. CEDR. Paris, 2013.
5. Alberts W. at al., *Report Factsheets, Common Noise Assessment Method (CNOSSOS-EU)*. CEDR. Paris, 2013.
6. Alférez J. R. at al., *Best practice in Strategic Noise Mapping*. CEDR. Paris, 2012.
7. Altreuther B., Männel M., *New concepts for low noise concrete road surfaces*. INTER-NOISE 2016. Hamburg, 2016.
8. Anderson D., Sweeney D.J. at al., *An Introduction to Management Science: Quantitative Approaches to Decision Making*^{14e}. Cengage Learning. Boston, 2016.
9. Antonowicz A., Antonowicz P., *Matematyka finansowa w praktyce: wybrane zagadnienia z zakresu finansów przedsiębiorstw*. Ośrodek Doradztwa i Doskonalenia Kadr, Gdańsk, 2009.
10. Babisch W., *The Noise/Stress Concept, Risk Assessment and Research Needs*. Noise Health. 2002, 4(16), p. 1–11.
11. Babisch W., & van Kamp I., *Exposure-response relationship of the association between aircraft noise and the risk of hypertension*. Noise Health. 2009, 11(44), p.149–156.
12. Beckenbauer T., *Akustische Eigenschaften von Strassenoberflächen*. Deutscher Strassen- und Verkehrskongress. Hamburg, 2000.
13. Bendtsen H., Jorgen H., Larsen E., *Traffic Management and Noise*. Road Directorate, Danish Road Institute, 2007.
14. Bendtsen H., Fryd J. at al., *ON-AIR. Optimised Noise Assessment and Management Guidance for National Roads. Investigation of noise planning procedures and tools*. CEDR Call 2012: Noise. 2015.
15. Berezowska-Apolinarska K., Kokowski P., *Rola zieleni w tłumieniu hałasu drogowego*. [w:] *IV Ogólnopolska konferencja szkoleniowa: Problem hałasu w mieście – Klimat akustyczny w przestrzeniach miejskich*. Kielce, 2011.
16. Biernacki S., *Badania poziomu hałasu na wybranych rondach w Krakowie i Rybniku*. Politechnika Krakowska. Kraków, 2001.
17. Bohatkiewicz J., *Wpływ geometrii, warunków i organizacji ruchu na klimat akustyczny w otoczeniu skrzyżowań*. Praca doktorska. Politechnika Krakowska. Kraków, 1999.

18. Bohatkiewicz J., *Wpływ danych ruchowych i niektórych elementów infrastruktury drogowej na poziom hałasu*. [w:] konferencja Naukowa „Wpływ infrastruktury komunikacyjnej na środowisko”. Kraków, 2001.
19. Bohatkiewicz J., *Problemy skutecznej ochrony akustycznej i stosowania ekranów akustycznych w Polsce. Seminarium pt. „Ochrona akustyczna w drogownictwie”*. Akademia Górniczo-Hutnicza. Kraków, 2006.
20. Bohatkiewicz J., *Problemy skutecznej ochrony przed hałasem*. „Magazyn Autostrady” 5/2006.
21. Bohatkiewicz J., *Badania wpływu zmian parku samochodowego na poziom emisji hałasu drogowego*. V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Ochrona środowiska i estetyka a rozwój infrastruktury drogowej”. Zamość, 2011.
22. Bohatkiewicz J., *Ochrona przed hałasem komunikacyjnym w obszarach miejskich w programach ochrony środowiska przed hałasem*. „Budownictwo i Architektura” 13 (4). Lublin, 2014.
23. Bohatkiewicz J., *Noise control plans in cities – selected issues and necessary changes in approach to measures and methods of protection*, „Transport Research Procedia”. Elsevier, 2016. Vol.14, p. 2744–2753.
24. Bohatkiewicz J., Adamczyk J., Tracz M. i in., *Podręcznik dobrych praktyk wykonywania opracowań środowiskowych dla dróg krajowych*. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad. Kraków, 2008.
25. Bohatkiewicz J., Czarnecka W., *Wpływ środków uspokojenia ruchu na bezpieczeństwo użytkowników ruchu, na przykładzie Miasteczka Holenderskiego w Puławach*. „Logistyka” 6/2014.
26. Bohatkiewicz J., Czarnecka W., Jamrozik K., Biernacki S., Hałucha M., *Wpływ uspokojenia ruchu na klimat akustyczny w otoczeniu ulic*. V Międzynarodowa Konferencja Ochrony Środowiska i Estetyki w Budownictwie Komunikacyjnym, Kazimierz Dolny, 2014.
27. Bohatkiewicz J. (red), Biernacki S., Drach M. i in., *Zasady uspokajania ruchu na drogach za pomocą fizycznych środków technicznych*. [w:] Ministerstwo Infrastruktury. Warszawa, lipiec 2008 r.
28. Bohatkiewicz J., Biernacki S., *Badania wpływu rond na redukcję hałasu*. [w:] Konferencja Naukowo-Techniczna pn. „Projektowanie rond – doświadczenia i nowe tendencje”. Kraków, 2010.
29. Bohatkiewicz J., Biernacki S., *Wytyczne wykonywania pomiarów hałasu przy drogach krajowych prowadzonych w trakcie generalnego pomiaru ruchu*. Zarządzenie Nr 12 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 5 maja 2005 r. Warszawa, 2005.
30. Bohatkiewicz J., Biernacki S., Jamrozik K., Kuliś S., *Efekty wpływu systemów ITS na klimat akustyczny w otoczeniu dróg*. II Polski Kongres ITS. Warszawa, 2009 [w:] <http://edroga.pl/inzynieria-ruchu/its-w-ograniczaniu-halasu-drogowego-cz-i-2306230> i <http://edroga.pl/inzynieria-ruchu/its-w-ograniczaniu-halasu-drogowego-cz-ii-2506237> z 06.2016 r.]

