



Władysław  
Gardziejczyk

# **Hałaśliwość nawierzchni drogowych**



Białystok 2018

**Władysław Gardziejczyk**

# **Hałaśliwość nawierzchni drogowych**



**Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej**  
**Białystok 2018**

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Jerzy Antoni Ejsmont, prof. zw. PG  
prof. dr hab. inż. Marek Iwański, prof. zw. PŚk

Redaktor wydawnictwa:

Elżbieta Dorota Alicka

Projekt okładki:

Agencja Wydawnicza EkoPress

Zdjęcia:

Marek Motylewicz

© Copyright by Politechnika Białostocka, Białystok 2018

ISBN 978-83-65596-58-1    ISBN 978-83-65596-59-8 (eBook)



Publikacja jest udostępniona na licencji

Creative Commons Uznanie autorstwa-Użycie niekomercyjne-Bez utworów zależnych 4.0  
(CC BY-NC-ND 4.0)

Pełna treść licencji dostępna na stronie

[creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.pl](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.pl)

Publikacja jest dostępna w Internecie na stronie Oficyny Wydawniczej PB

Redakcja techniczna, skład:

Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej

Druk:

Partner Poligrafia Andrzej Kardasz

Nakład: 63 egz.

---

Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej

ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok

tel.: 85 746 91 37, fax: 85 746 90 12

e-mail: [oficyna.wydawnicza@pb.edu.pl](mailto:oficyna.wydawnicza@pb.edu.pl)

[www.pb.edu.pl](http://www.pb.edu.pl)

# Spis treści

<b>Podstawowe oznaczenia .....</b>	<b>7</b>
<b>Słowo wstępne .....</b>	<b>9</b>
<b>1. Wprowadzenie .....</b>	<b>13</b>
1.1. Wybrane pojęcia z zakresu akustyki .....	13
1.2. Pojazd samochodowy jako źródło hałasu .....	17
1.3. Działania na rzecz ograniczenia nadmiernego hałasu od ruchu drogowego .....	23
<b>2. Nawierzchnie obniżające hałas toczenia pojazdów samochodowych – wybrane problemy materiałowo-technologiczne .....</b>	<b>26</b>
2.1. Projekty badawcze dotyczące hałaśliwości nawierzchni drogowych .....	26
2.2. Wpływ uziarnienia kruszywa na hałaśliwość nawierzchni asfaltowych ....	30
2.3. Nawierzchnie z asfaltu porowatego .....	32
2.4. Cienkie warstwy asfaltowe .....	36
2.5. Nawierzchnie poroelastyczne .....	39
2.6. Technika teksturowania a hałaśliwość nawierzchni betonowych .....	40
<b>3. Badanie i ocena hałaśliwości nawierzchni drogowych .....</b>	<b>44</b>
3.1. Przegląd i założenia metod oraz wskaźniki oceny poziomu hałasu .....	44
3.2. Wybrane problemy oceny hałasu opona/nawierzchnia i hałasu toczenia pojazdów samochodowych .....	53
3.2.1. Wpływ opony testowej na poziom hałasu według metody CPX .....	53
3.2.2. Metoda SPB w badaniach hałasu toczenia pojazdów samochodowych .....	56
3.2.2.1. Analiza wyników przeprowadzonych pomiarów .....	56
3.2.2.2. Porównywalność wyników pomiarów w różnych lokalizacjach .....	64
3.2.3. Wykorzystanie metody CPB w ocenie hałaśliwości nawierzchni ....	68
3.3. Hałaśliwość nawierzchni drogowych w Polsce .....	71
3.4. Propozycja klasyfikacji nawierzchni drogowych pod względem hałaśliwości .....	77
<b>4. Wpływ tekstury na poziom hałasu toczenia pojazdów samochodowych ....</b>	<b>80</b>
4.1. Charakterystyki powierzchni jezdni a poziom hałasu .....	80
4.2. Wpływ techniki teksturowania na hałaśliwość nawierzchni betonowych na drogach w Polsce .....	83
4.3. Makrotekstura nawierzchni drogowych .....	88

4.3.1. Ocena makrotekstury w badaniach poziomu hałasu opona/nawierzchnia .....	88
4.3.2. Ocena makrotekstury wybranych nawierzchni w Polsce .....	92
4.4. Wybór parametru do opisu makrotekstury nawierzchni .....	98
4.5. Zależności funkcyjne pomiędzy poziomem hałasu a makroteksturą nawierzchni i prędkością pojazdów .....	102
<b>5. Jednorodność, trwałość i ocena akustyczna nawierzchni drogowych .....</b>	<b>115</b>
5.1. Analiza porównawcza jednorodności akustycznej nawierzchni z SMA, asfaltu porowatego i cienkiej warstwy z betonu asfaltowego .....	115
5.1.1. Założenia i program badań .....	115
5.1.2. Ocena jednorodności akustycznej nawierzchni .....	116
5.2. Trwałość akustyczna nawierzchni .....	125
5.2.1. Stan wiedzy .....	125
5.2.2. Ocena trwałości akustycznej nawierzchni na przykładzie dróg w Polsce .....	131
5.2.2.1. Program badań .....	131
5.2.2.2. Wzrost hałaśliwości nawierzchni w okresie eksploatacji ..	132
5.2.2.3. Analiza widmowa dźwięków .....	136
5.2.2.4. Zmiany równoważnego poziom dźwięku w okresie eksploatacji nawierzchni .....	139
5.2.2.5. Badania współczynnika absorpcji i wodoprzepuszczalności nawierzchni porowatych .....	141
5.3. Ocena akustyczna nawierzchni drogowych .....	146
5.3.1. Nawierzchnia referencyjna .....	146
5.3.2. Systemy oceny akustycznej nawierzchni drogowych .....	149
5.3.3. Propozycja założeń do systemu oceny akustycznej nawierzchni drogowych w Polsce .....	153
<b>6. Wpływ nawierzchni na poziom hałasu w otoczeniu dróg .....</b>	<b>157</b>
6.1. Poziom emisji dźwięku od ruchu drogowego .....	157
6.1.1. Metoda obliczania .....	157
6.1.2. Wybór nawierzchni do szczegółowej analizy .....	159
6.1.3. Ustalenie poziomów emisji dźwięku w zależności od charakterystyki ruchu i rodzaju nawierzchni .....	164
6.2. Wpływ nawierzchni i kategorii pojazdów w prognozowaniu hałasu drogowego według metody CNOSSOS-EU .....	169
6.2.1. Uwagi ogólne .....	169
6.2.2. Założenia metody CNOSSOS-EU w odniesieniu do ruchu samochodowego i nawierzchni drogowych .....	171

---

6.2.3. Modelowanie hałasu od jadącego pojazdu samochodowego .....	174
6.2.4. Współczynniki korygujące wpływ nawierzchni .....	177
6.3. Nawierzchnie drogowe w Polsce w świetle zapisów metody CNOSSOS-EU .....	179
<b>Podsumowanie i wnioski .....</b>	<b>187</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>190</b>
<b>Streszczenie .....</b>	<b>209</b>
<b>Summary .....</b>	<b>211</b>
<b>Załączniki</b>	
Załącznik Z1. Zestawienie zależności regresyjnych w odniesieniu do nawierzchni badanych metodą SPB	
Z1.1. Analiza wyników pomiarów metodą SPB – pojazdy osobowe .....	214
Z1.2. Analiza wyników pomiarów metodą SPB – wielocłonowe pojazdy ciężarowe (kategoria 2b) .....	219
Z1.3. Analiza wyników pomiarów metodą SPB – wielocłonowe pojazdy ciężarowe (kategoria 2a) .....	223
Z1.4. Analiza wyników pomiarów metodą CPB – pojazdy osobowe .....	224
Załącznik Z2. Poziomy hałas według metody CPX na odcinkach testowych	
Z.2.1. Poziomy dźwięków na nawierzchni BBTM8 .....	225
Z.2.2. Poziomy dźwięków na nawierzchni PAC8 .....	226
Z.2.3. Poziomy dźwięków na nawierzchni SMA5 .....	227
Z.2.4. Poziomy dźwięków na nawierzchni SMA11 .....	228



## Podstawowe oznaczenia

- $L_{AeqD(N)}$  – równoważny poziom dźwięku (D – w porze dnia, N – w porze nocy) [dB],
- $L_{DWN}$  – długookresowy średni poziom dźwięku A wyznaczony w ciągu wszystkich dób w roku z uwzględnieniem pory dnia, pory wieczoru i pory nocy [dB],
- $L_N$  – długookresowy średni poziom dźwięku A wyznaczony w ciągu wszystkich nocy w roku [dB],
- $L_p$  – poziom ciśnienia akustycznego [dB],
- $L_W$  – poziom mocy akustycznej [dB],
- $L_{AE}$  – poziom ekspozycyjny dźwięku [dB],
- $L_{CPX}$  (oznaczenie równoważne: *CPXI*) – *Close-Proximity Index* (wskaźnik oceny hałasu opona/nawierzchnia według metody CPX) [dB],
- $L_{CPXP}$  – *Close-Proximity Index* (wskaźnik oceny hałasu opona/nawierzchnia w odniesieniu do opony P) [dB],
- $L_{CPXH}$  – *Close-Proximity Index* (wskaźnik oceny hałasu opona/nawierzchnia w odniesieniu do opony H) [dB],
- $L_{Amax,i(i=1,2a,2b)}$  – maksymalny poziom dźwięku od przejeżdżającego pojazdu osobowego (kategoria 1), ciężarowego (kategoria 2a) i wielocznionowego pojazdu ciężarowego (kategoria 2b) [dB],
- $SPBI$  – *Statistical Pass-By Index* (parametr oceny poziomu hałasu od ruchu samochodowego według metody SPB) [dB],
- $S_{CPX}$  – odchylenie standardowe poziomu dźwięku w metodzie CPX [dB],
- $D_a$  – średni kwadrat odchylenia standardowego między grupami [dB],
- $S_e$  – średni kwadrat odchylenia standardowego w grupie [dB],
- $ETD$  – prognozowana głębokość tekstury [mm],
- $MPD$  – średnia głębokość profilu nierówności [mm],
- $MTD$  – średnia głębokość tekstury [mm],
- $R_a$  – średnie arytmetyczne odchylenie profilu nierówności,
- $R_{ms}$  – średnie kwadratowe odchylenie profilu nierówności,
- $HP$  – głębokość tekstury według metody piasku kalibrowanego [mm],
- $IRI$  – międzynarodowy wskaźnik równości [mm/m],
- $\mu$  – współczynnik tarcia (w literaturze stosuje się także określenie współczynnik przyczepności) [-],
- $L_4$  – poziom nierówności dla fali o długości 4 mm [dB],
- $L_{63}$  – poziom nierówności dla fali o długości 63 mm [dB],
- AC (oznaczenie równoważne: DAC) – beton asfaltowy,



- SMA – mastyks asfaltowo-grysowy,
- PAC (oznaczenie równoważne: PA) – asfalt porowaty,
- DPAC – dwuwarstwowy asfalt porowaty,
- CC – beton cementowy (teksturowany tkaniną jutową, szczerkowany, rowkowany),
- EACC – beton cementowy teksturowany metodą odkrytego kruszywa,
- BBTM – beton asfaltowy do cienkich warstw,
- BBUM – beton asfaltowy do bardzo cienkich warstw,
- PU – nawierzchnie powierzchniowo utrwalone,
- KK – nawierzchnia z kostki kamiennej,
- SPB – metoda statystycznego przejazdu (*Statistical Pass-By method*),
- CPX – metoda z wykorzystaniem przyczepy badawczej (*Close Proximity method*),
- CPB – metoda kontrolowanego przejazdu (*Controlled Pass-By method*),
- OBSI – metoda z pomiarem poziomu dźwięku bezpośrednio przy kole jadącego pojazdu samochodowego (*On-Board Sound Intensity*),
- CTM – urządzenie do pomiaru makrotekstury nawierzchni (*Circular Texture Meter*),
- DFT – urządzenie do pomiaru współczynnika tarcia (*Dynamic Friction Tester*).

## Słowo wstępne

Hałas od ruchu samochodowego, obok zanieczyszczeń powietrza, jest obecnie największym zagrożeniem środowiskowym. Nadmierny jego poziom stanowi zagrożenie dla zdrowia ludzi, powodując zaburzenia snu, co w konsekwencji prowadzi do chorób układu krążenia, chronicznego zmęczenia, rozdrażnienia, stresu i spadku koncentracji oraz innych dolegliwości. Zbyt wysokie są społeczne koszty ochrony zdrowia związane z ponadnormatywnym hałasem od środków transportowych. Obniżenie jego poziomu u odbiorcy wymaga odpowiednich decyzji na etapie kształtowania układów drogowych, ustalania przebiegu tras drogowych, projektowania skrzyżowań i węzłów, zarządzania i organizacji ruchu, przy wyborze technologii wykonania nawierzchni drogowych oraz rodzaju stosowanych zabezpieczeń przeciwhałasowych.

W krajach Unii Europejskiej obowiązuje tzw. „polityka hałasowa”, wynikająca z Dyrektywy 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie oceny i zarządzania poziomem hałasu w środowisku. W dyrektywie zdefiniowano cele i zadania prowadzące do zmniejszenia szkodliwego wpływu nadmiernych dźwięków na środowisko. Wskazano na konieczność sporządzania map akustycznych, tworzenia programów „walki z hałasem” oraz zapewnienia dostępu mieszkańcom do informacji o hałasie. Stworzono także podstawy prawne do ujednoczenia wskaźników i metod oceny poziomu hałasu. W dyrektywie są zawarte zalecenia dotyczące obniżenia dokuczliwości hałasów od ruchu kołowego, szynowego i lotniczego.

W Dyrektywie 2002/49 Unii Europejskiej i Rady określono kierunki działań w celu poprawy klimatu akustycznego w środowisku. Jako jeden z nich wskazano budowę cichych nawierzchni drogowych, ograniczających w istotny sposób poziom dźwięków generowanych w rejonie płaszczyzny kontaktu opon samochodowych z nawierzchnią.

Dyrektywa Komisji UE 2015/996 z dnia 19 maja 2015 r. ustanowiła wspólną metodę oceny hałasu zgodnie z dyrektywą 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady. Wprowadzono bardziej jednoznaczne zapisy odnośnie do metody jego prognozowania pod kątem tworzenia map akustycznych i dokonano zmian w załączniku II, dotyczącym między innymi wpływu nawierzchni drogowych na poziom emisji hałasu od jadących pojazdów. Trwają prace nad uściśleniem podejścia do oceny skutków nadmiernego poziomu dźwięku, uwzględniające narażenie ludzi na uciążliwość i choroby z tym związane.

W metodzie CNOSSOS-EU, przyjętej jako podstawowa metoda prognozowania poziomu hałasu w krajach Unii Europejskiej (od 31 grudnia 2018 roku), wpływ nawierzchni powinien być uwzględniany w oparciu o wyniki badań metodą statystycznego przejazdu (SPB – *Statistical Pass-By method*). Mając to na uwadze, wyniki badań hałasu toczenia pojazdów samochodowych ustalone metodą SPB przez autora monografii na praktycznie wszystkich nawierzchniach stosowanych w Polsce mają szczególne znaczenie. Mogą być one wykorzystane na etapie dostosowywania metod prognozowania hałasu stosowanych dotychczas w naszym kraju do metody CNOSSOS-EU.

Monografia jest opracowaniem prezentującym wyniki badań i analiz hałaśliwości nawierzchni prowadzonych przez autora od wielu lat i stanowi istotne rozszerzenie rozważań przedstawionych w pracy [74]. Zestawienie i analiza wyników pomiarów hałasu toczenia pojazdów samochodowych metodą SPB, analiza skuteczności akustycznej nawierzchni asfaltowych i nawierzchni betonowych z uwzględnieniem ich makrotekstury, ocena jednorodności i trwałości akustycznej nawierzchni o zwiększonej zawartości wolnych przestrzeni, opracowanie propozycji założeń do systemu certyfikacji nawierzchni pod względem hałaśliwości oraz ustalenie współczynników korygujących wpływ nawierzchni na poziom hałasu w odniesieniu do nawierzchni referencyjnej są najważniejszymi osiągnięciami autora monografii.

W rozdziale 1 omówiono wybrane pojęcia z zakresu akustyki i wskaźniki oceny poziomu emitowanych dźwięków oraz przedstawiono pojazd samochodowy jako źródło hałasu drogowego. Zaprezentowano też działania prowadzące do poprawy klimatu akustycznego w otoczeniu dróg.

W rozdziale 2 omówiono najbardziej istotne projekty badawcze dotyczące hałaśliwości nawierzchni drogowych oraz przedstawiono wybrane charakterystyki materiałowo-technologiczne nawierzchni asfaltowych i z betonu cementowego, przyczyniające się do obniżenia poziomu hałasu toczenia opon samochodowych, jak też wskazano kierunki rozwoju tych technologii.

Zagadnienia związane z badaniami i oceną hałasu toczenia opon samochodowych są przedmiotem rozważań w rozdziale 3. Omówiono w nim wady i zalety podstawowych metod stosowanych w ocenie hałaśliwości nawierzchni oraz zwrócono uwagę na niektóre aspekty oceny wyników pomiarów. Przedstawiono analizę porównawczą maksymalnego poziomu dźwięku od przejazdu statystycznego pojazdu osobowego i wieloczołowego pojazdu ciężarowego na praktycznie wszystkich rodzajach warstw ścieralnych stosowanych na drogach w Polsce. Zaproponowano uaktualnienie wcześniej opracowanej klasyfikacji nawierzchni z akustycznego punktu widzenia.

W rozdziale 4 wykazano dużą rolę makrotekstury w generowaniu dźwięków w rejonie kontaktu opon z nawierzchnią asfaltową oraz znaczenie techniki teksturowania w wypadku nawierzchni betonowych. Opracowano zależności pomiędzy poziomem hałasu a makroteksturą i logarytmem prędkości.

Problemy trwałości, jednorodności i oceny akustycznej nawierzchni drogowych są tematem rozdziału 5. Przedstawiono w nim propozycję nawierzchni referencyjnej oraz propozycję założeń do systemu certyfikacji akustycznej technologii wykonywania nawierzchni o obniżonej hałaśliwości i kontroli poziomu emitowanych dźwięków na nowych nawierzchniach wraz z prowadzeniem monitoringu w czasie ich eksploatacji.

Analiza wpływu nawierzchni drogowych na emisję hałasu od ruchu samochodowego jest przedmiotem rozważań w rozdziale 6. Opracowano nomogramy umożliwiające ustalenie poziomu emisji hałasu w zależności od rodzaju nawierzchni i charakterystyki ruchu. Omówiono założenia metody CNOSSOS-EU w odniesieniu do nawierzchni drogowych. Ustalono współczynniki korygujące wpływ nawierzchni na maksymalny poziom dźwięku od przejazdu statystycznego pojazdu osobowego i wielocłonowego pojazdu ciężarowego w porównaniu z zaproponowaną nawierzchnią referencyjną. Wartości podanych współczynników, po uwzględnieniu modelu obliczania mocy akustycznej pojazdów, mogą być wykorzystane w prognozowaniu hałasu od ruchu drogowego metodą CNOSSOS-EU.

\*\*\*\*\*

Analizy i rozważania prezentowane w monografii są wynikiem wieloletnich badań autora we współpracy z instytutami, zespołami naukowo-badawczymi oraz licznymi osobami. W pierwszej kolejności należy wymienić 6-miesięczny staż w LCPC Centre de Nantes (obecnie: *Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux* - IFSTTAR) w Bouguenais we Francji w latach 1993-1994 i współpracę z dr. Yves Delannem i dr. Michelelem Bérengier. Poznanie metod badawczych oraz wykorzystywanego sprzętu na drogach we Francji pozwoliło już w latach dziewięćdziesiątych XX wieku rozpocząć badania hałaśliwości nawierzchni na drogach w Polsce. Nieocenionym nauczycielem w tym zakresie był (i jest) Pan prof. dr hab. inż. Jerzy Antoni Ejsmont z Politechniki Gdańskiej. Pan Profesor nauczył mnie prowadzenia badań nad hałaśliwością nawierzchni i krytycznej oceny ich wyników. Bardzo dziękuję, Panie Profesorze.

Mój udział w badaniach prowadzonych przez Politechnikę Gdańską na rzecz takich projektów, jak: HARMONOISE, SILVIA i IMAGINE, zaowocował kilkoma interesującymi spostrzeżeniami i był przyczynkiem do rozpoznania hałaśliwości nawierzchni kostkowych, wpływu zawilgocenia nawierzchni na poziom hałasu

toczenia pojazdów samochodowych oraz opracowania propozycji klasyfikacji nawierzchni pod względem hałaśliwości.

Bardzo wysoko oceniam współpracę z dr. inż. Piotrem Mioduszeuskim, profesorem Stanisławem Tarymą i dr. inż. Grzegorzem Ronowskim z Politechniki Gdańskiej. Merytoryczne dyskusje z Panem prof. dr. hab. inż. Marianem Traczem z Politechniki Krakowskiej i Panem dr. inż. Januszem Bohatkiewiczem z Politechniki Lubelskiej zawsze były inspiracją do kolejnych badań i analiz.

Dziękuję Zarządowi Dróg Wojewódzkich w Krakowie, Oddziałom Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w Białymstoku i w Łodzi, TPA Instytutowi Badań Technicznych Sp. z o.o. za zawsze życzliwe podejście do współpracy w zakresie badania hałaśliwości nawierzchni drogowych.

Wykonanie tak szerokich badań i analiz nie byłoby możliwe bez pomocy współpracowników z Politechniki Białostockiej. W pomiarach poziomu hałasu uczestniczyli: dr inż. Robert Ziółkowski, inż. Franciszek Sikorski, dr inż. Marek Motylewicz i mgr inż. Paweł Gierasimiuk, a w badaniach cech techniczno-eksploatacyjnych nawierzchni - dr inż. Marta Wasilewska. Właśnie do nich kieruję szczególne podziękowania. Dr. inż. Markowi Motylewiczowi i mgr. inż. Pawłowi Gierasimiukowi dodatkowo dziękuję za pomoc w zestawieniu wyników wieloletnich pomiarów oraz pomoc przy opracowaniu graficznej części monografii.

Zonie Marysi oraz synom, Danielowi i Piotrowi, bardzo dziękuję za wyrozumiałość i wsparcie przy redagowaniu niniejszej monografii.

Autor

# 1. Wprowadzenie

## 1. 1. Wybrane pojęcia z zakresu akustyki

Drgania akustyczne polegają na ruchu cząstek ośrodka sprężystego (np. powietrza) względem położenia równowagi. W wyniku lokalnych zmian ciśnienia w stosunku do ciśnienia atmosferycznego powstają fale akustyczne. Dźwięki występujące w środowisku, w tym pochodzące od ruchu samochodowego, są złożone i przy wykorzystaniu analizy Fouriera mogą być rozkładane na drgania sinusoidalne. Ułatwia to określenie ich częstotliwości  $f$  (Hz) i długości fali  $\lambda$  (m), podstawowych wielkości charakteryzujących falę akustyczną. Częstotliwość dźwięku jest liczbą okresów zmian ciśnienia akustycznego w ciągu 1 sekundy, a długość fali  $\lambda$  – odległością, jaką przebywa sinusoidalna fala dźwiękowa w czasie jednego okresu drgań.

Fali akustycznej towarzyszy przepływ energii, a jej charakterystyką jest natężenie dźwięku, które definiuje się jako energię przepływającą w czasie 1 sekundy przez powierzchnię jednego metra kwadratowego. Intensywność fali akustycznej pod względem energetycznym jest charakteryzowana poprzez poziom natężenia dźwięku i opisywana wzorem [193]:

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \text{ [dB]}, \quad (1.1)$$

gdzie:

$I$  – natężenie dźwięku [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],

$I_0$  – natężenie dźwięku odniesienia odpowiadające najmniejszemu natężeniu słyszalnemu dla częstotliwości równej 1000 Hz ( $I_0 = 10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$ ).

W praktyce nie mierzy się natężenia dźwięku, a ciśnienie akustyczne. Wielkością stosowaną do opisu stanu akustycznego środowiska jest poziom ciśnienia akustycznego. Określa on poziom skutecznej wartości ciśnienia odpowiadający energii zawartej w całym zakresie częstotliwości. Poziom ciśnienia akustycznego wyraża się wzorem [193]:

$$L_p = 10 \log \frac{p_a^2}{p_{a0}^2} \text{ [dB]}, \quad (1.2)$$

gdzie:

$p_a$  – ciśnienie akustyczne w analizowanym punkcie środowiska [ $\text{N}/\text{m}^2$ ],

$p_{a0}$  – ciśnienie odniesienia (występujące przy natężeniu  $I_0$ ) równe  $2 \cdot 10^{-5} \text{ N}/\text{m}^2$ .

Zgodnie z przepisami obowiązującymi w Unii Europejskiej w celu ilościowej oceny hałasu drogowego nie stosuje się poziomu ciśnienia akustycznego ( $L_p$ ), lecz poziom dźwięku  $L_A$  jako poziom ciśnienia akustycznego dźwięku skorygowany według charakterystyki częstotliwościowej zgodnej z krzywą korekcyjną A [138]. W monografii zastosowano zapisy: poziom dźwięku A (dB) i poziom dźwięku (dB(A)) jako równoważne. Wynika to z potrzeby cytowania pozycji literatury, w których stosowano jedną i drugą wersję zapisu.

Mocą akustyczną źródła dźwięku nazywa się ilość energii, jaka jest wysyłana w jednostce czasu i można ją przedstawić jako poziom mocy akustycznej, obliczony ze wzoru [138]:

$$L_W = 10 \cdot \log \left( \frac{W}{W_o} \right) \text{ [dB]}, \quad (1.3)$$

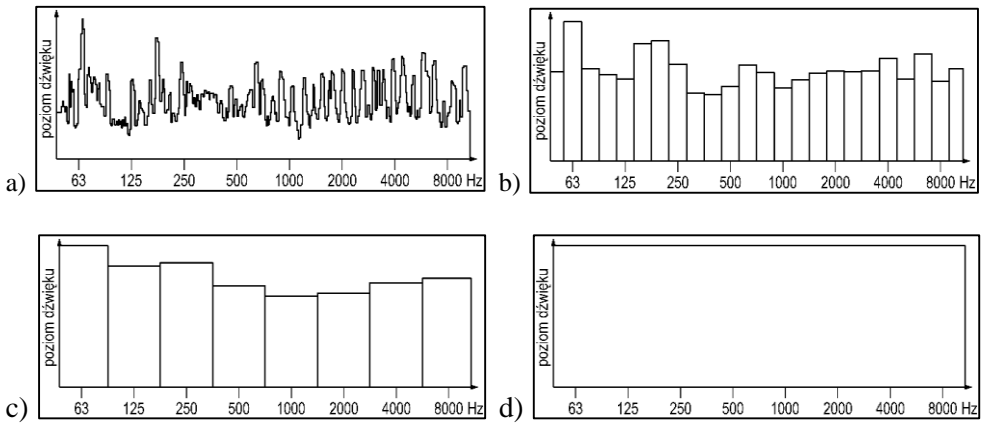
gdzie:

$W$  – moc akustyczna źródła dźwięku [W],

$W_o$  – moc odniesienia równa  $10^{-12}$  W.

Bardziej szczegółową charakterystykę dźwięków przedstawiają ich widma, prezentujące wartości amplitud składowych drgania akustycznego w funkcji częstotliwości. Poziomy ciśnienia akustycznego lub poziomy dźwięku są określane dla całego zakresu częstotliwości, oktaw lub tercji. Oktawa jest zbiorem kolejno następujących po sobie tonów, z których najwyższy ma częstotliwość dwa razy większą od najniższego  $f_{n2}/f_{n1} = 2$ . Oktawy są charakteryzowane przez tzw. częstotliwości środkowe: 31,5 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz, 8000 Hz i 16000 Hz. Tercjowe pasma częstotliwości (jedna trzecia oktawy) są opisane zależnością pomiędzy częstotliwościami  $f_{n2}$  i  $f_{n1}$ :  $f_{n2} = 2^{1/3} \cdot f_{n1}$ , a środkowe częstotliwości tych pasm w zakresie najbardziej słyszalnym ludziom przyjmują wartości: 25 Hz, 31,5 Hz, 40 Hz, ..., 10000 Hz, 12500 Hz, 16000 Hz. Na rysunku 1.1 pokazano przykładowe widma dźwięku w zależności od zakresu częstotliwości [186].

Podstawowa różnica pomiędzy poziomem ciśnienia akustycznego i poziomem mocy akustycznej polega na tym, że poziom ciśnienia akustycznego jest wartością mierzalną podczas pomiaru, a poziom mocy akustycznej nie daje się bezpośrednio zmierzyć. Poziom mocy akustycznej źródła dźwięku nie zależy od takich czynników, jak: odległość od źródła dźwięku, absorpcja i propagacja dźwięku.



Rys. 1.1. Widma dźwięku w zależności od zakresu częstotliwości: a) wąskopasmowe, b) w pasmach 1/3 – oktawowych, c) w pasmach oktawowych, d) w całym zakresie częstotliwości

W odniesieniu do ruchu samochodowego wartość poziomu mocy akustycznej można określić w sposób przybliżony poprzez pomiar maksymalnego poziomu dźwięku  $L_{pA}$  od przejeżdżającego pojedynczego pojazdu, pomiar poziomu ekspozycji hałasu pojedynczego pojazdu  $L_{AE}$  lub pomiar równoważnego poziomu dźwięku  $L_{Aeq}$  w czasie  $T$  (s) od przejazdu kilku lub kilkunastu pojazdów tego samego typu [140]. Pomierzone wartości  $L_{pA}$ ,  $L_{AE}$  i  $L_{Aeq}$ , po zastosowaniu odpowiednich wzorów, umożliwiają ustalenie wartości poziomu mocy pojedynczego pojazdu jadącego z określoną prędkością po danej drodze. Przybliżoną wartość poziomu mocy akustycznej  $L_{WA}$ , przy zastosowaniu modelu bezkierunkowego źródła punkowego, można określić ze wzoru [140]:

$$L_{WA} \approx L_{pAg} - 10 \cdot \log\left(\frac{s_o}{D^2}\right) - \delta \cdot L_g + 10 \cdot \log(4\pi), \quad (1.4)$$

gdzie:

$L_{pAg}$  – maksymalny poziom dźwięku od przejeżdżającego pojazdu w określonych warunkach [dB],

$s_o = 1\text{m}^2$ ,

$D$  – odległość odbiorcy od toru źródła dźwięku [m],

$\delta \cdot L_g$  – oddziaływanie źródła dźwięku z powierzchnią terenu.

Znajomość poziomu mocy akustycznej poszczególnych pojazdów jest wymagana przy prognozowaniu hałasu od ruchu drogowego, między innymi w metodzie CNOSSOS-EU, przyjętej do stosowania w krajach Unii Europejskiej. Zgodnie z założeniami metody statystycznego przejazdu (SPB) pomiary maksymalnego poziomu dźwięku od przejeżdżającego pojazdu są wykonywane na poboczu



(chodniku) drogi, w odległości 7,50 m od osi toru jazdy pojazdu i na wysokości 1,20 m nad powierzchnią jezdni. Przyjmując wartość  $\delta \cdot L_g \approx 2$  dB, przybliżoną wartość poziomu mocy akustycznej można obliczyć ze wzoru [140]:

$$L_{WA} \approx L_{pA} + 27. \quad (1.5)$$

W literaturze wartość  $\delta \cdot L_g$  jest przyjmowana w szerokim zakresie (do 6 dB) i jest uzależniona między innymi od pokrycia terenu pomiędzy źródłem hałasu a odbiorcą. W modelach generowania dźwięków w rejonie płaszczyzny kontaktu opon z nawierzchnią i jego propagacji także zróżnicowane jest podejście do lokalizacji źródła dźwięku (w odniesieniu do pojazdu i nawierzchni) [51, 79, 92, 109, 140, 246].

Ruch drogowy charakteryzuje się zmienną wartością poziomu dźwięku w czasie. Dokonanie oceny klimatu akustycznego w otoczeniu dróg polega na ustaleniu równoważnego poziomu dźwięku A wyrażonego w decybelach ( $L_{AeqD}$ ) w porze dnia (6.00-22.00) i w porze nocy ( $L_{AeqN}$ ) (22.00-6.00) [192]. Polityka długookresowa w zakresie ochrony przed hałasem, obejmująca między innymi opracowanie map akustycznych oraz tworzenie programów „walki” z nadmiernym hałasem, jest oparta na średnim poziomie dźwięku A, wyznaczonym dla wszystkich dób w roku ( $L_{DWN}$ ) z uwzględnieniem pory dnia (6.00-18.00), pory wieczoru (18.00-22.00) i pory nocy (22.00-6.00) oraz dla wszystkich nocy w roku ( $L_N$ ) (22.00-6.00). W rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 1.10.2012 r. [192] są podane dopuszczalne wartości powyższych wskaźników w zależności od źródła hałasu oraz charakterystyki zagospodarowania terenu.

Ocena klimatu akustycznego obszarów przyległych do tras drogowych może być dokonana z uwzględnieniem tzw. wskaźników globalnych (złożonych) (np.:  $M$ ,  $W$ ,  $LZH$ ,  $LMZH_k$ ,  $TZH$ ,  $TMZH$ ,  $TZH$ ) [113]. Wskaźnik  $M$  jest ustalany zgodnie z procedurą zaproponowaną w rozporządzeniu dotyczącym wymagań, jakim powinien odpowiadać program ochrony przed hałasem. Charakteryzuje on wielkość przekroczenia dopuszczalnego poziomu dźwięku i liczbę osób narażonych na nadmierny hałas w danym terenie. Wskaźnik  $W$  określa procentowy stosunek długości tras komunikacyjnych obszaru o danym poziomie hałasu do długości wszystkich dróg i ulic objętych analizą. Wskaźnik  $LZH$  wskazuje na liczbę ludności, a wskaźnik  $LMZH_k$  na procent ludności obszaru zagrożonej hałasem komunikacyjnym wyższym od dopuszczalnego. Wskaźnik  $TZH$  określa wielkość powierzchni obszaru, a wskaźnik  $TMZH$  – procent powierzchni obszaru z przekroczonym poziomem hałasu. Stosowane są także wskaźniki charakteryzujące obudowę dróg przed nadmiernym hałasem ( $ILZ$  – wskaźnik oddalenia pierwszej linii zabudowy od drogi,  $EB$  – wskaźnik ekranowania budynków mieszkalnych inną zabudową,  $WNK$  – wskaźnik degradacji klimatu akustycznego) [233].

W analizach akustycznych są stosowane również takie pojęcia, jak: dokuczliwość, głośność i hałaśliwość. Dokuczliwość dźwięków wiąże się z negatywnymi odczuciami mieszkańców w pobliżu tras drogowych. Rozróżnia się między innymi dokuczliwość chwilową i dokuczliwość całkowitą, dokuczliwość pojedynczych zdarzeń i dokuczliwość wielu zdarzeń akustycznych. Zaleca się wykorzystywanie do jej oceny wartości równoważnego poziomu dźwięku lub wskaźnika  $L_{DWN}$ . W szczegółowych analizach można oceniać procent osób objętych dokuczliwym hałasem. Prowadzone są badania dokuczliwości hałasu w zależności od charakterystyki ruchu i rodzaju nawierzchni drogowych [64, 213].

Wrażenie głośności zależy od poziomu ciśnienia akustycznego i częstotliwości dźwięku [193]. Poziomy głośności są wyrażane w fonach i liczbowo równe poziomom ciśnienia akustycznego w decybelach wyłącznie dla dźwięku prostego o częstotliwości 1000 Hz. Hałaśliwość określa się w noysach [193]. Jeden noys oznacza dokuczliwość dźwięków zakresie częstotliwości 910-1090 Hz i poziomu ciśnienia akustycznego 40 dB. Hałas o dwukrotnie wyższej dokuczliwości ma 2 noysy itd.

W niniejszej monografii, podobnie jak w innych opracowaniach autora, hałaśliwością nawierzchni przyjęto nazywać jej charakterystykę opisaną wartością maksymalnego poziomu dźwięku ustalonego według metody SPB, metody CPX lub innych metod (np. CPB, OBSI). Oznacza to, że pojęcie „hałaśliwość nawierzchni” jest innym pojęciem niż „hałaśliwość” będąca charakterystyką dźwięku stosowaną w akustyce.

Podane powyżej opisy wybranych pojęć z zakresu akustyki są uproszczone. Ich wprowadzenie miało jednak na celu lepsze zrozumienie zagadnień dotyczących badań hałasu drogowego, omawianych w kolejnych punktach monografii. W literaturze, przykładowo w takich pracach, jak [60, 61, 138, 139, 140, 193], są one omówione w sposób bardzo szczegółowy i kompleksowy.

## 1.2. Pojazd samochodowy jako źródło hałasu

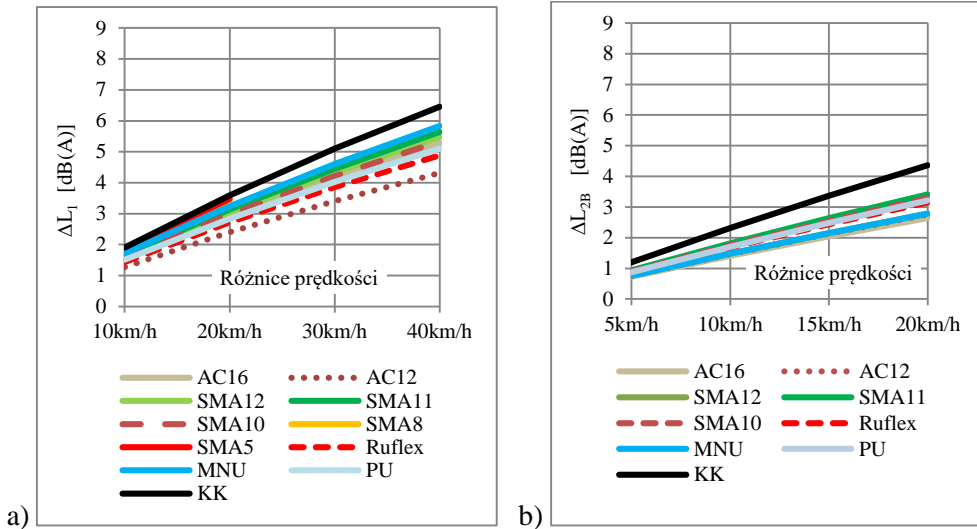
Natężenie ruchu i jego struktura rodzajowa, a także prędkość i charakterystyka techniczna pojazdów decydują w głównym stopniu o poziomie hałasu w otoczeniu tras drogowych. Zmniejszenie natężenia ruchu po wybudowaniu obwodnicy czy „przeniesienie” ruchu z ulic o znaczeniu lokalnym na główne ciągi komunikacyjne przyczynia się do redukcji hałasu w otoczeniu dróg o mniejszym znaczeniu, od 0,5 dB do 7 dB (0,5 dB – przy redukcji natężenia ruchu o 10% i 7 dB – przy redukcji o 80%) [24]. Zmniejszenie udziału samochodów ciężarowych z 10% do 0% wpływa na obniżenie poziomu hałasu o wartość 3,9 dB, a przy zmniejszeniu z 30% do 0% – o 8,3 dB.

Zgodnie z [59] redukcja prędkości pojazdu osobowego o 10 km/h przyczynia się do spadku poziomu hałasu o 3,7 dB, przy obniżeniu prędkości o 20 km/h – o 6,7 dB, a przy 30 km/h – o 9 dB. Mniejsze redukcje poziomu hałasu, w zakresie prędkości 30 – 60 km/h, przy zmniejszeniu prędkości od 10 do 30 km/h, uzyskuje się w wypadku pojazdów ciężarowych (do 3 dB). Przedstawione wartości są przybliżone i w rzeczywistości mogą być inne, gdyż zmiana natężenia ruchu prowadzi do istotnych zmian średnich prędkości pojazdów.

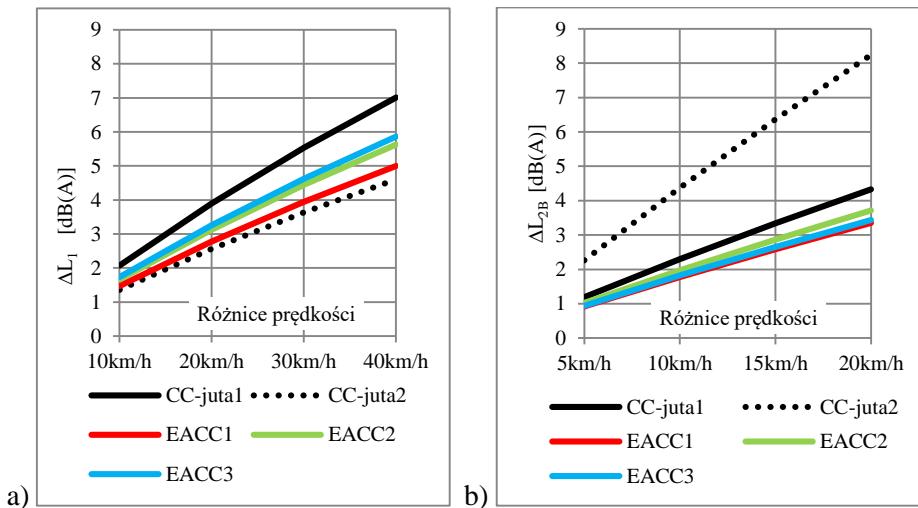
Ponieważ podane wartości nie uwzględniają charakterystyki nawierzchni, przeprowadzono analizę wartości różnic w zakresie maksymalnego poziomu dźwięku w zależności od typu pojazdu, rodzaju nawierzchni i prędkości jazdy (rys. 1.2 i 1.3). Badania wykonano na nawierzchniach najczęściej stosowanych na drogach w naszym kraju, a ich szczegóły podano w pracy [68]. Ustalono, że na nawierzchniach asfaltowych wzrost prędkości pojazdów o 10 km/h przyczynia się do wzrostu maksymalnego poziomu hałasu od przejazdu statystycznego pojazdu osobowego i ciężarowego średnio o około 1,6 dB, a przy wzroście prędkości o 20 km/h – o około 3 dB. W wypadku pojazdu osobowego wzrost prędkości o 30 km/h wpływa na zwiększenie poziomu hałasu średnio o 4,1 dB, a przy wzroście o 40 km/h – o 5,2 dB.

Na nawierzchni kostkowej stwierdzono nieco większy wzrost maksymalnego poziomu hałasu toczenia pojazdów niż na nawierzchniach asfaltowych i wynosi 1,9 dB dla pojazdu osobowego przy zwiększeniu prędkości o 10 km/h, 3,6 dB – przy zwiększeniu prędkości o 20 km/h oraz 6,5 dB – przy zwiększeniu prędkości o 40 km/h.

W wypadku nawierzchni betonowych teksturowanych metodą odkrytego kruszywa przy zwiększeniu prędkości pojazdów zanotowano podobny wzrost maksymalnego poziomu dźwięku jak na nawierzchniach asfaltowych. Na dwóch nawierzchniach teksturowanych tkaniną jutową ustalono zdecydowanie zróżnicowane wartości wzrostu poziomu hałasu statystycznego pojazdu osobowego i pojazdu ciężarowego przy zwiększeniu ich prędkości.



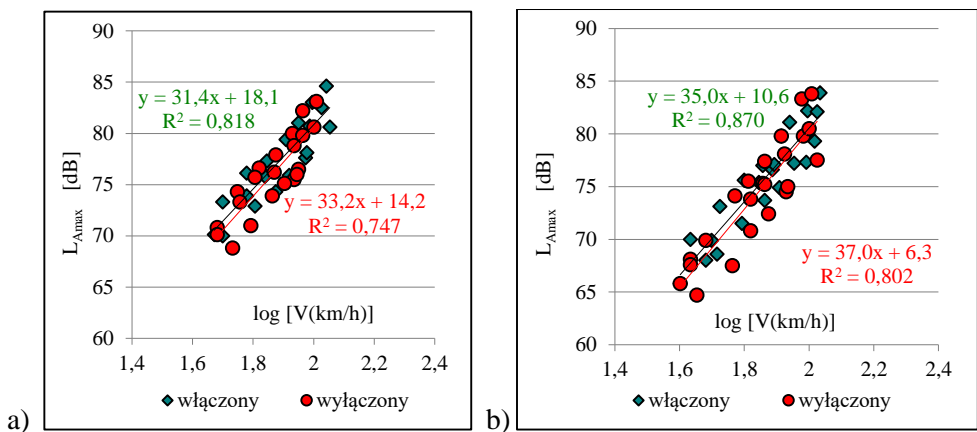
Rys. 1.2. Wpływ wzrostu prędkości na wzrost poziomu hałasu – nawierzchnie asfaltowe i z kostki kamiennej: a) pojazd osobowy, b) pojazd ciężarowy kat. 2b



Rys. 1.3. Wpływ wzrostu prędkości na wzrost poziomu hałasu – nawierzchnie betonowe a) pojazd osobowy, b) pojazd ciężarowy kat. 2b

Przy wyższych prędkościach hałas toczenia pojazdów samochodowych jest główną składową całkowitego poziomu dźwięku pochodzącego od jadącego pojazdu

du samochodowego. Potwierdzono to w badaniach autora monografii prowadzonych na nawierzchniach z betonu asfaltowego AC12 i z mastyksu grysowego SMA12 metodą kontrolowanego przejazdu (CPB). Trzy pojazdy osobowe o różnej charakterystyce przejeżdżały z prędkością od 50 km/h do 110 km/h (ze skokiem co 10 km/h) z włączonym i wyłączonym silnikiem. Ustalone wartości maksymalnego poziomu dźwięku pokazano na rysunku 1.4. Różnice pomiędzy wartościami maksymalnego poziomu dźwięku od przejeżdżającego pojazdu osobowego z włączonym i wyłączonym silnikiem na dwóch badanych nawierzchniach ulegają zmniejszeniu wraz ze wzrostem prędkości i przy prędkości 80 km/h wynoszą 0,5 dB (tab. 1.1).



Rys. 1.4. Poziom dźwięku od przejeżdżającego pojazdu osobowego w zależności od stanu silnika: a) nawierzchnia AC12, b) nawierzchnia SMA12

Hałas toczenia pojazdów samochodowych jest w dużym stopniu uwarunkowany uderzeniami opon o nierówności nawierzchni oraz mechanizmami aerodynamicznymi.

Uderzenia opon o nawierzchnię powodują zmiany krzywizny pasa bieżnika i odkształcenia ścianek bocznych i mają istotne znaczenie w zakresie niższych częstotliwości (poniżej 1000 Hz). Wpływ na drgania elementów bieżnika ma zarówno charakterystyka opony, jak i tekstura nawierzchni, a w szczególności makrotekstura i megatekstura. Z mikroteksturą powierzchni jest związane zjawisko adhezji gumy z nawierzchnią (mechanizm *stick-snap*) oraz tarcie opon o nawierzchnię decydujące o naprężeniach stycznych w śladzie ich styku (mechanizm *stick-slip*).

Tab. 1.1. Wartości maksymalnego poziomu dźwięku od przejeżdżającego pojazdu i wartości różnicy w zależności od stanu silnika

Prędkość [km/h]	Wartości poziomu dźwięku i wartości różnic pomiędzy poziomami [dB(A)]					
	AC12			SMA12		
	$L_{Amax1}$ (wł)	$L_{Amax1}$ (wył)	$L_{Amax1}(wł) - L_{Amax1}(wył)$	$L_{Amax1}$ (wł)	$L_{Amax1}$ (wył)	$L_{Amax1}(wł) - L_{Amax1}(wył)$
50	71,4	70,5	0,9	70,0	69,1	0,9
60	73,9	73,1	0,7	72,8	72,0	0,8
70	76,0	75,4	0,6	75,1	74,5	0,6
80	77,8	77,3	0,5	77,2	76,6	0,5
90	79,4	79,0	0,4	78,9	78,5	0,4
100	80,9	80,5	0,3	80,5	80,2	0,3

Mechanizmy aerodynamiczne obejmują rezonans powietrza w rowkach bieżnika, pompowanie powietrza, rezonans Helmholtza oraz turbulencje wywołane przez ruch opony względem otaczającego powietrza – ich wpływ jest znaczący w zakresie częstotliwości powyżej 1000 Hz. Rezonans powietrza w rowkach bieżnika jest powodowany przez drgania elementów bieżnika. Mechanizm „pompowanie powietrza” (*air pumping*) polega na sprężaniu i rozprężaniu powietrza zamkniętego w rowkach bieżnika i w nierównościach nawierzchni. Rezonans Helmholtza jest związany ze zmianami ciśnienia powietrza znajdującego się w rowkach bieżnika opuszczającego strefę styku z nawierzchnią.

Dodatkowy wpływ na poziom generowanych dźwięków ma charakterystyka materiałów tworzących oponę, jej wymiary i ciśnienie w oponie. Zjawiskami wzmacniającymi lub redukującymi mechanizmy generowania hałasu są: „efekt rogu”, impedancja mechaniczna i akustyczna oraz pochłanianie dźwięków przez nawierzchnię. „Efekt rogu” jest uzależniony od średnicy i szerokości opony oraz położenia źródła dźwięku i nabiera znaczenia w rejonie krawędzi wyjścia opony ze styku z nawierzchnią. Wpływ impedancji mechanicznej i impedancji akustycznej jest związany ze sztywnością materiałów, z których wykonano oponę i nawierzchnię. Absorpcja dźwięków przez nawierzchnię zależy od zawartości wolnych przestrzeni, rozmiarów i kształtu porów oraz liczby, grubości i stopnia zanieczyszczenia górnych warstw nawierzchni.

Szczegółowy opis mechanizmów generowania dźwięków w rejonie kontaktu opon samochodowych z nawierzchnią, a także od poruszającego się pojazdu jest przedstawiony między innymi w pracach [52, 202].

Jak wykazują badania, najbardziej istotnymi charakterystykami nawierzchni drogowej, decydującymi o poziomie hałasu toczenia pojazdów samochodowych, są: tekstura, porowatość i sztywność. W tabeli 1.2, w oparciu o wyniki analiz przeprowadzonych w ramach programu IPG (*Innovatie Programma Geluid*) w Holandii, przedstawiono wpływ tych charakterystyk na mechanizmy generowania hałasu drogowego w zależności od kategorii pojazdu [236]. Zwraca uwagę fakt, jak wiele jest niewyjaśnionych problemów w odniesieniu do pojazdu ciężarowego.

Tab. 1.2. Wpływ charakterystyk nawierzchni na mechanizmy generowania hałasu

Mechanizmy	Pojazd osobowy			Pojazd ciężarowy		
	Tekstura	Porowatość	Sztywność	Tekstura	Porowatość	Sztywność
Drgania opon i ich elementów	++	0	++	++	0	++
Stick-slip	++	+	?	?	?	?
Stick-snap	++	+	?	?	?	?
Turbulencje związane z ruchem opony	0	0	0	0	0	0
Rezonans Helmholtza	+	0	?	?	0	?
Pompowanie powietrza	+	++	?	?	?	?
Rezonans powietrza w rowkach bieżnika	+	++	?	?	?	?
Efekt „rogu”	0	++	0	0	++	0
Absorpcja hałasu toczenia opon	0	++	0	0	++	0
Absorpcja hałasu od układu napędowego	0	++	0	0	++	0

++ – bardzo istotny wpływ, + – istotny wpływ, 0 – nieistotny wpływ, ? – problem niewyjaśniony

Mechanizmy generowania dźwięków, z uwzględnieniem charakterystyki nawierzchni drogowych i opon samochodowych, stanowiły podstawę opracowania modeli fizycznych i hybrydowych generowania dźwięku w rejonie kontaktu opony z nawierzchnią.

Do najbardziej znanych modeli fizycznych należy zaliczyć model Kroppa [51] oraz model TRIAS (*Tyre Road Interaction Acoustic Simulation*) [189]. Model Kroppa obejmuje mechanizmy związane z wpływem charakterystyki opony wraz z promieniowaniem dźwięków wywołanych wibracjami i jej deformacjami oraz mechanizmy związane z płaszczyzną kontaktu opona/nawierzchnia. Model

TRIAS uwzględnia mechanizmy interakcji opony i nawierzchni, przepływu i „pompowanie” powietrza oraz propagację dźwięków do otoczenia. Model ten obejmuje moduły: RODAS (*Road Design Acoustic Simulation*) – opisujący nawierzchnię i TYDAS (*Tyre Desing Acoustic Simulation*) – charakteryzujący konstrukcję opony.