31. Bohatkiewicz J., Biernacki S., Jamrozik K., *Wpływ wprowadzenia środków uspokojenia ruchu na hałas komunikacyjny w miastach*. [w:] *Metody ochrony środowiska przed hałasem – teoria i praktyka*. (red.) Bohatkiewicz J., z.1. Portal drogowy Edroga.pl. Zakopane, 2013.
32. Bohatkiewicz J., Biernacki S., Hałucha M., Świątek Ł. i in., *Pomiary natężenia ruchu rowerowego w Krakowie*. EKKOM Sp. z o.o. na zlecenie Urzędu Miasta Krakowa. Kraków, 2015.
33. Bohatkiewicz J., Dudek M., *Wpływ prognozowania ruchu na analizy środowiskowe w drogownictwie*. Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna pt. „Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu”. Kraków, 2009.
34. Bohatkiewicz J., Hałucha M., *Mieszane działania naprawcze w programach ochrony środowiska*. [w:] *Metody ochrony środowiska przed hałasem – teoria i praktyka*. (red.) Bohatkiewicz J. z.1. Portal drogowy Edroga.pl. Zakopane, 2013.
35. Bohatkiewicz J., Hałucha M., *The Impact of Quiet Pavements' Usage on Traffic Noise on People in Loosely Built-Up Areas*. [w:] *Traffic Noise: Exposure, Health Effects and Mitigation*. Acoustics Research and Technology. New York, 2017.
36. Bohatkiewicz J. Śladkowski W., Tracz M., *Wpływ ograniczeń ruchu na klimat akustyczny w otoczeniu drogi z zabudową mieszkaniową*. [w:] *I Ogólnopolskie Sympozjum nt. „Wpływy środowiskowe na budowle i ludzi (obciążenia, oddziaływania, interakcje, dyskomfort)”*. Lublin, 1994.
37. Bohatkiewicz J., Tracz M., *Relationships between level of noise and level of service measures at traffic signal approaches*, [w:] *Proceedings of the Second International Symposium on Highway Capacity*. Australian Road Research Board, Transportation Research Board. Sydney, 1994.
38. Bohatkiewicz J. Tracz M., *Effects of traffic conditions on traffic noise at signalised intersection*. [w:] *International INCE Symposium EURONOISE'95*. Lyon, 1995.
39. Brzeziński A., Ciołkosz-Styk A., Gruzziel M., Kwiatkowski P., *Inteligentne systemy transportowe szansą zrównoważonego rozwoju miast*. [w:] *Kształtowanie współczesnej przestrzeni miejskiej*. Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego. 2014
40. Buczek P., *Zabezpieczenia akustyczne w aspekcie możliwej racjonalizacji*. [w:] *Metody ochrony środowiska przed hałasem – teoria i praktyka*. (red.) Bohatkiewicz J., z.1. Portal drogowy Edroga.pl. Zakopane, 2013.
41. *Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe*. World Health Organization, 2011.
42. Ciesielka W., *Ekrany akustyczne – projektowanie, badania i kontrola*. [w:] *I Seminarium „Ochrona środowiska przed hałasem”*. Batko W i in. (red.). Kraków, 2013.
43. Chodur J., *Funkcjonowanie skrzyżowań drogowych w warunkach zmienności ruchu*. Politechnika Krakowska. Seria Inżynieria Lądowa. Monografia 347. Kraków, 2007.
44. *Commission Recommendation of 6 August 2003 concerning the guidelines on the revised interim computation methods for industrial noise, aircraft noise, road traffic noise and railway noise, and related emission data (notified under document number C (2003) 2807, Commission 2003/613/EC)*. “Official Journal of the European Union” (L 212/49), 2003.

45. Conter M., Wehr R. at al., *ROSANNE project: new procedure for noise characterization of road surfaces in Europe*. INTER-NOISE 2016. Hamburg, 2016.
46. Czaja P., *Estetyka ekranów akustycznych w Polsce i Europie ze szczególnym uwzględnieniem roślinności pnącej*. [w:] *I Seminarium „Ochrona środowiska przed hałasem”*. Batko W i in. (red.). Kraków, 2013.
47. *Dyrektywa 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 25 czerwca 2002 r. odnosząca się do oceny i zarządzania poziomem hałasu w środowisku. Directive 2002/49/EC. Directive 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 European Communities”, L 189, 18.7.2002, p. 12–25.
48. *Dyrektywa Komisji (UE) 2015/996 z dnia 19 maja 2015 r. ustanawiająca wspólne metody oceny hałasu zgodnie z dyrektywą 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady (Tekst mający znaczenie dla EOG)*. Commission Directive (EU) 2015/996 of 19 May 2015 establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council (Text with EEA relevance). L 168, 1.7.2015.
49. Ejsmont J., *Ciche nawierzchnie drogowe*. [w:] *IV Koszalińska Konferencja Naukowo - Techniczna „Hałas - Profilaktyka - Zdrowie 2000.”* Kołobrzeg, 2000.
50. Ellebjerg L., *Controlling Traffic Noise through Traffic Management, Results of a literature study in SILENCE WP H1*. Danish Road Institute. Brussels, 2007.
51. Engel Z., *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa, 2001.
52. Engel Z., *Zwalczanie hałasu na świecie i w Polsce*. [w:] *50. Otwarte Seminarium z Akustyki*. Oddział Górnośląski PTA, 2003.
53. Engel Z., Sadowski J., Stawicka-Wałkowska M., Zaremba S., *Ekrany akustyczne*. Akademia Górniczo-Hutnicza. Kraków, 1990.
54. Ezzati M., Lopez A.D., *Comparative Quantification of Health Risks. Global and Regional Burden of Disease Attributable to Selected Major Risk Factors*. World Health Organization. Geneva, 2011.
55. *Francuska krajowa metoda obliczeń „NMPB-Routes - 96 (SETRA-CERTU-LCPC-CSTB)”*, określona w „Arrêté du 5 mai 1995 relatif au bruit des infrastructures routières, Journal Officiel du 10 mai 1995, art. 6” i francuskiej normie „XPS 31-133” [255].
56. Fryd. J. at al., *National Road Authorities Practice and Experiences with Preparation of Noise Action Plans*. CEDR. Paris, 2013.
57. Fryd, J., Pedersen T.H., *Noise Annoyance from Urban Roads and Motorways*. Paper 547 Internoise 2016. Hamburg, 2016, p. 5666–5677.
58. Fryd J., Axelsson H., Lück V. at al., *CEDR Technical Report 2017-03. State of the art in managing road traffic noise: cost-benefit analysis and cost-effectiveness analysis*. Conference of European Directors of Roads CEDR. Brussels, 2017.
59. Gaca S., *Badania prędkości pojazdów i jej wpływ na bezpieczeństwo ruchu drogowego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, seria Inżynieria Lądowa nr 75. Kraków, 2002.

60. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria ruchu drogowego*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa, 2008.
61. Gardziejczyk W., *Generowanie hałasu przez samochody osobowe i ciężarowe*. [w:] *Oslony przeciwhałasowe w ruchu drogowym*. Instytut Badawczy Dróg i Mostów. „Studia i Materiały” z. 64. Warszawa, 2011.
62. Gardziejczyk W., *Przegląd i analiza porównawcza metod badania hałaśliwości nawierzchni drogowych*. „Magazyn Autostrady”, 1–2/2011.
63. Gardziejczyk W., „Cicha” nawierzchnia drogowa jako sposób na ograniczenie poziomu hałasu od ruchu samochodowego. „Inżynieria Ekologiczna” 40. 2014.
64. Gardziejczyk W., *Hałas od przejeżdżającego pojazdu w zależności od jego prędkości i charakterystyki nawierzchni drogowej*. „Magazyn Autostrady”, 7/2015.
65. Gardziejczyk W., *Influence of road pavement macrotexture on tyre/road noise of vehicles*. „Baltic Journal of Road and Bridge Engineering” 9 (3). 2014.
66. Gardziejczyk W., *The effect of time on acoustic durability of low noise pavements – The case studies in Poland*. Elsevier. Transportation Research Part D 44 (2016).
67. Gardziejczyk W., *Wpływ technologii wykonania i tekstury nawierzchni drogowych na hałas pojazdów samochodowych*. Politechnika Białostocka. Rozprawy naukowe Nr 121. Białystok, 2005.
68. Gardziejczyk W., Gierasimiuk P., Motylewicz M., *Hałaśliwość nawierzchni betonowych – przykładowe wyniki badań*. „Drogownictwo”, 10/2014.
69. Gardziejczyk W., Gierasimiuk P., Motylewicz M., *Klimat akustyczny w otoczeniu ulic prowadzących ruch tranzytowy pojazdów ciężarowych*. [w:] *Metody ochrony środowiska przed hałasem – teoria i praktyka*. (red.) Bohatkiewicz J. z. 1. Portal drogowy Edroga.pl. Zakopane, 2013.
70. Gardziejczyk W., Gierasimiuk P., Motylewicz M., *Noisiness of the Surfaces on Low-Speed Roads*. Coatings 2016, 6(2).
71. Gardziejczyk W., Motylewicz M., *Noise level in the vicinity of signalized roundabouts*. Transportation Research Part D, Vol. 46 (2016).
72. Gardziejczyk W., Motylewicz M., *Przebudowa dróg i ulic a klimat akustyczny w ich otoczeniu*. „Materiały Budowlane”, 2015, nr 7.
73. Garniel A., Mierwald U. at al., *Vögel und Verkehrslärm*. Kieler Institut für Landschaftsökologie. Kiel, 2007.
74. *Global Health Risks. Mortality and burden of disease attributable to selected major risks*. World Health Organization, 2009
75. *Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure*. European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise (WG-AEN). Version 1, 2003.
76. *Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure*. European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise (WG-AEN). Version 2, 2007.
77. *Good practice guide on noise exposure and potential health effects*. EEA Technical Report No. 11/2010. European Environmental Agency, Copenhagen, October 2010.

78. Grobelak A., Kacprzak M., Fijałkowski K., *Fitoremediacja – niedoceniony potencjał roślin w oczyszczaniu środowiska*. JEcolHealth, vo. 14, nr 6. 2010.
79. *Guidelines for Community Noise*. Ed. Berglund B., Lindvall T., Schwela D. H. World Health Organization. Geneva, 2000.
80. *Guidelines for Road Traffic Noise Abatement*. Sustainable Mobility Initiatives for Local Environment. Program SMILE. Berlin, 2003.
81. Guski, R., Felscher-Suhr U., Schuemer R., *The concept of noise annoyance: how international experts see it*. „Journal of Sound and Vibration”, 223(4), 513–527.
82. Halicka A., *Budownictwo na obszarach zurbanizowanych – nauka, praktyka, perspektywy*. Monografie. Politechnika Lubelska. Lublin, 2014.
83. *Handbook of Transportation Engineering. Volume II: Application and Technologies*. (red.) Kutz M. Second Edition. Mc Graw-Hill Company, 2011.
84. HEATCO. *Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment*. University of Stuttgart. Stuttgart, 2006.
85. *Highway Capacity Manual 6th Edition. A Guide for Multimodal Mobility Analysis*. Transport Research Board. Washington D. C., 2016.
86. *Highway Renewable Energy: Photovoltaic Noise Barriers*. Federal Highway Administration. Wasington D.C., 2017.
87. *Historic, sustainable solution for traffic noise reduction in Alverna*. [w:] <https://www.eea.europa.eu/highlights/cutting-noise-with-quiet-asphalt/sound-scape-awards-winner-2014-alverna/view> – 15.07.2017
88. Hong J. Y., Jeon J. Y., *The effects of audio-visual factors on perceptions of environmental noise barrier performance*. Landscape and Urban Planning 125 (2014). Elsevier, 2014.
89. Hurba M., *Problemy ochrony przed hałasem w planowaniu przestrzennym*. [w:] *Metody ochrony środowiska przed hałasem – teoria i praktyka*. (red.) Bohatkiewicz J. z. 1. Portal drogowy Edroga.pl. Zakopane, 2013.
90. Hygge S., Rokho H., *Environmental noise and cognitive impairment in children*. [w:] *Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe*. World Health Organization. 2011.
91. *Instrukcja ITB nr 310. Metody sporządzania kompleksowych planów akustycznych miast i obszarów*. Wydawnictwo ITB. Warszawa, 1991.
92. ISO 10844 Acoustics. *Specification of test tracks for measuring noise emitted by road vehicles and their tyres*. 2014.
93. ISO 11819-1 Acoustics. *Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise. Part 1: The statistical pass-by method*. 1997.
94. ISO 11819-2 Acoustics. *Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise. Part 2: The close-proximity method*. 2017.
95. Jiang L., Kang J., *Combined acoustical and visual performance of noise barriers in mitigating the environmental impact of motorways*. „Science of the Total Environment” 543 (2016). Elsevier, 2016.