Modelem hybrydowym uwzględniającym mechanizmy generowania dźwięków, związanym z płaszczyzną kontaktu opony z nawierzchnią oraz charakterystyką nawierzchni, jest model SPERoN (*Statistical Physical Explantation of Rolling Noise*) [17]. Jego wykorzystanie przy interpretacji wyników poziomu hałasu uzyskanych na nawierzchni typu SMA11, nawierzchniach asfaltowych o maksymalnym uziarnieniu kruszywa 8 mm i zawartości wolnych przestrzeni 8÷12% oraz na nawierzchniach o maksymalnym uziarnieniu kruszywa 4 mm i zawartości wolnych przestrzeni 16÷22% pozwoliło wyjaśnić przyczynę różnic w ich hałaśliwości oraz wpływ poszczególnych mechanizmów generowania dźwięków na poziom hałasu w zależności od częstotliwości [41].

### 1.3. Działania na rzecz ograniczenia nadmiernego hałasu od ruchu drogowego

Zgodnie z danymi Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) około 40% mieszkańców w krajach Unii Europejskiej jest narażonych na hałas o poziomie powyżej 55 dB w ciągu doby, w tym około 20% – na poziom hałasu powyżej 65 dB w ciągu dnia i ponad 30% – na hałas o poziomie powyżej 55 dB w nocy. W krajach Unii Europejskiej około 54% mieszkańców zamieszkujących w dużych aglomeracjach znajduje się pod wpływem hałasu drogowego o poziomie  $L_{DWN} \geq 55$  dB, hałasu kolejowego – 8% i hałasu od ruchu lotniczego – 4% [164]. Dane te jednoznacznie wskazują na potrzebę działań prowadzących do obniżenia nadmiernych dźwięków w otoczeniu tras drogowych, które nie powinny przekraczać wartości dopuszczalnych [175, 190, 191, 192].

Szczególne znaczenia nabiera w takiej sytuacji lokalizacja i przebieg drogi w stosunku do obszarów zabudowanych i obszarów chronionych [233]. Korzystnym rozwiązaniem jest budowa obwodnic miast i obejść miejscowości, które oprócz obniżenia poziomu hałasu poprawiają także bezpieczeństwo oraz płynność ruchu lokalnego.

Na obszarach zabudowanych poprawę klimatu akustycznego można zapewnić poprzez zmniejszenie natężenia ruchu, eliminację z ruchu tzw. pojazdów hałaśliwych, obniżenie prędkości pojazdów, uspokojenie ruchu, poprawę płynności,



a także optymalną geometrię rozwiązań i organizację ruchu na skrzyżowaniach [24, 32, 34, 36, 37, 38, 39, 59, 65, 78, 182, 215, 229, 230]. Korzystnym rozwiązaniem z akustycznego punktu widzenia są na przykład skrzyżowania typu rondo [35]. W przypadku skrzyżowań z wyspą centralną należy zwrócić uwagę na występujące różnice pomiędzy poziomami hałasu w otoczeniu wlotów, wynikającą z różnic w obciążeniach wlotów oraz struktury kierunkowej i struktury rodzajowej pojazdów [156]. Konieczne są także analizy hałasu związane z prowadzeniem robót drogowych [71].

Zabezpieczeniami przeciwhałasowymi, przyczyniającymi się do obniżenia poziomu hałasu są: ekrany akustyczne, wały ziemne, pasy zieleni, okna i elewacje dźwiękochłonne [3, 4, 76, 105, 112, 113, 121, 245, 251]. Skuteczność akustyczna ekranów w obniżaniu poziomu dźwięku zależy od wymiarów geometrycznych i ich kształtu, lokalizacji w stosunku do trasy drogowej oraz izolacyjności akustycznej materiałów, z jakich zostały wykonane. Potwierdzono to w ramach badań równoważnego poziomu dźwięku w otoczeniu w obwodnicy Wasilkowa (droga krajowa nr 19), drogi krajowej nr 8 (odcinek Białystok – Katryńka) oraz ulicy św. Ojca Pio w Białymstoku [76].

Wały ziemne są konstrukcjami z gruntu w formie wału, wału z murem oporowym lub konstrukcjami przestrzennymi wypełnionymi gruntem. Przy dużych przekroczeniach dopuszczalnego poziomu hałasu korzystnym rozwiązaniem jest połączenie typowego ekranu i wału ziemnego. Szczególnym typem ekranów akustycznych są pasy zieleni izolacyjnej. Są one jednak skutecznym rozwiązaniem przy odpowiednio dużej ich szerokości.

W wielu sytuacjach urbanistycznych, głównie w miastach, w otoczeniu istniejących tras komunikacyjnych, budowa ekranów, wałów ziemnych czy tworzenie pasów zieleni izolacyjnej jest niemożliwe. Dlatego w celu obniżenia poziomu hałasu w mieszkaniach stosuje się okna dźwiękochłonne lub fasady szklane przy ścianach budynków. Nieznaczne obniżenie poziomu hałasu jest także możliwe dzięki zastosowaniu elementów tzw. małej architektury (żywoploty, ogrodzenia).

Szczegółowe informacje na temat zagadnień związanych z ujemnym wpływem hałasu drogowego na zdrowie ludzi, oceny działań poprawiających klimat akustyczny w otoczeniu dróg wraz z ich kosztami oraz metodyki wyboru optymalnych rozwiązań chroniących przed hałasem są zawarte w pracy [31].

Szczególnie korzystnym i efektywnym sposobem walki z nadmiernym poziomem emitowanych dźwięków od przejeżdżających pojazdów jest budowa nawierzchni o obniżonej hałasliwości, nazywanych także nawierzchniami cichymi. Zagadnienia technologiczne związane z konstruowaniem nawierzchni o obniżonej hałasliwości są bardzo szczegółowo prezentowane w raportach z projektów badawczych, artykułach i monografiach [2, 14, 23, 80, 89, 119, 153, 178, 180, 198, 197, 202, 205].

W wypadku standardowych warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych (SMA, beton asfaltowy) zastosowanie kruszywa o maksymalnym uziarnieniu 8 mm przyczynia się do obniżenia maksymalnego poziomu hałasu toczenia o 2÷3 dB w porównaniu z mieszankami o maksymalnym uziarnieniu kruszywa powyżej 10 mm. Wyższe redukcje poziomu hałasu, nawet do 6 dB na nowych nawierzchniach, można uzyskać, wykonując warstwę ścieralną z asfaltu porowatego (warstwy pojedyncze i podwójne), w postaci cienkich warstw z betonu asfaltowego typu BBTM lub warstwę z mastyksu grysowego o obniżonej hałaśliwości typu SMA LA.

Perspektywicznym rozwiązaniem w „walce” z nadmiernym hałasem od ruchu samochodowego są nawierzchnie poroelastyczne [18, 55, 85, 204].

Do niedawna nawierzchnie z betonu cementowego uznawano za rozwiązania bardzo hałaśliwe. Wynikało to z ich postrzegania jako zespołu „klawiszujących” starych płyt, ze zniszczonymi krawędziami i ubytkami w otoczeniu szczelin. Stosowane obecnie techniki teksturowania ich powierzchni umożliwiają uzyskanie poziomu emitowanych dźwięków porównywalnych z wartościami na nawierzchniach asfaltowych typu SMA 0/11 [7, 77, 83, 91, 161, 210].

Na ulicach miast, w szczególności w śródmieściach oraz w dzielnicach o charakterze zabudowy, występują nawierzchnie z kostki kamiennej. W dzielnicach mieszkaniowych o małym znaczeniu i niewielkim obciążeniu ruchem samochodowym są budowane nawierzchnie z betonowych kostek brukowych. W przypadku nawierzchni z betonowych kostek brukowych wpływ na poziom hałasu drogowego ma wymiar kostek oraz ich układ [70]. Na drogach o lokalnym znaczeniu, w szczególności w małych miejscowościach, występują także nawierzchnie brukowcowe. Poziom emitowanych dźwięków od pojedynczo przejeżdżających pojazdów na nawierzchniach kostkowych i brukowcowych jest zdecydowanie wyższy niż na nawierzchniach asfaltowych. Jednak przy małym obciążeniu ruchem samochodowym i niskich prędkościach pojazdów dopuszczalne wartości równoważnego poziomu dźwięku nie są na ogół przekraczane.

W ostatnich latach nawierzchnie obniżające hałas opon samochodowych są szczególnie akceptowane jako skuteczna metoda walki z hałasem w otoczeniu dróg. Jednak pomimo wielu wykonanych prac badawczych nadal pozostają niewyjaśnione zagadnienia w tym zakresie. Dotyczy to zarówno metod pomiaru i oceny poziomu hałasu, jak i aspektów technologicznych oraz ekonomicznych konstruowania nawierzchni o obniżonej hałaśliwości. W kolejnych rozdziałach monografii przeprowadzono rozważania w kierunku wyjaśnienia niektórych z tych problemów.

## **2. Nawierzchnie obniżające hałas toczenia pojazdów samochodowych – wybrane problemy materiałowo-technologiczne**

### **2.1. Projekty badawcze dotyczące hałaśliwości nawierzchni drogowych**

Problemy związane z nawierzchniami drogowymi obniżającymi hałas toczenia pojazdów samochodowych były przedmiotem wielu projektów badawczych, a do najważniejszych należy zaliczyć: SI.R.U.US (*Silent Road for Urban and extra-urban Use*), QCITY (*Quiet City Transport*), HARMONOISE (*Harmonised Accurate and Reliable Methods for the EU Directive on the Assessment and Management of Environmental Noise*), IMAGINE (*Improved Methods for the Assessment of the Generic Impact of Noise in the Environment*), SILVIA (*Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control*), SILENCE, RoTraNoMo (*Road Traffic Noise Modeling*), PERSUADE (*PoroElastic Road SURface for Avoiding Damage to the Environment*), ROSANNE (*Rolling resistance, Skid Resistance and Noise Emission measurement standards for road surfaces*). Poza tematem hałaśliwości nawierzchni rozważano w nich zagadnienia związane z prognozowaniem hałasu, oporem toczenia i właściwościami przeciwpoślizgowymi. Projekty były wykonywane przez konsorcja międzynarodowe, złożone z instytutów badawczych, uczelni, laboratoriów i administracji drogowej. Szczegółowe wyniki przeprowadzonych badań i analiz zawarto w raportach z realizacji poszczególnych zadań, jak i w raportach końcowych. Poniżej, w oparciu o opisy założeń i wyniki badań zaprezentowane w pracach [9, 25, 29, 45, 55, 88, 151, 180, 198, 202], przedstawiono ogólną charakterystykę wymienionych projektów w odniesieniu do hałaśliwości nawierzchni drogowych.

Jednym z głównych celów projektu SI.R.U.US było opracowanie cichych wielowarstwowych nawierzchni z wykorzystaniem innowacyjnych rozwiązań. W jego ramach podjęto próbę optymalizacji tekstury powierzchni i struktury warstwy górnej nawierzchni drogowych z uwzględnieniem ich właściwości akustycznych, trwałości konstrukcyjnej i kosztów. Wykonano prace nad wdrożeniem niestandardowych rozwiązań w górnych i dolnych warstwach, w tym betonowej warstwy z wbudowanymi rezonatorami Helmholtza pochłaniającymi dźwięk.

Za szczególnie interesujące zadanie w projekcie QCITY należy uznać próby ze stosunkowo dużą zawartością gumy w nawierzchni asfaltowych. Pomimo, że wybudowane odcinki w krótkim czasie (do dwóch lat) uległy zniszczeniu, potwierdzono duże możliwości takich rozwiązań w zakresie redukcji hałasu.

Celem projektu HARMONOISE było opracowanie spójnego modelu prognozowania hałasu od ruchu drogowego i ruchu kolejowego zgodnie z Dyrektywą 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady. W jego ramach zebrano dane na temat hałaśliwości nawierzchni w różnych krajach i przedstawiono ich porównanie. Szerokie zakresy uzyskiwanych poziomów hałasu opona/nawierzchnia i hałasu toczenia opon samochodowych były impulsem do określenia poziomu odniesienia pod kątem oceny hałaśliwości nawierzchni drogowych. Mając to na uwadze, Sandberg przedstawił koncepcję wirtualnej nawierzchni referencyjnej, opisanej pod względem akustycznym jako średnią z nawierzchni DAC11 i SMA11 [194]. Nawierzchnie stanowiące podstawę do ustalenia nawierzchni wirtualnej powinny być w dobrym stanie technicznym, użytkowane przez okres minimum jednego roku, mogą zawierać maksymalnie 10% dodatku gumy lub podobnych elastycznych materiałów w lepiszczu. Nie mogą być brane pod uwagę w tych rozważaniach cienkie warstwy asfaltowe. W wypadku braku nawierzchni typu DAC11 i SMA11 poziom hałasu nawierzchni referencyjnej może być ustalony w oparciu o wyniki uzyskane na nawierzchniach typu DAC i SMA o uziarnieniu od 0/8 do 0/16 mm. W takich sytuacjach zalecono stosowanie korekty w odniesieniu do pojazdów osobowych z uwagi na okres eksploatacji nawierzchni i maksymalne uziarnienie kruszywa. Takich korekt nie stosuje się w odniesieniu do pojazdów ciężarowych, ponieważ wpływ nawierzchni wykonanych w tych technologiach na hałas toczenia tej kategorii pojazdów jest stosunkowo mały.

Kontynuacją projektu HARMONOISE był projekt IMAGINE, opisujący dodatkowo procedury prognozowania hałasu przemysłowego i hałasu lotniczego, a także uzupełniający procedury związane z prognozowaniem hałasu drogowego. Osiągnięciem praktycznym tego projektu było opracowanie wytycznych wykorzystania modeli generowania dźwięków w tworzeniu map akustycznych.

W ramach projektu badawczego SILVIA, po dokonaniu szczegółowej analizy metod oceny hałaśliwości nawierzchni w różnych krajach, opracowano algorytmy postępowania przy certyfikacji technologii budowy górnych warstw nawierzchni oraz algorytmy oceny ich hałaśliwości po wybudowaniu i algorytmy prowadzenia monitoringu. Do przeprowadzenia certyfikacji zaproponowano wykorzystanie metody CPX i metody SPB (jako preferowany wariant) lub metody SPB z pomiarem makrotekstury (nawierzchnie o zwartej strukturze), makrotekstury i sztywności (nawierzchnie o zwartej strukturze i podwyższonej elastyczności, np. z dodatkiem gumy), makrotekstury i współczynnika absorpcji dźwięku (nawierzchnie porowate)

oraz tekstury, współczynnika absorpcji dźwięku i sztywności (nawierzchnie poroelastyczne).

Do oceny hałaśliwości nawierzchni bezpośrednio po ich wybudowaniu i w ramach prowadzenia monitoringu zaproponowano jako rozwiązanie preferowane metodę CPX. Dopuszczono w tych sytuacjach dokonywanie oceny właściwości akustycznych na podstawie parametrów charakteryzujących powierzchnię i strukturę nawierzchni (tekstura, współczynnik absorpcji dźwięku i sztywność). Wyniki badań i analiz wykonanych w ramach projektu SILVIA zamieszczono w raporcie pt.: *Guidance manual for the implementation of low-noise road surfaces*. W ramach projektu SILVIA nie przeprowadzono jednak kompleksowej walidacji opracowanej propozycji wspólnej europejskiej metody badania i kontroli hałaśliwości nawierzchni drogowych. Temat ten był ponownie podjęty w projekcie ROSANNE.

Projekt SILENCE obejmował prace mające na celu opracowanie zintegrowanego systemu działań służących skutecznej kontroli hałasu na obszarach zurbanizowanych. Opracowano i przetestowano najnowsze technologie budowy i utrzymania nawierzchni cichych z uwzględnieniem możliwości ich stosowania w miastach. W ramach projektu zebrano informacje na temat innowacyjnych rozwiązań przyczyniających się do obniżenia poziomu hałasu od ruchu drogowego, planów działania i skutecznych narzędzi do redukcji nadmiernego hałasu.

Głównym celem projektu PERSUADE było opracowanie konstrukcji nawierzchni poroelastycznej, trwałej, bezpiecznej oraz wpływającej na obniżenie poziomu emitowanych dźwięków o 10÷15 dB w porównaniu z nawierzchnią referencyjną. Projekt był w pewnym stopniu kontynuacją prac badawczych nad nawierzchnią typu PERS, prowadzonych wcześniej w ramach innych projektów, głównie w Szwecji i Japonii. W projekcie PERSUADE zaplanowano opracowanie wymagań w stosunku do podbudowy i warstwy poroelastycznej w celu lepszego ich powiązania, określenie trwałości warstwy poroelastycznej przy różnym obciążeniu i w różnych warunkach atmosferycznych, określenie zmiany właściwości przeciwpoślizgowych i akustycznych warstwy poroelastycznej w trakcie eksploatacji. Zakres projektu obejmował badania laboratoryjne i ocenę mieszanek na nawierzchnię poroelastyczną, budowę odcinków testowych i ich monitoring oraz analizy ekonomiczne badanych rozwiązań. Zaplanowano wykonanie czterech odcinków testowych o nawierzchni z mieszanek poroelastycznych na drogach w Danii, Szwecji, Belgii i w Polsce, dwóch odcinków o nawierzchni w postaci paneli poroelastycznych na drogach w Belgii i w Szwecji oraz jednego odcinka z kostek z warstwą poroelastyczną w Słowenii. Badano warstwy poroelastyczne pod kątem ich odporności ogniowej, odporności na promieniowanie słoneczne, przepuszczalności oraz prędkości odprowadzania wody, sztywności i elastyczności oraz zmiany oporu toczenia w czasie eksploatacji. W przypadku warstwy poroelastycznej

w postaci elementów prefabrykowanych prowadzono badania trwałości połączeń paneli i ich zwiększonej hałaśliwości, zachowania się połączeń pod obciążeniem od ruchu samochodowego oraz w czasie prowadzenia prac związanych z zimowym utrzymaniem.

Celem projektu ROSANNE była harmonizacja metod pomiarowych w zakresie właściwości przeciwpoślizgowych, emisji hałasu i oporu toczenia nawierzchni drogowych. Był on w pewnym stopniu kontynuacją prac wykonanych w takich projektach, jak: TYROSAFE, HERMES, SILVIA, SILENCE i MIRIAM, i obejmował cztery główne zadania:

- a) harmonizację metod i urządzeń stosowanych w ocenie właściwości przeciwpoślizgowych,
- b) dostosowanie stosowanych metod do pomiaru hałaśliwości nawierzchni, ustalenie zależności pomiędzy metodami SPB i CPX oraz powiązanie metod pod kątem wykorzystania wyników w modelu CNOSSOS-EU,
- c) normalizację metod i urządzeń do pomiaru współczynnika oporu toczenia,
- d) rozwój metod opisu i oceny powierzchni nawierzchni drogowych w celu lepszego odzwierciedlenia zjawisk zachodzących na styku opon z nawierzchnią pod kątem wpływu tekstury na emisję hałasu, współczynnik tarcia i opór toczenia.

W części dotyczącej harmonizacji metod pomiaru hałasu toczenia opon samochodowych ustalono zależności regresyjne pomiędzy wynikami pomiarów metodą CPX i SPB oraz określono możliwości wykorzystania danych z pomiarów metodą CPX w metodzie prognozowania hałasu metodą CNOSSOS-EU.

Problem hałaśliwości nawierzchni był przedmiotem także wielu innych projektów, realizowanych przez zespoły badawcze z dwóch/trzech krajów lub tylko przez zespoły utworzone w ramach poszczególnych krajów [198]. Przykładami są: zrealizowany w ramach współpracy francusko-niemieckiej projekt DEUFREKO, projekt PREDIT we Francji, QUIET TRAFFIC w Niemczech czy WnT i IPG w Holandii.

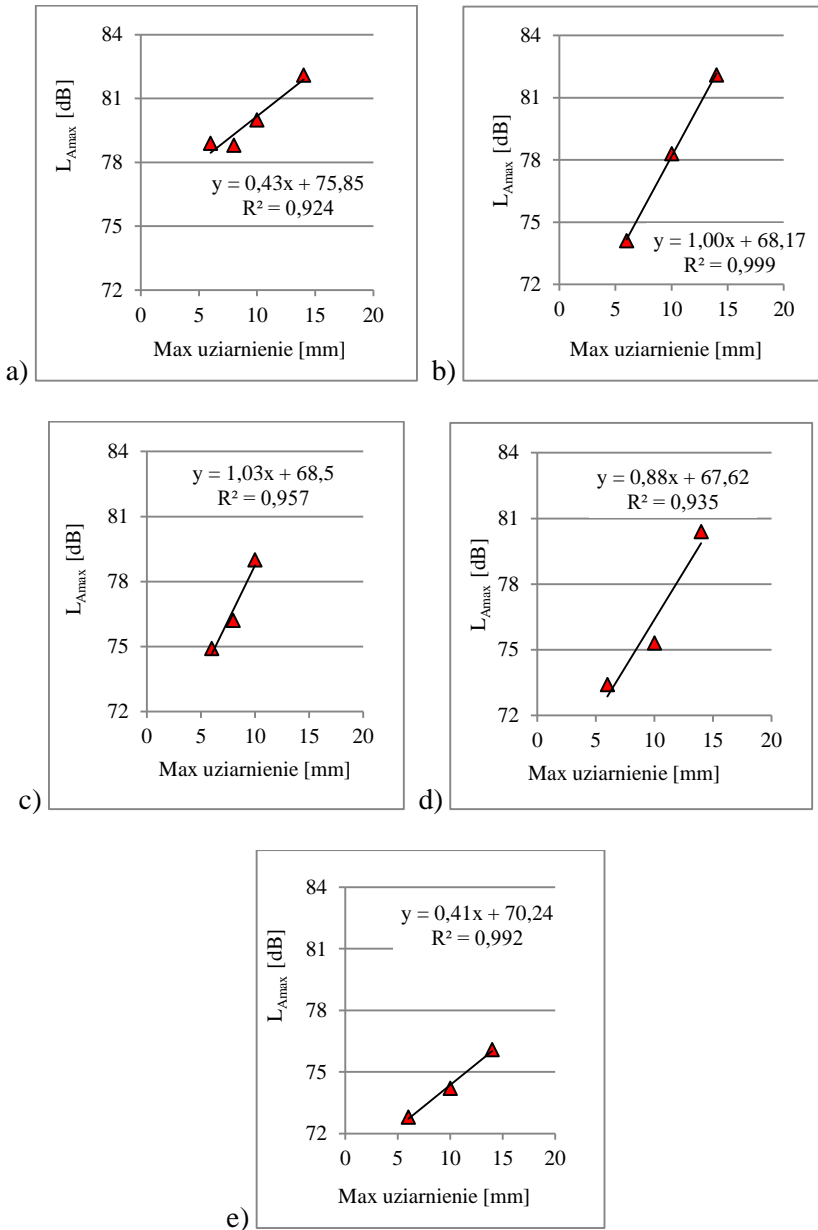
W Polsce badania hałaśliwości nawierzchni drogowych są prowadzone od wielu lat, w szczególności przez zespoły z Politechniki Gdańskiej i Politechniki Białostockiej, w ramach projektów międzynarodowych i projektów krajowych. Wyniki wspólnych badań były prezentowane między innymi w pracach [54, 74, 148, 149]. Został zrealizowany także projekt CiDro przez konsorcjum Politechnika Warszawska – Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie – Mostostal Warszawa S.A. [116, 176] oraz projekt badawczy „Ochrona przed hałasem”, w ramach konkursu RID, przez konsorcjum: Politechnika Krakowska – Politechnika Warszawska – Politechnika Wrocławska – Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie – Politechnika Lubelska [220, 221, 232]. Konsorcjum: Politechnika Gdań-

ska – Politechnika Białostocka – Firma Budowlano-Drogowa MTM S.A z Gdyni rozpoczęło badania w ramach projektu SEPOR (*Safe, Eco-friendly POroelastic Road surface* – Bezpieczna, proekologiczna poroelastyczna nawierzchnia drogową), w ramach I Konkursu Strategicznego „Nowoczesne technologie materiałowe” – TECHMATSTRATEG, którego głównym celem jest opracowanie technologii budowy nawierzchni poroelastycznej, trwałej, bezpiecznej i przyczyniającej się do redukcji poziomu hałasu o ponad 10 dB.

Niezależnie od projektów badawczych realizowanych przez uczelnie, instytuty badawcze i konsorcja naukowo-badawcze, oddziały Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad, zarządy dróg wojewódzkich, jednostki zarządzające drogami w miastach podejmowały i podejmują działania na rzecz stosowania nawierzchni o obniżonej hałaśliwości. Należy w szczególności podkreślić próby podejmowane przez Oddział GDKKIA w Poznaniu, Urząd Miasta w Poznaniu, a w ostatnich latach Zarząd Dróg Wojewódzkich w Krakowie, Zarząd Dróg Wojewódzkich w Katowicach, EKKOM Sp. z o.o. i TPA Instytut Badań Technicznych Sp. z o.o. w Pruszkowie.

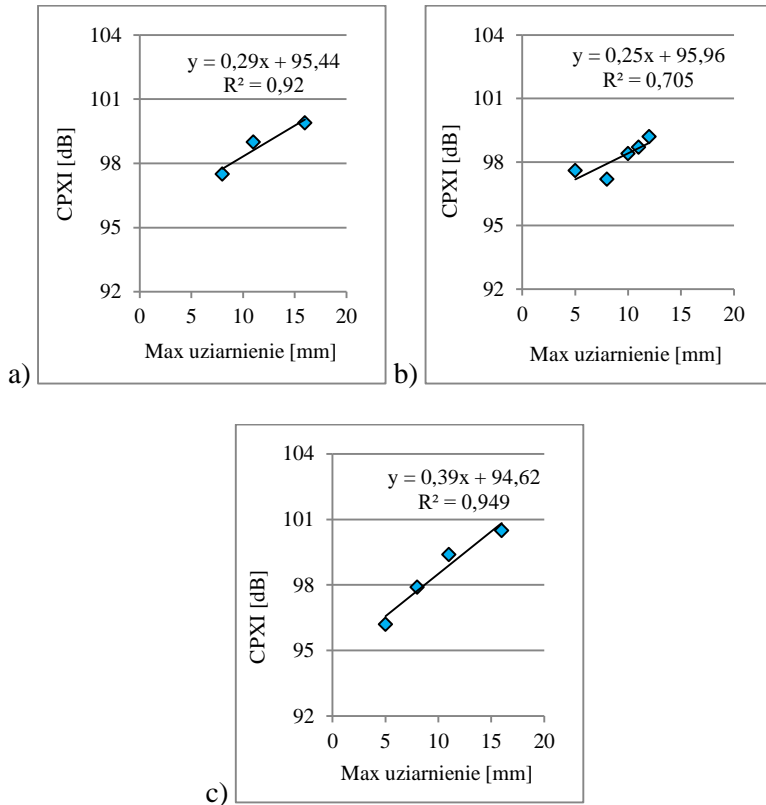
## **2.2. Wpływ uziarnienia kruszywa na hałaśliwość nawierzchni asfaltowych**

Maksymalne uziarnienie kruszywa wbudowanego w warstwie ścieralnej w istotny sposób wpływa na poziom hałasu toczenia pojazdów samochodowych. Dotyczy to zarówno warstw o zwartej strukturze, strukturze częściowo otwartej, jak i nawierzchni porowatych. Na rysunku 2.1 przedstawiono przykładowe wyniki badań autora monografii oraz wyniki prezentowane w pracy [5], według metody SPB, a na rysunku 2.2 – według metody CPX [145, 146]. Każdy z pokazanych punktów na poniższych rysunkach jest średnią z wartości maksymalnego poziomu dźwięku ustalonych na kilku nawierzchniach o takiej samej charakterystyce.



Rys. 2.1. Poziom dźwięku według metody SPB (w funkcji maksymalnego uziarnienia kruszywa):  
 a) PU, b) BBUM, c) BBTM 1, d) BBTM 2, e) PAC





Rys. 2.2. Poziom dźwięku według metody CPX (w funkcji maksymalnego uziarnienia kruszywa):  
 a) DAC – nawierzchnie w innych krajach Europy, b) SMA – nawierzchnie w Polsce,  
 c) SMA – nawierzchnie w innych krajach Europy

Podane zależności wskazują, że zwiększenie maksymalnego uziarnienia kruszywa o 1 mm powoduje wzrost poziomu hałasu od 0,25 dB do 1,03 dB. Jest to uzależnione dodatkowo od technologii wykonania warstwy ścieralnej, długości okresu eksploatacji i stanu technicznego nawierzchni.

### 2.3. Nawierzchnie z asfaltu porowatego

Szczególne miejsce w grupie nawierzchni obniżających hałas toczenia opon samochodowych mają nawierzchnie porowate. Już w latach osiemdziesiątych XX wieku w Holandii, Belgii i we Francji rozpoczęto ich stosowanie na szerszą skalę,

a w Holandii w 1990 roku podjęto decyzję o wykonywaniu górnych warstw nawierzchni z mieszanek porowatych na wszystkich drogach głównych [2, 23, 202].

Pierwsze podwójne warstwy z asfaltu porowatego wbudowano na drogach w Holandii w 1990 roku. W dolnej warstwie o grubości 35÷65 mm zastosowano kruszywo o uziarnieniu 11÷20 mm, a w warstwie górnej o grubości 20÷30 mm – kruszywo o uziarnieniu 4÷8 mm. Zawartość wolnych przestrzeni wahała się w przedziale 20÷25%, a ilość lepiszcza 5,7÷6%. Na drogach we Włoszech podwójne warstwy z asfaltu porowatego zostały po raz pierwszy wykonane w 1996, we Francji w 1997, a w Niemczech w 1998 roku.

Aspekty technologiczne konstruowania nawierzchni porowatych w różnych krajach oraz zagadnienia związane z ich skutecznością akustyczną są szczegółowo prezentowane w raportach z projektów badawczych, artykułach, referatach i monografiach [23, 115, 119, 153, 183, 198, 202, 217]. W związku z tym poniżej zwrócono uwagę jedynie na niektóre najbardziej istotne problemy w tym zakresie oraz wskazano działania podejmowane w celu zachowania dobrych właściwości akustycznych górnych warstw nawierzchni w okresie użytkowania drogi.

Według [132], w oparciu o rozważania teoretyczne oraz badania terenowe, zawartość wolnych przestrzeni 10%, 20% i 30% w jednowarstwowej nawierzchni porowatej przyczynia się do obniżenia poziomu hałasu odpowiednio o 2 dB, 3 dB i 4 dB. Wraz ze zwiększeniem zawartości wolnych przestrzeni wzrasta także współczynnik absorpcji dźwięków. Analizowano przy tym wpływ grubości i zawartości wolnych przestrzeni w dolnej i górnej warstwie w dwuwarstwowej nawierzchni porowatej na poziom hałasu. Przyjęto łączną grubość dwóch warstw 6 cm i optymalne rozwiązanie uzyskano przy następujących charakterystykach:

- górna warstwa: grubość – 2 cm, maksymalne uziarnienie kruszywa – 9,5 mm, zawartość wolnych przestrzeni – 10%;
- dolna warstwa: grubość – 4 cm, maksymalne uziarnienie kruszywa – 16 mm, zawartość wolnych przestrzeni – 20%.

W oparciu o opracowane teoretyczne modele nawierzchni porowatej autorzy ustalili, że dwuwarstwowa nawierzchnia porowata charakteryzuje się nieco gorszymi parametrami akustycznymi niż jednowarstwowa nawierzchnia o podobnej charakterystyce (różnica około 1 dB). W ramach projektu przeprowadzono także pomiary terenowe poziomu hałasu na czterech rodzajach nawierzchni: dwie warstwy z asfaltu porowatego, jedna warstwa z asfaltu porowatego, warstwa o zwartej strukturze i drobnym uziarnieniu oraz warstwa z dodatkiem granulatu gumowego. Najbardziej korzystne właściwości akustyczne ustalono na jednowarstwowej nawierzchni porowatej. Uzyskano redukcję poziomu hałasu o 3,3 dB (przy prędkości pojazdu osobowego 50 km/h) i o 3,6 dB (przy prędkości 80 km/h).

Zgodnie z [154] podwójne warstwy z asfaltu porowatego charakteryzują się większą skutecznością akustyczną oraz dłuższym okresem efektywnej redukcji hałasu w stosunku do pojedynczych warstw z asfaltu porowatego. Ich trwałość konstrukcyjna wynosi około 7÷8 lat i jest nieco gorsza niż cienkich warstw asfaltowych i pojedynczych warstw z asfaltu porowatego.

Skuteczność akustyczna nawierzchni porowatych jest ściśle związana z absorpcją dźwięków generowanych w rejonie płaszczyzny kontaktu opon z nawierzchnią a także dźwięków pochodzących od poruszających się pojazdów. Wolne przestrzenie, grubość i układ warstw porowatych ograniczają drgania powietrza w rowkach bieżnika, minimalizując tym samym wpływ zjawisk aerodynamicznych na poziom emitowanych dźwięków. Parametrem charakteryzującym zdolność nawierzchni do pochłaniania dźwięków jest współczynnik absorpcji. Jego wartość może być ustalona między innymi według dwóch metod w warunkach in situ (ISO 13472-1, ISO 13472-2) i metody w warunkach laboratoryjnych (PN-EN ISO 10534-1 – tzw. metoda rury Kundta).

Szczegółową analizę metod pomiaru współczynnika absorpcji wraz z modelowaniem jego wartości w odniesieniu do nawierzchni porowatych przedstawił Praticò z zespołem w pracach [177, 179, 181]. W badaniach tych zwrócono uwagę na potrzebę bardziej szczegółowego charakteryzowania warstw nawierzchni o strukturze porowatej przy ustalaniu współczynnika absorpcji dźwięków. Wskazano na wpływ takich charakterystyk, jak: grubość warstwy, opór przepływu powietrza z uwzględnieniem lepkości oraz krętości, wymiarów i sposobu połączenia porów. Analizowano również problem absorpcji dźwięku w odniesieniu do mieszanek mineralno-gumowo-asfaltowych [110, 135] i warstw poroelastycznych [242]. Badano wpływ na jego wartość maksymalnego uziarnienia kruszywa, zawartości granulatu gumowego i grubości nawierzchni.

Badania absorpcji dźwięków przez nawierzchnie drogowe w Polsce dotychczas praktycznie nie były prowadzone. Olszacki wykonał pomiary współczynnika absorpcji dźwięków w warunkach laboratoryjnych przy wykorzystaniu rury Kundta. Ustalił, że wpływ na jego wartość ma grubość próbki i zawartość wolnych przestrzeni, a najwyższe wartości współczynnika absorpcji dla jednowarstwowych próbek z asfaltu porowatego dotyczą zakresu częstotliwości od 800 do 1800 Hz [167].

Obecnie opinie na temat skuteczności akustycznej nawierzchni asfaltowych ze zwiększoną zawartością wolnych przestrzeni, w szczególności w dłuższym okresie eksploatacji, są podzielone. Od kilku lat, między innymi we Francji i Belgii, mniej jest budowanych nawierzchni porowatych [20]. Wynika to głównie ze zmniejszonej ich trwałości konstrukcyjnej, wyższych kosztów budowy oraz trudności w zimowym utrzymaniu.

Jedną z istotnych przyczyn obniżonej trwałości konstrukcyjnej nawierzchni porowatych jest szybsze starzenie się asfaltu. W celu przeciwdziałania temu zjawisku są badane różne rozwiązania poprawiające sytuację w tym zakresie. Jednym z nich jest utworzenie cienkiej powłoki na powierzchni asfaltu otaczającego ziarna kruszywa [136]. Po takim zabiegu zauważono „zamykanie” porów i wzrost poziomu dźwięku w zakresie częstotliwości powyżej 1250 Hz. Jednak po pewnym okresie użytkowania nawierzchni poziom hałasu w zakresie tych częstotliwości ulegał zmniejszeniu, co świadczy o „otwieraniu się” wcześniej zamkniętych porów. Poprawnie wykonany taki zabieg może być korzystnym rozwiązaniem służącym przedłużeniu trwałości konstrukcyjnej nawierzchni, a tym samym utrzymaniu skuteczności akustycznej w dłuższym okresie czasu.

Innym sposobem na zachowanie dobrych właściwości akustycznych nawierzchni w czasie jej eksploatacji jest wprowadzenie do warstwy mineralno-asfaltowej polimeru o właściwościach hydrofobowych. Badania laboratoryjne przeprowadzono na płytach testowych z jedną warstwą porowatą PAC8, jedną warstwą porowatą PAC11 i dwóch warstwach porowatych [136]. Każdą z nawierzchni wykonano w dwóch wariantach: ze standardowym lepiszczem i z asfaltem modyfikowanym polimerem. Następnie płyty testowe zanieczyszczono 960 g/m<sup>2</sup> sztucznego pyłu, którego skład odpowiadał pyłowi znajdującemu się na drogach (drobny piasek, cząsteczki gumy i cząsteczki organiczne). Przed zanieczyszczeniem i po zanieczyszczeniu dokonano pomiarów współczynnika absorpcji dźwięku. Stwierdzono, że na nawierzchniach z zastosowaniem polimeru spadek współczynnika absorpcji był znacznie mniejszy niż na nawierzchniach z asfaltem bez polimeru. Mniejszy wpływ zanieczyszczenia na poziom hałasu zaobserwowano także na nawierzchni PAC11 w porównaniu z nawierzchnią PAC8. Świadczy to o szybszej utracie dobrych właściwości akustycznych przez nawierzchnię o bardziej drobnym uziarnieniu kruszywa.

W celu przeciwdziałania zatykaniu się porów w górnej warstwie mineralno-asfaltowej analizowano dwa rozwiązania oparte na osiągnięciach z dziedziny nanotechnologii [134]. Pierwsze rozwiązanie polegało na utworzeniu w strukturze warstwy porowatej hydrofobowej otoczki porów, a drugie – na utworzeniu otoczki o charakterystyce hydrofilowej. Pierwszy pomysł jest oparty na tzw. efekcie kwiatu lotosu – poprzez zwiększenie kąta zwilżania między wodą a powłoką asfaltową ułatwia się przepływ wody, która „porywa” ze sobą cząstki brudu i tym samym oczyszcza powierzchnie asfaltowe. Drugie rozwiązanie polega na modyfikacji asfaltu polimerami o właściwościach hydrofilowych i wykorzystaniu tzw. efektu Marangoniego. Polimery migrują na powierzchnię warstewki asfaltu i zmniejszają kąt zwilżania pomiędzy cząsteczkami wody a jej powierzchnią. Dzięki temu woda przedostaje się pomiędzy powłokę asfaltową i zanieczyszczenia, nie pozwalając

na przyklejanie się pyłów do powierzchni asfaltowych. Skutkuje to tym, że wraz z przemieszczającą się wodą następuje usuwanie zanieczyszczeń ze struktur porowatych górnych warstw nawierzchni.

Powyższe przykłady wskazują, że poza standardowym czyszczeniem nawierzchni porowatych prowadzone są badania nad innymi rozwiązaniami przyczyniającymi się do zachowania dobrych właściwości akustycznych w możliwie najdłuższym czasie.

### 2.4. Cienkie warstwy asfaltowe

Cienkie warstwy asfaltowe o grubości od 10 mm do 30 mm są uznawane za równorzędne technologie w walce z nadmiernym hałasem z pojedynczymi warstwami z asfaltu porowatego. Niektóre z nich są nazywane nawet nawierzchniami „nowej generacji”. W odróżnieniu od warstw z asfaltu porowatego mogą być stosowane na drogach o lokalnym znaczeniu i na ulicach. Ich głównymi zaletami w porównaniu ze standardowymi warstwami z betonu asfaltowego i SMA są: większa redukcja hałasu, wyższe współczynniki tarcia (przy niskich i średnich prędkościach), niższy koszt oraz krótszy czas wykonania. Do głównych wad zalicza się większą podatność na ubytek ziaren i rozwarstwienia, mniejszą odporność na niskie temperatury, krótszy okres eksploatacji, większy spadek efektywności akustycznej w czasie eksploatacji, większe uzależnienie współczynnika tarcia od charakterystyki zastosowanych materiałów [19].

Poza maksymalnym uziarnieniem kruszywa, w wypadku cienkich warstw asfaltowych, ważną rolę w redukcji hałasu odgrywa zawartość wolnych przestrzeni. Potwierdzeniem tego są wyniki badań uzyskane na cienkich warstwach asfaltowych typu SMA, testowanych w ramach projektu SILENCE na odcinkach doświadczalnych na drogach w Holandii. Przy takim samym maksymalnym uziarnieniu kruszywa, lecz zdecydowanie różnej zawartości wolnych przestrzeni (od 3,4% do 15,3%), różnice w poziomach hałasu osiągały wartość do 3 dB.

W Niemczech opracowano mieszankę mastyksowo-grysową o zwiększonej zawartości wolnych przestrzeni typu SMA LA [80]. Zaproponowano dwa typy tej mieszanki: SMA5 LA (grubość warstwy 2,0÷3,0 cm) i SMA8 LA (grubość warstwy 2,5÷4,0 cm). Zawartość wolnych przestrzeni ustalono w przedziale 9÷14%. Po wykonaniu warstwy ścieralnej z tego typu mieszanek nie stosuje się posypki grysowej, aby nie pogorszyć ich właściwości akustycznych. W celu zabezpieczenia przed dostępem wody do warstwy niżej leżącej należy ją spryskać emulsją. Mieszanka SMA LA może być stosowana do budowy nawierzchni o kategorii ruchu KR1÷KR7 i jest zalecana do wbudowywania na drogach w obszarze zabudowa-

nym. Redukcja hałasu warstw typu SMA LA w stosunku do rozwiązań tradycyjnych wynosi od 2,5 dB do 4,0 dB według metody CPX.

Szczegółową analizę hałaśliwości nawierzchni o częściowo otwartej strukturze przeprowadzono na ponad 120 mieszankach mineralno-asfaltowych, wybranych spośród ponad 400 zastosowanych rozwiązań na nawierzchniach na drogach w Szwajcarii [40]. Badano poziom hałasu opona/nawierzchnia metodą CPX na nawierzchniach o maksymalnym uziarnieniu kruszywa 4 mm (w odniesieniu do nawierzchni ulic) i zawartości wolnych przestrzeni 12÷22% oraz 8 mm (na drogach zamiejskich) i zawartości wolnych przestrzeni od 9 do 13%. Ustalono różnice pomiędzy hałasem na nawierzchniach o strukturze częściowo otwartej i na nawierzchni typu SMA11 i DAC11 o wartości około 3 dB przy maksymalnym uziarnieniu kruszywa 4 mm i około 4 dB – przy uziarnieniu 8 mm. Stwierdzono, że w wypadku nawierzchni porowatych (zawartość wolnych przestrzeni powyżej 18%) wzrost zawartości wolnych przestrzeni o 1% przyczynia się do obniżenia poziomu hałasu o 0,4 dB. Nie zostało to potwierdzone w odniesieniu do warstw o częściowo otwartej strukturze (8÷18% wolnych przestrzeni).

Autorzy w oparciu o wyniki szczegółowych analiz statystycznych stwierdzili, że istotny wpływ na skuteczność akustyczną w okresie eksploatacji warstw o częściowo otwartej strukturze ma zawartość wypełniacza i frakcji piaskowej oraz wzajemny ich stosunek w zależności od maksymalnego uziarnienia kruszyw. Wykazali również, że w tego typu warstwach kryterium zawartości wolnych przestrzeni jest niewystarczające przy ich projektowaniu z uwagi na właściwości akustyczne. Ich zdaniem oceny akustycznej najlepiej jest dokonywać w okresie od 1 do 6 miesięcy po wybudowaniu drogi, a następnie po trzech latach eksploatacji nawierzchni.

Zastosowanie granulatu gumowego w mieszankach mineralno-asfaltowych jest korzystne z uwagi na zmniejszenie poziomu hałasu toczenia pojazdów oraz zwiększenie odporności na spękania. Granulat może być dodawany w technologii „na mokro” (jako modyfikacja asfaltu) lub „na sucho”, zastępując częściowo kruszywo mineralne. Paje z zespołem [168] wykazali, że dodatek gumy do asfaltu spowodował tylko nieznaczną poprawę sytuacji w zakresie emitowanych dźwięków (redukcja około 0,5 dB). Korzystniejszym rozwiązaniem okazało się zastąpienie pewnej części kruszywa granulatem asfaltowym (redukcja około 2 dB). W badaniach Vazquez i Paje [240] w warunkach in situ i w laboratorium ustalono, że mieszanka mineralno-asfaltowa z asfaltem modyfikowanym gumą ma niewielki wpływ na redukcję poziomu hałasu. Większą jego redukcję można osiągnąć dzięki poprawie tekstury nawierzchni. Jednak bardziej szczegółowe badania wykazały, że zastosowanie dodatku gumy w mieszance mineralno-asfaltowej w powiązaniu z optymalną zawartością wolnych przestrzeni może poprawić w istotny sposób jej właściwości akustyczne [169].

Wyniki badań hałasliwości nawierzchni z granulatem gumowym są prowadzone także we Włoszech. Na wykonanych odcinkach testowych na drogach zamiejских i na ulicach wykazano korzystny wpływ dodatku gumy na redukcję poziomu hałasu według metody CPX i SPB [127]. Zwrócono przy tym uwagę na duże zróżnicowanie w poziomach hałasu, a jako prawdopodobną przyczynę wskazano niedoskonałości w wykonaniu niektórych nawierzchni.

W badaniach Świczko-Żurek z zespołem [225] zanotowano, że modyfikacja asfaltu gumą w mieszance SMA ma nieznaczny wpływ na redukcję poziomu hałasu (od 0,2 do 1,2 dB) w porównaniu z warstwą z SMA bez dodatku gumy. Nie stwierdzono w tych badaniach różnicy pomiędzy oporami toczenia na tych nawierzchniach.

W Polsce pierwsze odcinki doświadczalne o nawierzchni redukującej poziom hałasu toczenia pojazdów samochodowych wybudowano w latach 1985-1986 [30]. W latach 1999-2004 powstały odcinki dróg o nawierzchni z mieszanki mineralno-asfaltowej typu Colsoft, a po 2005 roku na kilku odcinkach wbudowano mieszankę typu Rugosoft i mieszankę mineralno-gumowo-asfaltową typu GUF1. Jedną z przykładowych lokalizacji zastosowania mieszanki mineralno-gumowo-asfaltową typu GUF1, z dodatkiem włókien polimerowych lub poliamidowych, jest odcinek drogi krajowej nr 11, Podgałę-Szczecinek.

W latach 2007-2009 wykonano odcinki dróg o nawierzchni typu Nanosoft, a w 2009 roku rozpoczęto wdrażanie mastyksu grysowego o obniżonej hałasliwości typu SMA LA. W 2010 roku na drodze wojewódzkiej DW780 wykonano odcinek testowy o nawierzchni z asfaltu porowatego PAC8 i odcinek o nawierzchni z cienką warstwą z betonu asfaltowego typu BBTM8. W tym samym roku na drodze krajowej DK50 wybudowano odcinek z asfaltu porowatego PAC11. W 2014 roku na drodze wojewódzkiej DW967 powstał pierwszy w Polsce odcinek o dwóch warstwach z asfaltu porowatego (DPAC8+16).

Obecnie na wielu drogach zamiejских i w miastach, na drogach różnych klas technicznych i różnym znaczeniu są stosowane nawierzchnie redukujące hałas toczenia pojazdów samochodowych. Na szczególne podkreślenie zasługuje program budowy warstw ściernalnych o obniżonej hałasliwości realizowany w województwie małopolskim przez Zarząd Dróg Wojewódzkich w Krakowie. Wyniki badań wskazują na znaczącą redukcję równoważnego poziomu dźwięku w otoczeniu dróg wojewódzkich o takiej nawierzchni [33, 86].

## 2.5. Nawierzchnie poroelastyczne

Perspektywicznym rozwiązaniem w zakresie redukcji poziomu hałasu są nawierzchnie poroelastyczne, których istotnym składnikiem jest granulata gumowa [198, 203]. Stanowi on przynajmniej 20% udział w mieszance mineralno-gumowo-asfaltowej. Nawierzchnie poroelastyczne, poza znaczącym dodatkiem granulatu gumowego, mogą zawierać od 20% do 40% wolnych przestrzeni. Po raz pierwszy zostały one wybudowane w latach siedemdziesiątych XX wieku w Szwecji i uzyskano redukcję poziomu hałasu o około 5 dB w porównaniu z nawierzchnią referencyjną. Na odcinkach testowych wykonanych w latach osiemdziesiątych XX wieku redukcja hałasu osiągała wartość około 10 dB. Kolejne badania na takich warstwach ścieralnych prowadzono w latach 2000-2007. Prace badawcze nad zastosowaniem nawierzchni poroelastycznych były realizowane także w Norwegii (od 1989 r.) i w Japonii (od 1994 r.). W ramach projektów SILENCE i NR2C w latach 2006-2007 badano nawierzchnię typu PERS.

W 2009 roku rozpoczęto realizację projektu PERSUADE (*Poro-Elastic Road Surfaces for the Advanced Defence of the Environment*), a na podstawie uzyskanych wyników, zaprezentowanych między innymi w pracach [18, 25, 55, 57, 85, 203, 204, 247, 238], sformułowano następujące wnioski:

- ustalone różnice w redukcji poziomu hałasu, od 6 dB do 12 dB, w porównaniu do nawierzchni referencyjnej, wynikały z różnych nawierzchni referencyjnych w poszczególnych krajach oraz stosowanej metody pomiarów i czasu ich wykonania,
- większe redukcje poziomu hałasu o około 1 dB uzyskano przy prędkości 80 km/h w porównaniu z prędkością 50 km/h,
- redukcja poziomu hałasu od pojazdów ciężarowych była mniejsza od 2 dB do 4 dB w porównaniu z pojazdem osobowym,
- podstawowymi czynnikami decydującymi o redukcji poziomu hałasu są: zdecydowanie mniejsza sztywność warstwy poroelastycznej w porównaniu z tradycyjnymi rozwiązaniami oraz większa zawartość wolnych przestrzeni,
- współczynniki tarcia na nawierzchniach poroelastycznych były porównywalne, a opory toczenia nieco wyższe w odniesieniu do wartości na nawierzchniach tradycyjnych,
- trwałość konstrukcyjna badanych warstw poroelastycznych była zdecydowanie mniejsza niż przyjęto w założeniach,
- nie ma zagrożenia w otwartej przestrzeni związanego z zatruciem wskutek pożaru na nawierzchni poroelastycznej,



- potrzebne są prace nad ustaleniem parametrów opisujących w sposób najbardziej prawidłowy charakterystyki wytrzymałościowe warstw poroelastycznych oraz dostosowanie odpowiednich metod badawczych do ich oceny.

## **2.6. Technika teksturowania a hałaśliwość nawierzchni betonowych**

Nawierzchnie z betonu cementowego są stosowane głównie na drogach o dużym obciążeniu ruchem wielocłonowych pojazdów ciężarowych. Coraz częściej są także budowane drogi o znaczeniu lokalnym z nawierzchnią betonową. Szczegóły dotyczące technologii wykonywania tego typu nawierzchni oraz teksturowania ich powierzchni w Polsce i w innych krajach są przedmiotem wielu publikacji i opracowań [49, 50, 81, 122, 157, 158, 159, 160, 161, 165, 196, 201, 202, 219].

Poziom hałasu toczenia pojazdów samochodowych na nawierzchniach betonowych, przy założeniu dobrego ich stanu technicznego, zależy głównie od techniki teksturowania ich powierzchni. Korzystną techniką teksturowania, z punktu widzenia właściwości akustycznych, jest metoda odkrytego kruszywa. Polega ona na opóźnieniu hydratacji cementu, a następnie usunięciu niezwiązanej zaprawy cementowej szczotką mechaniczną lub wodą pod ciśnieniem. Nawierzchnie betonowe z wykorzystaniem tej techniki są najczęściej wykonywane w dwóch warstwach. Warstwa górna ma grubość od 38 mm do 70 mm, przy maksymalnym uziarnieniu kruszywa od 8 mm do 16 mm, a nawet do 32 mm [42]. W badaniach metodą CPX na tego typu nawierzchniach w Szwecji zanotowano niższe poziomy hałasu w porównaniu z hałaśliwością nawierzchni referencyjnej od 4,0 dB do 7,0 dB w zakresie częstotliwości wyższych od 800 Hz [196]. Podobne wnioski sformułowano w badaniach metodą SPB w Australii [173] oraz w ramach projektu NITE (*Noise Intensity Testing in Europe*), według metody CPX i metody OBSI [48]. Zgodnie z raportem sporządzonym przez European Working Group 8 [152] nawierzchnie z odkrytym kruszywem o maksymalnym jego uziarnieniu od 6 mm do 10 mm generują niższy poziom hałasu w porównaniu do nawierzchni referencyjnej średnio o 1,7 dB w odniesieniu do pojazdu osobowego i o 1,3 dB – w wypadku samochodu ciężarowego. Hall i in. [90] ustalili, że różnica pomiędzy poziomami hałasu na nawierzchniach o uziarnieniu kruszywa 0/7 mm i 0/20 mm wynosi około 2,0 dB.