96. Joynt J., Kang J., *The influence of preconceptions on perceived sound reduction by environmental noise barriers*. „Science of the Total Environment” 408 (2010). Elsevier, 2010.
97. Kaczmarek T. i in., *Pomiar izolacyjności akustycznej ekranów przeciwhałasowych in-situ*. [w:] *Oslony przeciwhałasowe w ruchu drogowym*. Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Studia i Materiały. z. 64. Warszawa, 2011.
98. Kazimierczak J. (red.), *Poradnik dla pracowników samorządowych uczestniczących w tworzeniu i użytkowaniu strategicznych map akustycznych*. Główny Instytut Górnictwa. Katowice, 2008.
99. Kephelopoulous S., Paviotti M., Afosso-Lédée F., *Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU)*. Joint Research Centre of the European Commission (JRC72550). 2012.
100. Kokowski P., *Lokalizacja i geometria ekranów przeciwhałasowych – projekt akustyczny ekranu*. [w:] *Oslony przeciwhałasowe w ruchu drogowym*. Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Studia i Materiały. z. 64. Warszawa, 2011.
101. Kompała J., *Ocena hałasu drogowego – dopuszczalne poziomy w Polsce i UE*. [w:] *Oslony przeciwhałasowe w ruchu drogowym*. Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Studia i Materiały. z. 64. Warszawa, 2011.
102. Kompała J., *Społeczny odbiór efektywności działań kształtujących klimat akustyczny na terenach zurbanizowanych*. [w:] *I Seminarium „Ochrona środowiska przed hałasem”*. (red.) Batko W i in. Kraków, 2013.
103. Kompała J., Mrukwa W., Świder J., *Teoria a praktyka stosowania ekranów akustycznych*. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko 2/2002.
104. *Kompleksowe Badania Ruchu w Krakowie*. Wykonane w ramach projektu „Zintegrowany system transportu publicznego w obszarze aglomeracji krakowskiej”. Politechnika Krakowska. Kraków, 2013.
105. *Kompleksowa dokumentacja projektowa w studium projektu budowlanego i wykonawczego na zadania: „Kompleksowe uspokojenie ruchu na odcinku drogi wojewódzkiej Nr 824 Żyrzyn - Puławy - Opole Lubelskie - Annapol wraz z budową instruktazowego terenu uspokojenia ruchu „Miasteczko Holenderskie” - Rozbudowa skrzyżowania ulic: Skowieszyńska - Zielona - Głęboka w Puławach”*. EKKOM Sp. z o.o. na zlecenie Zarządu Dróg Wojewódzkich w Lublinie. Kraków, 2006.
106. Konishi S., *Age influence of ISO test track using modified asphalt*. The 29th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering Inter Noise. 2000.
107. Koszarny Z., Szata W., *Narażenie ludności Warszawy na hałas uliczny cz. 1 i 2*. R.1 i 2 PZH, 1987.
108. Kowalski K.J., Dare T., McDaniel R., Olek J., Bernhard R., *Exploration of Laboratory Technique for Tire-Pavement Noise Assessment of Hot-Mix Asphalts*. Transportation Research Board 90th Annual Meeting, Washington D.C., 2011.
109. Kowalski K.J., Radziszewski P., Piłat J., Król J., *Metody kształtowania cichych i bezpiecznych nawierzchni drogowych*. [w:] *„Ochrona środowiska i estetyka a rozwój infrastruktury drogowej”*, Lublin, 2011.

110. Kowalski K.J., Brzeziński A.J., Król J.B., Radziszewski P., Szymański Ł., *Traffic Analysis And Pavement Technology As A Toll For Urban Noise Control*. Archives of Civil Engineering Vol. 61/4. 2015.
111. Królikowska A., *Trwałość ekranów przeciwhałasowych – zagrożenie korozyjne*. [w:] *Ochrona przeciwhałasowa w ruchu drogowym*. Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Studia i Materiały. z. 64. Warszawa, 2011.
112. Kucharski R. J., *Hałas drogowy*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa, 1979.
113. Kucharski R.J. i in., *Raport o stanie akustycznym środowiska na podstawie wyników realizacji map akustycznych*. Główny Inspektor Ochrony Środowiska. 2014.
114. Kucharski R. J., Sakowska P., Taras A., *Tworzenie map akustycznych przy użyciu technik GIS. Praktyczne rozwiązania*. Materiały 50 Otwartego Seminarium z Akustyki. Oddział Górnośląski PTA, 2003.
115. Kucharski R. J. i in., *Wytyczne opracowywania map akustycznych. Opracowane i wydane przez Instytut Ochrony Środowiska w ramach Projektu Nr 2005/017-4888.03.04 „Wzmocniony monitoring hałasu i substancji zubożających warstwę ozonową”*. Warszawa, 2006.
116. Kucharski R. J. (red.), *Wytyczne opracowywania map akustycznych*. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska. Warszawa, 2011.
117. Kucharski R. J. (red.), *Wytyczne do sporządzania map akustycznych*. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska. Warszawa, 2016.
118. Kucharski R. J., *Zmiany Dyrektywy 2002/49/WE*. National Reference Centers for Noise. Partnerstwo: Środowisko dla rozwoju. Krajowa sieć organów środowiskowych oraz instytucji zarządzających funduszami unijnymi (ENEA). Warszawa, 2016. [w:] http://www3.gdos.gov.pl/Documents/GH/Spotkanie%2027-28.06.2016/Zmiany%20Dyrektywy%202002_49_WE_R_Kucharski.pdf – 15.07.2017.
119. Lechowska L., *Hałas – edukacja ekologiczna*. [w:] *IV Ogólnopolska konferencja szkoleniowa: Problem hałasu w mieście – Klimat akustyczny w przestrzeniach miejskich*. Kielce, 2011.
120. Lipowczan A., *Aspekty ekonomiczne wykorzystania map akustycznych*. [w:] *Seminarium „Ochrona środowiska przed hałasem”*. (red.) Batko W i in. Kraków, 2013.
121. Lipowczan A., *Mapy akustyczne miast w świetle Prawa Ochrony Środowiska oraz Dyrektyw Unii Europejskiej*. [w:] 50. Otwarte Seminarium z Akustyki. Oddział Górnośląski PTA, 2003.
122. Liu M, Huang X., Xue G., *Effects of double layer porous asphalt pavement of urban streets on noise reduction*. Elsevier. International Journal of Sustainable Built Environment (2106) 5.
123. *Lubelskie standardy piesze. Kierunki rozwoju ruchu pieszego w Lublinie*. TRANSEKO. Lublin, 2016.
124. Luong J. at al., *Ultrathin porous pavement made with high viscosity rubber binder: A better acoustic absorption?* Elsevier. Applied Acoustic 79 (2014).

125. Maeck J., Bergiers A., *Noise Reducting Thin Asphalt Layers in a Urban Environment: a pilot study in Antwerp*. INTER-NOISE 2016. Hamburg, 2016.
126. Makarewicz R., *Hałas w środowisku*. Ośrodek Wydawnictw Naukowych. Poznań, 1996.
127. Makarewicz R., *Dźwięk w środowisku*. Ośrodek Wydawnictw Naukowych. Poznań, 1994.
128. Makarewicz R., *Zjawiska decydujące o hałasie drogowym*. [w:] Oslony przeciwhałasowe w ruchu drogowym. Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Studia i Materiały, z. 64. Warszawa, 2011.
129. Maurin M., *Community noise impact indicators: A framework with examples*. Journal Sound and Vibration. 1981.
130. Milford I. at al., *Value for Money in Road Traffic Noise Abatement*. CEDR. Paris, 2013.
131. Miller G.A., *The Magical Number Seven, Plus or Minus Two Some Limits on Our Capacity for Processing Information*. American Psychological Association. Psychological Review. Vol. 11, No. 2, 1955.
132. Mioduszewski P., *Hałaśliwość nawierzchni drogowych w Polsce i Europie*. [w:] Metody ochrony środowiska przed hałasem – teoria i praktyka. (red.) Bohatkiewicz J. Zeszyt nr 1. Portal drogowy Edroga.pl. Zakopane, 2013.
133. Motylewicz M., *Klimat akustyczny w otoczeniu skrzyżowań z wyspą centralną*. Rozprawa doktorska. Politechnika Białostocka. 2017.
134. Motylewicz M., *Skrzyżowania z wyspą centralną – przepustowość, warunki ruchu oraz wpływ na klimat akustyczny*. Budownictwo i Architektura 13 (1). 2016.
135. Motylewicz M., Gardziejczyk W., *Hałas od ruchu samochodowego w otoczeniu dróg*. Budownictwo i Architektura 13 (1). 2014.
136. Mueller N., Rojas-Rueda D. at al., *Health impacts related to urban and transport planning: A burden disease assessment*. Environmental International 107. Elsevier, 2017.
137. *Niebieska Księga. Infrastruktura drogowa*. Jaspers, 2015.
138. *Night Noise Guidelines for Europe*. World Health Organization, 2009.
139. Nowicka E., *Specyfika projektowania akustycznego budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej*. [w:] Budownictwo na obszarach zurbanizowanych. Nauka, praktyka, perspektywy. (red.) Halicka A. Monografie. Politechnika Lubelska. Lublin, 2014.
140. Nowicka E., Jakimowicz M i in., *Ekrany akustyczne jako wyrób budowlany w świetle regulacji nowego rozporządzenia CPR*. [w:] Batko W i in. (red.). I Seminarium „Ochrona środowiska przed hałasem”. Kraków, 2013.
141. Obwieszczenie Ministra Środowiska z dnia 15 października 2013 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku (Dz. U. z 2014 r., poz. 112).

142. Obwieszczenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 17 lipca 2015 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. z 2015 r., poz. 1422).
143. Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 22 czerwca 2017 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (Dz. U. z 2017 r., poz. 1405).
144. Olszacki J., *Hałas ruchu drogowego. Część 1. Mechanizm powstawania hałasu*. Drogownictwo 3/2008.
145. Olszacki J., *Hałas ruchu drogowego. Część 2. Mechanizm tłumienia hałasu*. Drogownictwo 4/2008.
146. O'Malley V., Alberts W., Faber N., Roebben M., *CEDR Road Noise 2009–2013 Summary Report*. CEDR. Paris, 2013.
147. Pedersen M., Garne E. at al., *Exposure to air pollution and noise from road traffic and risk of congenital anomalies in the Danish National Birth Cohort*. Environmental Research 159. Elsevier, 2017.
148. Petersen M.S., Bröcker J. at al., *Traffic flow: Scenario, Traffic Forecast and Analysis of Traffic on the TEN-T, Taking into Consideration the External Dimension of the Union*. European Commission DG TREN. 2009.
149. Pierzchała K., *Wykonawcza ocena warunków występujących przy realizacji akustycznych ekranów*. [w:] Batko W i in. (red.). I Seminarium „Ochrona środowiska przed hałasem”. Kraków, 2013.
150. Piontek F., *Metodyka oceny efektywności wydatkowania ekologicznych funduszy celowych*. [w:] Rocznik Ochrony Środowiska 1999, t. 1, Śródkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska. Koszalin, 1999.
151. Piontek F., *Znaczenie narzędzi ekonomiczno-prawnych i rozwiązań organizacyjnych dla wdrażania rozwoju zrównoważonego* [w:] Rocznik Ochrona Środowiska 2000, t. 2, Śródkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska. Koszalin, 2000.
152. PN-87/B-02151/02 Akustyka budowlana. *Ochrona przed hałasem pomieszczeń w budynkach. Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku w pomieszczeniach*. 1987.
153. PN-B-02170:2016-12. Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłogi na budynki.
154. PN-B-02171:2017-06. Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.
155. PN-ISO 1996-1:1999. *Akustyka. Opis i pomiary hałasu środowiskowego. Podstawowe wielkości i procedury*.
156. PN-ISO 1996-2:1999. *Akustyka. Opis i pomiary hałasu środowiskowego. Zbieranie danych dotyczących sposobu zagospodarowania terenu*.
157. PN-ISO 1996-3:1999. *Akustyka. Opis i pomiary hałasu środowiskowego. Wytyczne dotyczące dopuszczalnych poziomów hałasu*.