W ramach projektu FHWA, Uniwersytetu w Iowa oraz ACPA [62] nie potwierdzono jednak tak dobrych właściwości akustycznych nawierzchni z odkrytym kruszywem. Okazały się one głośniejszym rozwiązaniem od nawierzchni przecie-

ranych szczotką i tkaniną jutową oraz nawierzchni teksturowanych przy użyciu tarcz diamentowych i nawierzchni z podłużnym rowkowaniem.

Nawierzchnie betonowe poprzecznie rowkowane charakteryzują się podwyższoną hałaśliwością w stosunku do innych technik teksturowania. Istotny wpływ na poziom hałasu ma położenie rowków w stosunku do osi drogi, ich rozstaw, głębokość i szerokość [28, 42, 93, 123, 161].

Teksturowanie powierzchni tarczami diamentowymi metodą CDG (*Conventional Diamond Grinding i Diamond Grinding*) pozwala uzyskać korzystną teksturę zarówno odnawianych, jak i nowych nawierzchni. W tym celu używa się tarcz diamentowych ustawionych jedna przy drugiej (od 164 do 197 tarcz na szerokości 1 m), które wykonują rowkowania o głębokości od 3 do 20 mm. Według [160] głębokość szlifowania tarczami diamentowymi nie powinna przekroczyć 19 mm względem powierzchni wyjściowej. Uzyskuje się w ten sposób teksturę zapewniającą lepszy kontakt w płaszczyźnie opona/nawierzchnia, obniżającą poziom hałasu oraz przyczyniającą się do łatwiejszego odprowadzenia wody z powierzchni jezdni [187].

Za najbardziej efektywne rozwiązanie w obniżaniu hałaśliwości nawierzchni betonowych uważa się metodę NGCS (*Next Generation Concrete Surface*) [208]. Polega ona na szlifowaniu powierzchni w pierwszej fazie (nadanie mikrotekstury), a następnie wykonanie rowków w odstępach od 12,7 do 15,9 mm, o głębokości od 3,2 do 4,8 mm [87]. W taki sposób uzyskuje się tzw. teksturę negatywną, korzystną z punktu widzenia generowania dźwięków opona/nawierzchnia. Odpowiednikiem tej techniki teksturowania jest stosowana w Niemczech metoda *Grinding & Grooving* [210].

Technika teksturowania NGCS (*Next Generation Concrete Surface*) umożliwia redukcję hałasu o około 3 dB w porównaniu z nawierzchnią z odkrytym kruszywem [83] i nawierzchnią teksturowaną techniką CDG [7]. Dotyczy to także właściwości akustycznych nawierzchni typu NGCS na odcinkach, na których są używane opony kolcowane w warunkach zimowych, lecz tylko w początkowym okresie ich użytkowania [8]. Poziomy hałasu były niższe po oddaniu drogi do eksploatacji o ponad 4 dB w porównaniu do innych nawierzchni. Jednak po 4 miesiącach eksploatacji na nawierzchni NGCS poziom hałasu wzrósł o około 2,6 dB, a po 29 miesiącach stwierdzono poziom hałasu o wartości zbliżonej do hałaśliwości innych nawierzchni. Przyczyną tak dużej zmiany właściwości akustycznych w czasie eksploatacji było wykruszanie się ziaren, spowodowane używaniem opon kolcowanych.

Dobre właściwości akustyczne nawierzchni teksturowanej metodą *Grinding & Grooving* potwierdzono w badaniach niemieckich przeprowadzonych metodą SPB [210]. Na odcinkach doświadczalnych, przy prędkości 120 km/h, uzyskano

poziomy hałasu niższe o 2,4÷3,0 dB od wartości ustalonych na nawierzchni referencyjnej.

Izevbekhai i Khazanovich [103] ustalili, że nawierzchnia NGCS, jako rozwiązanie regenerujące teksturę, wpływa na obniżenie poziomu hałasu o 3 dB przy prędkości 96 km/h w porównaniu z nawierzchnią betonową rowkowaną poprzecznie. W ciągu 3 lat eksploatacji nie stwierdzili utraty dobrych właściwości akustycznych. Nawierzchnia NGCS była cichsza o 2,0÷2,5 dB w porównaniu z nawierzchnią CDG.

Poza pracami nad optymalizacją technik teksturowania powierzchni są także prowadzone badania nad wpływem innych charakterystyk nawierzchni betonowych na poziom hałasu. Na przykład w Chinach przeprowadzono badania hałaśliwości nawierzchni z porowatego betonu cementowego w warunkach laboratoryjnych i na rzeczywistych nawierzchniach [226]. Jako parametr charakteryzujący właściwości akustyczne w warunkach laboratoryjnych przyjęto współczynnik absorpcji dźwięków. Badano zdolność do pochłaniania dźwięków próbek wykonanych w postaci jednej warstwy i dwóch warstw z porowatego betonu cementowego (zawartość wolnych przestrzeni – 24%). Analizowano wpływ maksymalnego uziarnienia kruszywa (4,75 mm, 9,5 mm, 13,2 mm), krzywych uziarnienia, grubości warstwy/warstw porowatych. Ustalono maksymalne wartości współczynnika absorpcji dźwięku przy grubości 8 cm (zarówno przy jednej, jak i dwóch warstwach łącznie) i maksymalnym uziarnieniu kruszywa 9,5 mm. Na podstawie wyników badań laboratoryjnych podjęto decyzję o budowie odcinka testowego, na którym wykonano dwie nawierzchnie. Każda z nawierzchni miała łączną grubość 28 cm i dolną warstwę o grubości 20 cm ze standardowego betonu cementowego. Na jednej nawierzchni wykonano jedną warstwę o grubości 8 cm z porowatego betonu o zawartości wolnych przestrzeni równej 17%. Na drugiej nawierzchni wykonano dwie warstwy z betonu porowatego o łącznej grubości 8 cm, odpowiednio o zawartości wolnych przestrzeni 17% (warstwa górna) i 25% (warstwa dolna). Wyniki badań poziomu hałasu, przeprowadzone metodą CPX, nie wykazały różnicy pomiędzy hałaśliwością nawierzchni z jedną warstwą porowatą i nawierzchnią o dwóch warstwach z betonu porowatego. Stwierdzono redukcję poziomu hałasu od 4 dB do 8 dB w porównaniu z nawierzchniami betonowymi teksturowanymi różnymi technikami rowkowania i o 4 dB – przy teksturowaniu metodą odkrytego kruszywa. Autorzy eksperymentu zastrzegają jednak, że uzyskane wartości dotyczą odcinka testowego i potrzebne są szersze badania w celu stwierdzenia efektywności akustycznej nawierzchni z porowatego betonu cementowego.

Altreuther i Mannela wskazali następujące główne czynniki decydujące o obniżeniu hałaśliwości nawierzchni betonowych [6]:

- optymalne tekstuowanie ich powierzchni – w wypadku nawierzchni o zwartej strukturze (zawartość wolnych przestrzeni poniżej 5%),
- optymalne tekstuowanie i w mniejszym stopniu absorpcja dźwięków (mechanizm *air-pumping*) – nawierzchnie o częściowo otwartej strukturze (zawartość wolnych przestrzeni około 12%),
- absorpcja dźwięków i mechanizm *air-pumping* – betonowe nawierzchnie porowate.

Zaproponowali oni rozwiązanie polegające na optymalnym tekstuowaniu bardzo cienkiej warstwy z betonu cementowego wykonanej na bazie drobnego kruszywa o bardzo wysokiej wytrzymałości. Uzyskali redukcję poziomu hałasu do 5 dB w porównaniu ze standardowymi nawierzchniami. Badali także betonowe kostki porowate, zmniejszające poziom hałasu nawet do 7 dB przy przejeździe pojazdu osobowego z prędkością 30 km/h.

Podane prace na rzecz obniżenia hałaśliwości nawierzchni z betonu cementowego wskazują na duże możliwości w tym zakresie. Wymaga to jednak zastosowania nowych materiałów i nowych technologii. Wiele rozwiązań jest obecnie w fazie badań eksperymentalnych.

## 3. Badanie i ocena hałaśliwości nawierzchni drogowych

### 3.1. Przegląd i założenia metod oraz wskaźniki oceny poziomu hałasu

W zdecydowanej większości krajów europejskich podstawową metodą pomiaru poziomu hałasu opona/nawierzchnia jest metoda CPX (*Close Proximity method*), a metodą pomiaru poziomu dźwięku od przejeżdżających pojazdów – metoda SPB (*Statistical Pass By method*). Zgodnie z wymaganiami normowymi w wypadku metody CPX pomiary maksymalnego poziomu dźwięku są wykonywane bezpośrednio przy oponie testowej, w tzw. polu bliskim, a w wypadku metody SPB – w odległości 7,5 m od środka pasa ruchu, po którym poruszają się badane pojazdy, na wysokości 1,20 m nad poziomem nawierzchni. Szczegółowe zasady pomiaru są podane odpowiednio w normach: ISO 11819-2 [98] i ISO 11819-1 [97], a poniżej przedstawiono jedynie ogólne ich założenia.

W metodzie CPX opona testowa jest najczęściej umieszczona w specjalnej przyczepie badawczej, a pomiary są prowadzone za pomocą dwóch mikrofonów zainstalowanych w pobliżu styku opony z nawierzchnią. Mierzony jest hałas toczenia opon, a pomijane są inne źródła dźwięku związane z poruszającym się pojazdem. Nie jest uwzględniany efekt pochłaniania dźwięku przez nawierzchnię i efekt propagacji.

Do 2009 roku oponami testowymi, stosowanymi w wielu krajach, były cztery opony: A, B, C, D. Opona A (Avon/Cooper ZV 1) i opona B (Avon/Cooper Enviro CR 322) charakteryzowały się tzw. „letnią” rzeźbą bieżnika, opona C (Avon/Cooper Turbogrip CR 65) – „zimową” rzeźbą bieżnika, a opona D (Dunlop SP Arctic) – z „agresywną” rzeźbą bieżnika reprezentowała pojazdy ciężarowe. Obecnie, zgodnie z ISO/TS 11819-3 do oceny nawierzchni wykorzystuje się dwie opony referencyjne: P1 (SR TT – Uniroyal Tigerpaw ASTM F2493), reprezentującą hałas toczenia samochodów osobowych i H1 – (AAV4 – Avon AV4), reprezentującą hałas toczenia samochodów ciężarowych.

Pomiary są wykonywane przy prędkości referencyjnej (50 km/h, 80 km/h i 110 km/h). Wynikiem pomiarów jest CPX Index ( $L_{CPX}$ ) obliczony dla dwóch opon i CPX Index obliczany dla każdej z opon testowych ( $L_{CPXP}$  i  $L_{CPXH}$ ). Oprócz

całkowitych wartości maksymalnego poziomu dźwięku są mierzone poziomy dźwięku w pasmach tercjowych (dla środkowych częstotliwości od 315 Hz do 5000 Hz). W zależności od celu badań są określone minimalne i zalecane długości odcinków pomiarowych. Dokonuje się także korekty wyników z uwagi na temperaturę w czasie pomiarów.

Zgodnie z założeniami metody SPB pomiaru maksymalnego poziomu dźwięku dokonuje się od pojedynczo jadących pojazdów zaliczanych do jednej z trzech kategorii pojazdów: pojazdy osobowe i dostawcze (kategoria 1), pojazdy ciężarowe (kategoria 2a) i wielocłonowe pojazdy ciężarowe (kategoria 2b). Wraz z pomiarem poziomu dźwięku mierzy się prędkość każdego z przejeżdżających pojazdów. Wymagana liczba pojazdów osobowych, dla których ustala się poziom dźwięku i prędkość, wynosi 100, pojazdów ciężarowych kategorii 2a – 30, wielocłonowych pojazdów ciężarowych kategorii 2b – 30. Łączna liczba pojazdów ciężarowych objętych pomiarami nie powinna być mniejsza niż 80. Wynikiem pomiarów według metody SPB są wartości maksymalnego poziomu dźwięku od statystycznych pojedynczo przejeżdżających pojazdów poszczególnych kategorii z prędkością referencyjną, obliczone ze wzoru:

$$L_{Amax,i} = A_i + B_i \log(V_i), \quad (3.1)$$

gdzie:

$L_{Amax,i}$  – maksymalny poziom dźwięku od statystycznego pojazdu kategorii „i” ( $i=1, 2a, 2b$ ) [dB],

$A_i, B_i$  – współczynniki regresyjne,

$V_i$  – prędkość przejazdu statystycznego pojazdu [km/h].

W badaniach we Francji oraz w prognozowaniu poziomu hałasu metodą CNOSSOS-EU wzór 3.1 przyjmuje postać:

$$L_{Amax,i} = A_i + B_i \log\left(\frac{V_i}{V_0}\right), \quad (3.2)$$

gdzie:

$V_0$  – prędkość odniesienia: 90 km/h – w badaniach we Francji, 70 km/h – w prognozowaniu hałasu metodą CNOSSOS-EU.

Uzyskane wyniki według metody CPX i SPB umożliwiają dokonanie oceny nawierzchni pod względem hałaśliwości z uwzględnieniem struktury rodzajowej pojazdów. W wypadku metody CPX można tego dokonać w oparciu o wartość wskaźnika  $RSN_{Lcat}$  [45] (wzór 3.3), a w wypadku metody SPB na podstawie indeksu  $SPBI$  [97] (wzór 3.4):

$$RSN_{Lcat} = (W_{P,cat} \cdot L_{CPXP,ref.}) + (W_{H,cat} \cdot L_{CPXH,ref.}), \quad (3.3)$$

gdzie:

$L_{CPXP}$  – poziom dźwięku ustalony metodą CPX z wykorzystaniem opony P1 [dB],

$L_{CPXH}$  – poziom dźwięku ustalony metodą CPX z wykorzystaniem opony H1 [dB],

$W_P, W_H$  – współczynniki prezentujące udział w ruchu odpowiednio pojazdów osobowych i ciężarowych [-],

$$SPBI = 10 \lg(W_1 \cdot 10^{L1/10} + W_{2a} \cdot 10^{L2a/10} + W_{2b} \cdot 10^{L2b/10}), \quad (3.4)$$

gdzie:

$W_1, W_{2a}, W_{2b}$  – udział w ruchu odpowiednio pojazdów kategorii 1, 2a i 2b [-],

$L_1, L_{2a}, L_{2b}$  – maksymalny poziom dźwięku od przejazdu statystycznego pojazdu odpowiednio kategorii 1, 2a i 2b, z uwzględnieniem prędkości referencyjnej poszczególnych kategorii pojazdów [dB].

W tabeli 3.1 podano wartości współczynników charakteryzujących strukturę rodzajową pojazdów  $W_x$ , które mogą być przyjęte w wypadku braku danych o ruchu na analizowanej nawierzchni, w zależności od kategorii prędkości.

Tab. 3.1. Współczynniki charakteryzujące strukturę rodzajową ruchu [45, 97]

Pojazdy		Kategoria prędkości [km/h]						
		niska		średnia		wysoka		
		$V_{ref.}$	$W_x$	$V_{ref.}$	$W_x$	$V_{ref.}$	$W_x$	
Metoda SPB								
Pojazdy osobowe	1	50	0,900	80	0,800	110	0,700	
Pojazdy ciężarowe	2a	50	0,075	70	0,100	85	0,075	
Wielocłonowe pojazdy ciężarowe	2b	50	0,025	70	0,100	85	0,225	
Metoda CPX								
Opona P	50	0,900		80	0,800		100	0,700
Opona H		0,100			0,200			0,300

Każda z omawianych metod ma zalety i wady oraz jest mniej lub bardziej przydatna w zależności od celu prowadzonych pomiarów. W tabeli 3.2 przedstawiono ich porównanie, uwzględniając założenia, opinie prezentowane w literaturze [98] oraz doświadczenie autora z wieloletnich pomiarów poziomu hałasu metodą SPB.

### 3. Badanie i ocena hałaśliwości nawierzchni drogowych

Tab. 3.2. Porównanie metod CPX i SPB

	Metoda SPB	Metoda CPX
Zalety	<ul style="list-style-type: none"> <li>– umożliwia ustalenie poziomu dźwięku od jadących pojazdów w rzeczywistych warunkach terenowych,</li> <li>– pozwala na ocenę wpływu nawierzchni na hałas toczenia różnych typów pojazdów,</li> <li>– umożliwia określenie równoważnego poziomu dźwięku z uwzględnieniem struktury rodzajowej ruchu,</li> <li>– uwzględnia efekt propagacji oraz absorpcji dźwięku przez nawierzchnie porowate</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– może być stosowana w większości sytuacji ruchowych,</li> <li>– krótki okres wykonywania pomiarów i niezbyt wysoki ich koszt,</li> <li>– możliwość oceny jednorodności akustycznej nawierzchni w krótkim czasie na odcinkach o różnej długości,</li> <li>– umożliwia pomiar hałasu opona/nawierzchnia bez wpływu innych źródeł dźwięku</li> </ul>
Wady i ograniczenia	<ul style="list-style-type: none"> <li>– stosunkowo długi czas pomiaru,</li> <li>– ocena poziomu hałasu w konkretnym przekroju drogi,</li> <li>– pomiar może być wykonywany tylko przy niezbyt dużym ruchu i przy odpowiednio niskim poziomie tła akustycznego,</li> <li>– wyniki są reprezentatywne przy określonej charakterystyce pojazdów</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– pośrednia ocena hałaśliwości jadących pojazdów: bardziej dokładna w odniesieniu do pojazdów osobowych i mniej dokładna w odniesieniu do pojazdów ciężarowych,</li> <li>– nie uwzględnia propagacji i absorpcji dźwięków przez nawierzchnie porowate,</li> <li>– dość skomplikowana i kosztowna aparatura badawcza,</li> <li>– wymagana ciągła profesjonalna kontrola aparatury pomiarowej i opon testowych</li> </ul>
Zastosowanie	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ocena właściwości akustycznych nawierzchni w wybranym przekroju drogi,</li> <li>– kontrola zgodności poziomu hałasu w odniesieniu do ustalonych wymagań w konkretnej lokalizacji,</li> <li>– ustalenie charakterystyki akustycznej nawierzchni pod kątem wykorzystania w metodach prognozowania hałasu od ruchu drogowego</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ocena i ustalenie rankingu nawierzchni i opon pod względem właściwości akustycznych,</li> <li>– ocena jednorodności akustycznej nawierzchni na dłuższych odcinkach,</li> <li>– bieżąca kontrola zmian właściwości akustycznych nawierzchni w czasie eksploatacji drogi,</li> <li>– badania rozpoznawcze przed wykonaniem pomiarów metodą SPB</li> </ul>

W badaniach hałaśliwości nawierzchni, między innymi w Stanach Zjednoczonych i Australii, stosuje się jako podstawową metodę OBSI (*On-Board Sound Intensity*) [1]. Aparaturę badawczą w metodzie OBSI stanowią: mikrofony umieszczone przy oponie, przetwornik pomiarowy, wzmacniacz sygnału, źródło zasilania i jednostka zbierająca wyniki pomiarów. Najnowsze rozwiązania konstrukcyjne umożliwiają prowadzenie pomiarów z prędkością 110 km/h.

W 2014 roku Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie podjął prace nad wdrożeniem tej metody w Polsce z wykorzystaniem pojazdu z napędem elek-



trycznym. Wyniki pomiarów poziomu hałasu toczenia opon samochodowych uzyskane metodą OBSI przedstawiono w pracach [220, 221, 250].

Pod względem ogólnych założeń prowadzenia pomiarów zbliżoną do metody SPB jest metoda kontrolowanego przejazdu CPB (*Controlled Pass-By method*). Różnica polega na tym, że poziom dźwięku jest mierzony od jadących pojazdów testowych. Zgodnie z [162, 163] w pomiarach uczestniczą dwa pojazdy testowe, a pomiary są prowadzone z wykorzystaniem 4 zestawów opon testowych. W badaniach metodą CPB, prowadzonych przez zespół z Politechniki Białostockiej, wykorzystywano trzy, cztery lub pięć pojazdów testowych o znanej, lecz zróżnicowanej charakterystyce. W Holandii w takich badaniach uczestniczy nawet 15 pojazdów.

Jedną z zasadniczych różnic w przedstawionych metodach, decydującą o wyniku pomiarów, jest położenie mikrofonów (rys. 3.1). W metodach CPX i OBSI pomiary obejmują hałas toczenia pojedynczej opony w tzw. polu bliskim, a w metodach SPB i CPB mierzone są dźwięki od poruszającego się pojazdu, z różnych jego źródeł wraz z efektem propagacji i pochłaniania przez powierzchnie znajdujące się pomiędzy pasem ruchu a mikrofonem. Na ten fakt należy zwrócić szczególną uwagę w analizach wyników, w szczególności przy ocenie hałaśliwości nawierzchni drogowych.



Rys. 3.1. Lokalizacja mikrofonów w metodach pomiaru hałasu: a) CPX, b) SPB/CPB, c) OBSI (zdjęcia ze zbiorów PG, PB i IBDiM)

W ocenie hałaśliwości nawierzchni i opon samochodowych są stosowane także inne metody: CB (*Coast-By method*), TCB (*Trailer Coast-By method*), laboratoryjno-bębnowa [52, 202]. W metodzie wybiegowej CB poziom hałasu jest mierzony przy przejeździe pojazdu testowego z określoną prędkością przy wyłączonym silniku. Metoda TCB jest rozwiązaniem hybrydowym, wykorzystującym wydłużoną przyczepę badawczą, przy uwzględnieniu założeń metody CB i metody CPX. Metoda bębnowa polega na tym, że badane koło samochodowe toczy się po obracającym się bębnie pokrytym repliką nawierzchni drogowej.

Pomimo że metody SPB i CPX są objęte odpowiednio normami ISO 11819-1 i ISO 11819-2, nie są one stosowane w sposób jednolity i konsekwentny w różnych krajach. Odmienne są konstrukcje przyczep badawczych w metodzie CPX, występują różnice w lokalizacji mikrofonów w metodzie SPB. W takiej sytuacji ustalenie wiarygodnych zależności pomiędzy wynikami pomiaru hałasu opona/nawierzchnia uzyskanymi przez różne zespoły badawcze i według różnych metod jest zagadnieniem stosunkowo złożonym.

W literaturze są prezentowane bardzo szczegółowe analizy tego problemu, zarówno w odniesieniu do poszczególnych metod, jak i ich wzajemnego powiązania. Zostały ustalone zależności pomiędzy wynikami pomiarów poziomego dźwięku metodami SPB, CPX, CPB, CB, OBSI, a także porównania metody CPX z metodą laboratoryjną w celu określenia hałasu opon samochodowych.

Licitra i in. [129] przeprowadzili analizę porównawczą i opracowali zależności pomiędzy wynikami pomiarów według metody CPX i wynikami z metody statystycznego i kontrolowanego przejazdu (SPB, CB, CPB) w odniesieniu do pięciu rodzajów nawierzchni o różnej charakterystyce. Dodatkowo dokonali pomiaru ekspozycyjnego poziomu dźwięku  $L_{AE}$  na wysokości 3,0 m, w odległości 7,5 m od środka pasa ruchu, po którym poruszały się badane pojazdy. Wykazali, że istotny wpływ na zależności pomiędzy  $L_{CPX}$  a wskaźnikami opisującymi poziom hałasu od przejeżdżającego pojazdu ( $L_{Amax}$  i  $L_{AE}$ ) ma prędkość pojazdów oraz rodzaj nawierzchni. Wskazali także na konieczność prowadzenia dalszych badań pod kątem możliwości wykorzystania danych pomiarowych z metody CPX w modelowaniu poziomu hałasu w otoczeniu drogi.

Problem korelacji pomiędzy wynikami pomiarów według metod CPX i SPB był jednym z tematów rozpatrywanych w projekcie SILVIA [151]. Rozważania w tym zakresie na drogach w Polsce przedstawiono także w pracy [74]. W projekcie ROSANNE ustalono zależności funkcyjne pomiędzy poziomami hałasu przy wykorzystaniu opony P1 (standardowa referencyjna opona testowa, SRTT) w metodzie CPX i poziomami hałasu według metody SPB w odniesieniu do pojazdów osobowych oraz pomiędzy hałasem pomierzonym przy oponie testowej H1 (Avon AV4) i wielocłonowym pojazdem ciężarowym według metody SPB [211]. W tabeli 3.3 podano przykładowe zależności funkcyjne ustalone w ramach dotychczas prowadzonych badań w różnych ośrodkach badawczych (wzory 3.5÷3.14).

W badaniach metodą SPB w projekcie ROSANNE [211] pomiary wykonywano przy położeniu mikrofonu na wysokości 1,2 m, 2,4 m, 3,6 m i 4,8 m (badania w Niemczech) i na wysokości 1,2 m, 3,0 m i 5,0 m (badania w Danii). Stwierdzono, że przy wyższym położeniu mikrofonu zmniejsza się poziom hałasu o około 0,5 dB na jeden metr wysokości. Tendencja zmian była większa na nawierzchni betonowej z odkrytym kruszywem niż na nawierzchni z mastyksu grysowego.

Na podstawie badań w Holandii potwierdzono potrzebę uwzględniania rodzaju nawierzchni przy ocenie poziomu hałasu na różnych wysokościach. Dotyczy to w szczególności warstw redukujących poziom hałasu toczenia opon samochodowych (nawierzchnie porowate).

Tab. 3.3. Zależności pomiędzy maksymalnym poziomem dźwięku, ustalonym metodą SPB, a poziomem dźwięku według metody CPX

	Zależności funkcyjne	$R^2$
Arsenal – Austria [46]	$L_{SPB} = 1,10 L_{CPX} - 28,9$ (3.5)	0,96
DWW – Holandia [46]	$L_{SPB} = 1,22 L_{CPX} - 42,3$ (3.6)	0,56
M+P – Holandia [46]	$L_{SPB} = 0,79 L_{CPX} + 2,0$ (3.7)	0,40
Politechnika Gdańska [46]	$L_{SPB} = 1,22 L_{CPX} - 40,9$ (3.8)	0,95
Wyniki badań autora monografii [74]	$L_{SPB-1} = 0,99 L_{CPXI} - 19,28$ (3.9)	0,94
	$L_{SPB-2b} = 0,80 L_{CPXI} + 8,47$ (3.10)	0,76
	$L_{SPB-1} = 0,87 L_{CPX-B} - 7,05$ (3.11)	0,94
	$L_{SPB-2b} = 0,99 L_{CPX-D} - 10,76$ (3.12)	0,81
ROSANNE [45]	$L_{SPB-1-80} = 0,95 L_{CPXP(80)} - 15,6$ (3.13)	0,94
	$L_{SPB-2b-80} = 0,65 L_{CPXH(80)} + 24,0$ (3.14)	0,52

Cesbron i Klein [44] przeprowadzili analizę porównawczą poziomów hałasu według metody CPX i metody CB we Francji (poligon IFSTTAR) i w Geilenkirchen w Niemczech (poligon BAST). Na podstawie wyników określonych na 15 nawierzchniach o różnej charakterystyce stwierdzono, że średnia różnica pomiędzy poziomami hałasu ustalonymi tymi metodami wynosi  $21,6 \pm 0,9$  dB. Potwierdzono także bardzo dobrą korelację pomiędzy wynikami w zakresie pasm 1/3 – oktaowych od 400 Hz do 4000 Hz.

Porównanie metod OBSI i CPX było przedmiotem badań w Danii i Australii. Oddershede i zespołem ustalili na sześciu nawierzchniach wartości różnicy pomiędzy poziomem hałasu według metody OBSI i metody CPX [146]:

a)  $L_{OBSI} - L_{CPX} = 3,1 \pm 0,09$  dB, przy prędkości 50 km/h,

b)  $L_{OBSI} - L_{CPX} = 2,4 \pm 0,04$  dB, przy prędkości 80 km/h,

sugerując, że mogą być one inne na innych nawierzchniach. Zostało to wykazane w badaniach Tonina i in. [228]. Ustalone różnice, na zdecydowanie większej liczbie nawierzchni (15 warstw ścieralnych na odcinkach testowych w jednym kierunku i 18 – w kierunku przeciwnym), wyniosły od 1,5 dB do 1,9 dB, a standardowe odchylenia różnic były zdecydowanie większe (od 0,3 dB do 0,7 dB) w porównaniu z badaniami w Danii.

W pracy [224] przedstawiono analizę porównawczą wyników uzyskanych metodą CPX, przy wykorzystaniu przyczepy badawczej Tiresonic MK.4, i metodą bębnową laboratoryjną. Autorzy w oparciu o wyniki badań na różnych nawierzchniach (na rzeczywistych drogach) i na ich replikach pokrywających bęben na stanowisku laboratoryjnym, w tym także z nawierzchnią typu PERS, ustalili dobrą korelację pomiędzy uzyskanymi wartościami całkowitego poziomu dźwięku (różnice w granicach 1 dB). W zakresie poszczególnych pasm częstotliwości różnice osiągały wartości do 4 dB. Za przyczynę różnic uznano krzywiznę bębna, różne warunki propagacji dźwięków oraz stan nawierzchni w warunkach terenowych.

Wykorzystanie metody CPX w ocenie hałaśliwości nawierzchni było przedmiotem rozważań przez wielu autorów. Dotyczyło to zarówno założeń metody [125, 131, 147], opon testowych [130, 26, 207, 52, 202], jak i konstrukcji przyczep badawczych [227, 53, 54]. Interesujące rozważania przedstawili Licitra i in. [131] w ramach projektu LEOPOLDO, dotyczące metodologii analizy wyników w odniesieniu do odcinków pomiarowych o długości 5,76 m. Lelong z zespołem zaprezentowali wyniki pomiarów metodą CPX przy zastosowaniu jednej dwukołowej przyczepy badawczej, 6 pojazdów testowych z zamontowanymi mikrofonami przy kole (w tym jednego pojazdu z napędem elektrycznym), 10 zestawami opon na 9 nawierzchniach o różnej charakterystyce [125]. Stwierdzili, że w rankingu nawierzchni pod względem hałaśliwości powinno się uwzględniać rodzaj opony i okres jej użytkowania. Także zdaniem Licitry i in. [130] właściwości akustyczne nawierzchni nie powinny być oceniane przy wykorzystaniu tylko jednego rodzaju opony. Problem ten jest jeszcze bardziej złożony w wypadku nawierzchni o zwiększonej zawartości wolnych przestrzeni z uwagi na ich większą niejednorodność akustyczną.

Szczegółowe badania były prowadzone także nad wpływem temperatury na poziom hałasu toczenia opon samochodowych. W ramach projektu ROSANNE zaproponowano obliczanie poziomu dźwięku w temperaturze referencyjnej  $T_{ref}$  z uwzględnieniem korekty wynikającej z różnicy temperatury badania i temperatury referencyjnej, według wzoru [9]:

$$L_{CPX}(T_{ref}) = L_{CPX}(T) + \gamma_t(T_{ref} - T), \quad (3.5)$$

gdzie:

$L_{CPX}(T)$  – poziom hałasu ustalony w temperaturze  $T$  w czasie pomiaru,

$T_{ref}$  – temperatura referencyjna (20°C),

$\gamma_t$  – współczynnik korygujący, obliczany według wzoru:

- nawierzchnia o zwartej strukturze:  $\gamma_t = -0,14 + 0,0006 \cdot v$ ,
- nawierzchnia z betonu cementowego:  $\gamma_{PI} = \gamma_{HI} = -0,10 + 0,0004 \cdot v$ ,
- nawierzchnia porowata:  $\gamma_{PI} = \gamma_{HI} = -0,08 + 0,0004 \cdot v$ .

Według modelu prognozowania hałasu CNOSSOS-EU korektę poziomu mocy akustycznej pojazdu samochodowego na suchej nawierzchni, przy temperaturze  $T$ , innej niż temperatura referencyjna ( $T_{ref} = 20^{\circ}\text{C}$ ), proponuje się obliczać według wzoru [51]:

$$\Delta L_{W,temp,m}(T) = K_m \cdot (T_{ref} - T). \quad (3.6)$$

Współczynnik  $K_m$  przyjmuje wartości dodatnie w temperaturze powyżej  $20^{\circ}\text{C}$  i ujemne w temperaturze poniżej  $20^{\circ}\text{C}$ . Zaleca się stosowanie współczynnika ogólnego dla wszystkich rodzajów nawierzchni, równego  $0,08 \text{ dB}/^{\circ}\text{C}$  dla pojazdów kategorii 1 oraz  $0,04 \text{ dB}/^{\circ}\text{C}$  – dla pojazdów ciężarowych kategorii 2 i 3. Powyższe wartości dotyczą wszystkich pasm oktawowych od 63 Hz do 8000 Hz.

Wartości współczynnika  $K_m$  były ustalone we wcześniejszych badaniach w projekcie HARMONOISE, wskazując na jego zakres od  $0,03 \text{ dB}/^{\circ}\text{C}$  (nawierzchnie z porowatego betonu cementowego) do  $0,12 \text{ dB}/^{\circ}\text{C}$  (nawierzchnie powierzchniowo utrwalone) [104]. Wyniki badań wpływu temperatury na poziom hałasu, także w odniesieniu do częstotliwości dźwięku, są prezentowane w pracach [13, 150, 199].

Wieloletnie badania wpływu temperatury na poziom emitowanych dźwięków stanowiły podstawę do opracowania normy ISO/TS 13471-1:2017, dotyczącej metody CPX. Obecnie trwają prace nad przygotowaniem takiej normy (ISO/DTS 13471-2) w odniesieniu do metody SPB.

Zarówno w metodach pomiaru, jak i w modelach prognozowania poziomu dźwięku zakłada się, że nawierzchnia jest sucha. Problem wpływu jej zawilgocenia na poziom hałasu był badany przez autora monografii, a ich wyniki zostały przedstawione w pracach [66, 74, 206]. W ramach projektu HARMONOISE ustalono współczynniki korygujące wpływ mokrej nawierzchni na jej hałasliwość ( $\Delta L_{wet}$ ) w odniesieniu do pojazdu osobowego, zgodnie ze wzorami [104]:

$$\Delta L_{wet} = 10 \log \left( \frac{110}{V} \right) + 20 \log \left( \frac{f}{2000} \right), f \geq 2000 \text{ Hz}, 30 \leq V \leq 110 \text{ km/h}, \quad (3.7)$$

$$\Delta L_{wet} = 5 \log \left( \frac{110}{V} \right), f = 1600 \text{ Hz}, \quad (3.8)$$

$$\Delta L_{wet} = 2,5 \log \left( \frac{110}{V} \right), f = 1250 \text{ Hz}. \quad (3.9)$$

Poniżej częstotliwości 1250 Hz w odniesieniu do pojazdu osobowego oraz pojazdu ciężarowego w zakresie całego zakresu częstotliwości brak jest dotychczas jednoznacznych ustaleń dotyczących wpływu zawilgocenia nawierzchni na poziom hałasu.

Wyniki pomiarów hałasu według stosowanych metod są obarczone pewnymi błędami wynikającymi z warunków pomiaru, stosowanej aparatury czy zmiennego stanu nawierzchni. Dlatego w analizach należy uwzględnić tzw. niepewność pomiarów przy ocenie właściwości akustycznych nawierzchni drogowych [234]. Jest to szczególnie ważny problem na etapie kontroli hałaśliwości nawierzchni bezpośrednio po ich wykonaniu (na etapie odbioru robót) oraz w trakcie eksploatacji.

Wieloletnie badania nad wykorzystaniem metod CPX, SPB, CPB, CB czy OBSI skutkowały różnorodnymi udoskonaleniami w zakresie aparatury badawczej, zasad prowadzenia pomiarów i analizy wyników. Nadal jednak pozostają problemy wymagające dalszych, bardziej szczegółowych rozważań. W kolejnych podrozdziałach analizie poddano niektóre z nich, a mianowicie:

- a) oceniono wpływ typu opony testowej na poziom hałasu w metodzie CPX w zależności od rodzaju nawierzchni,
- b) przeanalizowano wpływ liczby pojazdów objętych badaniami na wyniki pomiarów według metody SPB,
- c) sprawdzono porównywalność wyników według metody SPB ustalonych na nawierzchniach wykonanych w tej samej technologii, lecz w różnych lokalizacjach,
- d) oceniono możliwość wykorzystania metody CPB w ocenie hałaśliwości nawierzchni.

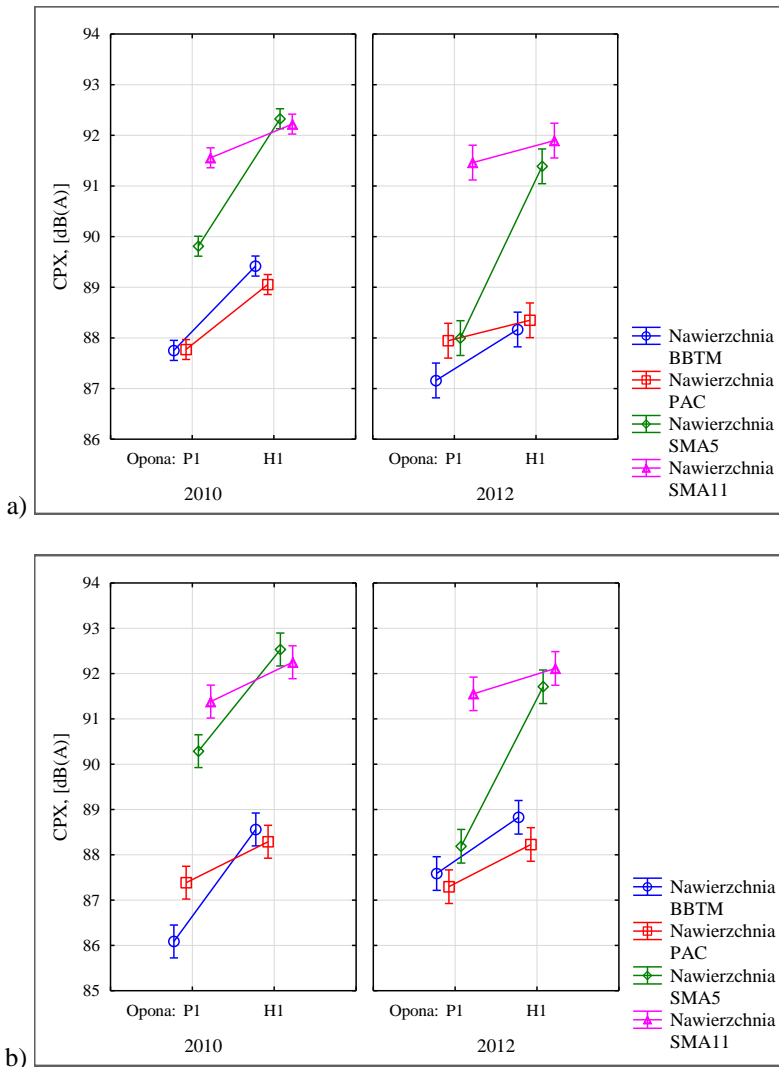
## **3.2. Wybrane problemy oceny hałasu opona/nawierzchnia i hałasu toczenia pojazdów samochodowych**

### **3.2.1. Wpływ opony testowej na poziom hałasu według metody CPX**

Hałas opon zależy od wielu czynników, a do najważniejszych z nich należą: wzór bieżnika, twardość gumy, wymiary opony, ciśnienie w oponach, prędkość jazdy, tekstura, porowatość i sztywność nawierzchni. Opony wykorzystywane w pomiarach hałasu są jedną z przyczyn rozbieżności przy interpretacji wyników. Problem ten zbadano na podstawie wyników uzyskanych na czterech nawierzchniach (BBTM8, PAC8, SMA11, SMA5), dwóch oponach testowych (P1 i H1) i przy dwóch prędkościach referencyjnych (50 km/h i 80 km/h). Podstawą analizy były wyniki pomiarów wykonanych w 2010 i 2012 roku przez zespół z Politechniki Gdańskiej przy wykorzystaniu przyczepy badawczej Tiresonic MK-3, we współpracy z TPA Instytutem Badań Technicznych Sp. z o.o. i autorem monografii.

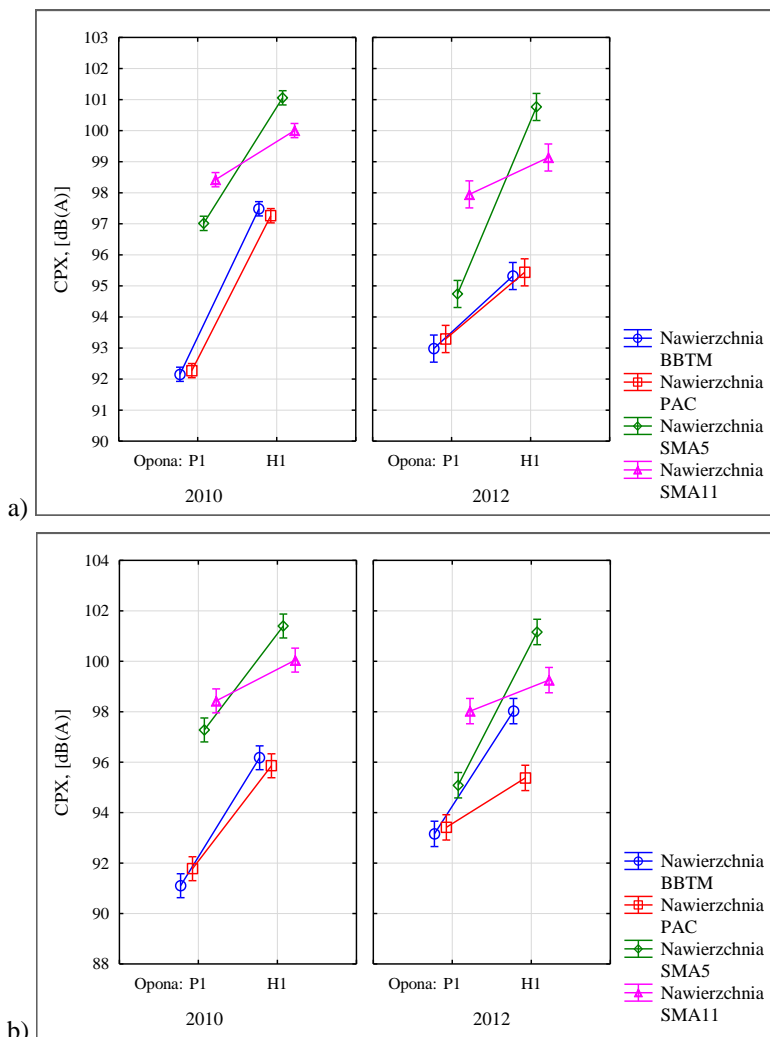
Opis i wyniki badań przedstawiono w pracach [148, 149], a poniżej zaprezentowano bardziej szczegółową ich analizę.

Na rysunkach 3.2 i 3.3, wykorzystując założenia dwuczynnikowej analizy wariancji z powtórzeniami [214], pokazano wpływ rodzaju opony na hałasliwość nawierzchni w zależności od ich charakterystyki i prędkości pomiaru.



Rys. 3.2. Porównanie poziomów dźwięku przy zastosowaniu dwóch opon na czterech nawierzchniach przy prędkości  $V = 50 \text{ km/h}$ : a) pas ruchu „W”, b) pas ruchu „E”

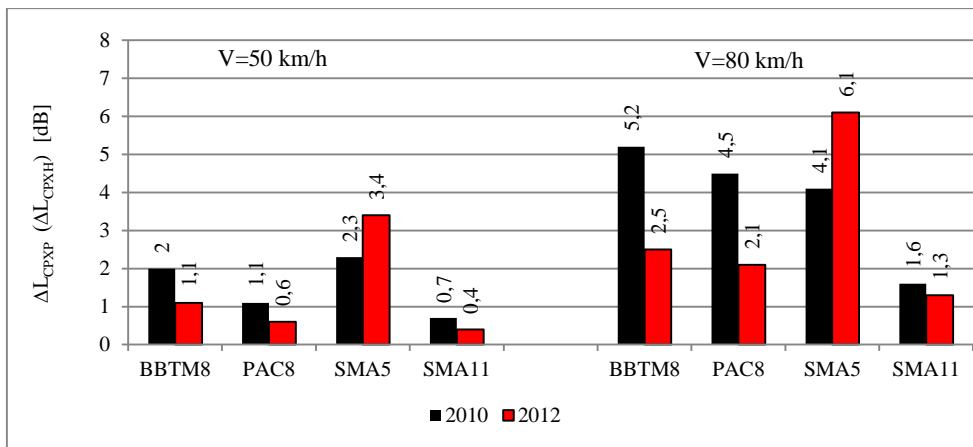
Przedstawione wyniki wskazują na istotne różnice w relacjach pomiędzy poziomami hałasu dwóch opon, ustalonymi na różnych nawierzchniach. Na wartości różnic pomiędzy głośnością opon miała wpływ także prędkość pomiaru. Najwyższą wartość różnicy pomiędzy głośnością opon P1 i H1 zanotowano na nawierzchni SMA5 przy prędkości 80 km/h – 6,1 dB. W zasadzie jedynie na nawierzchni SMA11 różnice pomiędzy głośnością opon P1 i H1 tylko nieznacznie różniły na dwóch pasach, przy dwóch prędkościach i w dwóch okresach pomiarowych.



Rys. 3.3. Porównanie poziomów dźwięku przy zastosowaniu dwóch opon na czterech nawierzchniach przy prędkości 80 km/h: a) pas ruchu „W”, b) pas ruchu „E”.



Na rysunku 3.4, uwzględniając średnie wyniki z dwóch pasów ruchu, pokazano wartości różnic pomiędzy głośnością opon w zależności od rodzaju nawierzchni, prędkości i okresu eksploatacji. Przedstawione wartości jednoznacznie potwierdzają, jak ważne znaczenie w badaniach hałasowości nawierzchni metodą CPX, a także innymi metodami opartymi na pomiarze maksymalnego poziomu dźwięku opona/nawierzchnia w tzw. polu bliskim, ma rodzaj zastosowanej opony testowej. Oznacza to, że nie można w sposób przypadkowy dobierać opony testowej, a uzyskane wyniki porównywać na przykład z wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu opon zalecanych przez normę ISO/TS 11819-3.



Rys. 3.4. Średnie różnice poziomami dźwięku od opon P1 i H1 na czterech nawierzchniach na podstawie średnich wyników z dwóch pasów ruchu

### 3.2.2. Metoda SPB w badaniach hałasu toczenia pojazdów samochodowych

#### 3.2.2.1. Analiza wyników przeprowadzonych pomiarów

Pomiary poziomu hałasu metodą statystycznego przejazdu (SPB) są prowadzone przez zespół z Politechniki Białostockiej od ponad dwudziestu lat. Dotychczas ustalono wartości maksymalnego poziomu dźwięku od około 8000 pojedynczo jadących pojazdów osobowych, 2700 wieloczlónowych pojazdów ciężarowych (kategoria 2b) i 500 pojazdów ciężarowych kategorii 2a.

Pomiary poziomu hałasu metodą SPB są zadaniem czasochłonnym, a zmienne warunki atmosferyczne lub inne czasowe zakłócenia ze strony otoczenia drogi (zbyt wysoki poziom tła akustycznego – np. prace polowe, prace budowlane) mogą uniemożliwić wykonanie pełnego programu badań. Liczba uzyskanych wyników

pomiarów jest niekiedy mniejsza (nawet zdecydowanie mniejsza) od wymaganej. Stan techniczny pojazdów typowanych do badań nie jest dokładnie znany i dopiero laboratoryjna analiza dźwięków pozwala wskazać wartości różniące się od pozostałych wyników. Na niektórych odcinkach dróg dodatkowym problemem są bardzo zróżnicowane lub bardzo zbliżone prędkości pojazdów objętych pomiarami. W wypadku pojazdów osobowych, na drogach zamiejskich, prędkości poruszających się pojazdów charakteryzują się stosunkowo dużą zmiennością (odchylenia standardowe osiągają wartości nawet powyżej 20 km/h), a w wypadku pojazdów ciężarowych kategorii 2b prędkości jadących drogą szybkiego ruchu – odchylenia standardowe niekiedy nie przekraczają wartości 2÷3 km/h.

Mając powyższe na uwadze, przeprowadzono analizę wyników pomiarów maksymalnego poziomu dźwięku, porównując ustalone wartości odchylenia standardowego reszt  $S_e$  i niepewności rozszerzonej wartości średniej  $L_{Amax}$  na założonym 95% poziomie ufności ( $U$ ) z wartościami dopuszczalnymi podanymi w normie ISO 11819-1 (tab. 3.4). Przyjmując założenie, że spełnione powinny być wymagania odnośnie do wartości  $S_e$  i  $U$ , zaproponowano eliminację ze zbioru danych tzw. wyników odstających. Jako kryterium takiej operacji przyjęto wartość standaryzowanej reszty, obliczonej jako iloraz różnicy pomiędzy wynikiem z pomiarów i wynikiem ustalonym z modelu a odchyleniem standardowym reszt  $S_e$ . Wartości standaryzowanej reszty większe od 3 stanowiły podstawę do traktowania danego wyniku jako jednoznacznie odstającego i usuwano z zestawu danych. W dalszej kolejności analizowano obserwacje z najwyższymi wartościami standaryzowanych reszt, a ich usuwanie ze zbioru danych poprzedzano analizą dopasowania modelu liniowego do wyników pomiarów oraz spełnieniem wymagań normy ISO 11819-1.

Tab. 3.4. Oczekiwane wartości dla maksymalnego poziomu dźwięku według SPB [97]

Kategoria pojazdów	Odchylenia standardowe reszt ( $S_e$ )	95% przedział ufności dla wartości średniej $L_{Amax}$ ( $U$ )
Kategoria 1	1,5 dB	0,3 dB
Kategoria 2a i 2b	2,0 dB	0,7 dB

Założenia, algorytm postępowania oraz niezbędne arkusze kalkulacyjne, umożliwiające usuwanie wyników odstających ze zbioru danych, są podane w pracy [218].

Analizie poddano także współczynniki determinacji  $R^2$ , przyjmując, że w odniesieniu do pojazdów osobowych powinien być spełniony warunek o bardzo wysokiej i prawie pełnej korelacji, a w przypadku pojazdów ciężarowych – co naj-

mniej wysokiej korelacji (tab. 3.5), przy założeniu, że siła współzależności zmiennej zostanie potwierdzona istotnością współczynników korelacji  $R$ .