158. PN-ISO 9613-1:2000. *Akustyka. Tłumienie dźwięku wynikające podczas propagacji w przestrzeni otwartej. Obliczenie pochłaniania dźwięku przez atmosferę.*
159. PN-EN 1793-3:2001. *Drogowe urządzenia przeciwhałasowe. Metoda badania w celu wyznaczenia właściwości akustycznych. Część 3: Znormalizowane widmo hałasu drogowego.*
160. PN-ISO 9613-2:2002. *Akustyka. Tłumienie dźwięku podczas propagacji w przestrzeni otwartej. Ogólna metoda obliczania.*
161. PN-EN ISO 11819-1:2002. *Akustyka. Pomiar wpływu nawierzchni drogowej na hałas uliczny. Część 1: Metoda SPB.*
162. Popek R., Gawrońska H., Gawroński S.W., *Zdolność krzewów do akumulacji mikropylów z powietrza.* Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Tom 5, Zeszyt 6, 2011.
163. Popów-Nowicka A., *Funkcje ekranów zieleni.* [w:] IV Ogólnopolska konferencja szkoleniowa: Problem hałasu w mieście – Klimat akustyczny w przestrzeniach miejskich. Kielce, 2011.
164. *Position paper on dose response relationships between transportation noise and annoyance.* European Communities. EU's future noise policy, WG2 – Dose/Effect. Luxemburg, February 2002.
165. *Position paper on dose-effect relationships for night time noise.* European Commission Working Group on Health and Socio-Economic Aspects, 2004.
166. *Postaw na rower. Podręcznik projektowania przyjaznej dla rowerów infrastruktury.* Tytuł oryginalny: *Sign Up for the Bike*”. C.R.O.W. Zarząd Główny Polskiego Klubu Ekologicznego, project “Miasta dla rowerów”. Kraków, 1999.
167. Preiss A., Kaczmarek T., Wojciechowska H., Żera J., Fields J. M., *Polish Version of Standardized Noise Reaction Questions for Community Noise Surveys.* International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health. 2003, 16(2), 155-159.
168. *Presenting Noise Mapping Information to the Public.* European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise (WG-AEN), Position Paper. 2008.
169. Prusak A., Stefanów P., *AHP – analityczny proces hierarchiczny. Budowa i analiza modeli decyzyjnych krok po kroku.* Wydawnictwo C.H. Beck. Warszawa, 2014.
170. Radosz S., *Analiza wybranych parametrów ruchu i drogi w aspekcie ochrony akustycznej środowiska.* Praca doktorska. Politechnika Krakowska. Kraków, 1985 r.
171. Radziszewski P. i in., *Perspektywy i kierunki rozwoju konstrukcji oraz nowych rozwiązań materiałowo-technologicznych nawierzchni drogowych w aspekcie ochrony środowiska i zrównoważonego rozwoju.* Politechnika Warszawska na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad. Warszawa, 2013.

172. Radziszewski P., Kowalski K.J., Król J., Otkalło K., *Projektowanie i badania mieszanek mineralno-asfaltowych o strukturze otwartej*. „Drogownictwo”, 5/2013.
173. Radziszewski P., Piłat J., *Mieszanki mineralno-gumowo-asfaltowe*. Konferencja „Asphalt Rubber 2003”. Drogownictwo, 5/2004.
174. Ranieri V., *Porous pavements: practice and developments*. Konferencja TRANS-NOISE. Zakopane, 2013.
175. Recio A., Linares C., Banegas J. R., Díaz J., *Road traffic noise effects on cardiovascular, respiratory, and metabolic health: An integrative model of biological mechanisms*. „Environmental Research” 146. Elsevier, 2016.
176. *Reported data on noise exposure covered by Directive 2002/49/EC*. European Environment Agency, 2017.
177. *Research for Quieter Europe in 2020*. An updated strategy paper of the CALM II Network. European Commission Research Directorate. Brussels. September, 2007.
178. Richard J., *Mapy rozkładu hałasu i planowanie działań*. Workshop: Hałas w środowisku – Dyrektywa Unii Europejskiej. Znaczenie dla miast w państwach członkowskich oraz możliwości finansowania prac. Gdańsk, 2003, 13-14.
179. *Roadside noise abatement*. Road Transport Research. OECD, 1995.
180. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz. U. z 1999 r. Nr 43, poz. 430 z późn. zmianami).
181. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie (Dz. U. z 2000 r. Nr 63, poz. 735 z późn. zmianami).
182. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 października 2002 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinien odpowiadać program ochrony środowiska przed hałasem (Dz. U. z 2002 r. Nr 179, poz. 1498).
183. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 17 stycznia 2003 r. w sprawie rodzajów wyników pomiarów prowadzonych w związku z eksploatacją dróg, linii kolejowych, linii tramwajowych, lotnisk oraz portów, które powinny być przekazywane właściwym organom ochrony środowiska, oraz terminów i sposobów ich prezentacji (Dz. U. z 2003 r. Nr 18, poz. 164).
184. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2007 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku (Dz. U. z 2007 r. Nr 120, poz. 826).
185. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 grudnia 2006 r. w sprawie dróg, linii kolejowych i lotnisk, których eksploatacja może powodować negatywne oddziaływanie akustyczne na znacznych obszarach, dla których jest wymagane sporządzanie map akustycznych, oraz sposobów określania granic terenów objętych tymi mapami (Dz. U. z 2007 r. Nr 1, poz. 8).

186. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 października 2007 r. w sprawie szczegółowego zakresu danych ujętych na mapach akustycznych oraz ich układu i sposobu prezentacji (Dz. U. z 2007 r. Nr 62, poz. 627).
187. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 10 listopada 2010 r. w sprawie sposobu ustalania wartości wskaźnika hałasu L (DWN) (Dz. U. z 2010 r. Nr 215, poz. 1414).
188. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 16 czerwca 2011 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów poziomów substancji lub energii w środowisku przez zarządzającego drogą, linią kolejową, linią tramwajową, lotniskiem lub portem (Dz. U. z 2011 r. Nr 140, poz. 824).
189. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 października 2012 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku (Dz. U. z 2012 r., poz. 1109).
190. Rudnicki A., *Zrównoważona mobilność a rozwój przestrzenny miasta*. [w:] Transport a logistyka formy urbanistycznej. Projekty dla polskich metropolii. (red.) Rudnicki A., Zuziak B. „Czasopismo Techniczne. Architektura”. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, z. 3, 2010.
191. Rudnicki A., *Kształtowanie układów komunikacyjnych miast*. [w:] Budownictwo na obszarach zurbanizowanych. Nauka, praktyka, perspektywy. (red.) Halicka A. Monografie. Politechnika Lubelska. Lublin, 2014.
192. Ruttmar I. i in., *Eksplotacja i utrzymanie nawierzchni z asfaltu porowatego*. Zastosowanie nowoczesnych technologii w konstrukcjach drogowych. Zakopane, 2010.
193. Rymśa J., *Optymalizacja inwestycji drogowych*. Grupa ds. Technik/Technologii. Warszawa, 2016.
194. Saaty T.L., *How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process*. European Journal of Operational Research 48 1990. pp. 9-26.
195. Saaty T.L., *Some Mathematical Concepts of the Analytic Hierarchy Process*. Behaviormetrika No. 29. 1991.
196. Saaty T.L., *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. Pittsburgh PA: RWS Publications 1996.
197. Sadowski J., *Akustyka w urbanistyce, architekturze i budownictwie*. Arkady, Warszawa, 1971.
198. Sadowski J., *Podstawy akustyki urbanistycznej*. Arkady. Warszawa, 1982.
199. Sadowski J., Strojny J., Żuchowicz I., *Warunki zdrowotne w planowaniu miast*. [w:] Akustyka w urbanistyce. Materiały z Konferencji. Płock. 1961, z. 8. Wydawnictwo IuIA. Warszawa, 1964.
200. Sakowski S., Zawieska J., *Wady i zalety ekranów przeciwhałasowych – akustyczne i ekonomiczne*. [w:] Osłony przeciwhałasowe w ruchu drogowym. Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Studia i Materiały. Zeszyt 64. Warszawa, 2011.
201. Sandberg U., *Influence of Road Surface Texture on Traffic Characteristics Related to Environment, Economy and Safety*. Swedish National Road Administration. 1998.