Tab. 3.5. Ocena korelacji pomiędzy zmiennymi [214]

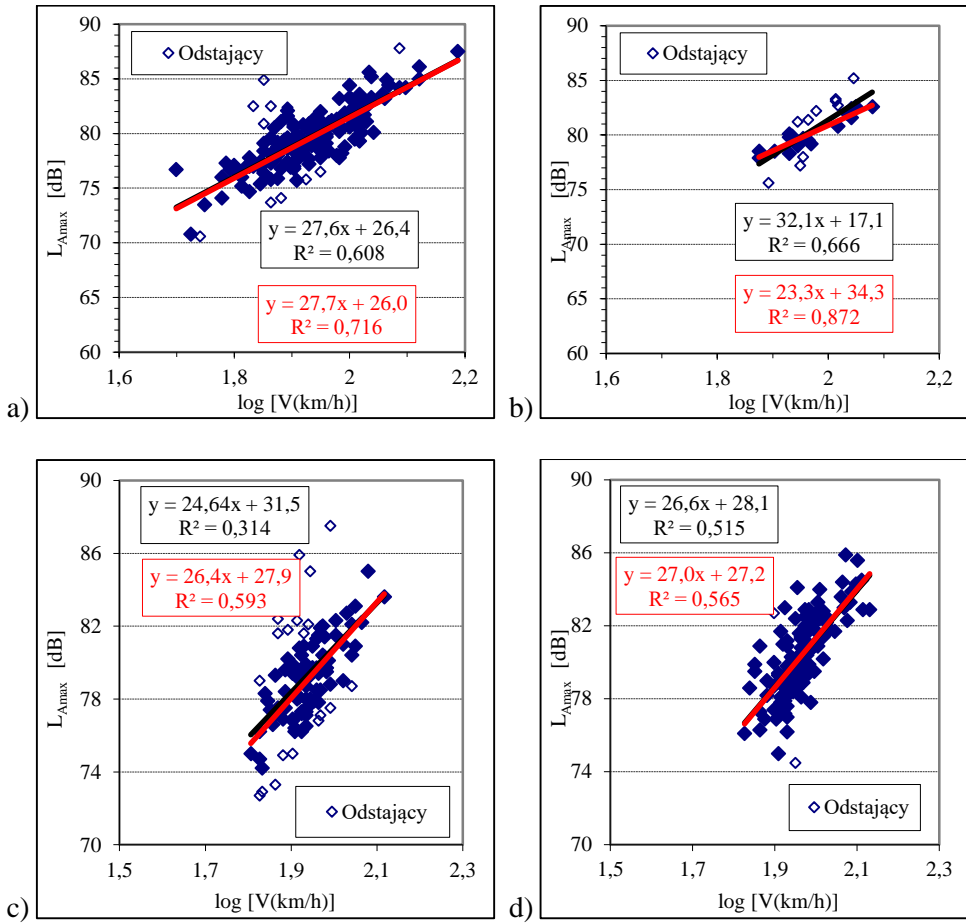
Współczynnik korelacji $R$	Współczynnik determinacji $R^2$	Korelacja
0	0	zmienne nie są skorelowane
$0 < R < 0,1$	$< 0,01$	korealacja nikła
$0,1 \leq R < 0,3$	$0,01 \leq R^2 < 0,09$	korelacja słaba
$0,3 \leq R < 0,5$	$0,09 \leq R^2 < 0,25$	korelacja przeciętna
$0,5 \leq R < 0,7$	$0,25 \leq R^2 < 0,49$	korelacja wysoka
$0,7 \leq R < 0,9$	$0,49 \leq R^2 < 0,81$	korelacja bardzo wysoka
$0,9 \leq R < 1,0$	$R^2 \geq 0,81$	korelacja prawie pełna

Na rysunku 3.5 pokazano wyniki pomiarów maksymalnego poziomu dźwięku od pojedynczo przejeżdżających pojazdów osobowych na czterech przykładowych nawierzchniach ze wskazaniem wyników odstających.

Ustalone zależności regresyjne (w odniesieniu do wszystkich wyników pomiarów oraz do wyników bez wartości odstających) pokazują, jaki jest wpływ eliminacji z analizy wartości odstających. W przypadkach „a”, „c” i „d” praktycznie nie miało to wpływu na maksymalne poziomy dźwięku w całym zakresie badanych prędkości. W przypadku „b”, przy liczbie wyników mniejszej od wymaganej, uzyskano zdecydowanie różne zależności regresyjne. Oznacza to, że w takiej sytuacji eliminacja wartości odstających w sposób istotny wpływa na wyniki pomiarów.

W ramach dotychczas prowadzonych pomiarów na ponad 50 odcinkach przez zespół z Politechniki Białostockiej zbadano hałaśliwość nawierzchni o różnej charakterystyce. W zdecydowanej większości wypadków pomiary prowadzono w dobrych warunkach atmosferycznych, w temperaturze zbliżonej do temperatury referencyjnej (20°C). W odniesieniu do warunków różnych od referencyjnych stosowano korekty wskazane w odpowiednich normach. W załączniku Z1 przedstawiono wyniki analizy maksymalnych poziomów dźwięku uzyskanych dla trzech kategorii pojazdów oraz wyniki ustalone metodą CPB. W tabelach 3.6÷3.8 podano zbiorcze ich zestawienie z uwzględnieniem technologii wykonywania górnych warstw nawierzchni drogowych. W odniesieniu do pojazdów osobowych (tab. 3.6) i pojazdów ciężarowych kategorii 2b (tab. 3.7) przeprowadzono eliminację wartości odstających.

### 3. Badanie i ocena hałaśliwości nawierzchni drogowych



Rys. 3.5. Wyniki pomiarów metodą SPB (pojazdy osobowe) z pokazaniem wyników odstających (kolor czerwony – zależności funkcyjne po usunięciu wyników odstających)

Tab. 3.6. Analiza wyników pomiarów hałasu toczenia metodą SPB (pojazdy osobowe)

Nawierzchnia - liczba odcinków	Zakres wyników pomiarów i analiz						
	<i>n</i>	<i>B</i>	<i>V<sub>sr</sub></i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>S<sub>e</sub></i>	<i>U</i>	
AC16 – 5	a	99-162	24,1-32,4	84,6-124,2	0,61-0,68	1,53-1,87	0,24-0,34
	b	97-160	25,2-34,4	84,0-124,0	0,64-0,81	1,30-1,50	0,21-0,30
AC12 – 9	a	76-156	21,1-34,4	52,3-90,8	0,31-0,75	1,28-2,26	0,27-0,45
	b	74-149	22,6-36,1	52,3-91,8	0,49-0,76	1,28-1,48	0,24-0,30
SMA12 – 7	a	92-158	21,1-28,2	87,0-101,1	0,49-0,62	1,55-1,74	0,24-0,37
	b	84-153	20,2-29,1	87,3-101,5	0,55-0,76	1,35-1,49	0,22-0,29
SMA11 - 11	a	19-95	19,8-33,0	70,7-108,6	0,51-0,84	0,82-1,31	0,21-0,52
	b	17-95	19,8-33,8	70,7-108,6	0,50-0,88	0,59-1,28	0,21-0,30
SMA10 – 3	a	109-150	23,8-26,7	84,5-102,7	0,46-0,64	1,34-1,67	0,22-0,32
	b	105-146	23,0-26,8	84,8-103,1	0,51-0,70	1,34-1,47	0,22-0,29
SMA8 – 1	a	49	31,1	60,5	0,75	1,26	0,36
	b	45	31,1	60,3	0,82	1,00	0,30
SMA5 – 1	a	85	31,8	68,2	0,57	1,73	0,37
	b	83	31,5	68,2	0,69	1,36	0,30
GUF1 – 2	a	118-146	28,3-31,6	85,4-95,5	0,67	1,58-1,59	0,26-0,29
	b	117-142	28,9-32,8	85,5-94,7	0,71-0,76	1,32-1,45	0,22-0,27
Ruflex – 2	a	108-146	22,6-27,6	90,0-94,8	0,49-0,59	1,43-1,61	0,27-0,36
	b	108-144	22,6-27,0	90,2-94,8	0,46-0,63	1,43-1,47	0,24-0,27
PU – 3	a	117-148	26,4-35,4	73,7-105,1	0,54-0,77	1,55-1,67	0,27-0,29
	b	114-145	28,4-34,7	73,9-104,8	0,59-0,79	1,46-1,49	0,25-0,28
PAC11 – 3	a	36-72	23,8-31,3	92,2-99,6	0,44-0,75	1,17-1,69	0,27-0,57
	b	20-72	22,2-31,6	95,2-99,6	0,53-0,94	0,71-1,17	0,27-0,30
PAC8 – 5	a	43-110	28,3-37,4	71,6-81,2	0,65-0,83	1,14-1,63	0,23-0,35
	b	40-106	28,3-33,3	71,6-81,2	0,73-0,88	0,94-1,42	0,23-0,30
BBTM8 – 4	a	67-93	22,9-30,6	76,5-88,2	0,60-0,74	1,13-1,23	0,23-0,28
	b	67-93	22,9-30,6	76,5-88,2	0,60-0,74	1,13-1,23	0,23-0,28
DPAC8+16 – 2	a	59-68	31,1-31,7	68,9-75,4	0,73-0,80	1,18-1,20	0,29-0,31
	b	58-68	30,0-31,7	68,9-75,2	0,79-0,85	0,75-0,80	0,29
KK – 2	a	82-115	32,9-33,5	41,9-76,6	0,56-0,78	1,82-2,13	0,34-0,37
	b	62-107	35,1-39,8	41,3-76,4	0,79-0,85	1,17-1,44	0,28-0,30
CC – 9	a	43-140	17,0-37,6	83,5-126,9	0,28-0,76	1,11-2,47	0,20-0,41
	b	38-137	16,9-36,2	84,0-126,9	0,50-0,81	1,11-1,50	0,20-0,30
EACC – 8	a	77-181	26,4-35,1	104,8-128,3	0,43-0,82	1,07-1,37	0,18-0,43
	b	61-181	26,4-35,1	104,7-128,3	0,66-0,82	1,07-1,37	0,18-0,30

a - wyniki pomiarów, b - wyniki pomiarów po usunięciu wartości odstających

### 3. Badanie i ocena hałaśliwości nawierzchni drogowych

Tab. 3.7. Analiza wyników pomiarów hałasu toczenia metodą SPB (pojazdy ciężarowe kategorii 2b)

Nawierzchnia - liczba odcinków		Zakres wyników pomiarów i analiz					
		$n$	$B$	$V_{sr}$	$R^2$	$S_e$	$U$
AC16 – 5	a	44-61	21,4-29,9	75,0-82,1	0,15-0,28	1,70-2,22	0,49-0,57
	b	44-58	19,0-30,0	74,7-82,1	0,27-0,35	1,70-1,97	0,49-0,57
AC12 – 3	a	42-47	22,0-36,2	72,4-80,1	0,08-0,42	1,39-2,55	0,41-0,75
	b	42-46	24,9-36,2	72,4-79,8	0,27-0,42	1,39-1,99	0,41-0,62
SMA12 – 7	a	40-67	16,4-38,9	72,7-82,9	0,11-0,50	1,21-1,99	0,33-0,53
	b	40-67	16,4-38,9	72,7-82,9	0,27-0,50	1,21-1,99	0,33-0,53
SMA11 – 4	a	35-66	30,7-36,4	78,8-84,9	0,31-0,52	0,98-1,31	0,29-0,45
	b	35-66	30,7-36,4	78,8-84,9	0,31-0,52	0,98-1,31	0,29-0,45
SMA10 – 3	a	50-55	25,7-37,3	75,2-80,6	0,20-0,41	1,28-2,01	0,35-0,37
	b	48-55	25,7-37,3	74,9-80,6	0,26-0,59	1,28-1,37	0,35-0,40
GUF1 – 2	a	39-45	24,5-38,5	78,4-81,4	0,15-0,45	1,18-2,05	0,36-0,67
	b	38-45	22,1-38,5	78,2-81,4	0,25-0,45	1,18-1,95	0,36-0,64
Ruflex – 2	a	52-72	25,4-31,9	76,2-76,6	0,26-0,53	1,12-1,64	0,26-0,46
	b	52-72	25,4-31,9	76,2-76,6	0,26-0,53	1,12-1,64	0,26-0,46
PU – 3	a	36-64	-2,3-37,5	68,5-81,0	0,00-0,35	1,28-2,60	0,32-0,88
	b	32-64	10,9-37,5	70,9-81,0	0,28-0,35	1,25-1,94	0,32-0,67
PAC11 – 3	a	17-97	26,8-32,6	83,5-83,9	0,16-0,26	1,24-1,83	0,30-0,64
	b	17-97	26,8-32,6	83,5-83,9	0,26-0,39	1,24-1,83	0,30-0,64
PAC8 – 2	a	14-21	39,8-55,3	75,4-78,6	0,45-0,69	1,00-2,26	0,58-1,03
	b	14	30,8-55,3	75,4-77,5	0,68-0,69	1,00-1,15	0,58-0,67
DPAC – 1	a	19	14,2	64,5	0,11	1,60	0,77
	b	17	5,3	63,9	0,03	1,31	0,67
KK – 1	a	54	40,0	58,6	0,80	1,89	0,52
	b	54	40,0	58,6	0,80	1,89	0,52
CC – 9	a	25-86	-13,8-64,1	76,4-86,4	0,04-0,57	1,27-2,88	0,27-1,19
	b	19-86	22,2-68,2	75,9-86,4	0,07-0,57	1,27-1,98	0,27-0,69
EACC – 8	a	16-68	17,3-34,7	79,2-85,8	0,07-0,71	0,89-1,43	0,27-0,52
	b	16-68	17,3-34,7	79,2-85,8	0,08-0,71	0,89-1,43	0,27-0,52

a- wyniki pomiarów, b- wyniki pomiarów po usunięciu wartości odstających

Tab. 3.8. Analiza wyników pomiarów hałasu toczenia metodą SPB (pojazdy kat.2a)

Nawierzchnia - liczba odcinków	Zakres wyników pomiarów i analiz					
	$n$	$B$	$V_{sr}$	$R^2$	$S_e$	$U$
AC16 – 3	25-31	27,7-57,7	72,6-75,1	0,18-0,39	3,14-3,41	1,19-1,41
AC12 – 3	31-34	2,6-36,4	70,6-74,2	0,00-0,36	2,78-3,35	1,00-1,17
SMA12 – 2	30-31	10,0-17,5	75,0-76,6	0,05-0,17	1,83-2,38	0,89-1,33
SMA10 – 3	29-30	6,7-41,4	73,1-74,6	0,02-0,29	1,79-3,34	0,68-1,25
GUF1 – 1	32	22,9	77,6	0,12	3,36	1,21
Ruflex – 1	34	17,4	73,0	0,17	2,01	0,70
PU – 2	28-31	16,7-30,1	66,4-77,3	0,20-0,37	2,15-2,50	0,79-0,97
CC – 1	20	46,1	70,3	0,26	3,27	1,54

Poniżej przedstawiono podsumowanie wyników pomiarów hałasu toczenia pojazdów samochodowych metodą SPB.

Liczba pojazdów osobowych w ramach pojedynczego pomiaru wynosiła od 19 do 181, pojazdów ciężarowych kategorii 2a – od 20 do 24, a pojazdów ciężarowych kategorii 2b – od 14 do 97. Średnia prędkość pojazdu osobowego na poszczególnych odcinkach zawierała się w przedziale 41,9÷128,3 km/h, wielocłonowego pojazdu ciężarowego – od 58,6 km/h do 86,4 km/h, a pojazdu ciężarowego kategorii 2a – od 66,4 do 77,6 km/h. Ustalone współczynniki determinacji  $R^2$  przyjmowały wartości w wypadku pojazdów osobowych od 0,28 do 0,84, pojazdów ciężarowych kategorii 2a – od 0,00 do 0,39, a pojazdów ciężarowych kategorii 2b – od 0,00 do 0,80.

Odchylenia standardowe reszt  $S_e$ , przed eliminacją wyników odstających, zawierały się w przedziale 0,82÷2,47 dB w wypadku pojazdów osobowych, od 0,29 dB do 2,88 dB – w wypadku wielocłonowych pojazdów ciężarowych i od 1,79 dB do 3,41 dB – w wypadku pojazdów ciężarowych kategorii 2a. Ustalono niepewność rozszerzoną wokół średniej  $L_{Amax}$  przy 95% poziomie ufności w zakresie: 0,18÷0,57 dB – w wypadku pojazdu osobowego, 0,26÷1,19 dB – w wypadku pojazdu ciężarowego kategorii 2b i 0,68÷1,54 dB – w wypadku pojazdu ciężarowego kategorii 2a.

W ramach analizy stwierdzono następujący średni procent wyników odstających w zależności od rodzaju nawierzchni:

- beton asfaltowy: 4,1% (pojazdy osobowe) i 4,8% (pojazdy ciężarowe kategorii 2b),
- SMA: 3% i 2,6%,
- nawierzchnie powierzchniowo utrwalone: 1,7% i 0%,
- nawierzchnie porowate i BBTM8: 5,9% i 8,7%,
- nawierzchnie betonowe: 2,9% i 6,8%,
- kostka kamienna: 14,2% i 0%.

Na niektórych nawierzchniach udział wyników odstających był jednak zdecydowanie wyższy od wartości średniej. Na przykład w wypadku pojazdów osobowych na nawierzchni porowatej na drodze krajowej DK50 wyniósł aż 17,4%. Było to związane z faktem, że w trakcie pomiarów poziomego hałasu od jadących pojazdów osobowych bardzo duży wpływ na ich przejazd miały pojazdy ciężarowe kategorii 2b. Pojazdy osobowe zbyt często przyspieszały lub hamowały. Stąd też wyniki pomiarów były obarczone dużymi błędami. Innym przykładem jest udział wyników odstających w odniesieniu do pojazdów osobowych na nawierzchni kostkowej (14,2%). Przyczyną tego był fakt ograniczenia prędkości do 50 km/h i zbyt duży wpływ układu napędowego i wydechowego na poziom hałasu. Oznacza to, że takie wyniki nie mogą być podstawą do oceny hałaśliwości badanych nawierzchni.

W odniesieniu do pojazdów ciężarowych kategorii 2a nie dokonano eliminacji wartości odstających, gdyż obliczone wartości  $S_e$ ,  $U$  i  $R^2$  były zdecydowanie „odległe” od wartości wymaganych (tab. 3.8). Stwierdzono przy tym, że obecnie na drogach w Polsce trudno jest w sposób jednoznaczny opisać poziom hałasu od pojazdów ciężarowych kategorii 2a, z uwagi na ich duże zróżnicowanie pod względem stanu technicznego oraz stosunkowo mały udział w ruchu na drogach ogólnodostępnych wyższych klas technicznych i drogach szybkiego ruchu. W związku z tym proponuje się, przy ustalaniu równoważnego poziomu dźwięku w otoczeniu tras drogowych, włączenie tej grupy pojazdów do pojazdów ciężarowych kategorii 2b.

Usuwanie ze zbioru danych wartości odstających eliminuje z analizy szczegółowej przypadkowe wyniki, które z różnych względów różnią się od wyników charakteryzujących większość pojazdów poruszających się na danej drodze. Przy prawidłowym prowadzeniu pomiarów, na drogach wyższych klas technicznych o płynnym ruchu, liczba wyników odstających jest niewielka i nie ma to istotnego wpływu na ustalone poziomy dźwięku w szerszym zakresie prędkości. Przy zdecydowanie mniejszej liczbie wyników od wymaganej w normie ISO 11819-1 usuwanie ze zbioru danych wyników odstających ma wpływ na ustaloną zależność funkcyjną pomiędzy poziomem hałasu i prędkością pojazdów. W związku z tym należy dążyć do uzyskania takiej liczby wyników (zbliżonej do podanej w normie), aby po usunięciu wartości odstających, statystyki  $S_e$  i  $U$  były mniejsze od wymaganych wartości.

Ustalenie (ewentualna korekta) minimalnej liczby pojazdów poszczególnych kategorii i wprowadzenie ewentualnych zmian w tym zakresie w zapisach obowiązującej normy powinno być przedmiotem dalszych, bardziej szczegółowych rozważań. Jak pokazują wyniki badań metodą SPB, w dotychczas prowadzonych pomiarach poziomu hałasu również w ramach projektów realizowanych przez konsorcja międzynarodowe, zbyt mało uwagi przywiązuje się do powiązania zakresu prędkości badanych pojazdów z ustalonymi prędkościami referencyjnymi dla danej kategorii drogi.



### 3.2.2.2. Porównywalność wyników pomiarów w różnych lokalizacjach

Jako jedną z wymienianych wad metody SPB jest jej „lokalny” charakter. Oznacza to, że uzyskane wyniki charakteryzują nawierzchnię jedynie w przekroju drogi, w którym dokonano pomiarów. W celu zbadania tego problemu sprawdzono, czy wyniki ustalone według metody SPB w jednym przekroju mogą charakteryzować hałaśliwość nawierzchni wykonanej w tej samej technologii na dłuższych odcinkach, a nawet w różnych lokalizacjach i na drogach o różnym znaczeniu. Analizie poddano wyniki pomiarów na nawierzchniach o zwartej strukturze w odniesieniu do sześciu przypadków. W ramach każdego przypadku porównywano hałaśliwość nawierzchni na dwóch odcinkach. Przed przeprowadzeniem pomiarów poziomu hałasu na porównywanych odcinkach dokonano oceny wizualnej stanu technicznego nawierzchni (ubytki ziaren kruszywa, spękania, wyboje, koleiny) oraz wykonano pomiary makrotekstury metodą objętościową lub przy wykorzystaniu urządzenia stacjonarnego CTM (*Circular Texture Meter*). Poniżej przedstawiono ogólną charakterystykę nawierzchni i warunków ruchu w ramach porównywanych sześciu przypadków.

W przypadkach I, II, III i V nawierzchnie na dwóch odcinkach nie różniły się między sobą pod względem stanu technicznego i makrotekstury. W przypadku IV występowały różnice związane ze stanem powierzchni warstwy ścieralnej, wynikające ze znaczenia drogi i jakości wykonania, a w przypadku VI – na jednym odcinku stwierdzono ubytki kruszywa, które zadecydowały o zmianie makrotekstury przy takim samym maksymalnym uziarnieniu kruszywa.

Charakterystyka przypadków:

- I – nawierzchnia z betonu asfaltowego AC12, droga krajowa DK1, odległość pomiędzy przekrojami badawczymi 10,180 km, obciążenie ruchem o takiej samej charakterystyce;
- II – nawierzchnia z mastyksu grysowego typu SMA11 wybudowana przez dwa różne przedsiębiorstwa, droga krajowa S8, odległość pomiędzy przekrojami badawczymi 8,890 km, obciążenie ruchem o takiej samej charakterystyce;
- III – nawierzchnia z mastyksu grysowego typu SMA11, droga wojewódzka DW780, odległość pomiędzy przekrojami badawczymi 5,750 km, obciążenie ruchem o takiej samej charakterystyce;
- IV – nawierzchnia z mastyksu grysowego typu SMA11, wykonana w tym samym roku, lecz przez różne przedsiębiorstwa, odcinki położone na drogach o różnym znaczeniu (droga wojewódzka DW780 i droga krajowa DK50), ruch o zdecydowanie różnej charakterystyce, różnice w stanie technicznym nawierzchni – na drodze wojewódzkiej zauważalne wypływy asfaltu, różnice w makroteksturze i megateksturze;

- V – nawierzchnia z betonu cementowego wykonana przez różne przedsiębiorstwa, teksturowana metodą odkrytego kruszywa EACC8, droga krajowa S8, odległość pomiędzy przekrojami badawczymi 208,200 km, obciążenie ruchem o takiej samej charakterystyce;
- VI – nawierzchnia z betonu cementowego wykonana przez różne przedsiębiorstwa, teksturowana metodą odkrytego kruszywa EACC8, droga krajowa S8, odległość pomiędzy przekrojami badawczymi 141,000 km, obciążenie ruchem o takiej samej charakterystyce, zróżnicowany stan techniczny nawierzchni na dwóch odcinkach – różne wartości *MPD* (1,20 mm i 1,90 mm).

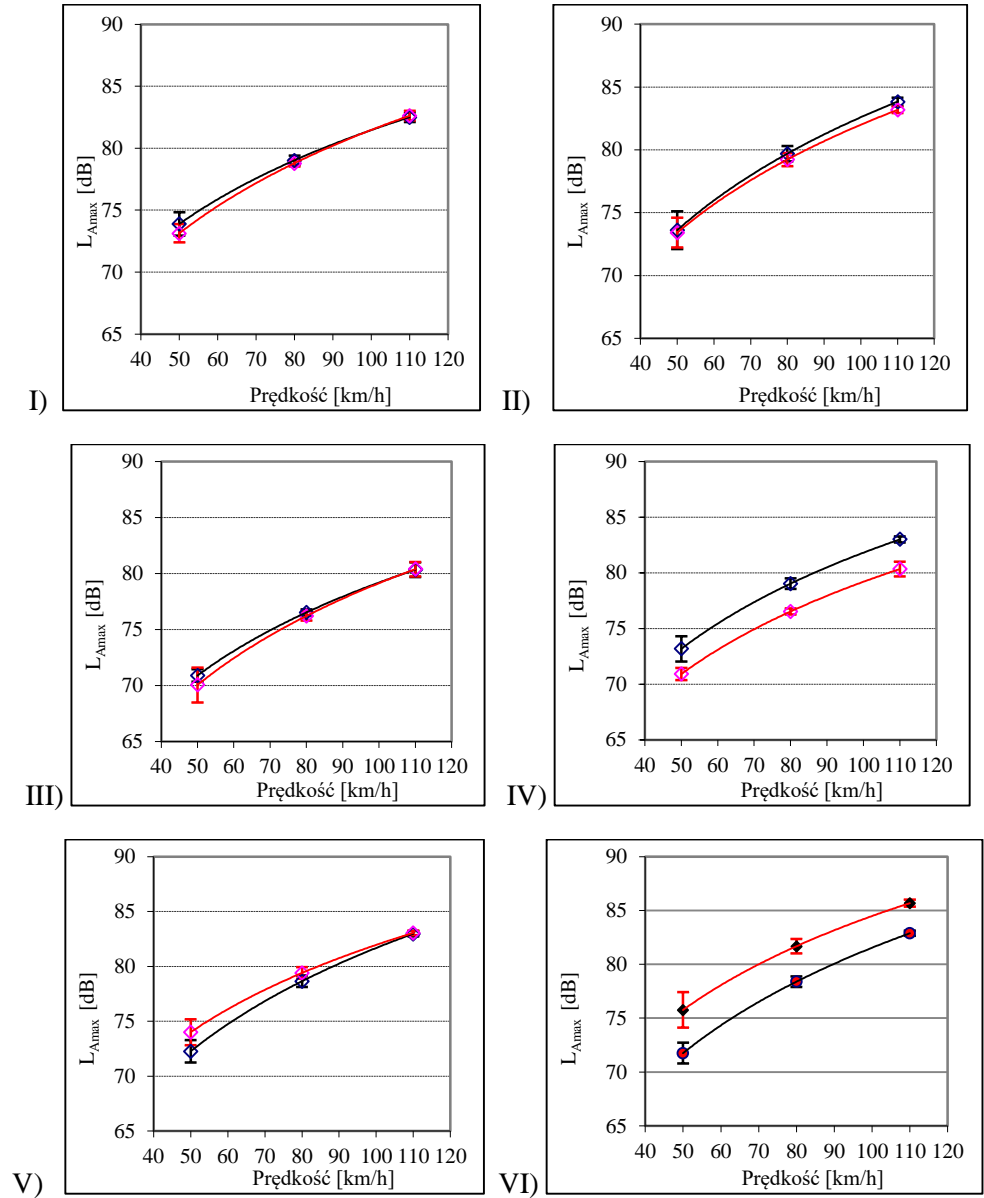
W tabeli 3.9 przedstawiono podsumowanie wyników pomiaru maksymalnego poziomu dźwięku według metody SPB, uzyskanych w sześciu przypadkach (odcinki „a” i „b”).

Tab. 3.9. Wyniki analizy porównawczej pomiarów poziomu hałasu w sześciu przypadkach

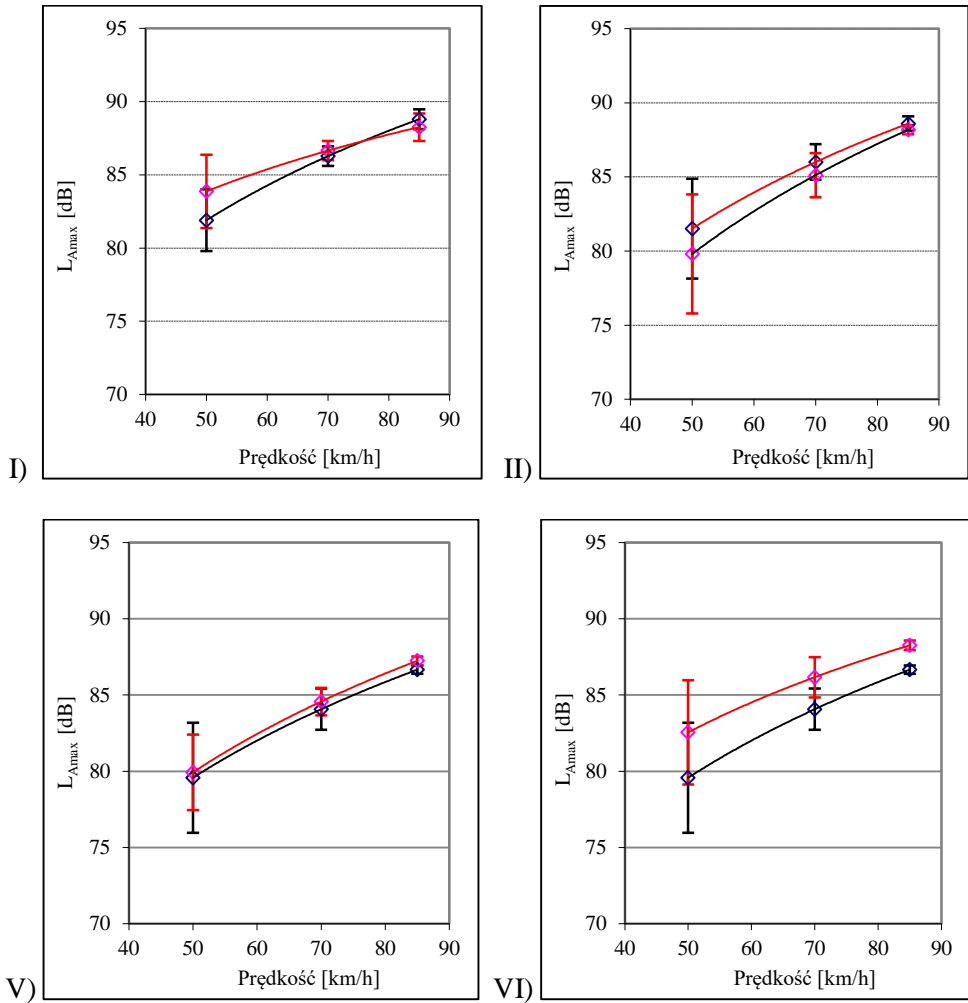
	I		II		III		IV		V		VI	
	Ia	Ib	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IVa	IVb	Va	Vb	VIa	VIb
Pojazdy osobowe												
<i>n</i>	97	141	69	63	131	80	137	61	87	49	87	80
$V_{sr}$	93,4	86,3	104,2	108,6	125,3	111,1	123,6	104,7	71,3	88,7	71,3	103,6
$L_{Amax,1}$ ( $V_{sr}$ )	80,7	79,7	83,1	83,0	84,8	83,2	84,5	85,1	75,2	77,6	75,2	82,3
$L_{Amax,1}$ (80)	79,0	78,8	79,7	79,2	78,7	79,4	78,4	81,7	76,5	76,2	76,5	79,0
$U(V_{sr})$	0,30	0,24	0,30	0,25	0,20	0,21	0,20	0,20	0,22	0,30	0,22	0,25
$U(80)$	0,37	0,26	0,61	0,52	0,53	0,52	0,50	0,66	0,27	0,41	0,27	0,47
Wielozłonowe pojazdy ciężarowe												
<i>n</i>	58	58	35	42	Z uwagi na niewielką liczbę pojazdów ciężarowych nie analizowano tych przypadków w odniesieniu do tej grupy pojazdów				81	64	81	58
$V_{sr}$	77,0	74,7	82,8	84,9					85,1	83,9	85,1	85,8
$L_{Amax,2b}$ ( $V_{sr}$ )	87,5	87,2	88,2	88,2					86,7	87,1	86,7	88,4
$L_{Amax,2b}$ (70)	86,3	86,7	86,0	85,1					84,1	84,6	84,1	86,2
$U(V_{sr})$	0,49	0,52	0,45	0,30					0,27	0,27	0,27	0,32
$U(70)$	0,67	0,65	1,20	1,49	1,35	0,91	1,35	1,32				

Porównanie wartości maksymalnego dźwięku od pojedynczo przejeżdżającego statystycznego pojazdu osobowego i statystycznego wielozłonowego pojazdu ciężarowego w odniesieniu do sześciu przypadków, przy prędkościach pojazdu osobowego: 50 km/h, 80 km/h i 110 km/h oraz przy prędkościach pojazdu ciężarowego: 70 km/h i 80 km/h.

rowego: 50 km/h, 70 km/h i 85 km/h wraz z 95% przedziałami ufności pokazano na rysunkach 3.6 i 3.7.



Rys. 3.6. Porównanie poziomów dźwięku – pojazd osobowy – przypadki I-VI



Rys. 3.7. Porównanie poziomów dźwięku – pojazd ciężarowy 2b – przypadki: I, II, V i VI

Pokazane wartości potwierdzają, że metoda SPB może być wykorzystana do opisu nawierzchni o zwartej strukturze pod względem akustycznym na dłuższych odcinkach, a nawet na różnych drogach tej samej kategorii, o nawierzchniach wykonanych w tej samej technologii. Warunkiem koniecznym jest jednak stwierdzenie porównywalności ich stanu technicznego (makrotekstura powierzchni), składu mieszanki mineralno-asfaltowej oraz techniki teksturowania betonów cementowych. Jednak zbyt duże przedziały ufnosci dla prędkości różnych od średniej,

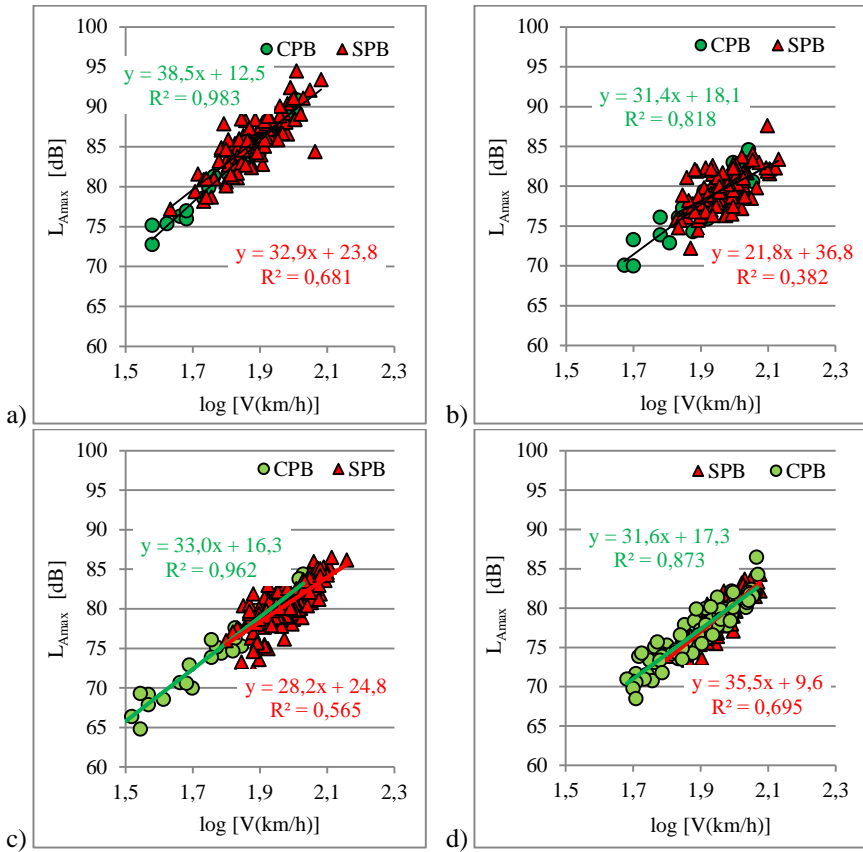
na poziomie istotności 0,05, w szczególności w odniesieniu do pojazdu ciężarowego, wskazują na potrzebę bardziej szczegółowej analizy uzyskiwanych wyników.

### **3.2.3. Wykorzystanie metody CPB w ocenie hałasliwości nawierzchni**

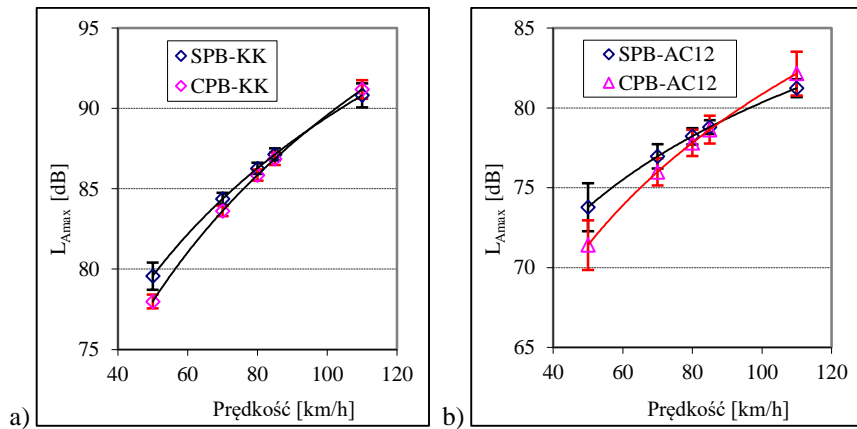
Ponieważ założenia metody CPB są zbliżone do założeń metody SPB, przeanalizowano możliwość wykorzystania metody CPB w ocenie hałasliwości nawierzchni drogowych. Przeprowadzono pomiary porównawcze na nawierzchniach z mastyksu grysowego, betonu asfaltowego i z kostki kamiennej. Jako pojazdy testowe na nawierzchni z betonu asfaltowego i z kostki kamiennej wykorzystano trzy pojazdy (Renault Laguna, Ford Mondeo, Fiat Siena), na nawierzchni z mastyksu grysowego typu SMA12 – cztery pojazdy (Renault Laguna, Ford Mondeo, Fiat Siena, samochód dostawczy Lublin), a na nawierzchni SMA11 – pięć pojazdów (Skoda Octavia, Toyota Avensis, Peugeot 307, Mitsubishi i Suzuki). Na tych samych nawierzchniach przeprowadzono badania hałasu metodą SPB. Wyniki pomiarów wykonanych w roku 2000 i 2002 wraz z analizą widmową dźwięków, także na mokrych i suchych nawierzchniach, były częściowo prezentowane w pracy [74].

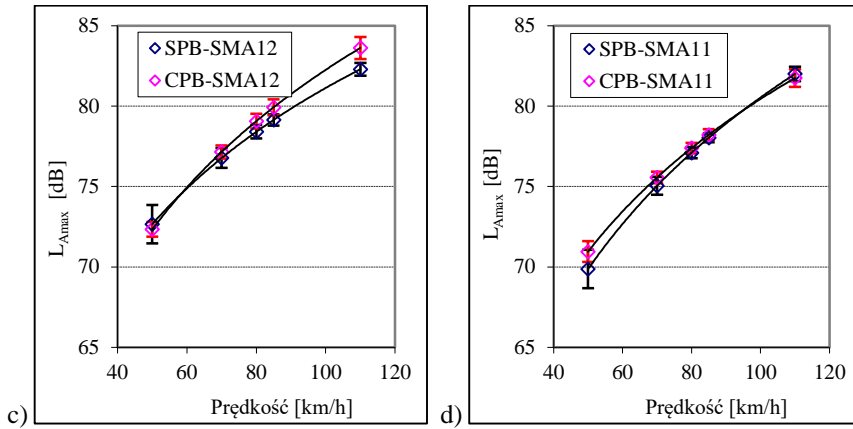
Na rysunku 3.8 pokazano porównanie maksymalnych poziomów hałasu według metody CPB i metody SPB oraz ustalone zależności regresyjne. Na rysunku 3.9 przedstawiono linie regresji wraz z 95% poziomami ufności odpowiadające poziomom hałasu przy prędkościach: 50, 70, 80, 85 i 110 km/h. W tabeli 3.10 podano wartości maksymalnego poziomu dźwięku od przejeżdżającego statystycznego pojazdu osobowego z prędkością 60, 70, 80, 90, 100 i 110 km/h oraz obliczone wartości różnic pomiędzy wynikami uzyskanymi według porównywanych metod. Dodatkowo obliczono wartości poziomu dźwięku w odniesieniu do średniej prędkości pojazdów badanych metodą SPB, która wynosiła: 77,8 km/h na nawierzchni z kostki kamiennej, 82,3 km/h na nawierzchni z betonu asfaltowego, 95,7 km/h na nawierzchni typu SMA12 i 91,5 km/h na nawierzchni SMA11.

Uwzględniając wyniki pomiarów i ich analizę, stwierdzono, że metoda CPB może być wykorzystywana w ocenie hałasliwości nawierzchni drogowych. Zaleca się przy tym zwrócić szczególną uwagę na dobór pojazdów testowych w metodzie CPB, reprezentujących pojazdy poruszające się po danej drodze. Proponuje się ustalenie zestawu pojazdów testowych, złożonego z minimum pięciu pojazdów. Metoda ta może być szczególnie przydatna w badaniach hałasu toczenia pojazdów przed oddaniem drogi do eksploatacji lub na etapie testowania pod względem akustycznym technologii wykonywania górnych warstw nawierzchni.



Rys. 3.8. Porównanie wyników pomiarów dźwięku metodami SPB i CPB: a) kostka kamienna, b) beton asfaltowy, c) SMA12,8, d) SMA11





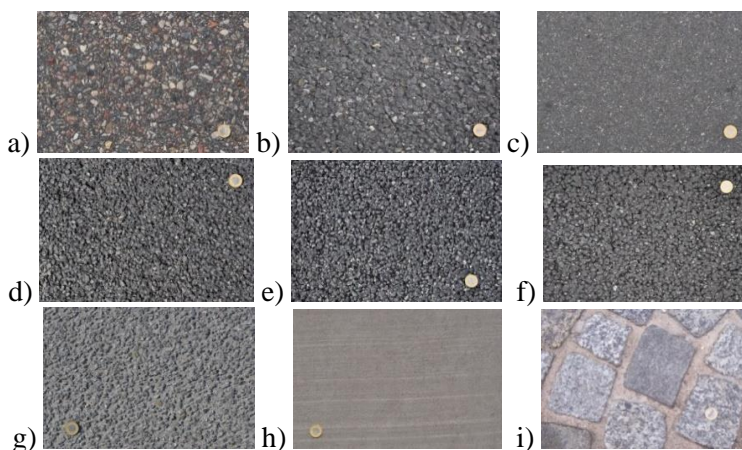
Rys. 3.9. Poziomy dźwięku według metod SPB i CPB na czterech nawierzchniach: a) kostka kamienna, b) beton asfaltowy AC12, c) SMA12, d) SMA11

Tab. 3.10. Porównanie poziomów hałasu ustalonych metodą CPB i SPB

V, km/h	$L_{Amax1}$ [dB(A)]		$\Delta L_{Amax1}$	$L_{Amax1}$ [dB(A)]		$\Delta L_{Amax1}$
	SPB	CPB	SPB-CPB	SPB	CPB	SPB-CPB
	Kostka kamienna			Beton asfaltowy		
60	82,3	81,0	1,3	75,6	73,9	1,7
70	84,5	83,5	1,0	77,0	76,0	1,0
80	86,4	85,8	0,6	78,3	77,9	0,4
90	88,1	87,7	0,4	79,4	79,5	- 0,1
100	89,6	89,5	0,1	80,4	80,9	- 0,5
110	-	-	-	81,3	92,2	- 0,9
$V_{sr}$ (wg SPB)	86,0	85,3	0,7	78,6	78,2	0,4
V, km/h	SMA12			SMA11		
60	74,9	75,0	- 0,1	72,7	73,5	- 0,8
70	76,8	77,2	- 0,4	75,1	75,6	- 0,5
80	78,5	79,1	- 0,6	77,2	77,4	- 0,2
90	79,9	80,8	- 0,9	79,0	79,1	- 0,1
100	81,2	82,3	- 1,1	80,6	80,5	0,1
110	82,4	83,7	- 1,3	82,1	81,8	0,3
$V_{sr}$ (wg SPB)	80,7	81,7	- 1,0	79,2	79,3	- 0,1

### 3.3. Hałaśliwość nawierzchni drogowych w Polsce

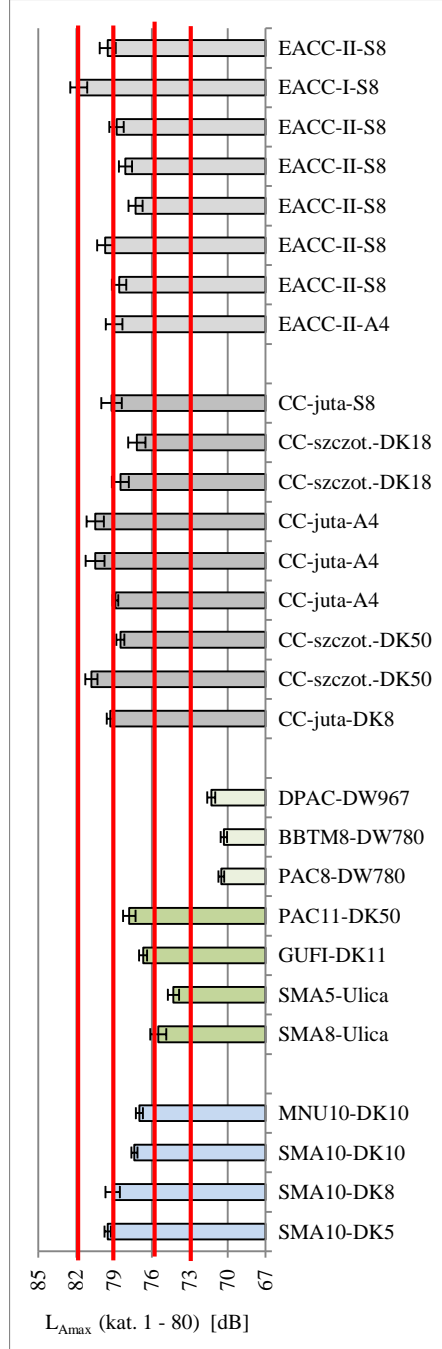
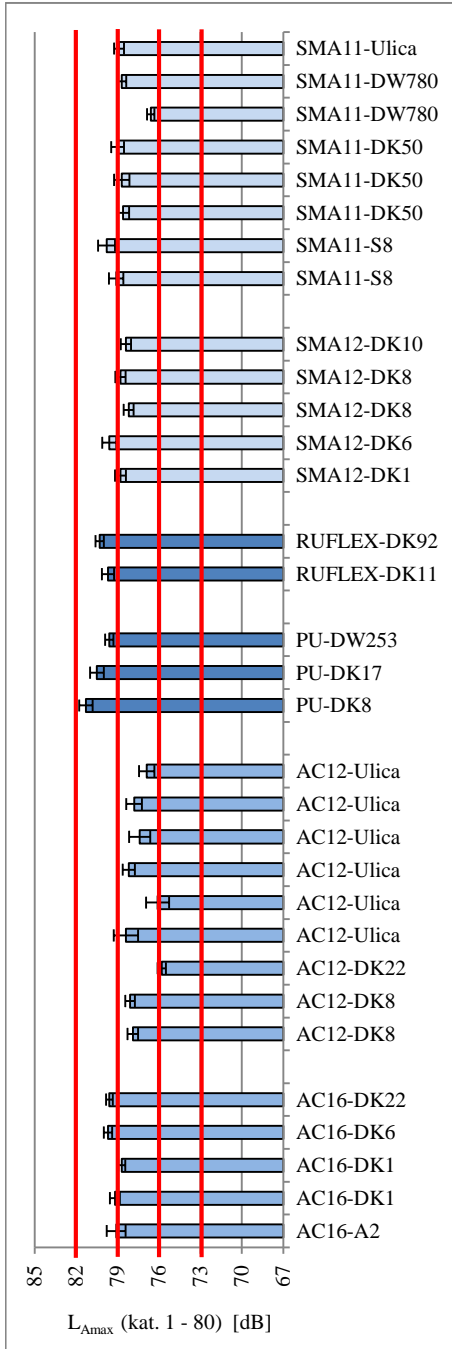
Podstawą oceny hałaśliwości nawierzchni drogowych w Polsce były pomiary wykonane metodą SPB przez zespół z Politechniki Białostockiej, uzupełnione wynikami według metody CPX, uzyskanymi przez zespół z Politechniki Gdańskiej. Badaniom poddano większość dotychczas stosowanych nawierzchni na drogach w Polsce, na ponad 50 odcinkach. Na niektórych odcinkach pomiary wykonywano dwukrotnie, trzykrotnie, a nawet czterokrotnie w celu ustalenia wpływu okresu eksploatacji nawierzchni na zmianę właściwości akustycznych. Widok przykładowych badanych nawierzchni pokazano na rysunku 3.10.



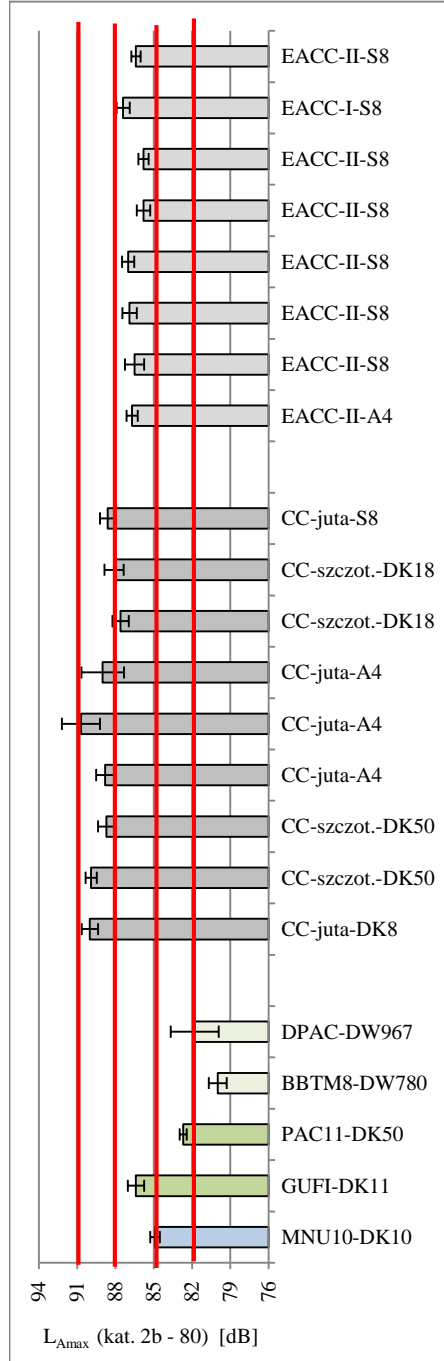
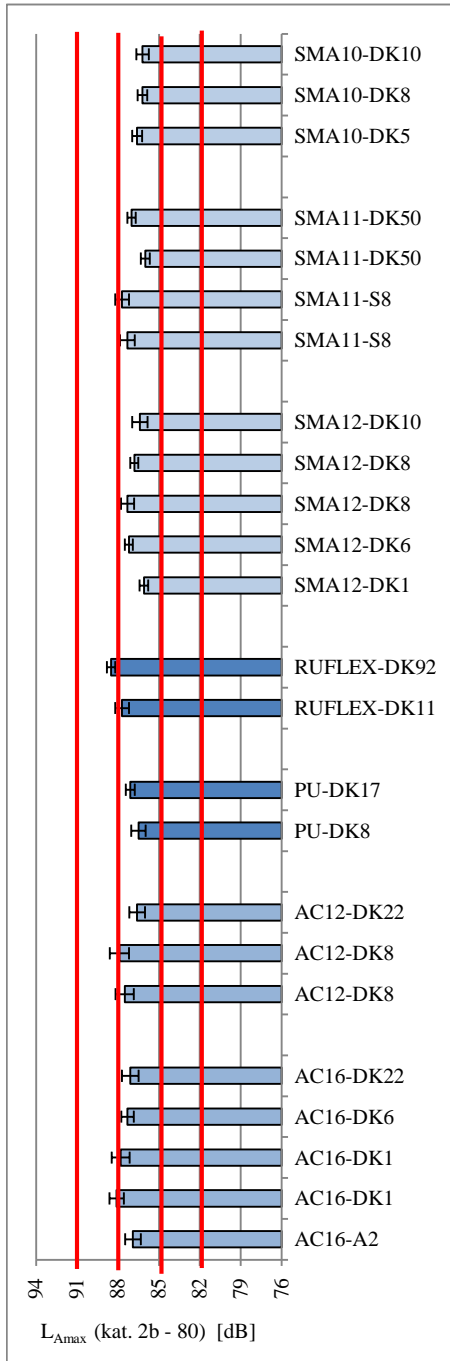
Rys. 3.10. Przykładowe nawierzchnie na badanych odcinkach: a) AC12, b) SMA11, c) SMA5, d) BBTM8, e) PAC8, f) DPAC8+16, g) EACC8, h) CC-teksturowanie juty, j) kostka kamienna

Na podstawie wyników z badań terenowych metodą SPB, zestawionych w Załączniku Z1, dokonano oceny hałaśliwości nawierzchni w Polsce. Na rysunkach 3.11 i 3.12 przedstawiono ustalone maksymalne poziomy dźwięku od pojedynczo przejeżdżającego statystycznego pojazdu osobowego i wielocłonowego pojazdu ciężarowego z prędkością 80 km/h wraz z pokazaniem wartości 95% przedziałów ufności. W wypadku nawierzchni porowatych i BBTM do analizy przyjęto poziomy hałas uzyskane w okresie do jednego roku od oddania drogi do użytkowania. Problem ich trwałości akustycznej w kolejnych latach jest przedmiotem rozważań w rozdziale 5 niniejszej monografii. Z analizy wyłączono nawierzchnie z kostki kamiennej z uwagi na ich zdecydowanie większą hałaśliwość oraz nawierzchnie z betonowej kostki brukowej z uwagi na ich stosowanie na odcinkach dróg o lokalnym znaczeniu, na ulicach w obszarze zabudowanym.





Rys. 3.11. Maksymalne poziomy dźwięku od przejazdu statystycznego pojazdu kat. I z prędkością 80 km/h wraz z 95% przedziałami ufności



Rys. 3.12. Maksymalne poziomy dźwięku od przejazdu statystycznego pojazdu ciężarowego kat. 2b z prędkością 80 km/h wraz z 95% przedziałami ufności

Na rysunku 3.11 zaznaczono przedziały odpowiadające klasom nawierzchni pod względem hałaśliwości, zgodnie z propozycją podaną w tabeli 3.13. W odniesieniu do pojazdu ciężarowego kategorii 2b zaznaczono także przedziały o zakresie 3 dB (rys. 3.12).

Zestawienie maksymalnych poziomów dźwięku od przejazdu statystycznego pojazdu osobowego i wielocłonowego pojazdu ciężarowego z prędkością 80 km/h na nawierzchniach dróg w Polsce stanowiło podstawę do sformułowania następujących wniosków.

1. Maksymalne różnice pomiędzy najbardziej hałaśliwymi i najcichszymi nawierzchniami, pomijając nawierzchnie kostkowe, osiągają wartość ponad 10 dB. Dotyczy to zarówno pojazdu osobowego, jak i pojazdu ciężarowego kategorii 2b. W ramach tych samych technologii są notowane różnice o wartości powyżej 4 dB.
2. W wypadku pojazdu osobowego najmniej korzystnym rozwiązaniem okazały się nawierzchnie powierzchniowo utrwalane i nawierzchnie betonowe teksturowane tkaniną jutową i metodą szczotkowania o dłuższym okresie użytkowania, a w wypadku pojazdów ciężarowych – nawierzchnie betonowe o drobnej i bardzo drobnej makroteksturze (np. teksturowane tkaniną jutową).
3. Najkorzystniejszym rozwiązaniem z akustycznego punktu widzenia w grupie nawierzchni asfaltowych są nawierzchnie porowate, cienkie warstwy z betonu asfaltowego typu BBTM8 oraz nawierzchnie z mastyksu grysowego typu SMA8 i SMA5.
4. Nawierzchnie z betonu asfaltowego AC16 i AC12 oraz z mastyksu grysowego SMA12, SMA11 i SMA10 charakteryzują się zbliżoną hałaśliwością zarówno z punktu widzenia pojazdu osobowego, jak i pojazdu ciężarowego.
5. Nawierzchnie betonowe teksturowane metodą odkrytego kruszywa, tkaniną jutową i metodą szczotkowania, będące w dobrym stanie technicznym, nie różnią się istotnie pod względem hałaśliwości w odniesieniu do pojazdu osobowego, a w wypadku pojazdu ciężarowego zdecydowanie korzystniejszym rozwiązaniem są nawierzchnie teksturowane techniką odkrytego kruszywa.
6. Uwzględniając przedstawioną propozycję klasyfikacji nawierzchni (tab. 3.13), zdecydowaną większość badanych nawierzchni należy zaliczyć do nawierzchni o normalnej hałaśliwości (klasa NH). Do klasy NC (nawierzchnie ciche) należą nawierzchnie typu PAC8, BBTM i DPAC8+16 o okresie eksploatacji do jednego roku, a do klasy o zredukowanej hałaśliwości (ZH) – nawierzchnie typu SMA5 i SMA8. Nawierzchnie powierzchniowo utrwalane, nawierzchnie typu Reflex oraz niektóre z rozwiązań z grupy nawierzchni betonowych stanowią klasę o podwyższonej hałaśliwości (PH).

W pracach [145, 146] przedstawiono wyniki pomiaru hałaśliwości nawierzchni według metody CPX w Polsce i w innych krajach Europy. Większość z podanych wyników uzyskano w ramach prac rozwojowych i projektów badawczych, realizowanych w różnych okresach czasu, na nawierzchniach o różnym okresie eksploatacji, wykonanych przez różne przedsiębiorstwa. Na ich podstawie, w tabeli 3.11, dokonano porównania hałaśliwości nawierzchni na drogach w Polsce i w innych krajach. Podano wartości różnic pomiędzy poziomami hałasu w ramach tych samych technologii ( $\Delta 1$ ) i różnice pomiędzy średnią wartością poziomu hałasu w ramach danej technologii i nawierzchnią typu SMA11 (na drogach w Polsce) oraz nawierzchnią z betonu asfaltowego DAC11 (na drogach w innych krajach Europy) ( $\Delta 2$ ).

Na podstawie przedstawionych wartości poziomów dźwięku według metody CPX oraz obliczonych różnic  $\Delta 1$  i  $\Delta 2$  sformułowano następujące wnioski.

1. Na nawierzchniach w Polsce i w innych krajach Europy występują znaczne różnice w generowanych poziomach hałasu opona/nawierzchnia w ramach tej samej technologii; rozrzut wyników jest większy przy większej liczbie badanych odcinków.
2. Nawierzchnie na drogach w Polsce i w innych krajach Europy, w przypadku tych samych technologii, są na ogół zbliżone do siebie pod względem akustycznym – szczegółowe porównania nie były możliwe z uwagi na brak pełnych danych na temat parametrów technicznych wbudowanych materiałów, stanu technicznego nawierzchni i okresu ich eksploatacji.
3. Wśród badanych nawierzchni najcichszą okazały się nawierzchnie typu PERS (w Polsce o 10 dB w stosunku do nawierzchni referencyjnej, a w innych krajach – o 8,7 dB), a bardzo korzystnymi właściwościami akustycznymi charakteryzują się także nawierzchnie z asfaltu porowatego (jedno- i dwuwarstwowe) i cienkie warstwy z betonu asfaltowego.
4. Do najbardziej hałaśliwych zaliczają się nawierzchnie kostkowe, a także nawierzchnie asfaltowe o maksymalnym uziarnieniu kruszywa 16 mm.
5. Nawierzchnie z betonu asfaltowego i z mastyksu grysowego, przy zastosowaniu zbliżonego uziarnienia kruszywa, są porównywalne pod względem akustycznym.
6. Większa hałaśliwość nawierzchni z betonu cementowego na drogach w innych krajach Europy wynika z faktu, że na drogach w Polsce badano głównie nawierzchnie betonowe teksturowane techniką odkrytego kruszywa wykonane w ostatnich latach.

Tab. 3.11. Zestawienie wyników badań metodą CPX

Oznaczenie	Nazwa	Polska						Inne kraje Europy					
		n	CPXI(80) [dB(A)]			Różnica		n	CPXI(80) [dB(A)]			Różnica	
			min	max	śred.	Δ1*)	Δ2*)		min	max	śred.	Δ1*)	Δ2*)
DAC16	Beton asfaltowy	13	96,7	101,3	98,5	4,6	-0,2	19	97,8	101,4	99,9	3,6	0,9
DAC12		21	97,4	101,7	99,3	4,0	0,6	-	-	-	-	-	-
<b>DAC11</b>	<b>Beton asfaltowy – nawierzchnia referencyjna</b>	<b>2</b>	<b>96,8</b>	<b>96,8</b>	<b>96,8</b>	<b>0,0</b>	<b>-1,9</b>	<b>31</b>	<b>96,6</b>	<b>102,2</b>	<b>99,0</b>	<b>5,6</b>	<b>0</b>
DAC8	Beton asfaltowy	-	-	-	-	-	-	15	96,1	99,0	97,5	2,9	-1,5
SMA16	Mastyks grysowy	-	-	-	-	-	-	83	99,0	102,7	100,5	3,7	1,5
SMA12		13	97,1	100,5	99,2	3,4	0,5	-	-	-	-	-	-
<b>SMA11</b>	<b>SMA – nawierzchnia referencyjna</b>	<b>13</b>	<b>97,4</b>	<b>100,1</b>	<b>98,7</b>	<b>2,7</b>	<b>0</b>	26	97,6	100,6	99,4	3,0	0,4
SMA10	Mastyks grysowy	4	98,2	98,5	98,4	0,3	-0,3	-	-	-	-	-	-
SMA8		18	95,7	99,3	97,2	3,6	-1,5	15	94,4	100,2	97,9	5,8	-1,1
SMA5		6	95,6	99,4	97,6	3,8	-1,1	4	95,5	96,7	96,2	1,2	-2,8
SMA8 LA	SMA o obniżonej hałaśliwości	8	93,4	98,4	96,7	5,0	-2,0	-	-	-	-	-	-
BBTM16	Cienka warstwa o nieciągłym uziarnieniu	-	-	-	-	-	-	8	99,1	102,3	100,4	3,2	1,4
BBTM11		-	-	-	-	-	-	17	98,8	101,1	100,0	2,3	1,0
BBTM8		23	93,5	97,6	95,3	4,1	-3,4	6	96,2	99,3	98,3	3,1	-0,7
BBTM6		-	-	-	-	-	-	3	96,1	98,8	97,6	2,7	-1,4
BBTM5		11	92,1	96,5	93,5	4,4	-5,2	-	-	-	-	-	-
PAC16	Asfalt porowaty 1 warstwa	-	-	-	-	-	-	14	96,1	102,0	99,6	5,9	0,6
PAC11		4	97,5	98,7	98,0	1,2	-0,7	56	93,7	100,3	96,8	6,6	-2,2
PAC8		9	93,5	95,9	94,5	2,4	-4,2	31	92,0	101,3	97,6	9,3	-1,4
DPAC16+16	Asfalt porowaty 2 warstwy	-	-	-	-	-	-	6	96,7	97,5	96,6	0,8	-2,4
DPAC11+16		-	-	-	-	-	-	105	91,4	101,0	95,6	9,6	-3,4
DPAC8+16	Asfalt porowaty 2 warstwy	1	93,2	93,2	93,2	-	-5,5	3	91,1	98,0	95,1	6,9	-3,9
RA16	MMA modyfikowana gumą	-	-	-	-	-	-	8	99,4	101,7	100,7	2,3	1,7
RA11		1	98,4	98,4	98,4	-	-0,3	23	96,0	101,0	99,1	5,0	0,1
RA8		10	96,5	99,8	97,9	3,3	-0,8	4	97,6	98,4	97,9	0,8	-1,1
MNU11	MMA – nieciągle uziarnienie	3	98,8	101,2	99,7	2,4	1,0	-	-	-	-	-	-
Remix	MMA z granulatem gumowym	-	-	-	-	-	-	5	95,2	100,8	98,7	5,6	-0,3
GA	Gussasphalt	-	-	-	-	-	-	5	96,2	98,0	97,2	1,8	-1,8
SS	Slurry seal	4	98,8	100,0	99,4	1,2	0,7	4	94,7	98,6	97,3	3,9	-1,7
SD	Powierzchniowe utrwalenie	-	-	-	-	-	-	26	96,5	100,7	98,9	4,2	-0,1
CC/EACC	Beton cementowy	10	97,2	100,0	97,9	2,8	-0,8	21	95,8	102,3	99,6	6,5	0,6
PCC	Beton cementowy porowaty	-	-	-	-	-	-	3	94,0	96,4	94,8	2,4	-4,2
CB	Betonowa kostka brukowa	3	100,6	104,1	102,9	3,5	4,2	-	-	-	-	-	-
PS	Kostka kamienna	3	106,1	107,0	106,4	0,9	7,7	-	-	-	-	-	-
ISO 10844	Nawierzchnia referencyjna ISO	-	-	-	-	-	-	2	94,0	95,0	94,5	1,0	-4,5
PERS	Nawierzchnia poroelastyczna	1	88,7	88,7	88,7	-	-10	11	89,1	92,2	90,3	3,1	-8,7

\*) Δ1 – różnica pomiędzy wartością maksymalną i minimalną w ramach technologii; Δ2 – różnica pomiędzy średnią wartością w ramach danej technologii i na nawierzchni referencyjnej

Podsumowując wyniki maksymalnego poziomu dźwięku ustalone według metody SPB i metody CPX, stwierdzono, że technologie wykonywania warstwy ścieralnej w Polsce i w innych krajach Europy na ogół są zbliżone pod względem akustycznym. Jednak w ramach poszczególnych technologii, przy uwzględnieniu kategorii pojazdów, zauważa się dość znaczące różnice. Szczególnie zaskakujące są duże różnice w poziomach dźwięku w ramach tej samej technologii i w ramach tego samego kraju. Nie ułatwia to dokonania jednoznacznych ustaleń i opracowania zaleceń pod kątem budowy nawierzchni obniżających poziom hałasu od ruchu drogowego.

#### **3.4. Propozycja klasyfikacji nawierzchni drogowych pod względem hałaśliwości**

Nawierzchnie drogowe są klasyfikowane według różnych kryteriów. Znany jest podział na nawierzchnie podatne, półsztywne i sztywne. Inny podział nawiązuje do materiałów stosowanych w górnej warstwie nawierzchni (asfaltowe, z betonu cementowego, kostkowe). Znane są różne typy mieszanek mineralno-asfaltowych czy technik teksturowania nawierzchni betonowych. Duże zróżnicowanie nawierzchni drogowych pod względem akustycznym spowodowało, że w niektórych krajach opracowano ich klasyfikację z punktu widzenia hałaśliwości.

Do najbardziej jednoznacznych zapisów w tym zakresie należy zaliczyć klasyfikacje opracowane we Francji i na Węgrzech [46]. We Francji nawierzchnie drogowe są zaliczane do jednej z 3 klas: R1, R2 i R3 [92]. Dla każdej klasy podano ustalone zależności pomiędzy maksymalnym poziomem dźwięku od przejeżdżającego pojazdu osobowego a logarytmem ze stosunku prędkości do prędkości referencyjnej. Na Węgrzech wyróżniono pięć klas pod względem hałaśliwości: A, B, C, D i E.

W innych krajach nie ustalono w sposób tak jednoznaczny klas nawierzchni, a określono współczynniki korygujące hałaśliwość poszczególnych technologii w porównaniu z nawierzchnią referencyjną lub bezpośrednio w odniesieniu do równoważnego poziomu dźwięku (np. kraje skandynawskie w metodzie NORD 2000, Austria, Belgia, Niemcy, Wielka Brytania).

W pracy [74], w oparciu o wyniki pomiarów hałasu metodą SPB i metodą CPX uzyskane do 2005 roku, przedstawiono propozycję podziału nawierzchni na 5 klas. Zaletą tej klasyfikacji jest przyjęcie dwóch równoważnych kryteriów:  $L_{Amax}l(80)$  (nazwanego wskaźnikiem hałaśliwości) i indeksu  $CPXI(80)$ . Propozycję klasyfikacji nawierzchni pod względem hałaśliwości, przy uwzględnieniu wyini-

ków badań poziomu hałasu wykonanych przez zespoły z Politechniki Białostockiej i Politechniki Gdańskiej, przedstawił także Sybilski z zespołem, proponując podział na 3 klasy (cichą, normalną, głośną) [216].

Mając na uwadze zalecenia dotyczące wpływu nawierzchni na prognozowanie hałasu metodą CNOSSOS-EU oraz prace wykonane w ramach projektu ROSANNE na rzecz dostosowania wyników metody CPX do metody CNOSSOS-EU, uznano, że podejście zaproponowane w pracy [74] było właściwe. Jednak w związku ze zmianą opon testowych w metodzie CPX oraz uwzględniając wyniki badań hałaśliwości nawierzchni drogowych w Polsce, przeprowadzonych przez autora monografii po 2005 roku, proponuje się wprowadzenie następujących zmian w odniesieniu do wcześniej zaprezentowanej klasyfikacji:

- przyjęcie zakresu 3 dB dla każdej z zaproponowanych klas hałaśliwości nawierzchni,
- przyjęcie wartości  $CPXI(80)$  (według metody CPX na podstawie pomiarów z wykorzystaniem opon testowych P1 i H1) i  $L_{Amax1}(80)$  (według metody SPB) jako równoważnych wskaźników oceny hałaśliwości nawierzchni.

Przedstawiona propozycja klasyfikacji dotyczy nawierzchni w dobrym stanie technicznym, spełniających wymagania odnośnie do równości, bez deformacji w przekroju podłużnym i w przekroju poprzecznym. W tabeli 3.12 przedstawiono uaktualnienie wcześniej zaproponowanej klasyfikacji nawierzchni pod względem hałaśliwości. Podane w normach ISO 11819-1 i ISO 11819-2 wartości odchylenia standardowego reszt ( $S_e$ ) i niepewności rozszerzonej wokół średniej ( $U$ ) przy 95% przedziale ufności są uzasadnieniem na przyjęcie zakresu 3 dB dla każdej klasy. W takiej sytuacji proponowanie większej liczby klas nawierzchni nie ma uzasadnienia.

Tabela 3.12. Propozycja klasyfikacji nawierzchni drogowych pod względem hałaśliwości

Klasa/symbol	Poziom dźwięku [dB(A)]		Przykłady warstw ściernych
	$L_{Amax1}(80)$	$CPXI(80)$	
Nawierzchnie ciche – <b>NC</b>	$\leq 73,0$	$\leq 93,0$	PAC8, BBTM8 i DPAC8+16 (nowe nawierzchnie), PERS
Nawierzchnie o obniżonej hałaśliwości – <b>ZH</b>	$73,1 \div 76,0$	$93,1 \div 96,0$	SMA5, SMA8, SMA8 LA, PAC8 i BBTM8 (po 2-3 latach eksploatacji)
Nawierzchnie o normalnej hałaśliwości – <b>NH</b>	$76,1 \div 79,0$	$96,1 \div 99,0$	AC11, SMA10, SMA11, EACC8, CC – teksturowane tkaniną jutową i metodą szcztokowania
Nawierzchnie o podwyższonej hałaśliwości – <b>PH</b>	$79,1 \div 82,0$	$99,1 \div 102,0$	SMA16, PU, Reflex, CC – teksturowane metodą rowkowania
Nawierzchnie o nadmiernej hałaśliwości – <b>NNH</b>	$> 82,0$	$> 102,0$	kostka kamienna, betonowa kostka brukowa, nawierzchnia betonowa poprzecznie rowkowana

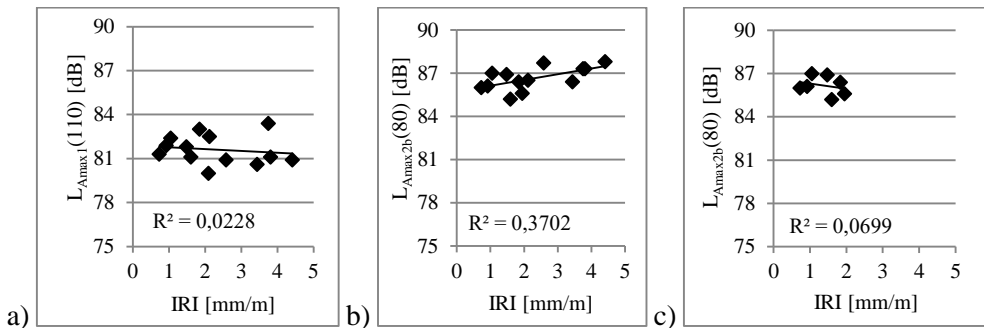
Biorąc pod uwagę możliwość badania maksymalnego poziomu dźwięku od jeżdżących pojazdów metodą kontrolowanego przejazdu CPB, tak opracowana klasyfikacja dopuszcza wykorzystanie tej metody w celu określenia hałaśliwości nawierzchni przed oddaniem odcinka drogi do użytkowania. Przedstawiona klasyfikacja może być przydatna planistom, projektantom układów drogowych oraz technologom na etapie wyboru rozwiązań w zakresie warstw ścieralnych z uwzględnieniem charakterystyki obszarów w otoczeniu drogi samochodowej.



## 4. Wpływ tekstury na poziom hałasu toczenia pojazdów samochodowych

### 4.1. Charakterystyki powierzchni jezdni a poziom hałasu

Ukształtowanie powierzchni jezdni oraz stan techniczny nawierzchni mają ważne znaczenie zarówno z punktu widzenia komfortu jazdy, bezpieczeństwa ruchu, ochrony środowiska, jak i kosztów eksploatacji pojazdów samochodowych. Deformacje w profilu podłużnym są opisywane falami o długości powyżej 50 m i nie mają istotnego wpływu na poziom hałasu od przejeżdżających pojazdów. W ramach badań własnych ustalono, że na nawierzchniach o wartości międzynarodowego wskaźnika równości  $IRI < 2$  mm/m wpływ równości na maksymalny poziom dźwięku (według metody SPB) generowanego przez jadące pojazdy osobowe i pojazdy ciężarowe jest nieistotny (rys. 4.1). Przy uwzględnieniu nierówności o wskaźniku  $IRI$  do 5 mm/m stwierdzono wpływ równości na poziom hałasu od przejeżdżających pojazdów ciężarowych i brak istotnego wpływu od poruszających się pojazdów osobowych.

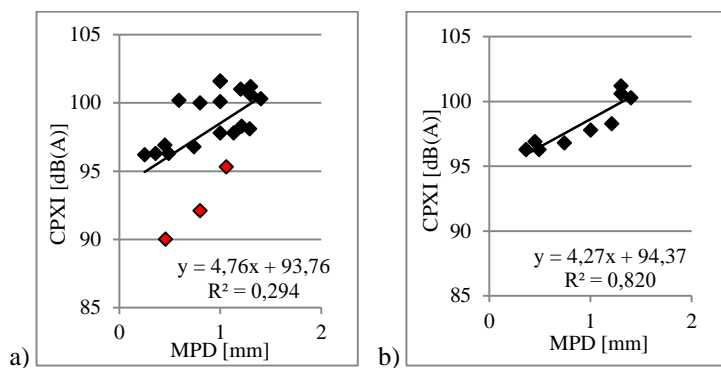


Rys. 4.1. Wpływ równości na poziom hałasu: a) pojazd osobowy, b) pojazd kategorii 2b –  $IRI < 5,0$ ; c) pojazd kategorii 2b –  $IRI < 2,0$

Nierówności nawierzchni odpowiadające teksturze dzielą się na [101]: megateksturę (nierówności o długości fali od 50 mm do 500 mm i o amplitudzie od 0,1 mm do 50,0 mm), makroteksturę (długość fali od 0,5 mm do 50,0 mm i amplituda od 0,1 mm do 20,0 mm) i mikroteksturę (długość fali do 0,5 mm i amplituda

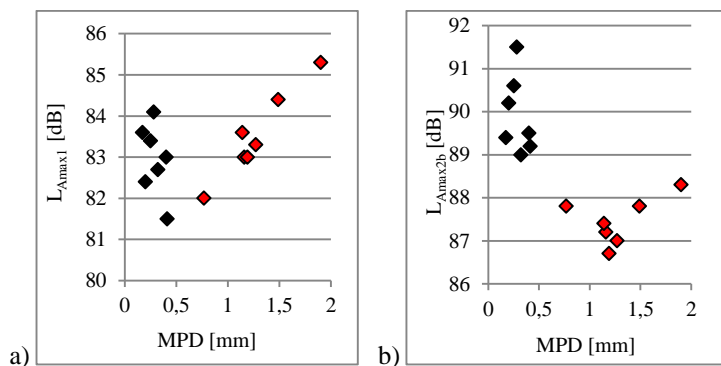
#### 4. Wpływ tekstury na poziom hałasu toczenia pojazdów samochodowych

do 0,2 mm). Na rysunku 4.2 pokazano wpływ makrotekstury (*MPD*) na poziom dźwięku ustalony według metody CPX przy uwzględnieniu nawierzchni asfaltowych i nawierzchni betonowych. Stwierdzono potrzebę niezależnego badania wpływu makrotekstury nawierzchni o zwartej strukturze i nawierzchni porowatych na poziom hałasu opona/nawierzchnia [74].



Rys. 4.2. Wpływ makrotekstury na poziom hałasu: a) nawierzchnie asfaltowe i betonowe (kolorem czerwonym wyróżniono nawierzchnie porowate), b) nawierzchnie asfaltowe o zwartej strukturze

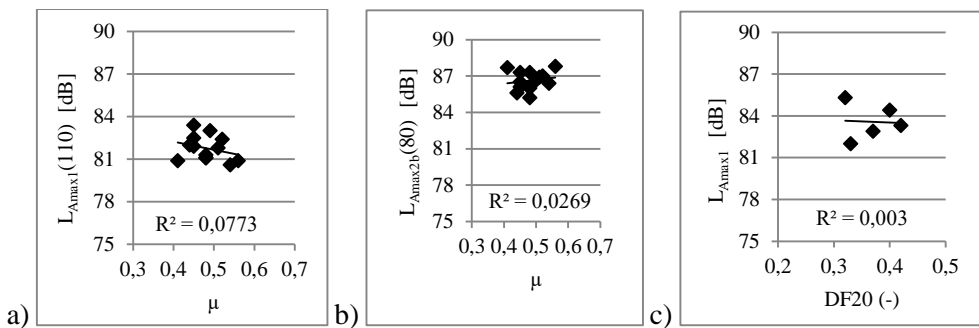
Wyniki badań maksymalnego poziomu dźwięku na nawierzchniach betonowych metodą SPB potwierdziły zróżnicowany wpływ techniki teksturowania i głębokości makrotekstury na poziom hałasu zarówno pojazdu osobowego, jak i pojazdu ciężarowego (rys. 4.3). Nawierzchnie betonowe z odkrytym kruszywem odróżniają się pod tym względem od nawierzchni teksturowanych innymi technikami.



Rys. 4.3. Makrotekstura nawierzchni betonowej a poziom hałasu: a) pojazd osobowy, b) pojazd ciężarowy kategorii 2b (kolor czerwony – nawierzchnie betonowe teksturowane metodą odkrytego kruszywa)

Makrotekstura wraz z mikroteksturą mają istotny wpływ na właściwości przeciwoślizgowe nawierzchni drogowych. Problem ten był przedmiotem wielu badań także w naszym kraju, a ich wyniki są podane między innymi w pracach [72, 102, 243, 244]. Rzeźba bieżnika opon samochodowych i makrotekstura tworzą „kanały” do odprowadzenia wody, umożliwiając tym samym lepszy kontakt w płaszczyźnie opony z nawierzchnią. Mackiewicz i in. omówili wpływ technologii wykonania nawierzchni betonowych na ich makroteksturę i równość [136].

W ramach przeprowadzonych badań zarówno na nawierzchniach asfaltowych, jak i betonowych nie stwierdzono istotnego wpływu współczynnika tarcia ustalonego według zestawu pomiarowego SRT-3, jak też przy wykorzystaniu urządzenia stacjonarnego DFT na całkowity poziom dźwięku od przejeżdżających pojazdów (rys. 4.4). Jednak, jak wykazano w rozdziale 3, nawierzchnia betonowa teksturovana tkaniną jutową (o bardzo drobnej teksturze) bardzo niekorzystnie wpływa na hałas od pojazdów ciężarowych jadących z prędkością powyżej 80 km/h. Oznacza to, że problem wpływu mikrotekstury nawierzchni wymaga bardziej szczegółowych badań, głównie z uwzględnieniem analizy widmowej dźwięków.



Rys. 4.4. Zależność pomiędzy poziomem hałasu (według metody SPB) a współczynnikiem tarcia: a) nawierzchnia asfaltowa – pojazd osobowy, b) nawierzchnia asfaltowa – pojazd ciężarowy, c) nawierzchnia betonowa – pojazd osobowy

Badania wpływu dylatacji, równości i makrotekstury nawierzchni betonowych na poziom hałasu według metody OBSI były wykonywane w projekcie „Ochrona przed hałasem drogowym” [220, 221]. Ustalone przez autorów zależności nie mogą być jednak bezpośrednio porównywane z wynikami uzyskanymi według metody SPB z uwagi na zdecydowanie różne założenia metod pomiarowych. Dotyczy to w szczególności dylatacji i równości nawierzchni, gdyż inne są mechanizmy generowania dźwięków przez oponę, a inne przez pojazd samochodowy w całości (głównie, gdy dotyczy to pojazdu ciężarowego).

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że obniżenie poziomu hałasu od poruszających się pojazdów na nawierzchniach asfaltowych o zwartej strukturze i na nawierzchniach betonowych teksturowanych techniką odkrytego kruszywa zależy głównie od makrotekstury ich powierzchni.

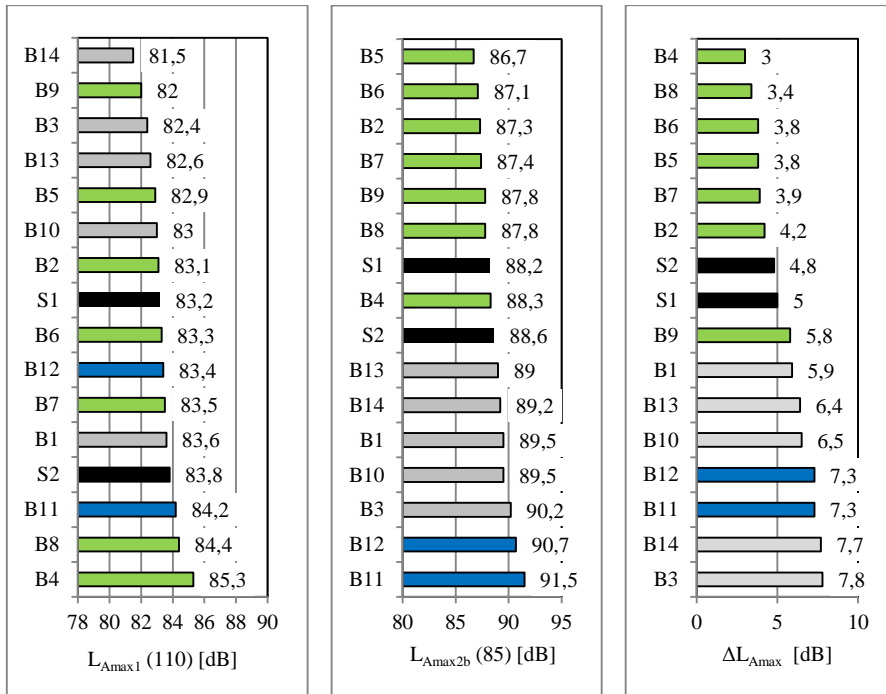
## 4.2. Wpływ techniki teksturowania na hałaśliwość nawierzchni betonowych na drogach w Polsce

Badania wpływu techniki teksturowania nawierzchni betonowych na poziom hałasu według metody SPB przeprowadzono na drogach krajowych S8, DK18, DK50 i A4. W tabeli 4.1 przedstawiono lokalizację przekrojów badawczych, informację o technice teksturowania, makroteksturze nawierzchni (*MPD*), okresie użytkowania drogi oraz wartości maksymalnego poziomu dźwięku od przejeżdżającego statystycznego pojazdu osobowego z prędkością 110 km/h i statystycznego wieloosobowego pojazdu ciężarowego z prędkością 85 km/h. W celu porównania hałaśliwości nawierzchni betonowych z hałaśliwością nawierzchni z mastyksu grysowego w tabeli 4.1 podano wyniki uzyskane na dwóch nawierzchniach typu SMA11. Szczegółową charakterystykę przekrojów badawczych i nawierzchni oraz wyniki pomiarów poziomu dźwięku podano w pracach [75, 77].

Tab. 4.1. Lokalizacja i charakterystyki badanych nawierzchni betonowych

Odcinek /Nr drogi	Lokalizacja	<i>MPD</i> [mm]	Lata eksploatacji	$L_{Amax,1}$ – 110 km/h [dB]	$L_{Amax,2b}$ – 85 km/h [dB]
Nawierzchnie teksturowane techniką przeciągania tkaniny jutowej					
B1/DK50	km 74+410P	0,17	12	83,6	89,5
B3/S8	km 345+970L	0,20	12	82,4	90,2
B10/A4	km 56+700L	0,40	15	83,0	89,5
B13/DK18	km 56+650L	0,32	9	82,6	89,0
B14/DK18	km 66+220L	0,41	9	81,5	89,2
Nawierzchnie teksturowane techniką odkrytego kruszywa					
B2/S8	km 401+400L	1,16	3	83,1	87,3
B4/S8	km 334+220L	1,90	3	85,3	88,3
B5/S8	km 193+200L	1,19	1	82,9	86,7
B6/S8	km 142+600P	1,27	1	83,3	87,1
B7/S8	km 158+190P	1,14	1	83,5	87,4
B8/S8	km 162+200L	1,49	1	84,4	87,8
B9/S8	km 170+100P	0,77	1	82,0	87,8
Nawierzchnie teksturowane techniką szczotkowania					
B11/A4	km 100+250L	0,28	15	84,2	91,5
B12/A4	km 148+450L	0,45	15	83,4	90,7
Nawierzchnie asfaltowe (SMA11)					
S1/S8	km 618+800P	1,17	3	83,2	88,2
S2/S8	km 627+690L	0,81	3	83,8	88,6

Na rysunku 4.5 przedstawiono ustalony ranking hałaśliwości badanych nawierzchni z punktu widzenia statystycznego pojazdu osobowego jadącego z prędkością 110 km/h, statystycznego wielocłonowego pojazdu ciężarowego jadącego z prędkością 85 km/h oraz ranking nawierzchni według różnic pomiędzy wartościami poziomu hałasu emitowanego przez pojazd osobowy i pojazd ciężarowy kategorii 2b.

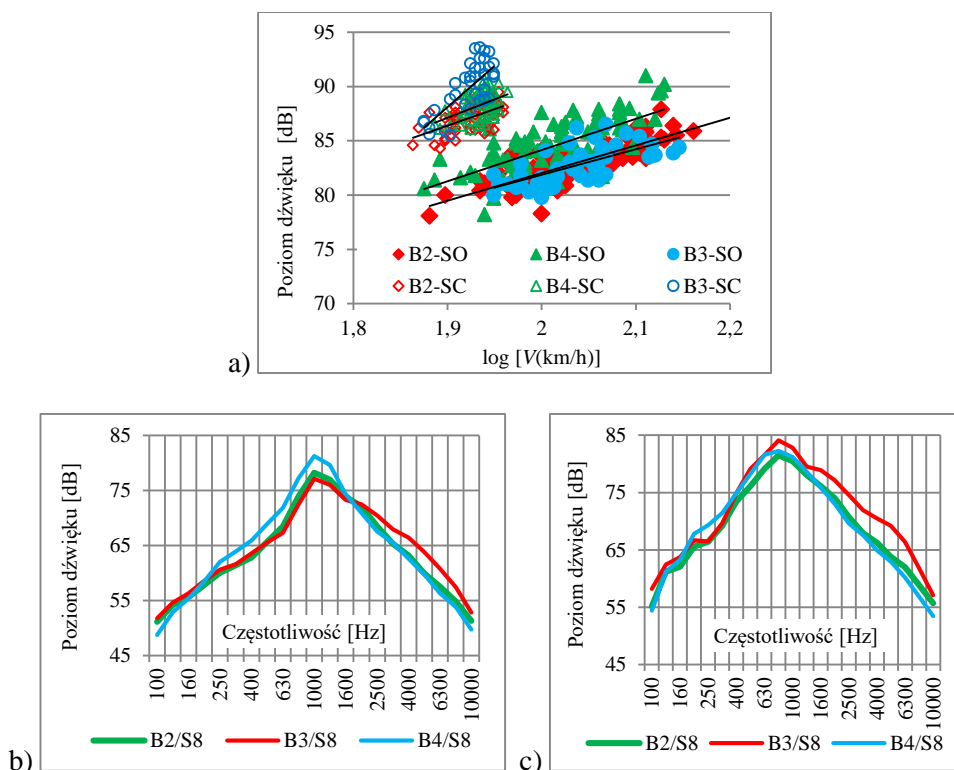


Rys. 4.5. Ranking nawierzchni betonowych pod względem hałaśliwości

Z punktu widzenia statystycznego pojazdu osobowego najniższe poziomy hałasu ustalono na nawierzchniach betonowych teksturowanych tkaniną jutową i metodą odkrytego kruszywa o drobnej teksturze, a najbardziej głośnymi okazały się nawierzchnie betonowe z odkrytym kruszywem o bardzo grubej teksturze oraz nawierzchnie betonowe o długim okresie eksploatacji z lokalnymi zniszczeniami. Zupełnie odwrotna sytuacja wystąpiła w wypadku pojazdu ciężarowego kategorii 2b – najbardziej hałaśliwymi są nawierzchnie betonowe o bardzo drobnej i drobnej teksturze. Pokazane różnice pomiędzy hałasem toczenia pojazdu osobowego i ciężarowego kategorii 2b stanowią bardzo ważną informację przy wyborze technologii wykonania górnej warstwy nawierzchni z uwzględnieniem struktury rodzajowej

ruchu drogowego. Analiza ustalonych poziomów hałasu na nawierzchniach betonowych i z mastyksu grysowego pokazuje, że prawidłowo wykonana nawierzchnia betonowa jest rozwiązaniem porównywalnym z nawierzchniami asfaltowymi.

Poniżej, na przykładzie trzech nawierzchni na drodze ekspresowej S8, pokazano wpływ techniki teksturowania nawierzchni betonowej na poziom hałasu w zależności od rodzaju pojazdu samochodowego. Na dwóch odcinkach zastosowano metodę odkrytego kruszywa (B2:  $MPD = 1,16$  mm, B4:  $MPD = 1,90$  mm), a na jednym – technikę przeciągania tkaniny jutowej (warstwa górna wykonana w technologii whitetopping, B3:  $MPD = 0,20$  mm). Na rysunku 4.6 przedstawiono wyniki pomiarów poziomu hałasu metodą SPB, a w tabeli 4.2 podano ustalone zależności pomiędzy maksymalnym poziomem dźwięku od statystycznego pojedynczego pojazdu osobowego i wielocłonowego pojazdu ciężarowego a logarytmem prędkości wraz ze współczynnikami korelacji  $R$  oraz poziomami hałasu.



Rys. 4.6. Poziomy dźwięku: a) wyniki pomiarów na 3 nawierzchniach – SPB, b) widma dźwięku – pojazd osobowy,  $V = 110$  km/h, c) widma dźwięku – pojazd ciężarowy kategorii 2b,  $V = 85$  km/h

Tab. 4.2. Zależności pomiędzy maksymalnym poziomem dźwięku i logarytmem prędkości

Prze- krój	Pojazd osobowy			Wielocłonowy pojazd ciężarowy		
	Zależność	R	L(110)	Zależność	R	L(85)
B2	$L_{\max}=31,14+25,45\log V$	0,83	83,1	$L_{\max}=28,09+30,68\log V$	0,54	87,3
B3	$L_{\max}=34,97+23,45\log V$	0,68	82,8	$L_{\max}=-55,31+75,48\log V$	0,72	90,3
B4	$L_{\max}=26,78+28,69\log V$	0,68	85,3	$L_{\max}=22,52+34,00\log V$	0,47	88,1

Podane wartości wskazują, że nawierzchnia teksturowana tkaniną jutową i metodą odkrytego kruszywa o wartości  $MPD = 1,16$  mm, w wypadku pojazdu osobowego, nie różni się pod względem hałasliwości. Zdecydowanie niekorzystnym rozwiązaniem jest nawierzchnia z odkrytym kruszywem o makroteksturze zbliżonej do 2 mm (różnica powyżej 2 dB). W wypadku wielocłonowego pojazdu ciężarowego najgłośniejszą nawierzchnią z punktu widzenia pojazdu ciężarowego kategorii 2b, przy prędkości powyżej 80 km/h, okazała się nawierzchnia teksturowana tkaniną jutową. Wyjaśnieniem takiego zróżnicowania są pokazane widma dźwięków.

Wpływ błędów technologicznych przy budowie nawierzchni betonowych znacząco wpływa na poziom hałasu toczenia opon samochodowych. Potwierdzono to na przykładzie nawierzchni teksturowanej szczotką z włóknami z tworzywa sztucznego w kierunku poprzecznym. Na trzech pasach wytypowano trzy przekroje badawcze: CC1, CC2 i CC3 o makroteksturze  $MPD(CC1) = 0,57$  mm,  $MPD(CC2) = 0,66$  mm i  $MPD(CC3) = 0,49$  mm. Na pasie, na którym zlokalizowano przekrój CC2, wyraźnie były widoczne poprzeczne „garby”, powstałe na etapie teksturowania powierzchni. Na rysunku 4.7 pokazano powierzchnie badanych nawierzchni.

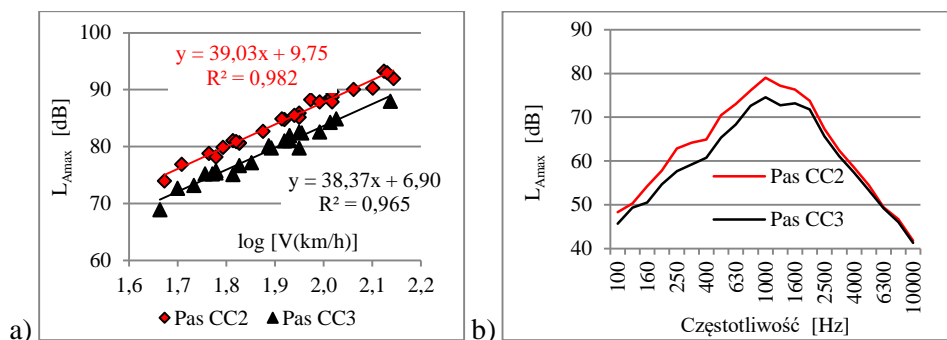


Rys. 4.7. Widok nawierzchni betonowej w przekrojach: a) CC1, b) CC2, c) CC3

Pomiary wstępne poziomu hałasu wykonano zgodnie z założeniami metody CPB, lecz przy wykorzystaniu tylko jednego pojazdu osobowego marki Skoda Octavia. Po stwierdzeniu porównywalności wyników na pasach CC1 i CC3 w drugim etapie uzupełniono wcześniejsze pomiary o wartości poziomu hałasu na pasach CC2 i CC3 od przejazdu dwóch dodatkowych pojazdów o zdecydowanie różnej charakterystyce. Na rysunku 4.8 pokazano wyniki wykonanych pomiarów

#### 4. Wpływ tekstury na poziom hałasu toczenia pojazdów samochodowych

maksymalnego poziomu dźwięku metodą CPB (wraz z widmami) na pasach CC2 i CC3, a w tabeli 4.3 – ustalone zależności pomiędzy poziomem hałasu i logarytmem prędkości.



Rys. 4.8. Wyniki badań maksymalnego poziomu dźwięku ustalone metodą CPB: a) 3 pojazdy testowe, b) widma dźwięku ( $V = 80 \text{ km/h}$ )

Tab. 4.3. Zależności funkcyjne na trzech pasach ruchu

Metoda CPB – 1 pojazd			Metoda CPB – 3 pojazdy			
		$R$	$L_1(80)$		$R$	$L_1(80)$
CC1	$L_{Amax} = 9,86 + 36,58 \log V$	0,99	79,5	-	-	-
CC2	$L_{Amax} = 10,18 + 38,75 \log V$	0,99	83,9	$L_{Amax} = 9,75 + 39,03 \log V$	0,99	84,0
CC3	$L_{Amax} = 9,29 + 37,18 \log V$	0,99	80,0	$L_{Amax} = 6,90 + 38,37 \log V$	0,98	79,9

Przedstawione wyniki potwierdzają wpływ makrotekstury powierzchni oraz błędów technologicznych na etapie teksturowania nawierzchni na poziom hałasu od przejeżdżających pojazdów. Różnice pomiędzy poziomami hałasu o wartości do 4 dB wskazują na potrzebę wyboru najbardziej optymalnych technik teksturowania oraz zwrócenia szczególnej uwagi na poprawne wykonanie tego zabiegu na nawierzchniach betonowych.



## 4.3. Makrotekstura nawierzchni drogowych

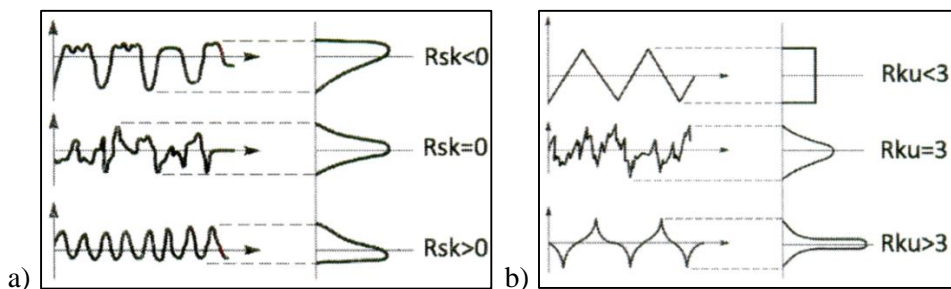
### 4.3.1. Ocena makrotekstury w badaniach poziomu hałasu opona/nawierzchnia

Istotny wpływ nawierzchni drogowej na bezpieczeństwo ruchu samochodowego i poziom hałasu opona/nawierzchnia był (i jest) inspiracją do szczegółowych rozważań na temat ustalenia najbardziej odpowiedniego parametru (-ów) opisującego jej makroteksturę. Podstawowym parametrem klasyfikującym makroteksturę nawierzchni jest wskaźnik *MTD* (*Mean Texture Depth*), znany także jako parametr *TD* (*Texture Depth*) lub *HP* (wysokość piasku kalibrowanego), ustalany według metody objętościowej. Prognozowaną wartość makrotekstury stanowi parametr *ETD* (*Estimated Texture Depth*). Obecnie makrotekstura jest najczęściej oceniana w oparciu o średnią głębokość profilu nierówności *MPD* (*Mean Profile Depth*), a jej wartość ustala się przy wykorzystaniu urządzeń stacjonarnych (np. Circular Texture Meter – CTM, skanery 3D, stacjonarne profilografy laserowe i igłowe, urządzenia fotometryczne) i urządzeń mobilnych (profilografy laserowe).

Problem wpływu megatekstury i makrotekstury na poziom hałasu bada się w odniesieniu do całych zakresów długości fal nierówności odpowiadających makroteksturze i megateksturze, jak i fal nierówności o 4 mm i 63 mm (lub 5 mm i 80 mm) [202].

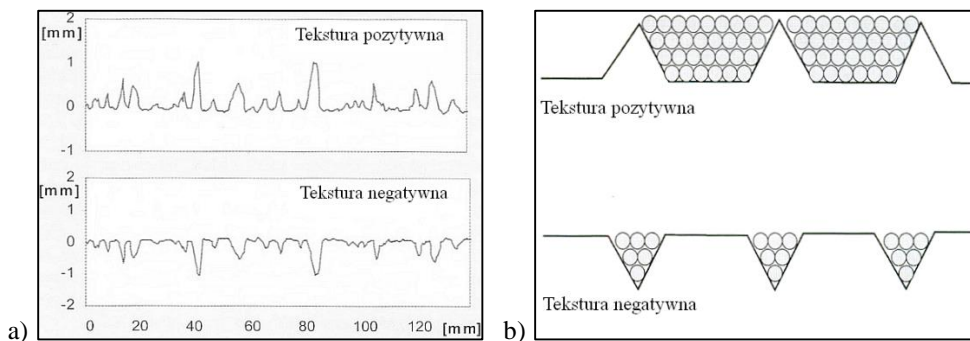
Makroteksturę powierzchni ocenia się również w oparciu o następujące parametry ustalone na podstawie profili nierówności: średnie arytmetyczne odchylenie profilu ( $R_a$  – *Root Mean Absolute*), średnie kwadratowe odchylenie profilu ( $R_{ms}$  – *Root Mean Square*), asymetria profilu  $R_{sk}$  (*Skewness*) i kurtoza  $R_{ku}$  (*Kurtosis*). Zasady obliczania ich wartości są podane między innymi w pracy [101].

Asymetria profilu nierówności jest miarą rozkładu amplitudy w stosunku do rozkładu normalnego. Wartości  $R_{sk} < 0$  wskazują na przewagę zagłębień (negatywna asymetria), a wartości  $R_{sk} > 0$  informują o przewadze wzniesień nad powierzchnią (pozytywna asymetria) (rys. 4.9a). Kurtoza  $R_{ku} > 3$  oznacza obecność w profilu nierówności głębokich zagłębień lub ostrych wzniesień, a gdy  $R_{ku} < 3$  – brak jest ostrych zagłębień i wzniesień. Jeżeli  $R_{sk} = 0$  i  $R_{ku} = 3$ , profil nierówności jest zgodny z rozkładem normalnym (rys. 9b). W literaturze wartość kurtozy jest podawana także w odniesieniu do wartości 0.



Rys. 4.9. Ocena makrotekstury nawierzchni w oparciu o parametry [15]: a) asymetria profilu, b) kurtoza

Z punktu widzenia współpracy opon samochodowych z nawierzchnią ważną rolę odgrywa tzw. kierunkowość tekstury, opisywana jako pozytywna, negatywna lub neutralna (rys. 4.10). Wskaźnik kierunkowości tekstury  $TO$  (*Texture Orientation*), można obliczyć jako iloraz  $MPD$  i  $R_{ms}$  [142, 212]. Jeżeli jego wartość jest większa od 1,05 (1,10), tekstura jest określana jako pozytywna, a jeżeli jest mniejsza niż 0,95 (0,90) – jako negatywna. Pomiędzy tymi zakresami teksturę ocenia się jako neutralną.

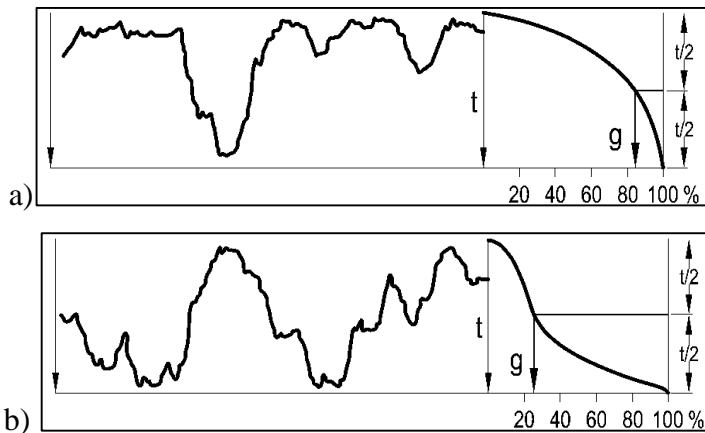


Rys. 4.10. Przykłady pozytywnej i negatywnej tekstury nawierzchni [142, 195]: a) na rzeczywistych nawierzchniach, b) modelowanie tekstury

W pracy [142] przedstawiono wyniki oceny tekstury na 124 nawierzchniach, reprezentujących 28 technologii zestawionych w 22 grupy. Przykładowo na 48 nawierzchniach z mieszanek mineralno-asfaltowych zbliżonych technologicznie do betonu asfaltowego 24 nawierzchnie miały teksturę pozytywną, 10 – teksturę negatywną, a 14 – teksturę neutralną. Wśród 24 nawierzchni z mastyksu grysowego na 4 nawierzchniach teksturę oceniono jako pozytywną, na 14 – neutralną, a na 6 – negatywną. Wszystkie 4 nawierzchnie powierzchniowo utrwalone i typu

*slurry seal* miały teksturę pozytywną, a 8 nawierzchni z betonu cementowego teksturowanych metodą szcztokowania i przeciągania tkaniny jutowej – teksturę negatywną.

W Niemczech do oceny tekstury nawierzchni proponuje się przyjmować cztery parametry [143, 144]: wskaźnik kształtu  $g$ , wskaźnik  $gL$  oraz wskaźniki  $A_{\max}$  i  $W_{\max}$ . Na rysunku 4.11 pokazano zasady ustalania wartości  $g$  na nawierzchni o teksturze negatywnej i pozytywnej. W wypadku tekstury negatywnej wskaźnik  $g$  przyjmuje wartości większe od 70%, a w wypadku tekstury pozytywnej – mniejsze od 50%. Wskaźnik  $gL$  jest obliczany jako iloczyn średniej wartości wskaźnika kształtu i długości fali nierówności odpowiadającej maksymalnej amplitudzie. Wskaźniki  $A_{\max}$  i  $W_{\max}$  oznaczają odpowiednio maksymalną amplitudę odpowiadającą falam nierówności w zakresie makrotekstury i długość fali nierówności odpowiadającej maksymalnej amplitudzie.