202. Sandberg U., Ejsmont J., *Tyre/road noise reference book*. Informex. 2002.
203. Sandberg U., Świeczko Zurek B., Ejsmont J.A., Ronowski G., *Tyre/road noise reduction of poroelastic road surface tested in a laboratory*. Acoustics 2013.
204. Sälzer E., *Ochrona przed hałasem w miastach*. Biblioteka Drogownictwa. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa, 1978 r.
205. Schulte W., Gladbach, B., *Offenporiger asphalt. Lärmschutzwirkung, -bedingungen und -dauer*. Asphalt 2/2004.
206. Shaneyfelt K.M. et al., *Air quality considerations for stormwater green street design*. Environmental Pollution 231 (2017). Elsevier, 2017.
207. SILENCE., *Practitioner Handbook for Local Noise Action Plans*. Bruksela, 2008.
208. Solecka K., *Wielokryterialna ocena wariantów zintegrowanego systemu miejskiego transportu publicznego*. Praca doktorska. Politechnika Krakowska. Kraków, 2013.
209. Stansfeld S. A., Berglund B., Clark C., Lopez-Barrio I., Fischer P., Ohrstrom E., et al., *Aircraft and road traffic noise and children's cognition and health: a cross-national study*. Lancet. 2005, 365, 1942-1949.
210. Suchorzewski W., *Rola transportu w kształtowaniu struktury funkcjonalno-przestrzennej miast*. [w:] *Transport a logistyka formy urbanistycznej. Projekty dla polskich metropolii*. (red.) Rudnicki A., Zuziak B., „Czasopismo Techniczne. Architektura”. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, z. 3, 2010.
211. Suchorzewski W., Dzieran W., Tomszewski L., *Urban Road Network*. Permanent International Association of Road Congress. XIVth World Congress – Prague 1971.
212. Sybilski D., *Długowieczne nawierzchnie asfaltowe w świecie i w Polsce*. Drogownictwo, 3/2004.
213. Sybilski, D., *Ciche nawierzchnie. Zastosowanie nowoczesnych technologii w konstrukcjach nawierzchni*. PKD Region Małopolska, Konwent Dyrektorów ZDW, ZMRP Oddział Małopolska. Zakopane, 2010.
214. Sybilski D. i in., *Ocena wpływu typu i technologii wykonania nawierzchni drogowej na hałaśliwość ruchu drogowego i jego uciążliwość dla środowiska*. Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Temat WS-05. Warszawa, 2005.
215. Sybilski D., Horodecka R., Maliszewski M., *Możliwości stosowania cichych nawierzchni drogowych w Polsce*. „Materiały budowlane” 8/2011.
216. Szarata A., *Ocena efektywności funkcjonalnej parkingów przesiadkowych (P+R)*. Praca doktorska. Politechnika Krakowska. Kraków, 2005.
217. Szarata A., *Ocena efektywności funkcjonalnej systemu parkingów przesiadkowych (Park and Ride)*. „Transport Miejski i Regionalny” 1/2007.
218. Szarata A., *Analiza wielkości parkingów Park and Ride zlokalizowanych w obszarach metropolitalnych*. Budownictwo i Architektura (13(4), 2014.
219. Szarata A., *Modelowanie podróży wzbudzonych oraz tłumionych zmianą infrastruktury transportowej*. Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej. Seria Inżynieria Lądowa. Monografia 439. Kraków, 2013.

220. Szydło A., *Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego*. Polski Cement. Kraków, 2004.
221. Szydło A., Mackiewicz P., *Nawierzchnie betonowe na drogach gminnych*. Polski Cement. Kraków, 2005.
222. *Technical Report 2017-1. State of the art in managing road traffic noise: noise-reducing pavements*. Conference of European Directors of Roads. 2017.
223. *Technical Report 2017-2. State of the art in managing road traffic noise: noise barriers*. Conference of European Directors of Roads. 2017.
224. *The NOISE Observation & Information Service for Europe*. <https://www.eea.europa.eu/themes/human/noise/noise-story-map> lipiec 2017
225. Tracz M i in., *Pomiary i badania ruchu drogowego*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa, 1984.
226. Tracz M., *Przyjazne środowisku projektowanie autostrad*. XLII Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Materiały Konferencyjne, t.1. Kraków-Krynica, 1996.
227. Tracz M., *Przyjazne środowisku projektowanie dróg w obszarach zurbanizowanych*. Międzynarodowa Konferencja Naukowa nt. „Zagadnienia komunikacji w planowaniu przestrzennym i projektowaniu urbanistycznym w aspekcie zagrożeń dla środowiska”. Komisji Urbanistyki i Architektury O/PAN Kraków, 1996.
228. Tracz M., *Uwarunkowania stosowania środków redukujących hałas*. Materiały Budowlane, nr 5/98, 1998.
229. Tracz M., Bohatkiewicz J., *Impact on traffic conditions on the level of noise at traffic signals*. Proceedings of the 3rd International Conference on Traffic Effects on Structures and Environment - TESE'94. Strbske Pleso, 1994.
230. Tracz M., Bohatkiewicz J., *Studies of the relationships between level of noise and level of service measures at at-grade intersections*. [w:] *Proceedings of the Third International Symposium on Highway Capacity*. U.S. Transportation Research Board. Copenhagen, Denmark, 1998.
231. Tracz M., Bohatkiewicz J., Gondek St., *Traffic and noise simulation at signalised intersection*. [w:] „Computing in Civil and Building Engineering”. Berlin, 1995.
232. Tracz M., Bohatkiewicz J., Radosz S., Stręk. J., *Oceny oddziaływania dróg na środowisko. Część I i II – wydanie pierwsze*. Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych. Warszawa, 1997 r.
233. Tracz M., Bohatkiewicz J., *Oceny oddziaływania na środowisko inwestycji i istniejących obiektów drogowych*. Zasady ochrony środowiska w projektowaniu, budowie i utrzymaniu dróg. Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych. Instytutu Badawczy Dróg i Mostów. Warszawa, 1998 r.
234. Tracz M., Bohatkiewicz J., Stręk. J., *Wytyczne wykonywania ocen oddziaływania autostrad na środowisko. Część I i II*. Agencja Budowy i Eksploatacji Autostrad, 1998 r.