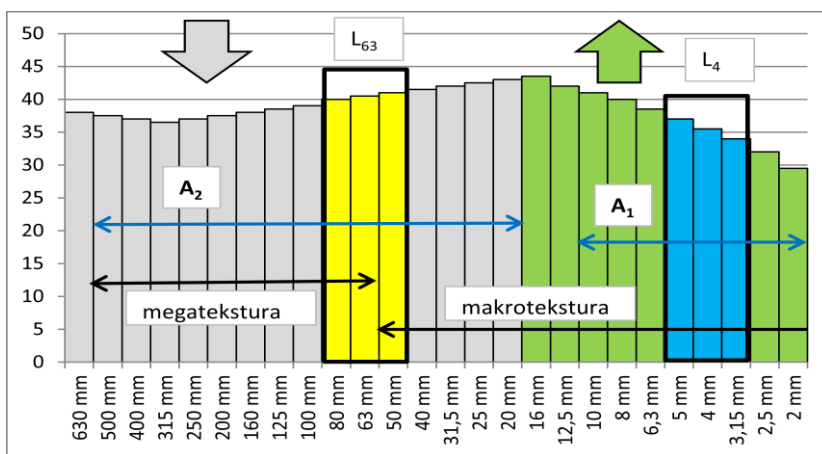


Rys. 4.11. Wskaźnik kształtu „g”: a) tekstura negatywna, b) tekstura pozytywna

Szczegółowe rozważania na temat wyboru parametru opisującego makroteksturę pod kątem wpływu na poziom hałasu przedstawiono w pracy [118]. Badano zależności pomiędzy wartością  $MPD$ , poziomami nierówności  $L_{80}$  i  $L_5$ , uziarnieniem kruszywa, wskaźnikiem kształtu  $g$ , a poziomem hałasu według metody CPX. Zdaniem autorów projektu zrealizowanego przez zespoły z Norwegii, Szwecji i Danii, wskaźnik kształtu  $g$ , proponowany w Niemczech, nie wyjaśnia wpływu tekstury na poziom hałasu w większym stopniu niż inne stosowane dotychczas parametry opisujące teksturę nawierzchni. W ramach badań ustalono także, że asymetria profilu nierówności może być wykorzystywana przy ocenie kierunkowości tekstury.

Wpływ tekstury na poziom emitowanych dźwięków w rejonie kontaktu opony z nawierzchnią analizowany jest od wielu lat. Sandberg i Descornet [200] wskazali najbardziej istotne charakterystyki powierzchni decydujące o poziomie hałasu toczenia. Sandberg i Ejsmont w pracy [202] przedstawili zależności pomiędzy poziomem dźwięku a parametrami opisującymi teksturę powierzchni.

W raporcie [212] opracowano zależności pomiędzy ilorazem  $A_2/A_1$  i poziomem dźwięku oraz ilorazem  $L_{80}/L_5$  a poziomem dźwięku. Na rysunku 4.12 pokazano sposób ustalania wartości  $A_1$  i  $A_2$ , poziomów nierówności w pasmach oktaowych  $L_4$  i  $L_{63}$ .



Rys. 4.12. Istotne charakterystyki poziomu nierówności nawierzchni z punktu widzenia generowanych dźwięków opona/nawierzchnia [202, 212]

W literaturze z zakresu tego problemu badacze są zgodni – nierówności o długości fal od 2 do 10 mm są korzystnym rozwiązaniem z punktu widzenia poziomu hałasu przy największej amplitudzie nierówności, a nierówności o długości fal powyżej 10 mm – przy najmniejszej amplitudzie nierówności. Potwierdzają to także współczynniki korelacji pomiędzy poziomami nierówności i poziomami dźwięku w pasmach oktaowych i 1/3-oktaowych [74, 118, 202].

Uwzględniając stosunkowo dużą zmienność profili nierówności nawierzchni, nawet w zakresie tej samej technologii, określane są tzw. obwiednie profili nierówności [118, 133, 195].

Powyższe rozważania wskazują na potrzebę wyboru najbardziej odpowiedniego parametru charakteryzującego makroteksturę pod kątem jej wpływu na poziom hałasu, uwzględniając przy tym łatwość jego pomiaru i oceny. Bardzo ważnym

problemem jest wybór odpowiedniej metody pomiaru makrotekstury nawierzchni. W wypadku tekstur izotropowych (nawierzchnie z betonu asfaltowego, SMA, powierzchniowe utrwalenia, nawierzchnie betonowe z odkrytym kruszywem) pomiary są łatwiejsze, a wyniki bardziej dokładne. W wypadku tekstur anizotropowych (nawierzchnie betonowe o teksturze poprzecznie i podłużnie rowkowanej, nawierzchnie kostkowe) problem jest bardziej złożony, a bezpośrednie wykorzystanie standardowych metod może prowadzić do istotnych błędów pomiaru.

Szczegółnej uwagi w tym zakresie wymagają nawierzchnie porowate, zawierające w swojej strukturze powiązane wolne przestrzenie. Ocena ich makrotekstury przy wykorzystaniu metody objętościowej, a także metod z wykorzystaniem techniki laserowej, jest obciążona dużymi błędami. Perspektywicznym rozwiązaniem wydają się pomiary w układzie 3D. Znane są już urządzenia pozwalające na taki opis powierzchni, lecz brak jest dotychczas jednoznacznych parametrów charakteryzujących makroteksturę nawierzchni z punktu widzenia jej wpływu na poziom hałasu.

### 4.3.2. Ocena makrotekstury wybranych nawierzchni w Polsce

Makrotekstura nawierzchni asfaltowych jest ściśle związana z technologią wykonania warstwy ścieralnej i maksymalnego uziarnienia zastosowanego kruszywa. W wypadku nawierzchni betonowych o makroteksturze decyduje technika teksturowania ich powierzchni. Poniżej, na podstawie wyników uzyskanych przy wykorzystaniu metody objętościowej, profilografów stacjonarnych (igłowego i laserowego) oraz urządzenia CTM (*Circular Tester Meter*), dokonano oceny makrotekstury przykładowych nawierzchni asfaltowych i betonowych.

W tabelach 4.4 i 4.5 przedstawiono wartości parametrów charakteryzujących makroteksturę na przykładowych nawierzchniach asfaltowych i nawierzchniach betonowych na rzeczywistych odcinkach drogowych. Biorąc pod uwagę wartości ilorazu  $MPD$  i  $R_{ms}$ , należy stwierdzić, że wszystkie badane nawierzchnie asfaltowe i betonowe charakteryzowały się teksturą pozytywną. Nie potwierdzają tego jednak wartości  $R_{sk}$  (asymetria profili nierówności), mniejsze od zera, w odniesieniu do większości nawierzchni asfaltowych oraz niektórych nawierzchni betonowych teksturowanych metodą szczotkowania i tkaniny jutowej.

#### 4. Wpływ tekstury na poziom hałasu toczenia pojazdów samochodowych

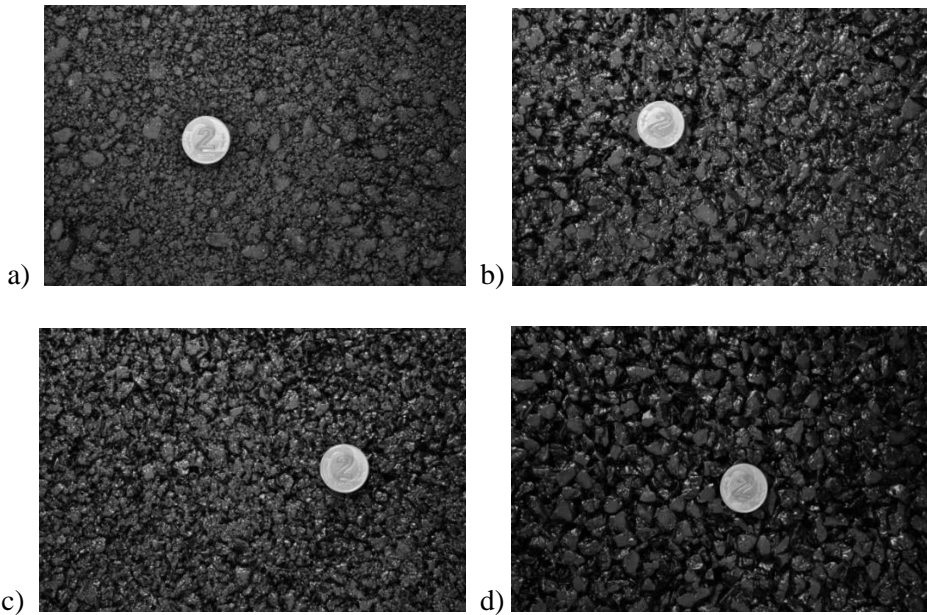
Tab. 4.4. Parametry charakteryzujące makroteksturę nawierzchni asfaltowych

Nawierzchnia	$MPD$	$R_a$	$R_{ms}$	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$MPD/R_{ms}$
SMA12	0,84	0,56	0,75	-1,47	5,75	1,12
	0,87	0,53	0,75	-1,88	8,35	1,16
	0,66	0,34	0,49	-1,94	10,25	1,35
	0,75	0,41	0,58	-1,91	9,15	1,29
SMA11	1,11	0,63	0,86	1,54	7,94	1,29
	0,76	0,49	0,66	1,48	5,94	1,15
DAC12	0,35	0,14	0,20	-0,90	8,56	1,75
	0,37	0,14	0,19	-0,68	7,97	1,95

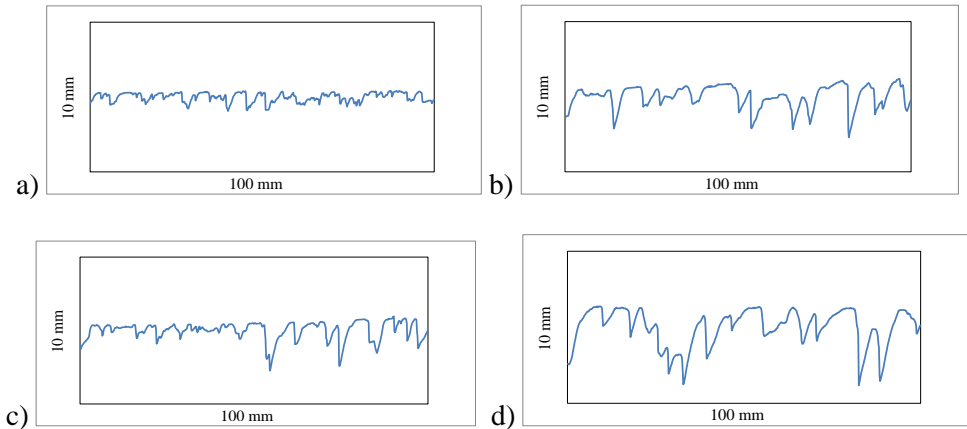
Tab. 4.5. Parametry charakteryzujące makroteksturę nawierzchni betonowych

Technika teksturowania	$MPD$	$R_a$	$R_{ms}$	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$MPD/R_{ms}$
Metoda odkrytego kruszywa	1,20	0,62	0,74	0,07	2,39	1,62
	1,24	0,65	0,78	0,18	2,53	1,59
	0,84	0,41	0,51	0,48	3,38	1,65
	1,55	0,86	1,05	0,22	2,88	1,48
	1,09	0,53	0,64	0,23	2,60	1,70
Metoda szczotkowania i tkaniny jutowej	0,46	0,28	0,35	0,31	3,13	1,31
	0,56	0,33	0,41	-0,16	3,00	1,37
	0,65	0,36	0,45	-0,11	2,82	1,44
	0,49	0,24	0,30	-0,15	2,90	1,63

Dodatkowo przeprowadzono ocenę makrotekstry w warunkach laboratoryjnych, na płytach testowych przy wykorzystaniu urządzenia CTM. Asfaltowe płyty testowe były wykonane z betonu asfaltowego (AC5, AC8, AC11, AC14), z mieszanki mastyksowo-grysowej (SMA5, SMA8, SMA11, SMA14), z betonu asfaltowego do bardzo cienkich warstw (BBTM5B, BBTM8B, BBTM11B, BBTM14B) i asfaltu porowatego (PA5, PA8, PA11). Mieszanki mineralno-asfaltowe zaprojektowano zgodnie z wymaganiami WT-2 (2010) w odniesieniu do warstwy ścieralnej i kategorii ruchu KR6 [82]. Powierzchnie przykładowych płyt testowych pokazano na rysunku 4.13, a na rysunku 4.14 – profile nierówności badanych nawierzchni.



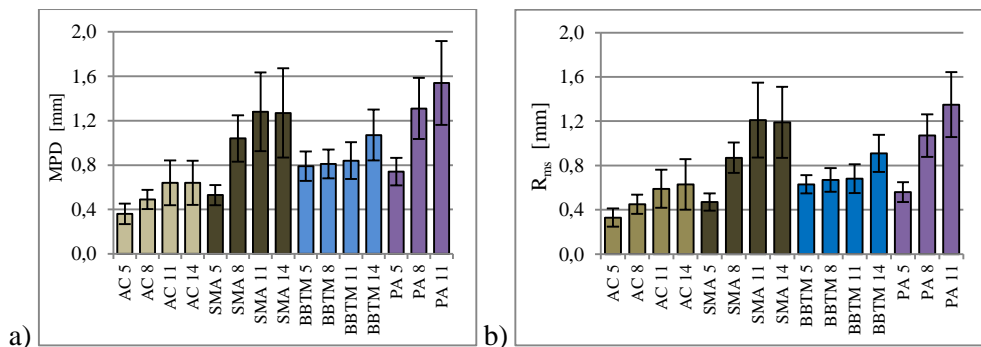
Rys. 4.13. Przykładowe płyty z mieszank mineralno-asfaltowych: a) AC 8, b) SMA 8, c) BBTM 8B, d) PA 8



Rys. 4.14. Przykładowe profile nierówności: a) AC8, b) SMA8, c) BBTM8B, d) PAC8

Na rysunku 4.15 przedstawiono średnie wartości  $MPD$  i  $R_{ms}$  wraz z ich odchyleniami standardowymi. W wypadku nawierzchni z SMA i z asfaltu porowatego zwiększenie maksymalnego uziarnienia kruszywa z 5 mm do 8 mm (11 mm, 14 mm) miało istotny wpływ na wzrost makrotekstry. Nie stwierdzono istotnej

różnicy w przypadku zmiany maksymalnego uziarnienia z 11 mm do 14 mm na nawierzchniach z betonu asfaltowego i z mastyksu grysowego. W wypadku betonu asfaltowego zwiększenie uziarnienia kruszywa ma niewielki wpływ na głębokość makrotekstury. Na nawierzchniach z mieszanki BBTM o maksymalnym uziarnieniu kruszywa w zakresie 5÷11 mm praktycznie nie zauważono zmian w makroteksturze powierzchni. Dopiero zastosowanie kruszywa o uziarnieniu 0/14 mm w sposób istotny wpłynęło na zwiększenie głębokości makrotekstury.



Rys. 4.15. Wartości parametrów charakteryzujących makroteksturę wraz z odchyleniami standardowymi: a)  $MPD$ , b)  $R_{ms}$

Ilorazy  $MPD/R_{ms}$  wskazują, że nawierzchnie z betonu asfaltowego mają teksturę neutralną, nawierzchnie typu SMA o uziarnieniu kruszywa 0/5 i 0/8 – teksturę neutralną, a o uziarnieniu kruszywa 0/11 i 0/14 – teksturę pozytywną. Wszystkie badane nawierzchnie z asfaltu porowatego i BBTM charakteryzowały się teksturą pozytywną (tab. 4.6). Podobnie jak w badaniach nawierzchni asfaltowych „w terenie” wartości  $R_{sk}$ , ustalone na płytach testowych, przyjmują wartości ujemne, co oznacza przewagę zagłębień, a tym samym teksturę negatywną. Na taką teksturę wskazują profile nierówności pokazane na rysunku 4.14. Jest to zgodne z ustaleniami w pracy [118], co oznacza, że bardziej właściwym wskaźnikiem do oceny kierunkowości tekstury jest asymetria profilu nierówności  $R_{sk}$ .

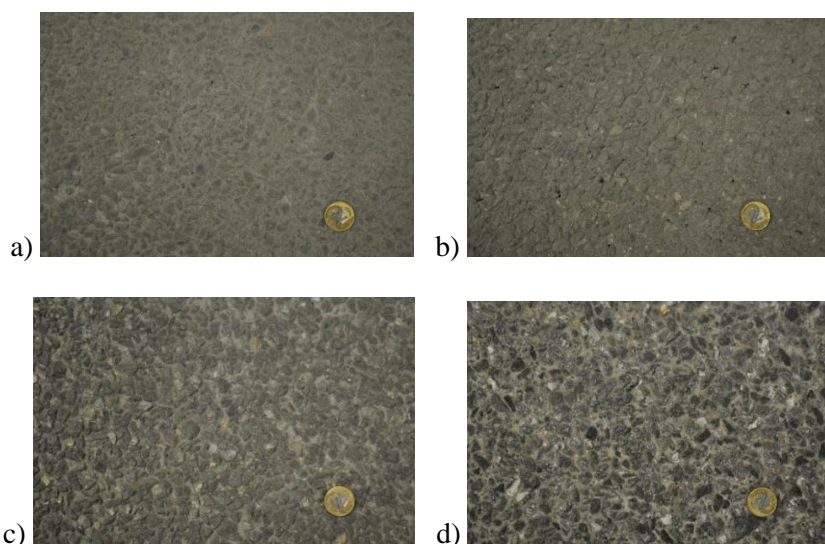


Tab. 4.6. Makrotekstura asfaltowych płyt testowych

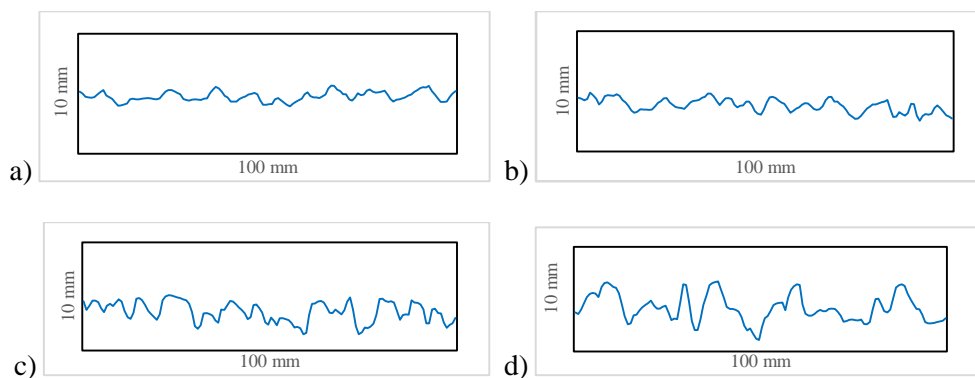
Typ MMA	Metoda oceny makrotekstury						Charakterystyki profili nierówności		
	Profilograf igłowy			CTM					
	$MPD$ [mm]	$R_{ms}$ [mm]	$MPD/R_{ms}$	$MPD$ [mm]	$R_{ms}$ [mm]	$MPD/R_{ms}$	$R_a$	$R_{sk}$	$R_{ku}$
AC5	0,36	0,33	1,09	0,35	0,33	1,06	0,25	-1,65	5,57
AC8	0,49	0,45	1,09	0,46	0,43	1,07	0,32	-1,56	5,35
AC11	0,64	0,59	1,08	0,57	0,51	1,12	0,41	-1,63	3,81
AC14	0,64	0,63	1,02	0,80	0,88	0,91	0,66	-1,37	5,36
SMA5	0,53	0,47	1,10	0,56	0,49	1,14	0,40	-1,11	3,54
SMA8	1,04	0,87	1,20	1,14	0,84	1,36	0,69	-0,88	3,36
SMA11	1,28	1,21	1,06	1,06	1,01	1,05	0,78	-1,42	4,63
SMA14	1,27	1,19	1,07	1,08	0,99	1,09	0,74	-1,80	6,96
BBTM5	0,79	0,63	1,25	0,92	0,73	1,26	0,59	-0,91	3,89
BBTM8	0,81	0,67	1,21	0,74	0,63	1,17	0,49	-0,90	4,49
BBTM11	0,84	0,68	1,24	0,91	0,70	1,30	0,58	-1,18	3,11
BBTM14	1,07	0,91	1,18	0,89	0,76	1,17	0,61	-1,26	4,06
PA5	0,74	0,56	1,32	0,79	0,60	1,32	0,49	-0,91	3,05
PA8	1,31	1,07	1,22	1,32	1,08	1,22	0,89	-0,85	2,84
PA11	1,54	1,35	1,14	1,52	1,27	1,19	1,00	-0,98	3,83

Analizę makrotekstury nawierzchni betonowych teksturowanych metodą odkrytego kruszywa w warunkach laboratoryjnych przeprowadzono na podstawie parametrów charakteryzujących makroteksturę 64 płyt wykonanych w firmie „BUDPOL” Firma Budowlana Piotr Smolarczyk z Częstochowy. Na rysunku 4.16 pokazano widok powierzchni przykładowych płyt o różnej makroteksturze, a na rysunku 4.17 – ich profile nierówności.

#### 4. Wpływ tekstury na poziom hałasu toczenia pojazdów samochodowych



Rys. 4.16. Widok powierzchni płyt betonowych: a)  $MTD = 0,72$  mm, b)  $MTD = 0,98$  mm, c)  $MTD = 1,46$  mm, d)  $MTD = 2,21$  mm



Rys. 4.17. Profile nierówności nawierzchni betonowych: a)  $MTD = 0,72$  mm; b)  $MTD = 0,98$  mm; c)  $MTD = 1,46$  mm; d)  $MTD = 2,21$  mm

W tabeli 4.4 podano ustalone wartości  $MPD$ ,  $R_a$ ,  $R_{ms}$ ,  $R_{sk}$  i  $R_{ku}$  na płytach betonowych, a także liczbę płyt badanych testowych w poszczególnych zakresach makrotekstury (według  $MPD$ ).

W oparciu o przeprowadzone pomiary z wykorzystaniem urządzenia CTM na nawierzchniach betonowych z odkrytym kruszywem na drodze S8 ( $MPD = 0,46 \div 1,55$  mm) i na płytach testowych ( $MPD = 0,69 \div 2,23$  mm) stwierdzono, że nawierzchnie charakteryzują się teksturą pozytywną. Jest to najbardziej

prawdopodobna przyczyna wyższej ich hałaśliwości w porównaniu z hałaśliwością ostatnio coraz częściej stosowanych nawierzchni teksturowanych techniką *Next Generation Cement Surface (Grinding & Grooving)*.

Tab. 4.7. Makrotekstura powierzchni betonowych płyt testowych

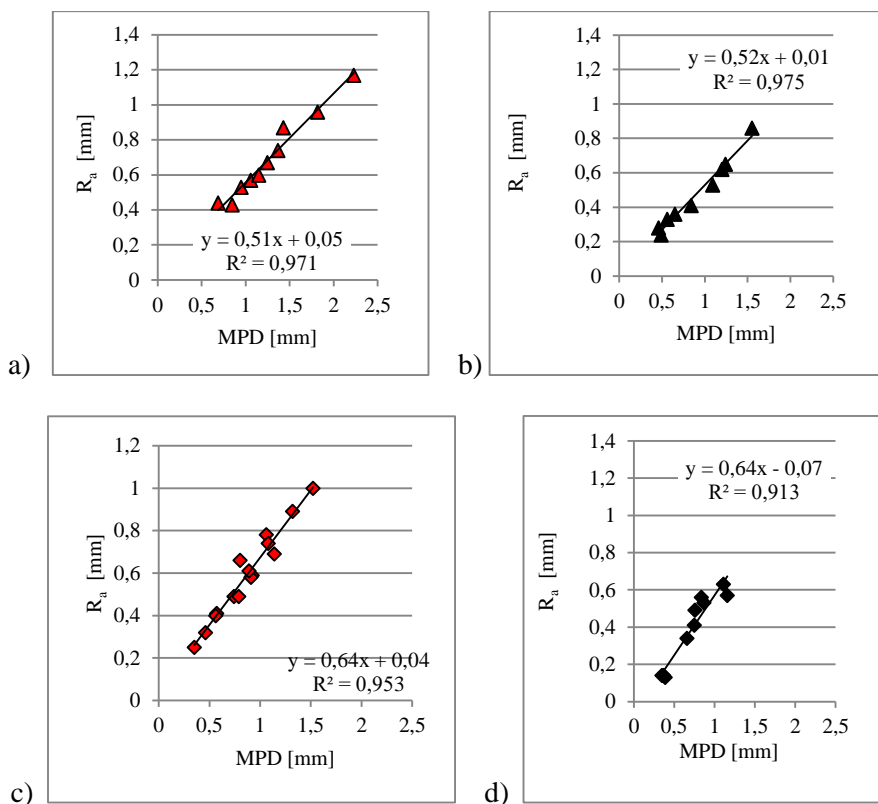
Zakres MPD [mm]	<i>n</i>	<i>MPD</i> [mm]	<i>R<sub>a</sub></i> [mm]	<i>R<sub>ms</sub></i> [mm]	<i>R<sub>sk</sub></i>	<i>R<sub>ku</sub></i>	<i>MPD/R<sub>ms</sub></i>
≤0,80	4	0,69	0,44	0,54	0,03	2,52	1,27
0,81÷0,90	5	0,85	0,43	0,52	0,19	2,62	1,63
0,91÷1,00	7	0,95	0,53	0,65	0,14	2,72	1,45
1,01÷1,10	12	1,06	0,57	0,70	0,16	2,63	1,52
1,11÷1,20	11	1,15	0,60	0,73	0,05	2,51	1,58
1,21÷1,30	13	1,25	0,67	0,81	0,09	2,50	1,54
1,31÷1,40	4	1,37	0,74	0,89	0,23	3,02	1,53
1,41÷1,50	1	1,43	0,87	1,06	0,25	2,56	1,35
1,51÷2,00	4	1,82	0,96	1,14	0,31	2,35	1,60
>2,00	3	2,23	1,17	1,41	0,24	2,53	1,58

Przedstawiona analiza wyników makrotekstury na nawierzchniach eksploatowanych dróg w naszym kraju i na nawierzchniach wykonanych w warunkach laboratoryjnych potwierdza dużą niejednorodność powierzchni pod względem makrotekstury. Wskazuje to na potrzebę opracowania bardziej jednoznacznych parametrów do opisu tej cechy nawierzchni w zależności od technologii jej wykonania. Ocena kierunkowości tekstury w oparciu o wartość ilorazu *MPD/R<sub>ms</sub>* nie jest dobrym rozwiązaniem. Nawierzchnie asfaltowe, jak wynika z wartości asymetrii profili *R<sub>sk</sub>*, charakteryzują się w większości teksturą negatywną, co nie potwierdziły wskaźniki kierunkowości tekstury powierzchni *TO*.

#### 4.4. Wybór parametru do opisu makrotekstury nawierzchni

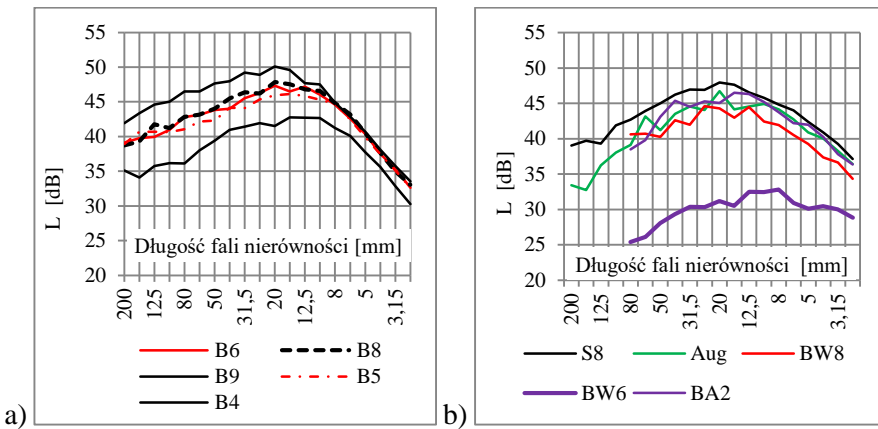
Analiza przeprowadzona w punktach 4.3.1 i 4.3.2 wskazała na możliwość wyboru jednego spośród następujących czterech parametrów charakteryzujących makroteksturę (*MPD*, *R<sub>a</sub>*, *L<sub>4</sub>*, *L<sub>63</sub>*) do szczegółowych rozważań na temat wpływu tekstury na poziom hałasu od przejeżdżających pojazdów. W związku z tym poniżej ustalono zależności regresyjne pomiędzy tymi parametrami oraz ich wpływ na poziom hałasu według metody SPB.

Na rysunku 4.18 pokazano zależności potwierdzające bardzo dobrą korelację pomiędzy wartościami  $MPD$  i  $R_a$  na rzeczywistych nawierzchniach i na płytach testowych w warunkach laboratoryjnych.

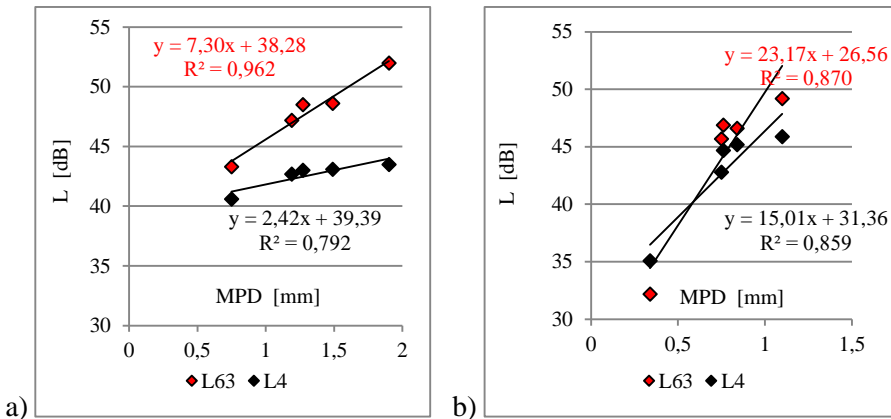


Rys. 4.18. Zależności pomiędzy  $MPD$  i  $R_a$ : a) betonowe płyty testowe, b) nawierzchnia betonowa, c) asfaltowe płyty testowe, d) nawierzchnia asfaltowa

W celu ustalenia zależności pomiędzy poziomami nierówności  $L_{63}$  i  $L_4$  a wartością  $MPD$  oraz pomiędzy poziomami nierówności a poziomem hałasu do badań wytypowano pięć nawierzchni asfaltowych o zwartej strukturze oraz pięć nawierzchni betonowych z odkrytym kruszywem. Nawierzchnie, na których przeprowadzono badania, nie były zdeformowane w przekroju podłużnym i w przekroju poprzecznym, a wskaźnik  $IRI$  przyjmował wartości mniejsze niż 2 mm/m. Na rysunku 4.19 pokazano ustalone poziomy nierówności na wybranych nawierzchniach, a na rysunku 4.20 zależności pomiędzy poziomami nierówności  $L_{63}$  i  $L_4$  a wartością  $MPD$ .



Rys. 4.19. Poziomy nierówności: a) nawierzchnie betonowe, b) nawierzchnie asfaltowe

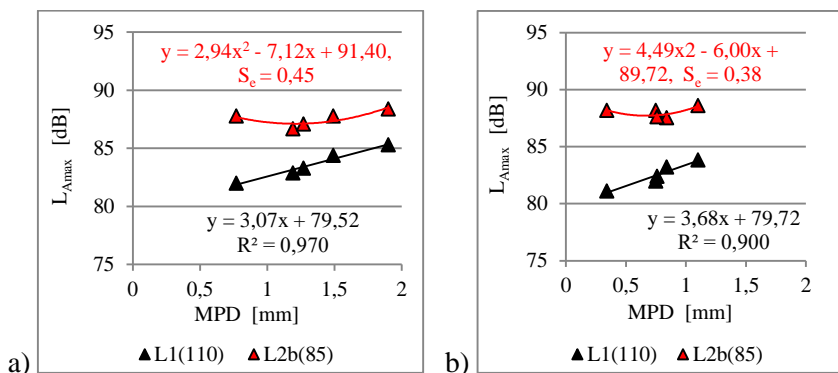


Rys. 4.20. Zależność pomiędzy wartością  $MPD$  a poziomami nierówności  $L_{63}$  i  $L_4$ : a) nawierzchnie betonowe z odkrytym kruszywem, b) nawierzchnie asfaltowe o zwartej strukturze

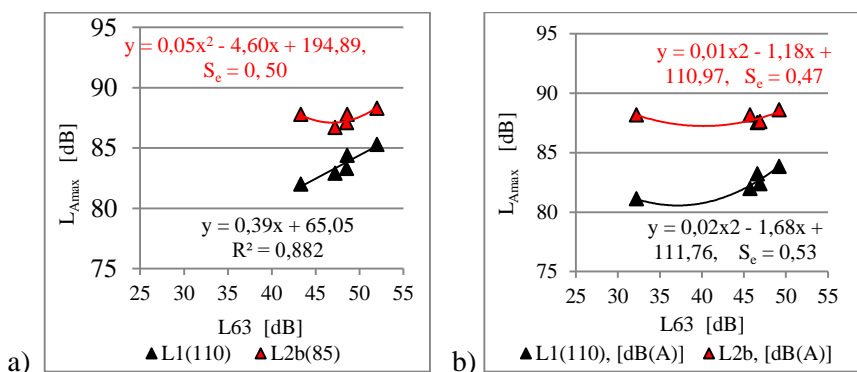
Wpływ makrotekstury nawierzchni asfaltowych i betonowych wybranych do analizy, opisanej parametrami  $MPD$ ,  $L_4$  i  $L_{63}$ , na poziom hałasu statystycznego pojazdu osobowego i statystycznego wielocznionowego pojazdu ciężarowego zaprezentowano na rysunkach 4.21÷4.23.

Wzajemne skorelowanie parametrów charakteryzujących makroteksturę oraz największe wartości współczynnika determinacji  $R^2$  pomiędzy poziomami hałasu a wartością  $MPD$  stanowiły podstawę wyboru do dalszych analiz tej charakterystyki jako podstawowej do opisu hałasu toczenia pojazdów samochodowych.

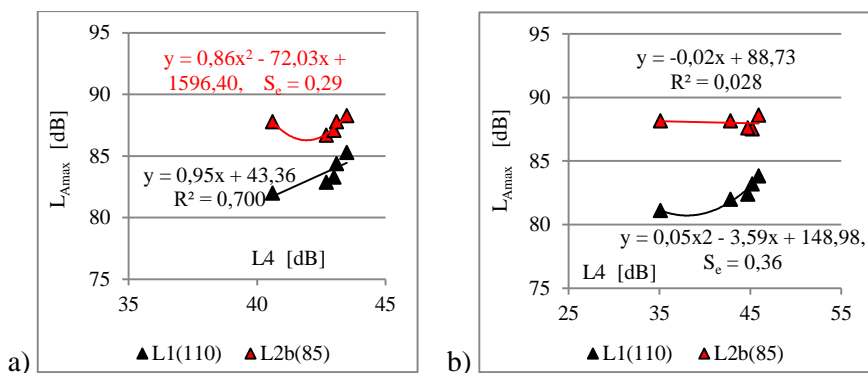
#### 4. Wpływ tekstury na poziom hałasu toczenia pojazdów samochodowych



Rys. 4.21. Poziom hałasu a MPD: a) nawierzchnie betonowe b) nawierzchnie asfaltowe



Rys. 4.22. Poziom hałasu a poziom nierówności  $L_{63}$ : a) nawierzchnie betonowe, b) nawierzchnie asfaltowe



Rys. 4.23. Poziom hałasu a poziom nierówności  $L_4$ : a) nawierzchnie betonowe b) nawierzchnie asfaltowe

## 4.5. Zależności funkcyjne pomiędzy poziomem hałasu a makroteksturą nawierzchni i prędkością pojazdów

Ustalenie zależności pomiędzy poziomem hałasu toczenia pojazdów samochodowych kategorii 1 i 2b a logarytmem prędkości pojazdów i makroteksturą poprzędzono wyborem odcinków badawczych o nawierzchni asfaltowej oraz nawierzchni betonowej, na których prowadzono pomiary hałasu uwzględnione w poniższej analizie.

Z grupy nawierzchni asfaltowych wybrano warstwy ścieralne z betonu asfaltowego (na drogach: DK8 – dwa odcinki, DK22, A2), mastyksu grysowego (na drogach: DK2, DK8, DK10) oraz nawierzchnię powierzchniowo utrwaloną (DK8). Ich powierzchnie charakteryzowały się makroteksturą o wartości *MPD* w zakresie od 0,30 mm do 1,15 mm. Łącznie na ośmiu odcinkach z nawierzchnią asfaltową w analizie uwzględniono wyniki pomiarów maksymalnego poziomu hałasu w odniesieniu do 691 pojazdów osobowych i 346 wielocłonowych pojazdów ciężarowych.

Z grupy nawierzchni betonowych do analizy włączono nawierzchnie teksturowane metodą odkrytego kruszywa i tkaniną jutową o wartości *MPD* od 0,40 mm do 1,90 mm, wbudowane na drodze S8 (pięć odcinków), na drodze DK18 (jeden odcinek) i na autostradzie A4 (1 odcinek). Łącznie na siedmiu odcinkach z nawierzchnią betonową w analizie uwzględniono wyniki pomiarów maksymalnego poziomu hałasu w odniesieniu do 522 pojazdów osobowych i 383 wielocłonowych pojazdów ciężarowych.

W analizie nie uwzględniono pojazdów ciężarowych kategorii 2a z uwagi na ich nieznaczny udział w ruchu oraz bardzo zróżnicowany stan techniczny.

Mając na uwadze założenia prognozowania hałasu drogowego według metody CNOSSOS-EU, opracowano modele regresyjne w odniesieniu do całkowitego poziomu hałasu oraz pasm oktawowych o środkowych częstotliwościach: 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz i 8000 Hz. Do opisu zależności funkcyjnych pomiędzy maksymalnym poziomem dźwięku a logarytmem prędkości pojazdu i makroteksturą nawierzchni przyjęto wielomian drugiego stopnia w postaci:

$$L_{1(2b)} = b_0 + b_1 \cdot \log V + b_2 \cdot MPD + b_{11} \cdot (\log V)^2 + b_{22} \cdot (MPD)^2 + b_{12} \cdot \log V \cdot MPD, \quad (4.1)$$

gdzie:

$b_1, b_2, \dots, b_{22}$  – współczynniki wielomianu.

Sprawdzenie istotności parametrów modeli polegało na weryfikacji hipotezy zerowej  $H_0: \beta_i = 0$ , przy hipotezie alternatywnej  $H_1: \beta_i \neq 0$ . Odrzucenie hipotezy zerowej  $H_0$  na rzecz hipotezy alternatywnej oznaczało, że dany parametr jest istotny. Ponieważ reszty modelu mają rozkład normalny, w tym celu wykorzystano test  $t$ -Studenta, porównując wartości  $t$  z wartościami krytycznymi  $t_{n-k, \alpha/2}$ . Uwzględniając liczbę wyników pomiarów poziomu hałasu ( $n$ : od 346 do 691) oraz poziom istotności  $\alpha = 0,05$ , odczytana z tablic statystycznych wartość krytyczna  $t_{n-k, \alpha/2}$  wynosi 1,96. Zestawienie wyników sprawdzenia istotności parametrów modeli regresyjnych, łącznie dla całkowitych poziomów dźwięku i poziomów w pasmach oktaowych, podano w tabeli 4.10.

Po sprawdzeniu istotności parametrów modeli ustalono następujące zależności w odniesieniu do całkowitych poziomów dźwięku:

a) nawierzchnia asfaltowa – statystyczny pojazd osobowy:

$$L_1 = 18,92 + 30,41 \cdot \log V - 2,62 \cdot MPD + 5,39 \cdot MPD^2, S_e = 1,54; \quad (4.2)$$

b) nawierzchnia asfaltowa – statystyczny wielocłonowy pojazd ciężarowy:

$$L_{2b} = 44,78 + 23,23 \cdot \log V - 8,44 \cdot MPD + 7,14 \cdot MPD^2, S_e = 1,82; \quad (4.3)$$

c) nawierzchnia betonowa – statystyczny pojazd osobowy:

$$L_1 = 18,57 + 32,09 \cdot \log V - 3,46 \cdot MPD + 2,35 \cdot MPD^2, S_e = 1,18; \quad (4.4)$$

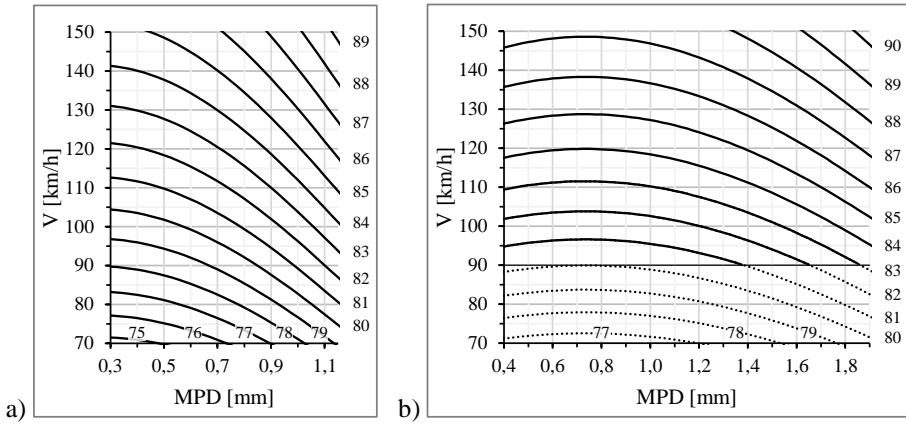
d) nawierzchnia betonowa – statystyczny wielocłonowy pojazd ciężarowy:

$$L_{2b} = 30,39 + 32,39 \cdot \log V - 9,17 \cdot MPD + 3,56 \cdot MPD^2, S_e = 1,31. \quad (4.5)$$

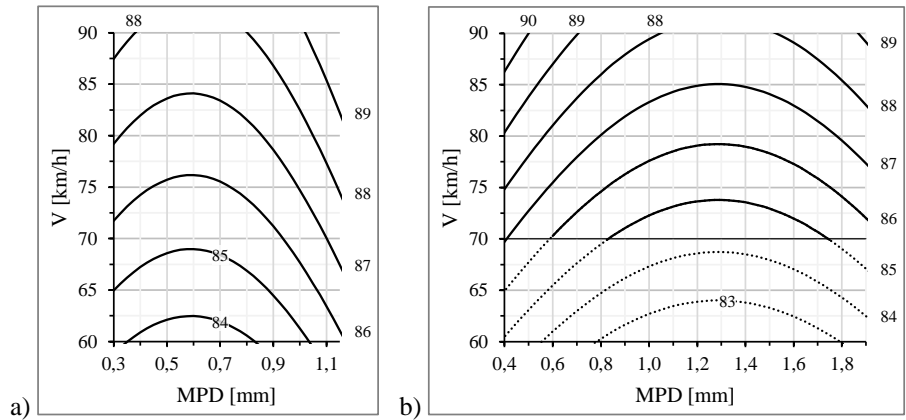
Każdy model regresyjny był poddany, oprócz weryfikacji statystycznej, także weryfikacji merytorycznej, w ramach której sprawdzono, czy spełnia on założenia teorii wyjściowej. W odniesieniu do wyników maksymalnego poziomu dźwięku od przejeżdżających pojazdów jako kryterium przyjęto standardowe błędy estymacji w odniesieniu do pojazdu osobowego i pojazdu ciężarowego. Opracowane modele charakteryzują się dobrym dopasowaniem do wyników pomiarów. Wartości standardowego błędu estymacji w każdym wypadku są mniejsze od wartości dopuszczalnych określonych w normie ISO 11819-1, pomimo zdecydowanie większej liczby wyników.

Na rysunkach 4.24 i 4.25 przedstawiono nomogramy obrazujące opracowane zależności, a na rysunkach 4.26 i 4.27 podano analizę reszt jako weryfikację statystyczną analizy regresji.



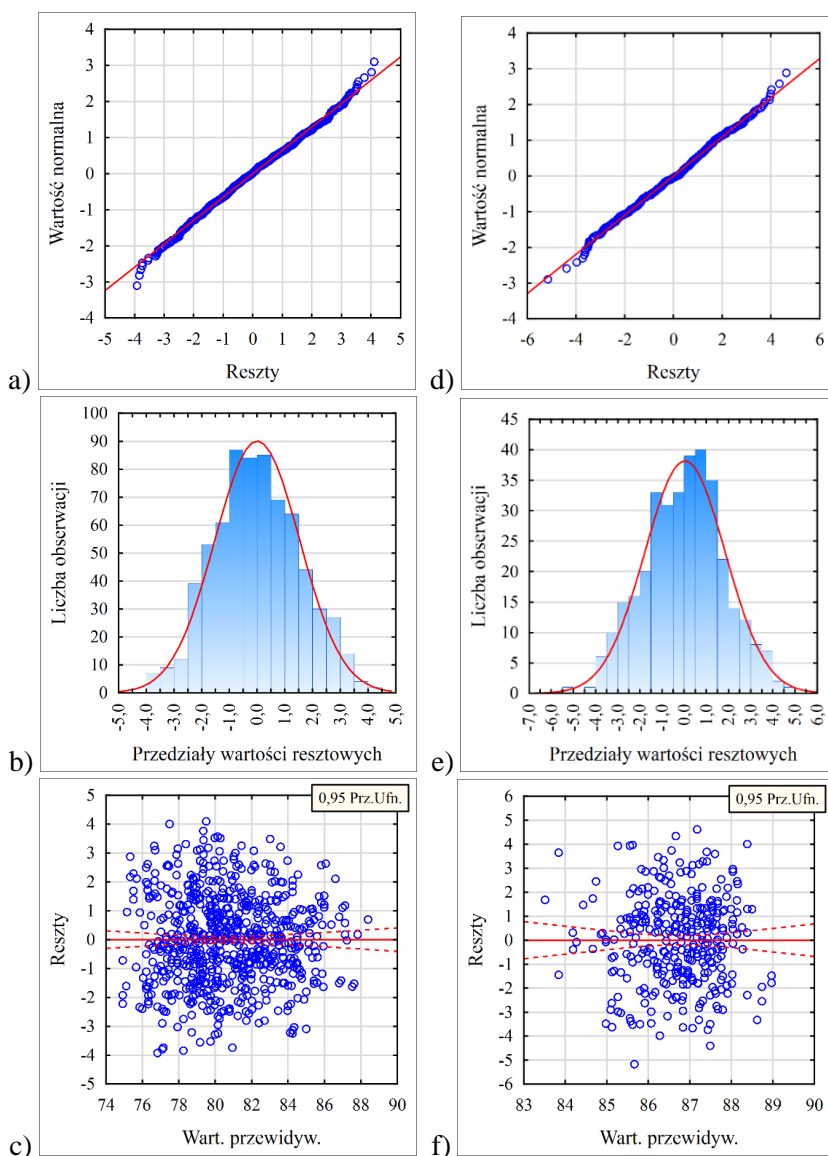


Rys. 4.24. Poziomy dźwięku od pojazdu osobowego: a) nawierzchnia asfaltowa, b) nawierzchnia betonowa

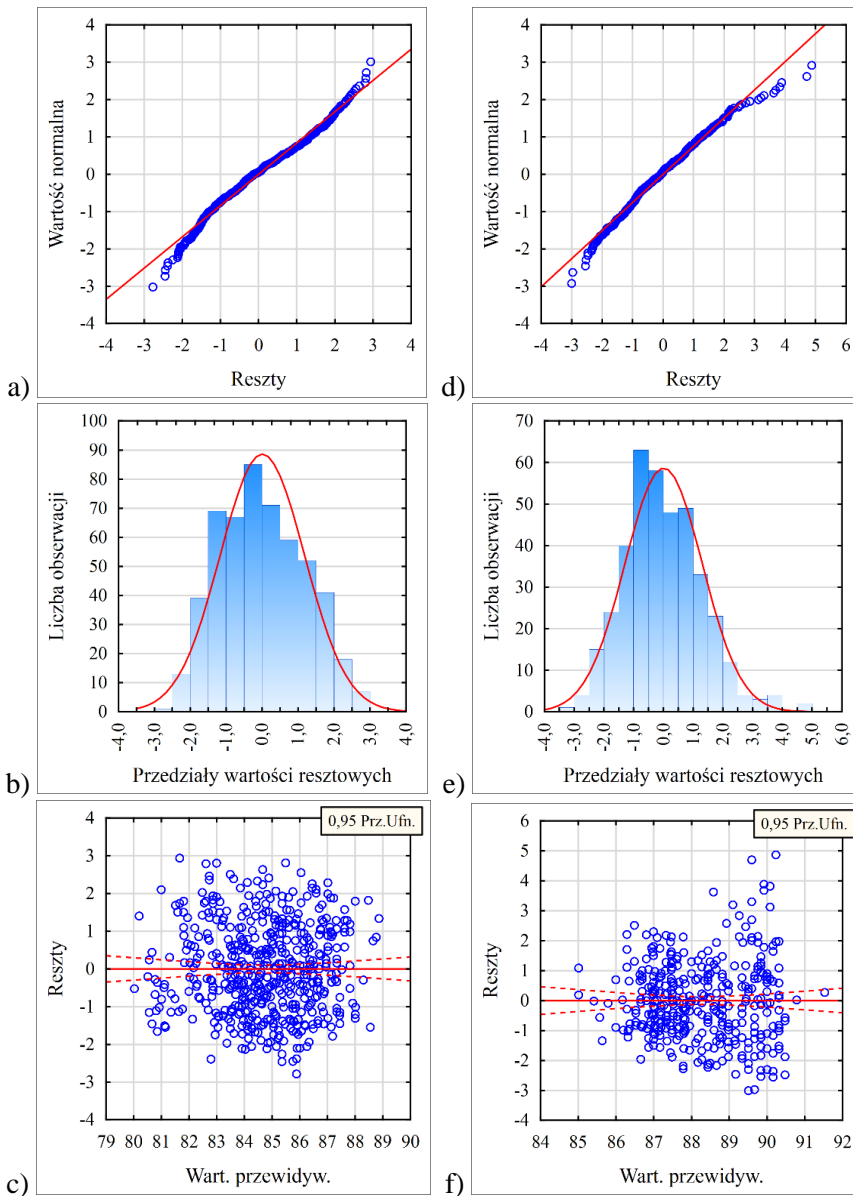


Rys. 4.25. Poziomy dźwięku od pojazdu ciężarowego kategorii 2b: a) nawierzchnia asfaltowa, b) nawierzchnia betonowa

#### 4. Wpływ tekstury na poziom hałasu toczenia pojazdów samochodowych



Rys. 4.26. Analiza reszt jako weryfikacja założeń analizy regresji (nawierzchnia asfaltowa):  
 – pojazd osobowy: a) wykres normalności reszt, b) histogram reszt, c) wykres rozrzutu wartości przewidywanych względem reszt;  
 – pojazd ciężarowy kategorii 2b: d) wykres normalności reszt, e) histogram reszt, f) wykres rozrzutu wartości przewidywanych względem reszt



Rys. 4.27. Analiza reszt jako weryfikacja założeń analizy regresji (nawierzchnia betonowa):

- pojazd osobowy: a) wykres normalności reszt, b) histogram reszt, c) wykres rozrzutu wartości przewidywanych względem reszt;
- pojazd ciężarowy kategorii 2b: d) wykres normalności reszt, e) histogram reszt, f) wykres rozrzutu wartości przewidywanych względem reszt

Opracowane zależności regresyjne różnią się od zależności podanych w pracach [69, 74] w odniesieniu do nawierzchni asfaltowych. Stwierdzone różnice wynikają ze zwiększonej liczby badanych nawierzchni uwzględnionych przy opracowaniu modeli regresyjnych.

W oparciu o powyższe modele regresyjne w tabeli 4.8 porównano różnice w poziomach hałasu od przejazdu statystycznego pojazdu osobowego i ciężarowego kategorii 2b w zależności od makrotekstury i prędkości przejazdu na nawierzchniach asfaltowych i z betonu cementowego. Ustalone wartości wskazują na większą hałaśliwość nawierzchni betonowych przy *MPD* od 0,4 mm do 0,9 mm. Przy głębokości makrotekstury od 0,9 mm do 1,1 mm nawierzchnie asfaltowe są głośniejsze niż nawierzchnie betonowe. Podobne relacje występują zarówno w odniesieniu do pojazdu osobowego, jak i pojazdu ciężarowego.