235. Tracz M., Bohatkiewicz J., Radosz S., Stręk J., *Oceny oddziaływania dróg na środowisko. Część I i II – wydanie drugie rozszerzone i uaktualnione*. Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych. Warszawa, 1999 r.
236. Tracz M., Bohatkiewicz J., *Postępowanie w sprawie ocen oddziaływania na środowisko. Część I – wydanie trzecie rozszerzone i uaktualnione*. Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych. Warszawa, 2001 r.
237. Tracz M., Bohatkiewicz J. i in., *Metodyka wykonywania map akustycznych dla dróg krajowych o natężeniu $\dot{S}DR > 16400$ pojazdów na dobę*. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad. Warszawa, 2007.
238. Tracz M., Chodur J., Gaca S., Gondek S., *Instrukcja projektowania małych rond*. EKODROGA. Kraków, 1996.
239. Tracz M., Chodur J., Gaca S., *Wytyczne projektowania skrzyżowań drogowych*. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad. Warszawa, 2001.
240. Tracz M., Kawecki J., Kogut J., Bohatkiewicz J., *Wpływ ruchu drogowego na środowisko w obszarach zurbanizowanych w zakresie hałasu i drgań*. Grant KBN 1995-1997.
241. Tracz M., Radosz S., Bohatkiewicz J., *Prediction of traffic noise at signalised intersection using simulation method*. INTER-NOISE'92, Toronto, 1992.
242. Tracz M., Woźniak K., Buczek P., *Rola obwodnic w poprawie klimatu akustycznego otoczenia przejazdów drogowych przez miasta*. Polska Akademia Nauk. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej. Studia z zakresu inżynierii Nr 86. Kraków, 2014.
243. *Tyre/Road Noise*. Final Report SI2.408210. Federation of European Highway Research Laboratories. 2006.
244. Ustawa prawo ochrony środowiska z dnia 27 kwietnia 2001 r. (Dz. U. z 2001 r. Nr 62, poz. 627 z późn. zmianami).
245. Vaitkus A. et al., *Asphalt wearing course optimization for road traffic noise reduction*. ELSEVIER. Construction and Building Materials 152 (2017).
246. *Valuation of Noise*. Paper of the Working Group on Health and Socio-Economic Aspects. November 2003.
247. Weyena S., *Energetyczna skuteczność ekranów i barier akustycznych*. [w:] Batko W i in. (red.). I Seminarium „Ochrona środowiska przed hałasem”. Kraków, 2013.
248. Wiącek J., Polak M., Kucharczyk M., Bohatkiewicz J., *The influence of road traffic on birds during autumn period: Implications for planning and management of road network*. Landscape and Urban Planning, Elsevier. Vol (150), 2015.
249. Wiącek J., Polak M., Filipiuk M., Kucharczyk M., Bohatkiewicz J., *Do Birds Avoid Railroads as Has Been Found for Roads?* Environmental Management. Springer, 05/2015.
250. Woźniak K., *Wpływ dostępności do dróg na efektywność ochrony akustycznej otoczenia*. Praca doktorska. Politechnika Krakowska. Kraków, 2011.
251. *Wskaźniki makroekonomiczne dla Polski*. Główny Urząd Statystyczny, 2016. [w:] <http://stat.gov.pl/wskazniki-makroekonomiczne/> – 16.08.2017 r.

252. Wszolek T., *Najczęstsze błędy w projektowaniu i realizacji ekranów akustycznych*. [w:] Batko W i in. (red.). I Seminarium „Ochrona środowiska przed hałasem”. Kraków, 2013.
253. Wszolek T., *Skuteczność akustyczna wału, wykopu, pasa zieleni*. [w:] *Oslony przeciwhałasowe w ruchu drogowym*. Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Studia i Materiały, z. 64. Warszawa, 2011.
254. *Wytyczne projektowania dróg III, IV i V klasy technicznej WPD-2*. Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych. Warszawa, 1995.
255. *Wytyczne projektowania dróg VI i VII klasy technicznej WPD-3*. Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych. Warszawa, 1995.
256. XPS 31-133 “*Acoustique – Bruit des infrastructures de transports terrestres, Calcul de l’atténuation du son lors de sa propagation en milieu extérieur, incluant les effets météorologiques*”.
257. Zarządzenie nr 415/2010 Prezydenta Miasta Lublin z dnia 10.06.2010 r. w sprawie wprowadzenia do stosowania „Standardów technicznych dla infrastruktury rowerowej Miasta Lublin”. Lublin, 2010.
258. *Zasadność budowy ekranów akustycznych i przepustów (przejeżdź dla zwierząt) na autostradzie A2 i innych wybranych odcinkach dróg*. Informacja o kontroli Najwyższej Izby Kontroli nr 42/2014/P13159/LLO. Warszawa, 2014.
259. *Zielona Księga. W kierunku nowej kultury mobilności w mieście*. Komisja Wspólnot Europejskich COM (2007) 551. Bruksela, 2007.
260. Żabicki P., Gardziejczyk W., *Wybrane aspekty analizy wielokryterialnej w projektowaniu obejść drogowych*. Budownictwo i Architektura 13 (1). 2014.