Tabela 4.8. Różnice w hałaśliwości nawierzchni asfaltowych i betonowych w funkcji *MPD* i prędkości

<i>MPD</i> [mm]	Różnice pomiędzy poziomami dźwięków w zależności od prędkości [dB]									
	Prędkość $V_{so}$ [km/h]							Prędkość $V_{sc2b}$ [km/h]		
	90	100	110	120	130	140	150	70	80	90
0,4	-2,1	-2,2	-2,3	-2,3	-2,4	-2,4	-2,5	-1,6	-2,2	-2,6
0,5	-1,8	-1,8	-1,9	-2,0	-2,0	-2,1	-2,1	-1,3	-1,8	-2,3
0,6	-1,3	-1,4	-1,5	-1,5	-1,6	-1,7	1,7	-0,8	-1,3	-1,8
0,7	-0,9	-0,9	-1,0	-1,1	-1,1	-1,2	-1,2	-0,2	-0,8	-1,2
0,8	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,6	-0,6	-0,7	0,4	-0,2	-0,6
0,9	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	-0,1	1,0	0,5	0,0
1,0	0,9	0,9	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	1,8	1,3	0,8
1,1	1,7	1,6	1,5	1,5	1,4	1,3	1,3	2,6	2,1	1,6

Wyniki przeprowadzonych pomiarów stanowiły podstawę do opracowania zależności funkcyjnych w pasmach oktaowych emitowanych dźwięków od jadących pojazdów. Współczynniki modeli regresyjnych oraz standardowe błędy estymacji podano w tabeli 4.9, a w tabeli 4.10 przedstawiono wyniki sprawdzenia istotności parametrów ustalonych zależności.

Tabela 4.9. Współczynniki wielomianów i standardowe błędy estymacji

$f$ [Hz]	Nawierzchnie asfaltowe					Nawierzchnie betonowe				
	Wyraz wolny	$\log V$	$MPD$	$MPD^2$	$S_e$	Wyraz wolny	$\log V$	$MPD$	$MPD^2$	$S_e$
Pojazd osobowy										
63	38,56	3,27	13,35	-9,73	4,44	9,57	19,86	-0,49	-	2,63
125	-17,30	37,02	1,23	-	3,55	-25,84	41,54	0,16	-	1,85
250	3,12	28,97	3,69	-	2,79	-0,94	32,40	-	1,26	1,66
500	26,01	20,50	-	4,71	2,50	10,27	30,60	-3,46	2,58	1,61
1000	20,62	27,47	-	4,80	1,82	15,89	32,05	-2,04	2,16	1,30
2000	18,03	30,04	-8,03	7,11	1,86	21,11	29,42	-6,96	2,56	1,93
4000	2,50	34,40	-13,03	9,66	2,04	9,71	31,19	-8,26	3,02	1,62
8000	-9,05	34,30	-8,41	7,08	2,51	-12,95	37,37	-6,17	2,21	1,70
Pojazd ciężarowy kategorii 2b										
63	52,88	3,54	-	-	5,46	-50,29	56,34	-	-	3,30
125	38,18	13,42	-	-	4,30	30,74	18,67	-	-	2,33
250	87,34	-7,81	-	-	3,93	40,19	17,19	0,66	-	2,37
500	41,71	22,48	-8,64	7,53	2,69	40,43	23,68	-5,85	2,49	1,95
1000	33,37	27,62	-9,15	7,91	1,77	18,46	37,83	-10,70	4,10	1,71
2000	44,76	20,17	-14,08	10,40	2,03	17,13	34,62	-8,92	3,13	1,43
4000	35,20	20,29	-9,71	7,55	2,74	21,39	29,30	-13,02	4,78	1,80
8000	30,43	19,36	-19,54	16,02	3,47	0,48	36,19	-13,47	4,94	2,34

Tabela 4.10. Weryfikacja istotności parametrów modeli regresyjnych

$f$ [Hz]		Nawierzchnie asfaltowe				Nawierzchnie betonowe			
		$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{22}$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{22}$
Pojazd osobowy									
Cały zakres	$t$	12,14	39,16	-2,23	6,65	8,88	31,46	-6,32	9,35
	$p$	0,000	0,000	0,026	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
63	$t$	8,60	1,46	3,95	-4,17	2,08	9,05	-2,10	-
	$p$	0,000	0,143	0,000	0,000	0,037	0,000	0,037	-
125	$t$	-4,87	20,76	2,62	-	-7,66	25,67	1,02	-
	$p$	0,000	0,000	0,009	-	0,000	0,000	0,044	-
250	$t$	1,12	20,68	10,03	-	-0,32	23,32	-	8,56
	$p$	0,264	0,000	0,000	-	0,746	0,000	-	0,000

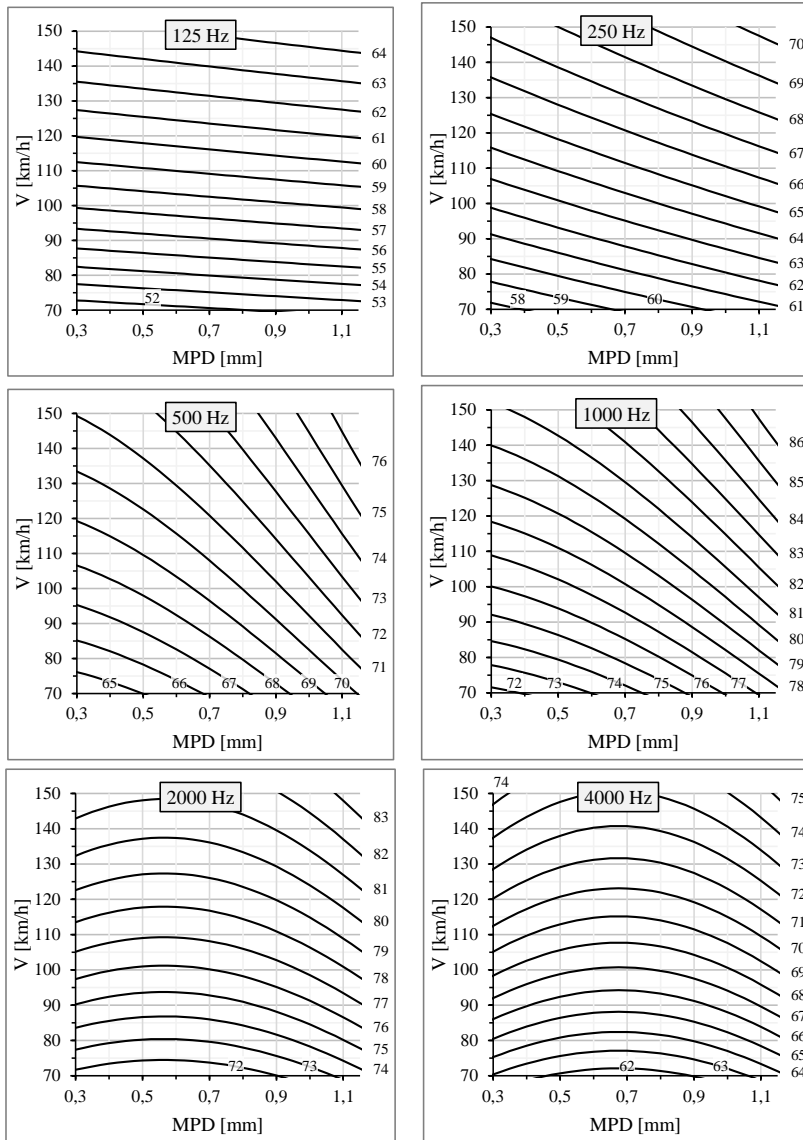
#### 4. Wpływ tekstury na poziom hałasu toczenia pojazdów samochodowych

Tabela 4.10. Weryfikacja istotności parametrów modeli regresyjnych – cd.

500	<i>t</i>	10,44	16,35	-	4,71	3,62	22,13	-4,66	7,56
	<i>p</i>	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1000	<i>t</i>	11,33	30,00	-	28,84	6,93	28,66	-3,39	7,84
	<i>p</i>	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
2000	<i>t</i>	9,61	32,13	-5,67	7,28	6,18	17,66	-7,80	6,23
	<i>p</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4000	<i>t</i>	1,21	33,52	8,39	9,00	3,40	22,37	-11,05	8,78
	<i>p</i>	0,225	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
8000	<i>t</i>	-3,56	27,08	-4,39	5,35	-4,31	25,52	-7,86	6,43
	<i>p</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Pojazd ciężarowy kategorii 2b									
Cały zakres	<i>t</i>	9,16	9,02	-3,50	3,96	4,21	8,70	-14,05	12,29
	<i>p</i>	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
63	<i>t</i>	3,64	0,46	-	-	-2,80	6,05	-	-
	<i>p</i>	0,000	0,645	-	-	0,005	0,000	-	-
125	<i>t</i>	3,34	2,22	-	-	2,42	2,85	-	-
	<i>p</i>	0,001	0,027	-	-	0,016	0,005	-	-
250	<i>t</i>	8,36	-1,41	-	-	3,11	2,57	2,79	-
	<i>p</i>	0,000	0,159	-	-	0,002	0,011	0,006	-
500	<i>t</i>	5,76	5,89	-2,42	2,82	3,77	4,29	-6,04	5,79
	<i>p</i>	0,000	0,000	0,016	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000
1000	<i>t</i>	7,03	11,04	-3,91	4,51	1,96	7,82	-12,60	10,89
	<i>p</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,050	0,000	0,000	0,000
2000	<i>t</i>	8,21	7,02	-5,24	2,01	2,17	8,53	-12,53	9,91
	<i>p</i>	0,000	0,0000	0,000	0,000	0,030	0,000	0,000	0,000
4000	<i>t</i>	4,78	5,23	-2,68	2,78	2,16	5,74	-14,56	12,04
	<i>p</i>	0,000	0,000	0,008	0,006	0,031	0,000	0,000	0,000
8000	<i>t</i>	3,26	3,94	-4,25	4,65	0,04	5,47	-11,57	9,55
	<i>p</i>	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

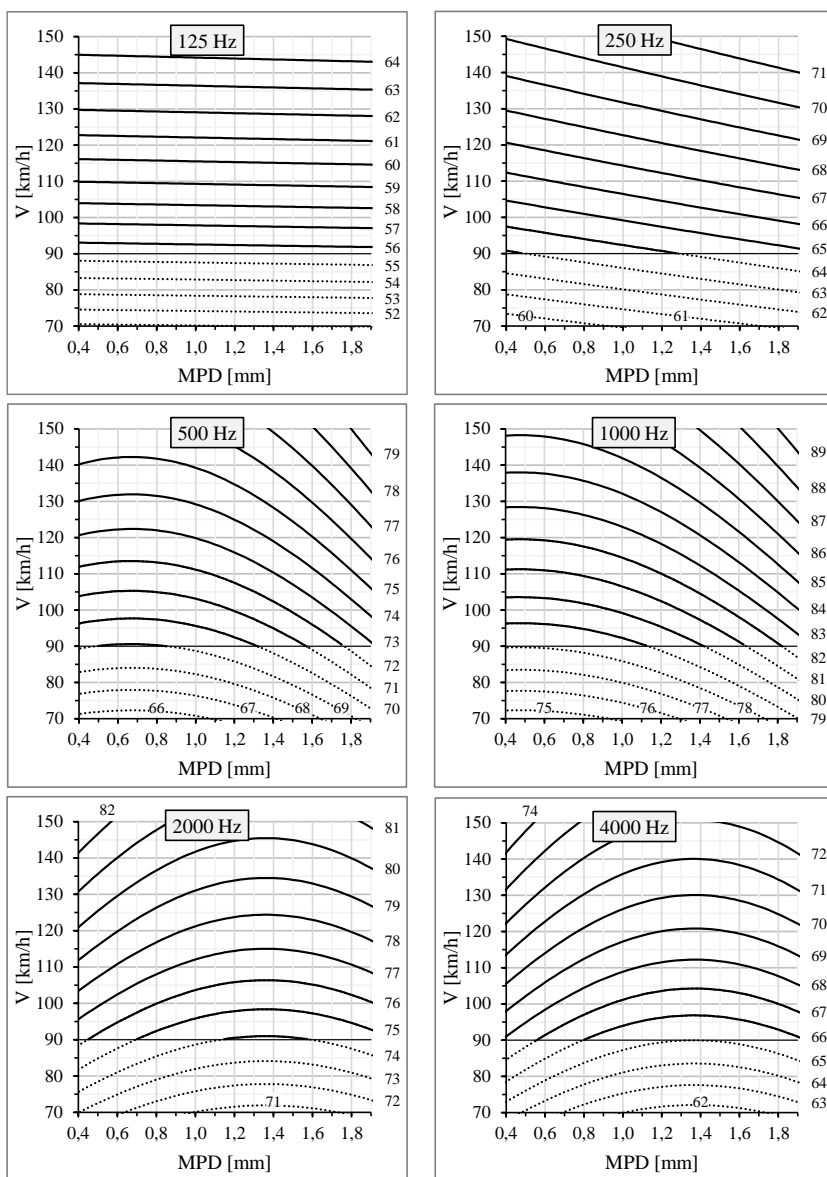
W modelach regresyjnych w odniesieniu do pasm oktawowych niektóre z parametrów okazały się nieistotne na poziomie istotności 0,05. Dotyczy to częstotliwości 63 Hz, 250 Hz i 4000 Hz. Na rysunkach 4.28÷4.31 przedstawiono nomogramy prezentujące wartości maksymalnego poziomu dźwięku od statystycznego

pojazdu osobowego i statystycznego wieloczlónowego pojazdu ciężarowego, jadących na nawierzchni asfaltowej i na nawierzchni betonowej, w pasmach oktawowych o środkowych częstotliwościach: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz i 4000 Hz.



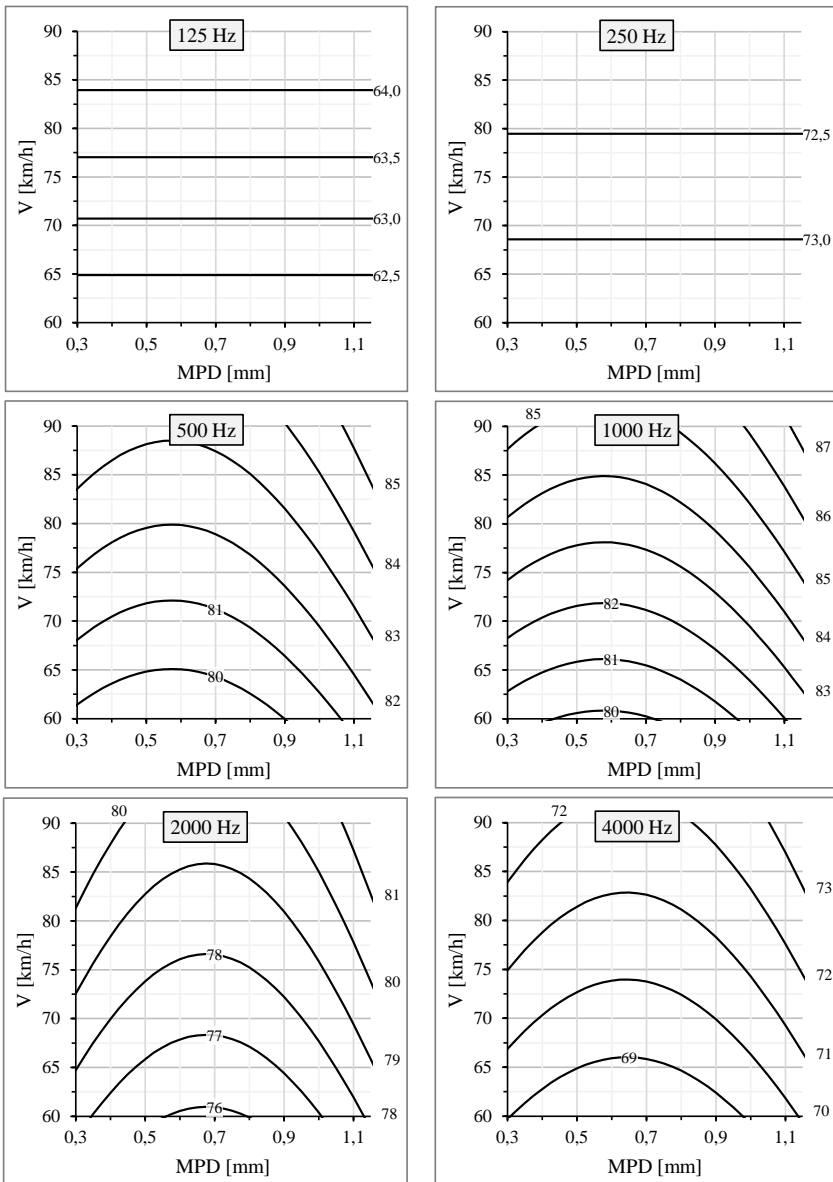
Rys. 4.28. Poziomy dźwięku w pasmach oktawowych na nawierzchniach asfaltowych – pojazd osobowy

#### 4. Wpływ tekstury na poziom hałasu toczenia pojazdów samochodowych



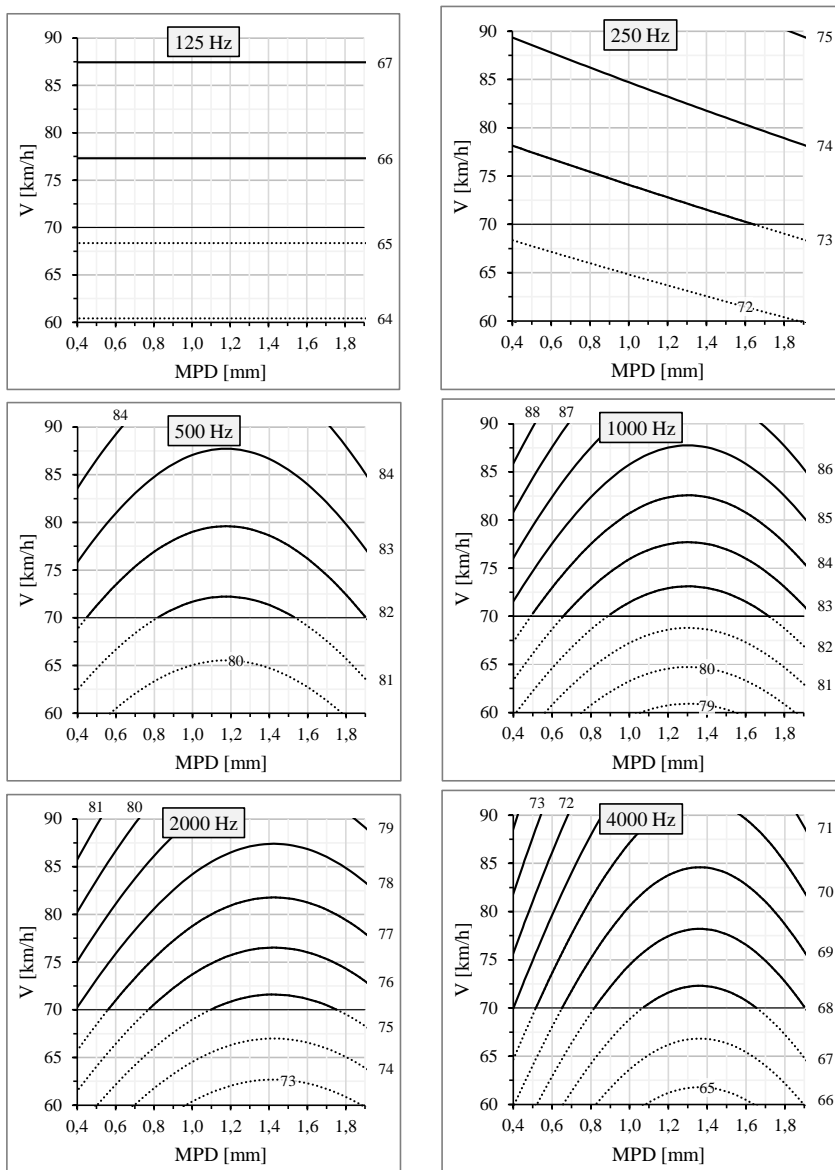
Rys. 4.29. Poziomy dźwięk w pasmach oktawowych na nawierzchniach betonowych – pojazd osobowy





Rys. 4.30. Poziomy dźwięku w pasmach oktawowych na nawierzchniach asfaltowych – pojazd ciężarowy kat. 2b

#### 4. Wpływ tekstury na poziom hałasu toczenia pojazdów samochodowych



Rys. 4.31. Poziomy dźwięku w pasmach oktawowych na nawierzchniach betonowych – pojazd ciężarowy kat. 2b

Przy częstotliwości 1000 Hz i niższych częstotliwościach zwiększenie wartości *MPD* powoduje wzrost poziomu emitowanych dźwięków od pojazdu osobowego na nawierzchni asfaltowej. Powyżej częstotliwości 1000 Hz korzystnym rozwiązaniem jest nawierzchnia o wartości *MPD* zbliżonej do 0,70 mm. W wypadku nawierzchni betonowej i pojazdu osobowego przy częstotliwościach 125 Hz i 250 Hz wzrost makrotekstury wpływa na wzrost poziomu dźwięku, przy częstotliwościach 500 Hz i 1000 Hz korzystnym rozwiązaniem jest nawierzchnia o wartości  $MPD = 0,4 \div 0,8$  mm, a przy częstotliwościach 2000 Hz i 4000 Hz – o wartości *MPD* zbliżonej do 1,4 mm.

W odniesieniu do pojazdu ciężarowego na nawierzchni asfaltowej praktycznie nie zanotowano wpływu makrotekstury na poziom dźwięku o częstotliwości 125 Hz i 250 Hz, a w wypadku wyższych częstotliwości najkorzystniejszym rozwiązaniem jest nawierzchnia o wartości *MPD* zbliżonej do 0,6 mm. Na nawierzchni z betonu cementowego, z punktu widzenia poziomu hałasu od pojazdu ciężarowego, powyżej częstotliwości 250 Hz najniższą emisję dźwięku notuje się przy wartości *MPD* zbliżonej do 1,4 mm.

Podsumowując, należy stwierdzić, że zarówno w odniesieniu do całkowitych poziomów dźwięku, jak i poziomów dźwięku w pasmach oktawowych występuje podobieństwo pod względem hałasliwości nawierzchni asfaltowych o zwartej strukturze i nawierzchni betonowych z odkrytym kruszywem, wybudowanych na drogach w Polsce.

Z punktu widzenia pojazdu osobowego nawierzchnia asfaltowa powinna charakteryzować się drobną teksturą, a nawierzchnia betonowa – makroteksturą o wartości *MPD* zbliżonej do 0,8 mm. W odniesieniu do pojazdu ciężarowego najniższe poziomy dźwięku występują przy makroteksturze o wartości *MPD* równej 0,5 mm (nawierzchnie asfaltowe) i 1,3 mm (nawierzchnie betonowe z odkrytym kruszywem). Podane powyżej ustalenia dotyczą pojazdów osobowych jadących z prędkością od 70 km/h do 150 km/h na nawierzchni asfaltowej i od 90 km/h do 150 km/h na nawierzchni betonowej oraz pojazdów ciężarowych jadących z prędkością odpowiednio 60÷90 km/h i 70÷90 km/h.

## **5. Jednorodność, trwałość i ocena akustyczna nawierzchni drogowych**

### **5.1. Analiza porównawcza jednorodności akustycznej nawierzchni z SMA, asfaltu porowatego i cienkiej warstwy z betonu asfaltowego**

#### **5.1.1. Założenia i program badań**

Przyczyną niejednorodności akustycznej nawierzchni drogowych mogą być błędy popełnione na etapie wytwarzania mieszanki mineralno-asfaltowej, błędy przy jej wbudowaniu, błędy w teksturowaniu nawierzchni betonowych, niewłaściwe metody stosowane w ramach zimowego utrzymania oraz lokalne zniszczenia powstające w czasie eksploatacji drogi. Niekiedy pierwsze realizacje, z uwagi na brak doświadczenia wykonawców, są obciążone dodatkowymi błędami. W wypadku nawierzchni asfaltowych o zwiększonej zawartości wolnych przestrzeni przyczyną braku jednorodności akustycznej górnych warstw nawierzchni jest nierównomierne zatykanie się porów spowodowane zmiennymi warunkami eksploatacji (np. lokalizacja wjazdów/wyjazdów i skrzyżowań, zróżnicowane obciążenie pasów ruchu, zróżnicowana struktura rodzajowa pojazdów i różne ich prędkości).

Jednorodność akustyczną nawierzchni na danym odcinku drogi można ocenić w oparciu o odchylenie standardowe (*Scpx*) poziomów dźwięku ustalonych metodą CPX na poszczególnych odcinkach drogi w odniesieniu do pojedynczych przejazdów, pasów ruchu, prędkości referencyjnych i opon testowych [98]. Z uwagi na brak w naszym kraju odcinka drogi krajowej, na której w niewielkiej odległości wykonano nawierzchnie o różnych właściwościach akustycznych, o takim samym okresie eksploatacji i zbliżonym obciążeniu ruchem, do przeprowadzenia analizy jednorodności akustycznej wybrano drogę wojewódzką nr 780 w województwie małopolskim. W stosunkowo niewielkiej odległości od siebie wytypowano cztery odcinki, każdy o długości 500 m, o nawierzchni: SMA5, SMA11, BBTM8 i PAC8.

Ogólna charakterystyka warstw ściernalnych na tych odcinkach przedstawiała się następująco:

- SMA5 – maksymalne uziarnienie kruszywa 5 mm, zawartość wolnych przestrzeni 3÷4%, grubość 25 mm;

- SMA11 – maksymalne uziarnienie kruszywa 11 mm, zawartość wolnych przestrzeni 3÷4%, grubość 40 mm;
- BBTM8 – maksymalne uziarnienie kruszywa 8 mm, zawartość wolnych przestrzeni 12÷15%, grubość 30 mm;
- PAC8 – maksymalne uziarnienie kruszywa 8 mm, zawartość wolnych przestrzeni 18÷24%, grubość 40 mm, dodatek granulatu asfaltowo-gumowego „tecRoad”.

Pomiary poziomu dźwięku opona/nawierzchnia metodą CPX były wykonane przez zespół z Politechniki Gdańskiej w 2010 i 2012 roku, a autor monografii był konsultantem w ramach projektu realizowanego przez Zarząd Dróg Wojewódzkich w Krakowie, TPA Instytut Badań Technicznych Sp. z o.o. i przedsiębiorstwo realizujące przebudowę drogi. Do badań poziomu hałasu wytypowano odcinki testowe o długości 500 m i na każdym z nich wykonano po dwa (lub trzy) przejazdy na każdym pasie ruchu, oznaczonym odpowiednio jako „E” (pas prowadzący ruch w kierunku wschodnim) i „W” (pas prowadzący ruch w kierunku zachodnim). W badaniach wykorzystano dwie opony testowe P1 i H1, a wyniki pomiarów znormalizowano do temperatury 20°C oraz prędkości referencyjnej 50 km/h i 80 km/h.

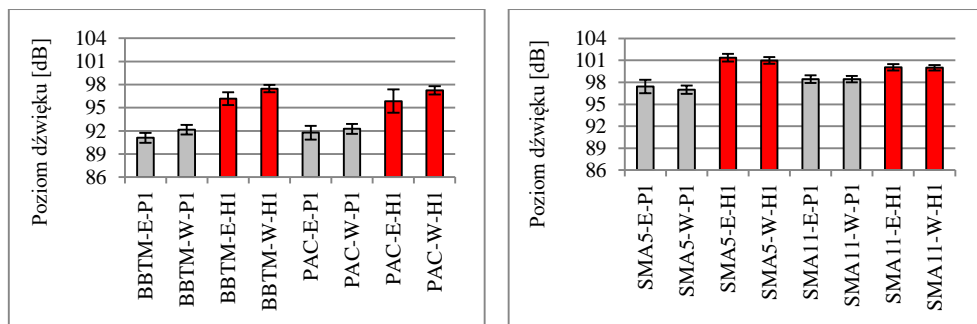
### 5.1.2. Ocena jednorodności akustycznej nawierzchni

Analizę przeprowadzono w oparciu o wyniki maksymalnego poziomu dźwięku ustalone na 10-metrowych segmentach drogi na poszczególnych pasach ruchu na czterech odcinkach testowych. Przyjęta długość segmentu (10 m), inna niż długość normowa (20 m), wynikała z potrzeby powiązania długości segmentu z długością odcinka obliczeniowego równą 50 m (5 x 10 m), przyjmowaną w badaniach i ocenie parametrów techniczno-eksploatacyjnych na drogach w Polsce [47].

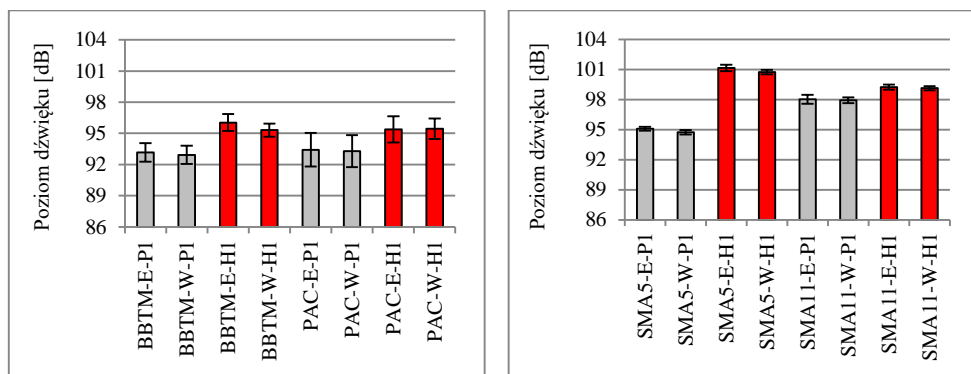
Uzyskane w 2010 roku wyniki pomiarów stanowiły podstawę do oceny jednorodności akustycznej nawierzchni bezpośrednio po jej wybudowaniu, a wyniki z 2012 roku – do oceny jednorodności po dwóch latach eksploatacji drogi. Szczegółowe dane na temat przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników zaprezentowano w pracach [148, 149]. Poniżej przedstawiono ich podsumowanie wraz z poszerzoną analizą.

Poziomy dźwięku i ich odchylenia standardowe, określone przy dwóch lub trzech przejazdach przyczepy badawczej na tej samej nawierzchni, na tym samym pasie ruchu, przy tej samej oponie testowej i tej samej prędkości referencyjnej, w poszczególnych latach nie różniły się istotnie [148]. W związku z tym do dalszych analiz przyjęto ich średnie wartości niezależnie dla dwóch okresów pomiarowych (2010 i 2012) oraz obliczono odchylenia standardowe  $S_{CPX}$ . Na rysunkach 5.1 i 5.2

pokazano, jako przykład, średnie wartości poziomu dźwięku wraz z ustalonymi wartościami  $S_{CPX}$  na badanych nawierzchniach (BBTM8, PAC8, SMA5, SMA11), na dwóch pasach ruchu (E i W), dla dwóch opon testowych (P1 i H1), przy prędkości referencyjnej 80 km/h.



Rys. 5.1. Średnie wartości poziomów dźwięku wraz z odchyleniami standardowymi na badanych nawierzchniach w 2010 r.

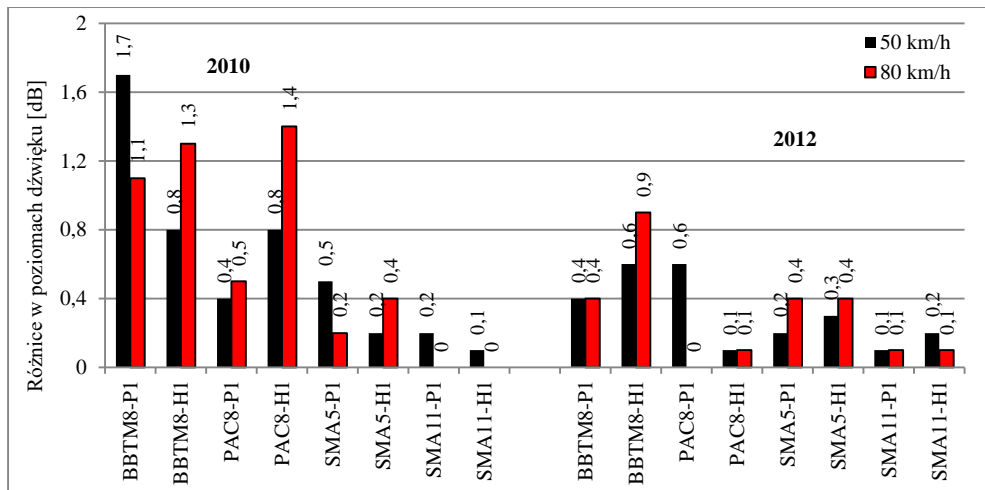


Rys. 5.2. Średnie wartości poziomów dźwięku wraz z odchyleniami standardowymi na badanych nawierzchniach w 2012 r.

Z przedstawionych danych wynika, że ustalone poziomy dźwięku na dwóch pasach ruchu w odniesieniu do tej samej opony, przy takiej samej technologii wykonania warstwy ścierniczej nie różnią się istotnie (poza nową nawierzchnią typu BBTM). Jednak różnice pomiędzy średnimi wartościami poziomu hałasu na poszczególnych pasach ruchu, w odniesieniu do tej samej opony, osiągają stosunkowo duże wartości (rys. 5.3). Dotyczy to w szczególności nawierzchni PAC8 i BBTM8. Na przykład na nawierzchni BBTM8 podczas pomiaru z zastosowaniem

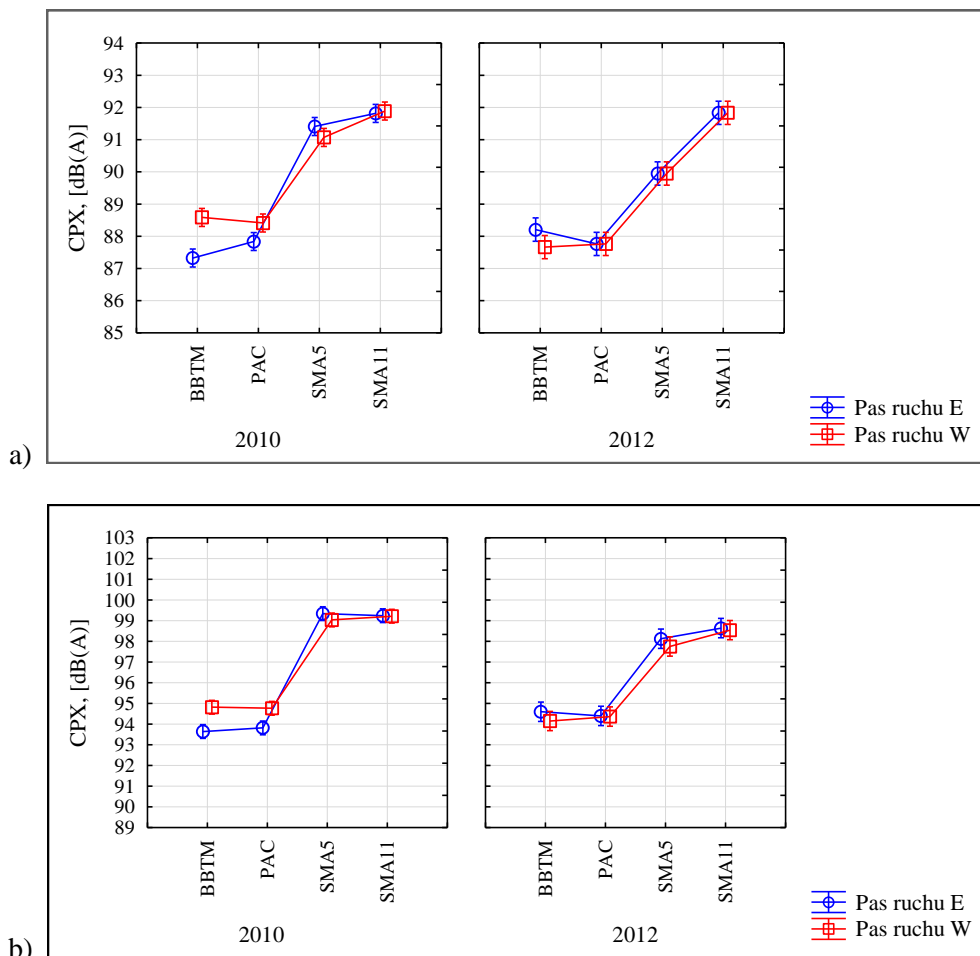
opony P1 przy prędkości 50 km/h ustalono różnicę 1,7 dB. Przy pomiarze z wykorzystaniem opony H1, przy prędkości 80 km/h, wartości różnic wynosiły 1,3 dB na nawierzchni BBTM8 i 1,4 dB na nawierzchni PAC8. Jedną z prawdopodobnych przyczyn tak dużego zróżnicowania poziomów hałasu pomiędzy pasami ruchu na tych nawierzchniach były niedokładności na etapie budowy warstw ścieralnych ze zwiększoną zawartością wolnych przestrzeni. Po dwóch latach eksploatacji nie zanotowano tak dużych różnic w hałaśliwości nawierzchni na dwóch pasach ruchu.

W wypadku nawierzchni z mastyksu grysowego różnice pomiędzy hałaśliwością nawierzchni na dwóch pasach ruchu, zarówno bezpośrednio po jej wykonaniu, jak i po dwóch latach eksploatacji, nie przekraczały 0,5 dB.



Rys. 5.3. Różnice pomiędzy poziomami dźwięku na pasie E i pasie W

W oparciu o dwuczynnikową analizę wariancji z powtórzeniami [214] zbada-no różnice w poziomach dźwięku, uwzględniając średnie z wyników dla dwóch opon testowych, na dwóch pasach ruchu, w zależności od rodzaju nawierzchni, w latach 2010 i 2012, przy prędkościach 50 km/h i 80 km/h (rys. 5.4). Ustalono, że w 2010 roku pasy ruchu różniły się istotnie pod względem hałaśliwości na nawierzchni BBTM8 i nawierzchni PAC8. Znaczące różnice ustalono także na nawierzchni SMA5. Poziomy dźwięku określone w 2012 roku na dwóch pasach nie różniły się istotnie. Stwierdzono przy tym, że różnice średnich poziomów hałasu, ustalone jako średnie z dwóch opon, były znacznie mniejsze niż różnice przy porównaniu poziomów hałasu od poszczególnych opon.



Rys. 5.4. Porównanie wartości  $L_{CPX}$  na dwóch pasach ruchu dla dwóch opon łącznie: a) 50 km/h, b) 80 km/h

Na podstawie wartości odchyłek standardowych  $S_{CPX}$  w odniesieniu do poziomów hałasu na poszczególnych nawierzchniach, podanych w tabeli 5.1, stwierdzono, że bezpośrednio po ich wykonaniu współczynnik  $S_{CPX}$  osiągnął maksymalną wartość (1,59 dB) na nawierzchni PAC8 przy pomiarze z oponą H1 i prędkości 80 km/h. Na nawierzchniach z mastyksu grysowego standardowe odchylenia były mniejsze niż na nawierzchniach BBTM8 i PAC8. Najwyższą średnią wartość  $S_{CPX}$  z wyników obliczonych dla dwóch pasów ruchu i dwóch opon uzyskano na nawierzchni PAC8 ( $1,00 \pm 0,42$ ).



Tab. 5.1. Wartości odchylenia standardowego poziomów dźwięku na odcinkach testowych

Nawierzchnia	V	Opona	$SCP_X$ (2010)			$SCP_X$ (2012)		
			Pas E	Pas W	Średnia	Pas E	Pas W	Średnia
BBTM8	50	P1	0,73	0,58	0,66±0,07	0,91	0,77	0,82±0,10
		H1	0,70	0,64		0,71	0,90	
	80	P1	0,72	0,75	0,74±0,18	0,92	0,94	0,88±0,06
		H1	0,95	0,52		0,86	0,80	
PAC8	50	P1	1,01	0,61	0,84±0,24	0,98	1,04	1,00±0,05
		H1	1,08	0,66		1,02	0,94	
	80	P1	1,00	0,75	1,00±0,42	1,69	1,57	1,39±0,28
		H1	1,59	0,65		1,24	1,08	
SMA5	50	P1	0,63	0,57	0,48±0,15	0,25	0,27	0,29±0,05
		H1	0,39	0,32		0,36	0,28	
	80	P1	0,76	0,66	0,63±0,11	0,30	0,35	0,32±0,05
		H1	0,59	0,50		0,36	0,26	
SMA11	50	P1	0,50	0,46	0,46±0,05	0,53	0,35	0,38±0,10
		H1	0,48	0,38		0,32	0,33	
	80	P1	0,69	0,53	0,56±0,10	0,52	0,41	0,41±0,09
		H1	0,58	0,45		0,40	0,31	

Po dwóch latach eksploatacji drogi najwyższą wartość  $SCP_X$  zanotowano na nawierzchni PAC8 przy pomiarze oponą P1 i prędkości 80 km/h (1,69 dB). Wszystkie średnie wartości odchylenia standardowego na nawierzchniach o zwiększonej zawartości wolnych przestrzeni były zdecydowanie większe od 0,5 dB, a na nawierzchniach z mastyksu grysowego zdecydowanie mniejsze niż 0,5 dB. Stwierdzono także zdecydowany wzrost średnich wartości  $SCP_X$  na nawierzchniach o zwiększonej zawartości wolnych przestrzeni i ich zdecydowany spadek na nawierzchniach z SMA. W pierwszym wypadku wpływ na wzrost wartości  $SCP_X$  miało nierównomierne zanieczyszczanie struktury wewnętrznej nawierzchni porowatych, a w drugim wypadku – wyrównywanie się pod wpływem ruchu pojazdów powierzchni nawierzchni o zwartej strukturze.

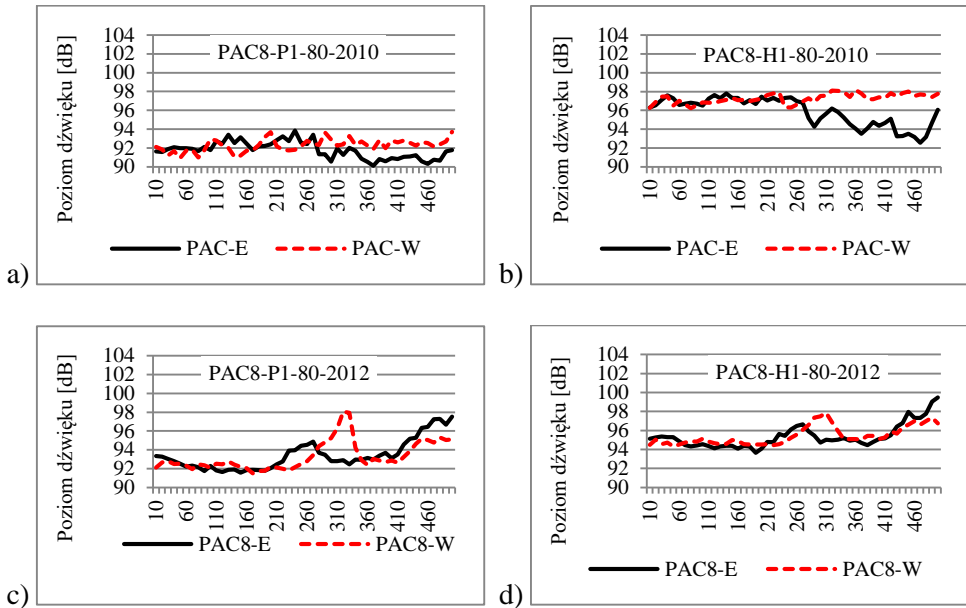
Podobne wyniki w zakresie jednorodności akustycznej ustalili badacze w innych krajach. Paje i in. [170, 171] odnotowali maksymalną wartość  $Scpx$  wynoszącą 1,7 dB na odcinku testowym o nawierzchni porowatej o długości 5000 m. Na nawierzchni o strukturze częściowo otwartej wartości  $Scpx$  były zbliżone do 1,45 dB, na nawierzchni o zwartej strukturze, lecz w bardzo złym stanie technicznym (12-letni okres eksploatacji, pęknięcia, koleiny) – wartość  $Scpx$  była równa 3,6 dB.

Niejednorodność akustyczna nawierzchni może stanowić istotny problem przy wyborze przekroju do wykonania pomiarów hałasu metodą statystycznego przejazdu (SPB). Potwierdziły to badania Licitry i in. [128]. Wyniki uzyskane według metody SPB na odcinku testowym z dodatkiem gumy i na nawierzchni o zwartej strukturze w pięciu różnych okresach pomiarowych w ciągu trzech lat były zdecydowanie różne od wartości uzyskanych w ramach tych samych pomiarów, w tym samym czasie, przy zastosowaniu metody CPX. Zdaniem autorów trudno jest porównywać rezultaty prowadzonych badań metodą CPX (pomiar ciągły na długości całego odcinka) z pomiarem metodą SPB, w konkretnej lokalizacji. Oznacza to potrzebę bardziej jednoznacznych ustaleń, które umożliwią porównywalność wyników według tych dwóch metod.

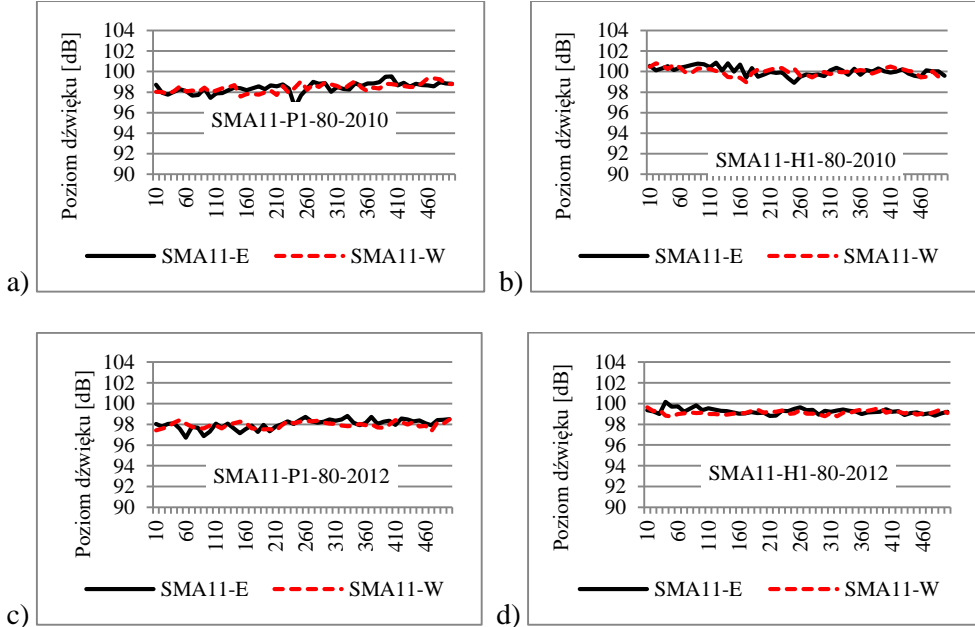
Wartości  $S_{CPX}$  ustalone na drogach w Polsce oraz wyniki uzyskane przez badaczy w innych krajach potwierdzają, że nawierzchnie o zwiększonej zawartości wolnych przestrzeni charakteryzują na ogół większą niejednorodnością akustyczną w porównaniu z nawierzchniami o zwartej strukturze. Sytuacja ta ulega pogorszeniu wraz z okresem eksploatacji.

Dodatkowo na nawierzchniach o zwiększonej zawartości wolnych przestrzeni, poza początkową i końcową częścią odcinka, mogą występować także inne miejsca o podwyższonej hałaśliwości. Są to najczęściej rejonry zjazdów na pola i łąki, wjazdy na posesje czy skrzyżowania. Tak niekorzystnych zmian nie stwierdza się na ogół na nawierzchniach o zwartej strukturze. Potwierdzeniem tego są przedstawione na rysunkach 5.5 i 5.6 wartości  $L_{CPXP}$  i  $L_{CPXH}$ , ustalone na 10-metrowych segmentach o nawierzchni PAC8 i SMA11, przy prędkości 80 km/h, w ramach pomiarów wykonanych na drodze wojewódzkiej nr 780 w 2010 i 2012 roku. W załączniku Z2 pokazano ustalone wartości poziomu dźwięku na wszystkich badanych nawierzchniach.

Mając na uwadze powyższe ustalenia oraz uwzględniając założenie o długości odcinka obliczeniowego (50 m) przyjmowanego Polsce w ocenie stanu technicznego [47], przeprowadzono analizę zmian poziomów dźwięku na odcinkach o długości 50 m na podstawie wyników uzyskanych na 10-metrowych segmentach drogi oraz analizę zmian na odcinkach o długości 500 m w oparciu o wyniki ustalone na 50-metrowych odcinkach obliczeniowych. Wykorzystano w tym celu jednoczynnikową analizę wariancji [214]. Obliczenia wykonano niezależnie dla każdego z pasów ruchu, gdyż uzyskane wartości na nawierzchni porowatej w 2012 roku (w miejscu zlokalizowanego zjazdu na drogę boczną) wykazały prawdopodobne przesunięcie punktu początkowego pomiarów na jednym z pasów ruchu (rys. 5.5c i 5.5d). Jako jedną grupę danych przyjęto wyniki z odcinka o długości 50 m (5x10 m).



Rys. 5. 5. Poziomy dźwięku na 10-metrowych segmentach (PAC8, V = 80 km/h)



Rys. 5.6. Poziomy dźwięku na 10-metrowych segmentach (SMA11, V = 80 km/h)

Jako czynnik grupujący (klasyfikujący) ustalono poziom dźwięku na 10-metrowym segmencie badanej nawierzchni, a jako estymatory wariancji [214]:

- średni kwadrat odchylenia standardowego pomiędzy grupami, obliczony ze wzoru:

$$D_a = \sqrt{\frac{MS_{efekt}}{k}}, \quad (5.1)$$

- średni kwadrat odchylenia wewnątrzgrupowego, ustalony ze wzoru:

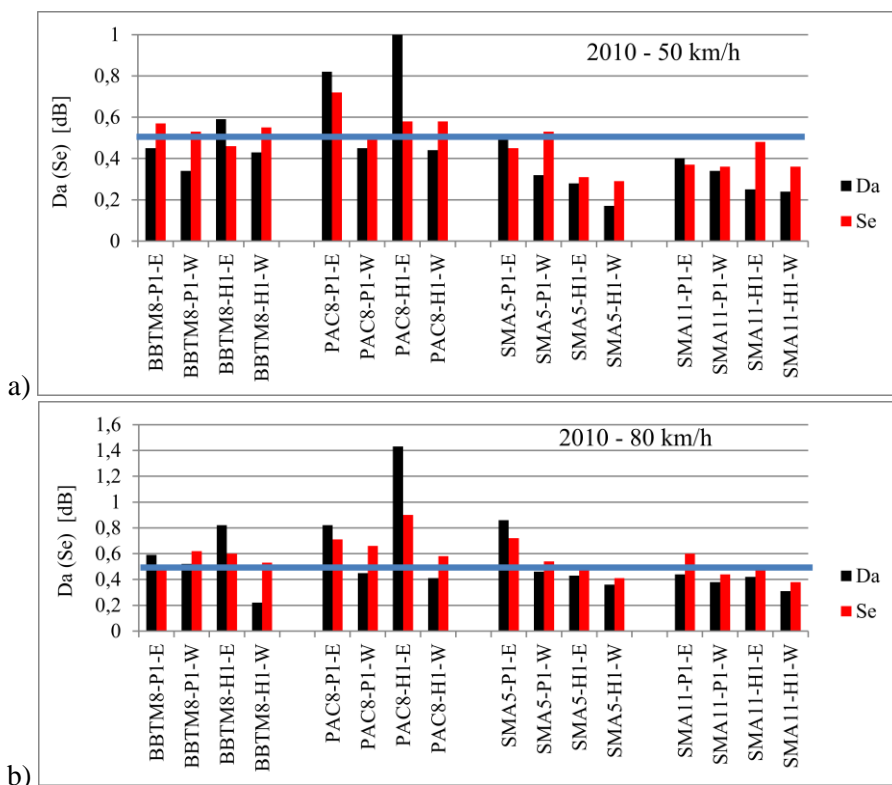
$$S_e = \sqrt{MS_{bład}}, \quad (5.2)$$

gdzie:

$MS_{efekt}$  – średnia suma kwadratów efektu,

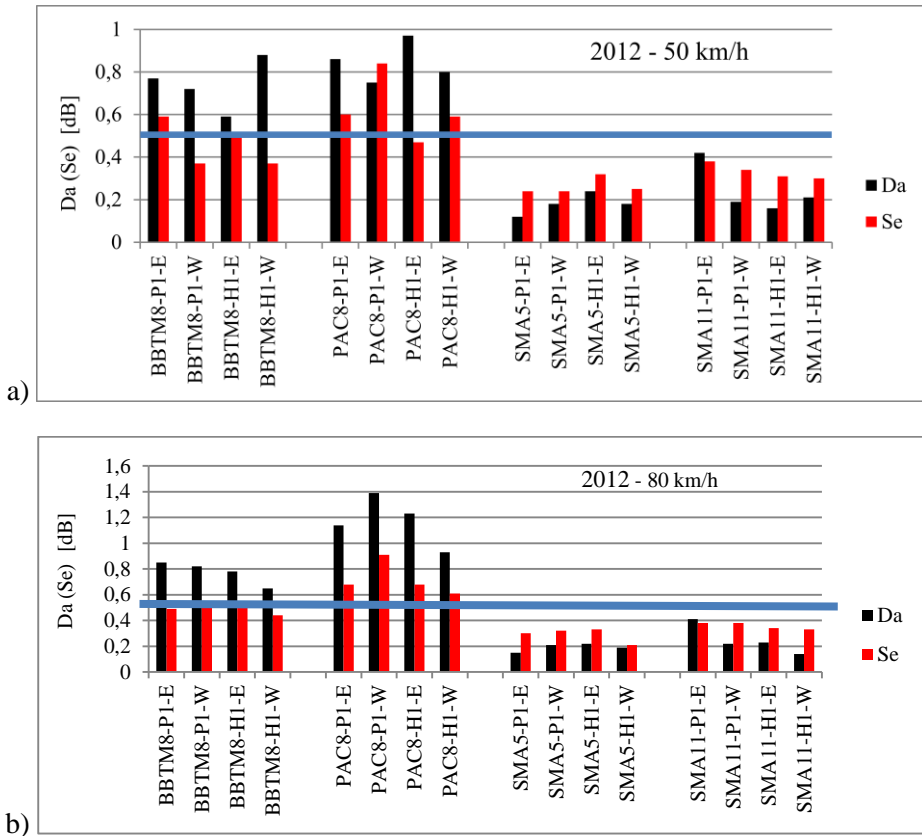
$MS_{bład}$  – średnia suma kwadratów błędu,

$k$  – liczba powtórzeń pomiarów na odcinku o długości 50 m ( $k = 5$ ).



Rys. 5.7. Wartości estymatorów wariancji według danych z 2010 roku

Wyniki obliczeń  $D_a$  i  $S_e$  przedstawiono na rysunkach 5.7 i 5.8 w odniesieniu do czterech nawierzchni (BBTM8, PAC8, SMA5, SMA11), dwóch opon (P1, H1), dwóch pasów ruchu (E, W), dwóch prędkości (50 km/h i 80 km/h), na podstawie pomiarów wykonanych w 2010 i 2012 roku.



Rys. 5.8. Wartości estymatorów wariancji według danych z 2012 roku

Przyjmując wartości dopuszczalne  $D_a = 0,5$  dB i  $S_e = 0,5$  dB, wyniki przeprowadzonej analizy potwierdzają występowanie problemów z jednorodnością nawierzchni ze zwiększoną zawartością wolnych przestrzeni. W wypadku nawierzchni o zwartej strukturze (SMA), przy prędkości 50 km/h i 80 km/h, jednorodność akustyczna jest zachowana na wymaganym poziomie, zarówno bezpośrednio po wykonaniu nawierzchni, jak i po dwóch eksploatacji. Wprawdzie na nawierzchni SMA5 w 2010 roku zanotowano pewne przekroczenia wartości 0,5 dB, ale prawdopodobnie było to związane z pozostałościami na powierzchni

ziaren kruszywa bezpośrednio po ułożeniu warstwy ścieralnej. Po dwóch latach eksploatacji sytuacja uległa zdecydowanej poprawie. Nastąpiło wyrównanie nierówności na powierzchni jezdni pod wpływem ruchu pojazdów.

Bardziej złożoną sytuację zanotowano na nawierzchniach PAC8 i BBTM8. Bezpośrednio po wykonaniu warstwy ścieralnej w 2010 roku na powierzchni jezdni stwierdzono nierówności związane z niedokładnością wykonania, a w 2012 następowało już nierównomierne zanieczyszczanie struktury wewnętrznej warstwy ścieralnej. Oznacza to, że w wypadku nawierzchni o zwiększonej zawartości wolnych przestrzeni prowadzenie monitoringu ich trwałości akustycznej jest uzasadnione i konieczne. Ma to bardzo ważne znaczenie zarówno z punktu widzenia ustalania przekrojów do badań poziomu hałasu metodą SPB, jak i oceny wpływu nawierzchni na poziom hałasu w otoczeniu drogi.

## 5.2. Trwałość akustyczna nawierzchni

### 5.2.1. Stan wiedzy

Stan techniczny nawierzchni drogowych w trakcie eksploatacji ulega pogorszeniu. Obciążenie ruchem samochodowym oraz niesprzyjające warunki atmosferyczne prowadzą do istotnych zmian zarówno w charakterystyce materiałów zastosowanych do budowy warstwy ścieralnej, jej strukturze wewnętrznej, jak i na powierzchni jezdni. Mają one wpływ na trwałość materiałowo-konstrukcyjną i na trwałość akustyczną. W pierwszym wypadku są to: starzenie się lepiszcza, ubytki ziaren kruszywa, spękania, koleiny, wyboje. Pogorszenie trwałości akustycznej oznacza wzrost poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych. Zmiany właściwości akustycznych nie przebiegają w sposób jednakowy na całej długości trasy drogowej. Skrzyżowania, wjazdy, zmiany prędkości pojazdów, zmienne obciążenie ruchem wpływają na występujące różnicowania w tym zakresie.

Zanieczyszczenia warstwy ścieralnej oraz problemy związane z zimowym utrzymaniem prowadzą do sytuacji, że po kilku latach eksploatacji tzw. nawierzchnie „ciche” charakteryzują się podobnymi właściwościami akustycznymi jak nawierzchnie o zwartej strukturze, będąc przy tym mniej trwałym rozwiązaniem pod względem konstrukcyjnym.

Zarządcy dróg powinni podejmować działania pozwalające na zachowanie dobrych właściwości akustycznych w możliwie długim czasie. Jednym z takich przedsięwzięć jest systematyczne czyszczenie nawierzchni porowatych oraz stosowanie odpowiednich działań w ramach zimowego utrzymania. Zaleca się na przykład czyszczenie nawierzchni nie rzadziej niż raz w roku. Jeśli czyszczenie

nawierzchni jest nieregularne lub zbyt długi okres upływie po wybudowaniu nawierzchni do pierwszego czyszczenia, utrzymanie właściwości akustycznych na wymaganym poziomie jest bardzo utrudnione, a wręcz niemożliwe [155]. Mannel i Altreuther [137] wykazali, że poziomy hałasu po 8 latach eksploatacji nawierzchni czyszczonej 2 razy w roku i nawierzchni nieczyszczonej były porównywalne.

Problem wpływu okresu eksploatacji nawierzchni na poziom hałasu opona/nawierzchnia był badany w wielu krajach. W ramach projektu *Acoustic Aging of Asphalt Performances: A California/Danish Comparison* [21], przy zastosowaniu metody SPB (w Danii) i metody OBSI (na autostradach w Kalifornii), ustalono, że średni wzrost poziomu hałasu na wszystkich badanych nawierzchniach wynosił 0,58 dB w roku (statystyczny pojazd osobowy) i 0,27 dB (statystyczny wielocznony pojazd ciężarowy). W ramach tych badań opracowano między innymi zależność (wzór 5.3) pomiędzy wzrostem poziomu hałasu ( $\Delta L_{Aging}$ ) a okresem użytkowania nawierzchni, średnim dobowym ruchem i liczbą pasów ruchu, która zdaniem autorów może być wykorzystana w ramach systemu zarządzania nawierzchniami PMS (*Pavement Management System*) na drogach o wyższych prędkościach:

$$\Delta L_{Aging}(A) = (0,25 \cdot \Delta L_{Age} \cdot A) + ((0,75 \cdot \Delta L_{ADT} \cdot ADT \cdot 365 \cdot A)/(10^6 \cdot N)), \quad (5.3)$$

gdzie:

- $\Delta L_{Age}$  – roczny wzrost poziomu hałasu [dB/rok],
- $\Delta L_{ADT}$  – parametr wzrostu poziomu hałasu w funkcji obciążenia ruchem [dB/1 milion pojazdów],
- $A$  – długość okresu użytkowania nawierzchni [lata],
- $ADT$  – średni dobowy ruch [l. poj./24 h],
- $N$  – liczba pasów ruchu w dwóch kierunkach.

W tabeli 5.2 podano proponowane wskaźniki rocznego wzrostu poziomu hałasu z uwagi na długość okresu eksploatacji oraz wskaźniki wzrostu poziomu hałasu w odniesieniu do jednego miliona pojazdów [21].

Zgodnie z badaniami Bendstena [21, 22], prowadzonymi w Danii metodą SPB i CPX, roczny wzrost poziom hałasu na nawierzchni referencyjnej (DAC11) wynosi: 0,3 dB dla pojazdu osobowego na ulicach z prędkością 50 ÷ 60 km/h; 0,4 dB dla pojazdu osobowego na autostradach z prędkością 90 ÷ 110 km/h; 0,2 dB dla pojazdu kategorii 2b na innych drogach głównych. Na nawierzchniach z otwartą strukturą i warstwach o drobnym uziarnieniu kruszywa redukcja hałasu wyniosła na ulicach 0,7 dB dla pojazdu osobowego i do 0,3 dB dla pojazdu ciężarowego kategorii 2b.

Tab. 5.2. Wskaźniki wzrostu poziomu hałasu w zależności od okresu eksploatacji nawierzchni i obciążenia ruchem

	Beton asfaltowy			
	zwarty	częściowo otwarty	cienka warstwa	porowaty
$\Delta L_{Age}$ [dB/tok]	0,40	0,41	0,84	0,53
$\Delta L_{ADT}$ [dB/1 mln pojazdów]	0,21	0,26	0,24	0,42

W projekcie SILENCE wartości rocznych zmian poziomu hałasu ustalono na 0,1 dB na nawierzchniach o zwartej strukturze, niezależnie od rodzaju pojazdu i prędkości, a na nawierzchniach porowatych i częściowo otwartej strukturze 0,4 dB dla pojazdu osobowego przy wyższych prędkościach i 0,9 dB przy niskich prędkościach oraz 0,2 dB dla pojazdu ciężarowego kategorii 2b przy wyższych prędkościach [23]. W ramach tego projektu nie zanotowano wpływu okresu użytkowania badanych nawierzchni na poziom hałasu pojazdu ciężarowego 2b przy niskich prędkościach.

Wpływ okresu eksploatacji na poziom hałasu badano także na drogach w Portugalii [63]. Przy wykorzystaniu metody CPB na trzech różnych nawierzchniach i przy trzech prędkościach 50, 70 i 90 km/h ustalono wzrost poziomu hałasu od 1,0 dB do 1,7 dB w ciągu jednego roku. Anfosso-Lédée i Brosseaud w pracy [10] przedstawili wyniki badań wpływu okresu użytkowania nawierzchni we Francji na poziom hałasu metodą SPB. Wskazali na wzrost poziomu hałasu od pojazdu osobowego o 5,5 dB pomiędzy pierwszym a dziesiątym rokiem eksploatacji na nawierzchni typu PAC10 oraz wzrost o 3,0 dB pomiędzy pierwszym a siódmym rokiem eksploatacji na nawierzchni z bardzo cienką warstwą z betonu asfaltowego typu 2.

Zmiany właściwości akustycznych w czasie były monitorowane metodą CPX (przy prędkości 50 km/h) przez Miljkovica i Radenberga [143]. Na dwóch ulicach o nawierzchni redukującej hałas (LOA 5D) w Düsseldorfie w Niemczech stwierdzono nieznaczny wpływ okresu eksploatacji na jej właściwości akustyczne (wzrost poziomu hałasu poniżej 1,3 dB w ciągu około 3 lat).

W Norwegii [27] wykazano, że na nawierzchniach porowatych redukcja hałasu spadła z zakresu 5÷9 dB do 1÷2 dB po 2÷3 latach użytkowania drogi przez pojazdy z kolcowanymi oponami. Główną przyczyną pogorszenia się właściwości akustycznych było zanieczyszczenie porów w nawierzchni cząstkami z warstwy ścieralnej powstałymi w wyniku stosowania tego rodzaju opon.

Wpływ okresu eksploatacji na poziom hałasu, przy wykorzystaniu metody CPX i prędkości 50 km/h, na 20 nawierzchniach porowatych z zastosowaniem



asfaltów modyfikowanych polimerami badano na ulicach i drogach w Hong Kongu. Wykazano wzrost poziomu hałasu na wszystkich nawierzchniach od -0,64 dB do 5,18 dB (średnio na jeden odcinek:  $2,21 \pm 1,58$  dB w ciągu 5 lat) [96]. Odpowiada to rocznemu średniemu wzrostowi poziomu hałasu o 0,44 dB.

Ho i in. [94] w badaniach na pięciu rodzajach nawierzchni o niskiej hałaśliwości ustalili, że poziom hałasu opona/nawierzchnia wzrasta o  $1,2 \div 1,5$  dB w ciągu jednego roku.

W pracy [241] przedstawiono wyniki pomiarów na 8 odcinkach testowych o nawierzchni w postaci cienkich warstw bitumicznych oraz na 2 odcinkach referencyjnych (SMA10 i DPAC). Badania wykonywano przez okres 34 miesiące, odpowiednio po 1, 11, 15, 22, 26 i 34 miesiącach użytkowania drogi. Autorzy opracowali wiele zależności oraz ustalili wartości wzrostu poziomu dźwięku w jednym roku na poszczególnych odcinkach według metody CPX (opona P1, H1 i średnie wartości dla dwóch opon) i metody SPB (w odniesieniu do pojazdu osobowego) (tab. 5.3).

Tab. 5.3. Porównanie wskaźników rocznego wzrostu poziomu hałasu według metody CPX i SPB

Nr odcinka	Warstwa ściernalna (zawartość wolnych przestrzeni)	SPB	CPX		
			P1	H1	średnia
1	<b>SMA10 (7%)</b>	0,45	-0,10	0,58	0,24
2	PAC4 (25%)	1,70	2,39	1,55	1,97
3	PAC4 (25%)	0,43	1,34	1,30	1,32
4	SMA6,3 (11%)	0,96	1,37	1,34	1,36
5	<b>DPAC6,3+14 (23%, 21%)</b>	1,27	2,45	2,05	2,25
6	SMA6,3 (15%)	0,24	1,46	1,03	1,25
7	SMA6,3 (11%)	1,21	1,31	1,33	1,32
8	SMA6,3 (11%)	0,56	1,13	1,52	1,33
9	SMA6,3 (11%)	0,33	1,00	1,26	1,13
10	SMA8 (14%)	0,73	0,62	1,30	0,96
Nawierzchnie SMA10 i DPAC6,3+10 – przyjęto jako nawierzchnie referencyjne					

Podane wartości na niektórych nawierzchniach różnią się o około 0,8 dB/rok w zależności od typu opony. Istotne różnice (nawet około 1dB) ustalono również pomiędzy wynikami uzyskanymi w oparciu o metody CPX i SPB.

W ramach projektu badawczego „QUESTIM” [235] dokonano przeglądu zmiany właściwości akustycznych nawierzchni w czasie eksploatacji w różnych krajach. Ustalono wartości rocznego wzrostu poziomu dźwięku, według metody SPB, podano w tabeli 5.4. Są one stosunkowo niskie, ale uwzględniając wartości wzrostu poziomu hałasu na poszczególnych nawierzchniach na tej samej drodze,

wynoszą od 0 dB/rok do 5 dB/rok. Najwyższe różnice zanotowano w przypadku stosowania opon kolcowanych.

Tab. 5.4. Wskaźniki rocznego wzrostu poziomu hałasu według projektu QUESTIM [235]

Nawierzchnia	Kraj	Wzrost poziomu hałasu [dB/rok]	
		pojazd osobowy	pojazd ciężarowy
PAC 0/16 – 1 warstwa	Holandia	0,62	0,20
	Hiszpania	0,30	-
PAC 0/8-0/11 – 1 warstwa	Niemcy	0,31	0,06
	Francja	0,41/0,19	0,00
	Dania	0,65	0,09
PAC 0/6 – 1 warstwa	Francja	0,14	0,00
PAC 0/8 – 2 warstwy	Holandia	0,38	0,36
	Hiszpania	0,52	-
TSL 0/6 – częściowo otwarta struktura	Holandia	0,33	0,41
	Francja	0,60/0,67	-
SMA 0/14	Wielka Brytania	0,48	0,33
SMA 0/8-0/11	Wielka Brytania	0,58	0,35
	Dania	0,35	0,10
	Holandia	0,10	-
SMA 0/6	Wielka Brytania	0,60	0,29
	Dania	0,48	0,18
HRA 0/20	Wielka Brytania	0,25	0,12
EACC	Wielka Brytania	0,22	0,09
PC – 2 warstwy	Holandia	0,16	0,12
DAC 0/8-0/11	Dania	0,53	0,04
	Francja	0,12	0,00
DAC 0/16	Holandia	0,10	0,05
	Francja	0,11	0,04

Kneib i in. [111] potwierdzili występowanie różnic we wzroście poziomu hałasu na poszczególnych pasach drogi wielopasowej w okresie eksploatacji. Zwrócili uwagę na potrzebę rozpatrywania zmian poziomu hałasu w zależności od specyfiki poszczególnych krajów, wyróżniając przy tym trzy grupy: kraje skandynawskie, kraje środkowej Europy i kraje południowej Europy. Wynika to ze zróżnicowanych temperatur oraz stosowania w niektórych krajach opon kolcowanych. W opracowanym modelu prognozowania poziomu dźwięku jako istotnie staty-

stycznie zmienne zaproponowali: poziom dźwięku na nowej nawierzchni danego typu, okres użytkowania nawierzchni, całkowite natężenie ruchu oraz udział w ruchu pojazdów ciężarowych.

Szczegółową analizę przyczyn zmian w poziomach dźwięku na nawierzchniach o zwartej strukturze i na nawierzchniach porowatych w okresie eksploatacji przeprowadzili Maennel i Altreuther [137]. W wypadku nawierzchni asfaltowych o zwartej strukturze i nawierzchni betonowych zwrócili uwagę na wpływ udziału pojazdów ciężarowych w potoku ruchu na stan nawierzchni, a także na różnice w poziomach hałasu na poszczególnych pasach ruchu dróg dwujezdniowych. Wykazali, że na pasach zewnętrznych wzrost wynosi 0,5 dB/rok, a na pasie wewnętrznych – 0,3 dB/rok. W wypadku nawierzchni porowatych wyróżnili dwie główne przyczyny wzrostu hałasowości w czasie: zatykanie się porów i zmianę tekstury nawierzchni. W odniesieniu do zatykania się porów wyjaśnili, jak wpływają zanieczyszczania warstwy porowatej w zależności od miejsca zatykania się porów. W przypadku dróg o niskich prędkościach zatykanie postępuje od górnej części warstwy, a w przypadku dróg o wyższych prędkościach pojazdów – od dolnej części warstwy porowatej. Na niektórych drogach o nawierzchni porowatej zanotowali równomierne zatykanie się porów na całej grubości warstwy porowatej. Zmiana tekstury powierzchni warstw porowatych jest związana z ubytkami ziaren słabiej związanych.

Maennel i Altreuther wyróżnili także trzy okresy pogarszania się właściwości akustycznych nawierzchni porowatych [137]. W okresie pierwszym (do 3 lat po wykonaniu) następuje wstępne zatykanie się porów i tylko nieznaczny wzrost poziomu dźwięku. W drugim okresie (od 3 do 6 (8) lat) następuje pewna stabilizacja wzrostu poziomu dźwięku. Tempo wzrostu jest uzależnione od charakterystyki ruchu i prędkości pojazdów. Po 6 (8) latach większość porów jest już zatkanych i następuje całkowita utrata dobrych właściwości akustycznych warstwy ścieralnej.

Przedstawiona powyżej analiza wskazuje na istotne zróżnicowania w rocznych wzrostach poziomu hałasu w zależności od rodzaju nawierzchni, typu pojazdu i prędkości pojazdów. Potwierdza to potrzebę prowadzenia dalszych, bardziej szczegółowych badań w celu poprawy trwałości akustycznej nawierzchni drogowych.

## 5.2.2. Ocena trwałości akustycznej nawierzchni na przykładzie dróg w Polsce

### 5.2.2.1. Program badań

Problem trwałości akustycznej nawierzchni drogowych w Polsce przeanalizowano na podstawie wyników pomiarów maksymalnego poziomu dźwięku uzyskanych metodą statystycznego przejazdu (SPB) na odcinkach testowych na dwóch drogach wojewódzkich (DW780 i DW967) oraz na drodze krajowej DK50. Badania maksymalnego poziomu dźwięku na drodze wojewódzkiej DW780 przeprowadzono w latach: 2011, 2012, 2014 i 2016, na drodze wojewódzkiej DW967 w latach: 2014 i 2016, a na drodze krajowej DK50 w latach: 2011, 2012 i 2014.

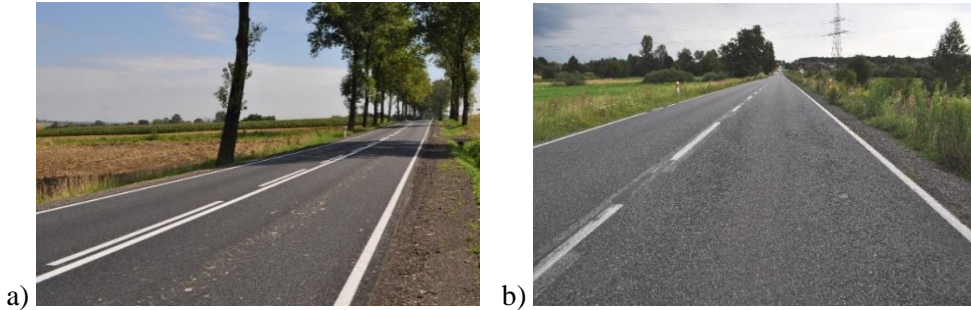
Ogólną charakterystykę warstw ścieralnych na drodze DW780 podano w pkt 5.1.1. Na drodze wojewódzkiej DW967 warstwę ścieralną stanowiły dwie warstwy z asfaltu porowatego DPAC8+16 (grubość górnej warstwy z PAC8 – 4,0 cm, zawartość wolnych przestrzeni 23,6%; grubość dolnej warstwy PAC16 – 6,0 cm, zawartość wolnych przestrzeni 25,5%). Na drodze krajowej DK50 badano hałaśliwość nawierzchni z asfaltu porowatego (grubość warstwy ścieralnej 4,0 cm, założona zawartość wolnych przestrzeni 18÷22%) i z mastyksu grysowego SMA11 (grubość warstwy ścieralnej 4,0 cm, założona zawartość wolnych przestrzeni 3÷4%).

Pomiary maksymalnego poziomu dźwięku od przejeżdżających pojazdów prowadzono w okresie letnim, przy temperaturze zbliżonej do 20°C i prędkości wiatru mniejszej od dopuszczalnej. Równoległe z pomiarami maksymalnego poziomu dźwięku mierzono prędkości chwilowe badanych pojazdów. W poniższej analizie, na drogach DW780 i DW967, uwzględniono jedynie wyniki pomiarów w odniesieniu do pojazdów osobowych (kategoria 1), gdyż z uwagi na lokalny charakter drogi przejeżdżające pojazdy ciężarowe były w bardzo różnym stanie technicznym, a ich liczba była stosunkowo mała.

Na drodze krajowej DK50 badano poziom hałasu od pojedynczo jadących pojazdów osobowych i wielocłonowych pojazdów ciężarowych (kategoria 2b). W pomiarach nie uwzględniano 2- i 3-osiowych pojazdów ciężarowych (kategoria 2a) z uwagi ich bardzo małą liczbę oraz na ogół zły stan techniczny.

W 2011 roku nawierzchnia na odcinkach testowych na drodze DW780 była w dobrym stanie technicznym. W kolejnych latach postępowało zanieczyszczenie nawierzchni PAC8 i BBTM8, a w 2014 roku stwierdzono ubytki ziaren kruszywa i lokalne zniszczenia warstwy ścieralnej (rys. 5.9). Nawierzchnia na tych odcinkach nie była systematycznie czyszczona, a podejmowane próby usunięcia zanieczyszczeń nie przyniosły wymaganych efektów. Na nawierzchni z SMA11 na dro-

dze DW780 po dwóch latach eksploatacji zaobserwowano lokalnie występujące wypływy lepiszcza, co spowodowało pewne zmiany w teksturze powierzchni.



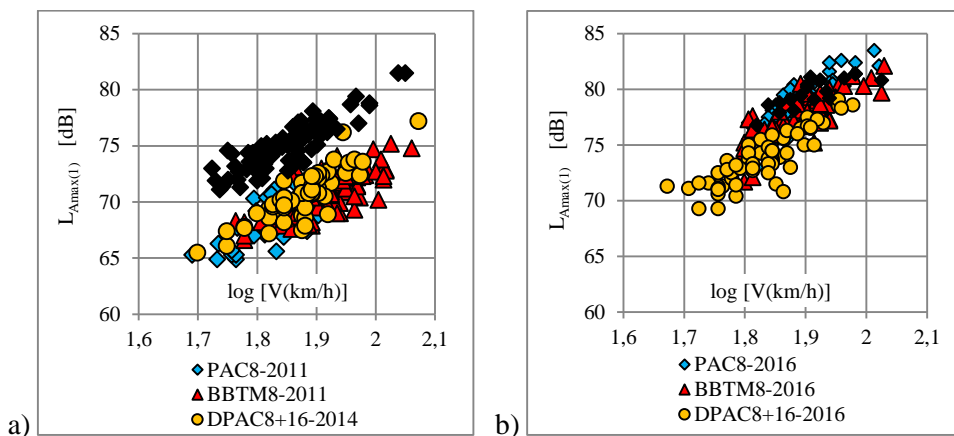
Rys. 5.9. Widok nawierzchni na odcinkach testowych: a) BBTM8, b) PAC8

W wypadku odcinka testowego o nawierzchni typu PAC11 na drodze krajowej DK50 w ramach zimowego utrzymania, w pierwszym roku po wykonaniu drogi, zastosowano piasek co doprowadziło do częściowego zatkania porów w warstwie ścieralnej.

W ramach badań zaplanowano także wykonanie pomiarów współczynnika absorpcji dźwięków oraz wodoprzepuszczalności na nawierzchniach: PAC8, BBTM8 i DPAC8+16.

### 5.2.2.2. Wzrost hałaśliwości nawierzchni w okresie eksploatacji

Wyniki badań poziomu hałasu w latach 2011÷2014 przedstawiono w pracy [73], a w niniejszej monografii rozszerzono analizę o wyniki pomiarów wykonanych na drogach DW780 i DW967 w 2016 roku. Na rysunku 5.10 pokazano porównanie wartości  $L_{Amax}$  od przejazdu pojedynczych pojazdów osobowych w latach 2011 i 2016 na nawierzchniach PAC8, BBTM8 i SMA11 oraz w latach 2014 i 2016 na nawierzchni DPAC8+16. W tabeli 5.5 podano współczynniki  $A$  i  $B$  zależności regresyjnych ( $L_{Amax} = A + B \cdot \log V$ ), średnią prędkość badanych pojazdów na poszczególnych odcinkach oraz maksymalne poziomy dźwięku od przejazdu statycznego pojazdu osobowego z prędkością 80 km/h.



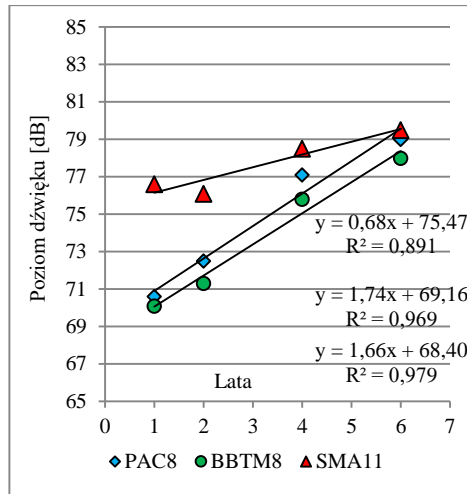
Rys. 5.10. Wyniki pomiarów maksymalnego poziomu dźwięku metodą SPB: a) nowe nawierzchnie, b) nawierzchnie po okresie eksploatacji

Tab. 5.5. Zestawienie wyników pomiarów poziomu hałasu w okresie eksploatacji nawierzchni

Nawierzchnia	Rok	A	B	$V_{sr}$ , (km/h)	$R^2$	$L_{Amax}$ (80), (dB)
SMA11	2011	21,0	29,2	88,0	0,74	76,6
	2012	13,3	33,0	87,3	0,84	76,1
	2014	24,5	28,4	84,4	0,53	78,5
	2016	41,9	19,8	80,9	0,62	79,5
BBTM8	2011	16,0	28,4	82,8	0,72	70,1
	2012	13,2	30,6	88,2	0,74	71,3
	2014	19,6	29,5	82,4	0,74	75,8
	2016	22,5	29,2	77,4	0,74	78,0
PAC8	2011	14,8	29,3	83,0	0,83	70,6
	2012	9,7	33,0	73,8	0,73	72,5
	2014	16,4	31,9	81,7	0,83	77,1
	2016	15,7	33,3	78,8	0,73	79,0
DPAC8+16	2014	14,2	30,0	75,2	0,75	71,3
	2016	15,9	31,7	68,9	0,80	76,2

Przedstawione dane w sposób jednoznaczny potwierdzają znaczną utratę dobrych właściwości akustycznych nawierzchni w okresie ich eksploatacji. Jest to wynikiem systematycznego zanieczyszczania warstwy ścieralnej z PAC8, BBTM8 i DPAC8+16. Na drodze DW780, w odniesieniu do statystycznego pojazdu oso-

bowego jadącego z prędkością 80 km/h, roczny wzrost poziomu hałasu osiągnął wartości: 1,74 dB na nawierzchni PAC8, 1,66 dB – na nawierzchni BBTM8 i 0,68 dB na nawierzchni SMA11 (rys. 5.11).



Rys. 5.11. Wzrost maksymalnego poziomu dźwięku od przejazdu statystycznego pojazdu osobowego w czasie eksploatacji na nawierzchniach testowych na drodze wojewódzkiej (według metody SPB:  $V = 80$  km/h)

Wartości maksymalnego poziomu dźwięku na dwuwarstwowej nawierzchni porowatej DPAC8+16 także potwierdziły bardzo dobre jej właściwości akustyczne bezpośrednio po wykonaniu. Jednak już po 2 latach eksploatacji maksymalny poziom dźwięku od jadącego statystycznego pojazdu osobowego z prędkością 80 km/h wzrósł o 2,45 dB.

Ustalone wartości rocznego wzrostu poziomu hałasu są na ogół wyższe od przedstawionych w podrozdziale 5.2.1, a jedną z głównych przyczyn takiej sytuacji jest z pewnością położenie odcinków na drodze ogólnodostępnej, przebiegającej przez obszary rolnicze, wzdłuż pól i łąk, oraz przez obszary zabudowane.

W tabeli 5.6 podano wyniki pomiarów hałasu metodą SPB w latach: 2011, 2012 i 2014 na odcinkach testowych na drodze krajowej DK50. Stwierdzono, że maksymalny poziom dźwięku na nawierzchni PAC11 po pierwszym roku użytkowania był niższy zaledwie o 1,6 dB(A) w wypadku przejazdu statystycznego pojazdu osobowego z prędkością 110 km/h w porównaniu z nawierzchnią SMA11. W odniesieniu do wieloczołowego pojazdu ciężarowego kategorii 2b różnica ta wynosiła 3,2 dB(A).

W 2014 roku, w wypadku samochodu osobowego, nawierzchnia z PAC11 okazała się bardziej hałaśliwa (o 0,2 dB) od nawierzchni SMA11. Z punktu widzenia samochodu ciężarowego kategorii 2b nawierzchnia z SMA11 była nadal głośniejszym rozwiązaniem o 2,2 dB(A) w porównaniu z nawierzchnią PAC11.

Wpływ na utratę dobrych właściwości akustycznych nawierzchni porowatej na drodze krajowej DK50 miały błędne działania w ramach zimowego utrzymania. Zastosowanie piasku w ramach poprawy bezpieczeństwa ruchu spowodowało częściowe zatkanie się porów w warstwie ścieralnej.

Wyniki pomiarów poziomu hałasu na drodze krajowej DK50 wykazały, że średni roczny wzrost poziomu hałasu w latach 2011÷2014 roku na nawierzchni SMA11 osiągnął wartość 0,20 dB dla pojazdu osobowego jadącego z prędkością  $V = 110$  km/h, 0,30 dB dla wieloosobowego pojazdu ciężarowego jadącego z prędkością 85 km/h. Na nawierzchni PAC11 średni roczny wzrost poziomu hałasu wyniósł odpowiednio wartości 0,80 dB i 0,63 dB.

Tab. 5.6. Zestawienie wyników pomiarów według metody SPB na drodze DK50

Droga DK50 – samochód osobowy							
Nawierzchnia	Rok	A	B	$V_{sr}$	$R^2$	$L_{Amax}(80)$	$L_{Amax}(110)$
SMA11	2011	21,6	29,8	94,5	0,66	78,3	82,4
	2014	24,4	28,7	104,9	0,77	79,0	83,0
PAC11	2011	18,3	30,6	93,1	0,64	76,5	80,8
	2014	34,6	23,8	100,3	0,53	79,9	83,2
Droga DK50 – pojazd ciężarowy 2B							
Nawierzchnia	Rok	A	B	$V_{sr}$	$R^2$	$L_{Amax}(70)$	$L_{Amax}(85)$
SMA11	2011	20,7	34,3	81,1	0,36	84,0	86,9
	2014	28,2	30,9	79,0	0,52	85,2	87,8
PAC11	2011	31,0	27,3	83,8	0,26	81,4	83,7
	2014	33,7	26,9	83,8	0,18	83,3	85,6

Oceniając wartości rocznego wzrostu poziomu hałasu na badanych odcinkach dróg w Polsce, należy stwierdzić, że na drogach DW780 i DW967 są one zdecydowanie wyższe od ustalonych w innych krajach na podobnych nawierzchniach. Główną przyczyną utraty korzystnych właściwości akustycznych w ciągu kolejnych 6 lat eksploatacji było zanieczyszczenie porów w warstwie ścieralnej, wynikające z lokalizacji drogi na obszarze rolniczym i udziału w ruchu pojazdów obsługujących pola uprawne i łąki oraz brak ich systematycznego czyszczenia. W przypadku DK50 ustalone roczne zmiany poziomu hałasu w odniesieniu do



pojazdu osobowego były zbliżone do wartości ustalonych w innych krajach. Nieco większe wartości uzyskano jedynie na nawierzchni PAC11 w przypadku pojazdów kategorii 2b.

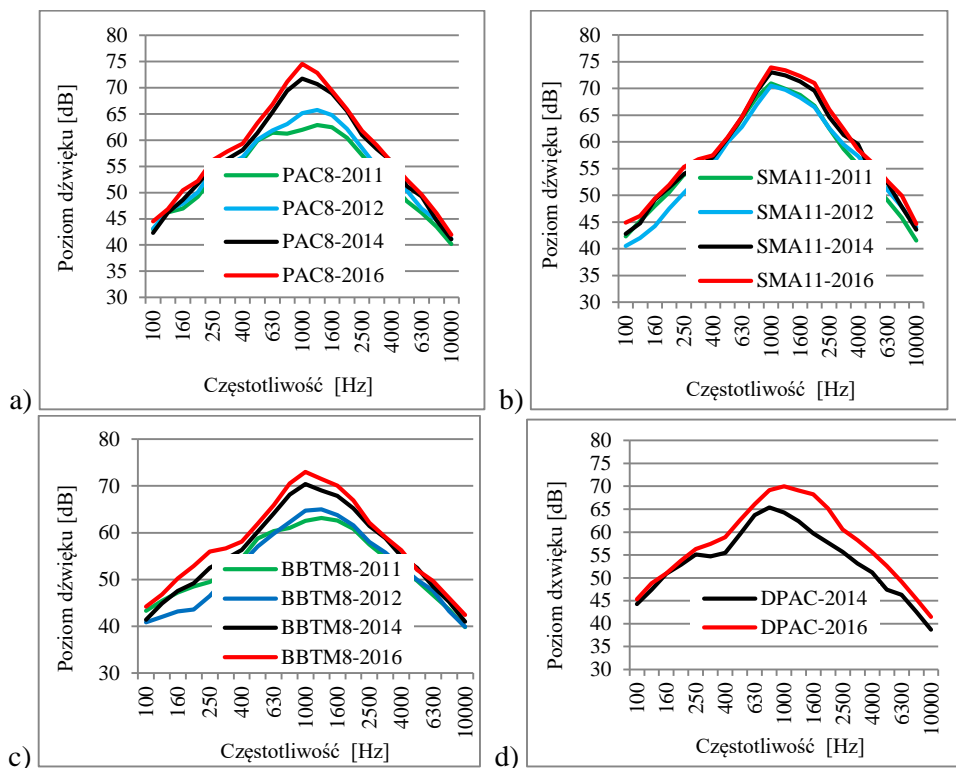
Wyniki powyższej analizy potwierdzają, jak ważne znaczenie z punktu widzenia zachowania korzystnych właściwości akustycznych w okresie eksploatacji mają: lokalizacja drogi, prędkość poruszających się pojazdów, prawidłowe działania w ramach zimowego utrzymania oraz brak systematycznego czyszczenia nawierzchni porowatych.

### 5.2.2.3. Analiza widmowa dźwięków

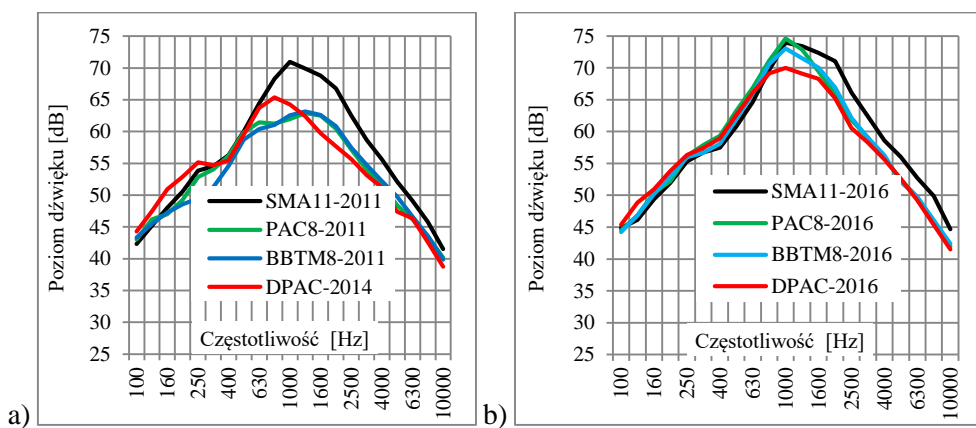
Analiza widmowa dźwięków umożliwia bardziej szczegółowe rozpoznanie przyczyn nadmiernego poziomu hałasu, a następnie doskonalenie technologii budowy górnych warstw nawierzchni. Van Loon, Tollenaar i van Blokland [237], w oparciu o analizę widmową, przedstawili mechanizmy zmiany właściwości akustycznych w czasie, obejmujące wstępne zatykanie się porów, całkowite zamknięcie porów poprzez zanieczyszczenia, destrukcję struktury warstwy ściernalnej oraz zmiany tekstury powierzchni.

Wyniki wykonanych pomiarów hałasu metodą statystycznego przejazdu na nawierzchniach o zwiększonej zawartości wolnych przestrzeni umożliwiły analizę zmian w widmach dźwięku od poruszających się pojazdów w okresie eksploatacji. Na rysunku 5.12 pokazano widma dźwięku od przejazdu statystycznego pojazdu osobowego jadącego z prędkością  $V = 80$  km/h na drodze wojewódzkiej DW780 na nawierzchniach: PAC8, SMA11 i BBTM8 w latach 2011, 2012, 2014 i 2016 oraz na drodze wojewódzkiej DW967, na nawierzchni DPAC8+16, w latach 2014 i 2016.

Analizę porównawczą poziomów dźwięku w pierwszym roku po wykonaniu i po sześciu latach eksploatacji nawierzchni na drodze DW780 oraz po dwóch latach użytkowania nawierzchni na drodze DW967 pokazano na rysunku 5.13. Na nawierzchniach BBTM8 i PAC8 stwierdzono znaczny wzrost maksymalnego poziomu dźwięku od pojazdu osobowego w zakresie częstotliwości od 500 Hz do 2000 Hz. Wzrost ten przy częstotliwości 1000 Hz osiągnął wartość około 10 dB w porównaniu z poziomem w 2011 roku. W wypadku nawierzchni z SMA11 zanotowano różnice do 5 dB przy częstotliwości powyżej 1000 Hz. Widma dźwięków ustalone w 2016 roku na trzech badanych nawierzchniach są zbliżone do widm na nawierzchni z SMA11 w latach 2011÷2016. Oznacza to, że zanieczyszczenia warstw ściernalnych BBTM8 i PAC8 spowodowały, że pod względem akustycznym przypominają one warstwy nawierzchni o zwartej strukturze.



Rys. 5.12. Widma dźwięków: a) PAC8, b) SMA11, c) BBTM8, d) DPAC8+16

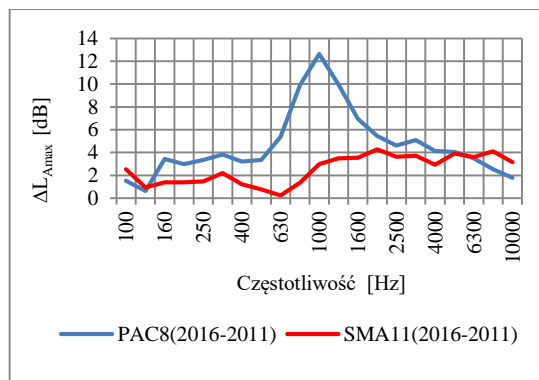


Rys. 5.13. Widma dźwięków na badanych nawierzchniach: a) 2011, b) 2016

Obliczone wartości różnic pomiędzy poziomami dźwięku w pasmach tercjowych dla przykładowych częstotliwości na badanych nawierzchniach w roku 2011 i 2016 podano w tabeli 5.7, a na rysunku 5.14 przedstawiono różnice w widmach dźwięku w okresie 2011÷2016 na nawierzchni z asfaltu porowatego PAC8 i SMA11. Największe ich wartości stwierdzono w zakresie częstotliwości 500÷2500 Hz, a maksymalną różnicę zanotowano przy częstotliwości 1000 Hz (9,6 dB).

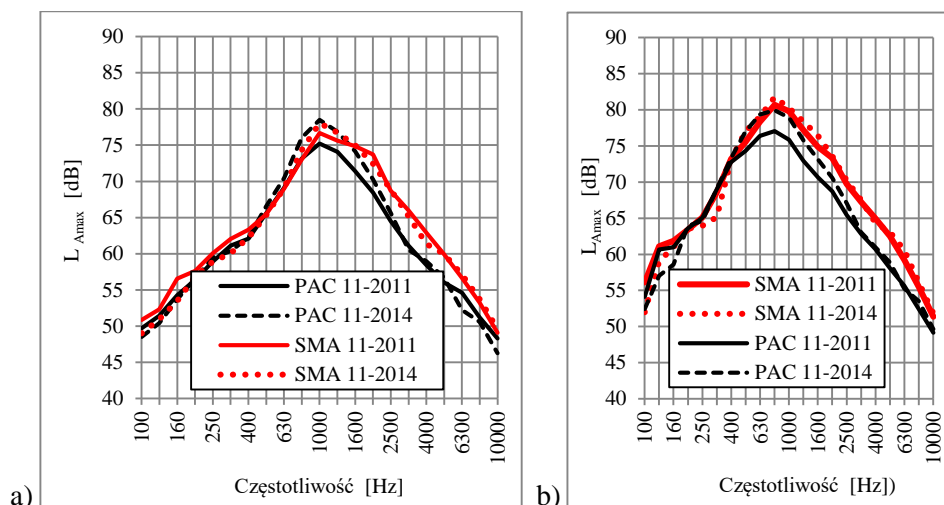
Tab. 5.7. Różnica w poziomach dźwięku opona/nawierzchnia w pasmach 1/3-oktawowych

	$\Delta L_{Amax}$ [dB]					
	Częstotliwość [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Różnice w poziomach hałasu pomiędzy nawierzchniami w latach 2016 i 2011						
SMA11 (2016-2011)	0,9	1,5	0,8	3,0	4,3	2,9
BBTM8 (2016-2011)	1,3	6,5	3,2	10,5	6,1	4,0
PAC8 (2016-2011)	0,6	3,3	3,4	12,6	5,4	4,1
Różnice w poziomach hałasu pomiędzy nawierzchniami w 2011 roku						
SMA11 (2011) – BBTM8 (2011)	-0,3	4,4	1,3	8,4	5,9	3,4
SMA11 (2011) – PAC8 (2011)	-1,0	1,1	0,1	9,0	6,3	4,0
PAC8 (2011) – BBTM8 (2011)	0,7	3,4	1,2	-0,6	-0,4	-0,6
Różnice w poziomach hałasu pomiędzy nawierzchniami w 2016 roku						
SMA11 (2016) – BBTM8 (2016)	-0,7	-0,6	-1,2	0,9	4,1	2,3
SMA11 (2016) – PAC8 (2016)	-0,7	-0,8	-2,5	-0,6	5,2	2,8
PAC8 (2016) – BBTM8 (2016)	0,0	0,2	1,3	1,6	-1,0	-0,5
Różnice w poziomach hałasu pomiędzy nawierzchnią w latach 2014 i 2011						
DPAC8+16 (2016-2014)	1,4	1,2	3,1	5,7	7,5	4,4



Rys. 5.14. Różnice w widmach dźwięku w latach 2016 i 2011 na PAC8 i SMA11

Wyniki przeprowadzonej analizy widm dźwięku od przejazdu statystycznego pojazdu osobowego z prędkością 110 km/h i statystycznego wielocłonowego pojazdu ciężarowego z prędkością 85 km/h na nawierzchniach PAC11 i SMA11 na drodze DK50 pokazano na rysunku 5.15.



Rys. 5.15. Widma dźwięku w pasmach 1/3-oktawowych: a) pojazd osobowy,  $V = 110$  km/h, b) wielocłonowy pojazd ciężarowy,  $V = 85$  km/h

W wypadku pojazdu osobowego istotne różnice na nawierzchni PAC11 zano-towano w zakresie częstotliwości 630 Hz÷2500 Hz. Praktycznie nie stwierdzono różnicy w poziomach dźwięku w latach 2011 i 2014 na nawierzchni SMA11. Widma dźwięku od przejazdu wielocłonowego pojazdu ciężarowego pod wzglę-dem ich układu są zbliżone do widm dźwięków od przejeżdżającego pojazdu oso-bowego. Różnice są jednak nieco większe niż w przypadku samochodu osobowe-go.

#### 5.2.2.4. Zmiany równoważnego poziomu dźwięku w okresie eksploatacji nawierzchni

Wraz ze wzrostem poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych pogorsze-niu ulega również klimat akustyczny w otoczeniu drogi. W celu sprawdzenia, jak przedstawia się sytuacja w tym zakresie w otoczeniu odcinków o nawierzchni BBTM8 i SMA11 na drodze DW780 oraz odcinków o nawierzchni SMA11 i PA11 na drodze krajowej DK50, przeprowadzono pomiary równoważnego poziomu dźwięku ( $L_{Aeq}$ ) w jednogodzinnych okresach czasu. Punkty pomiaru równoważnego poziomu dźwięku zlokalizowano w odległości 10 m od krawędzi jezdni,

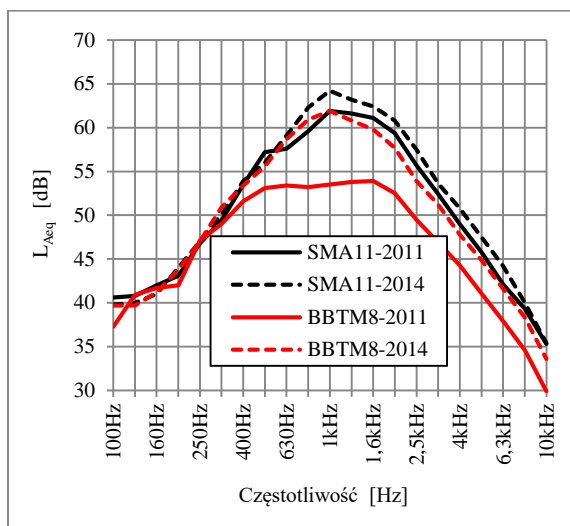
na wysokości 4,0 m nad poziomem nawierzchni. Pomiary  $L_{Aeq}$  na poszczególnych drogach przeprowadzono w tym samym czasie i przy takiej samej charakterystyce ruchu samochodowego (natężenie, struktura rodzajowa, prędkość pojazdów).

Tab. 5.8. Równoważny poziom dźwięku ( $L_{Aeq}$ ) w otoczeniu drogi DW780 i DK50

Rok	Natężenie ruchu, [l. poj./h]	% poj. ciężarowych	$L_{Aeq}$ [1h]		$\Delta L_{Aeq}$ [dB]
			Nawierzchnia		
			BBTM 8	SMA 11	
Droga wojewódzka DW780					
2011	532	7,5	63,1	69,2	6,1
2014	565	13,0	68,9	70,9	2,0
Droga krajowa DK50					
Rok	Natężenie ruchu, [l. poj./h]	% poj. ciężarowych	Nawierzchnia		$\Delta L_{Aeq}$ [dB]
			PAC11	SMA11	
2011	664	69,6	71,4	74,5	3,1
2014	654	68,0	74,5	75,8	1,3

W 2011 roku w otoczeniu drogi DW780 ustalono różnicę pomiędzy poziomami  $L_{Aeq}$  o wartości 6,1 dB, a w 2014 roku wartość ta zmniejszyła się do 2,0 dB. Podobną sytuację zanotowano w otoczeniu drogi DK50. W 2011 roku była to różnica 3,1 dB, a w 2014 wynosiła zaledwie 1,3 dB. Stwierdzono zatem, że równoważny poziom dźwięku w otoczeniu odcinka drogi DW780 o nawierzchni BBTM8 średnio wzrastał w roku o około 2 dB, przy takich samych warunkach ruchu, a w otoczeniu drogi o nawierzchni SMA11 – o około 0,7 dB. W otoczeniu drogi DK50 wartości rocznego wzrostu równoważnego poziomu dźwięku wynosiły około 1 dB przy nawierzchni PAC11 i o około 0,4 dB przy nawierzchni z SMA11. Mniejsze wartości wzrostu  $L_{Aeq}$  przy DK50 wynikają z wyższych prędkości pojazdów oraz zdecydowanie mniejszego ruchu lokalnego obsługującego przyległe teryny oraz innej struktury rodzajowej ruchu.

Widma emitowanych dźwięków przez ruch samochodowy w otoczeniu dwóch odcinków na drodze DW780 w latach 2011 i 2014 potwierdziły ustalenia dokonane w oparciu o wyniki maksymalnego poziomu dźwięku od przejazdu pojedynczych pojazdów. Nawierzchnie o zwiększonej zawartości wolnych przestrzeni, bez ich czyszczenia, po kilku latach eksploatacji stają się pod względem akustycznym takie same jak nawierzchnie o zwartej strukturze.



Rys. 5.16. Widma równoważnego poziomu dźwięku w otoczeniu badanych odcinków testowych w latach 2011 i 2014

Badania wpływu rodzaju nawierzchni na równoważny poziom dźwięku były prowadzone w otoczeniu dróg wojewódzkich w województwie małopolskim. Uzyskane wyniki potwierdziły korzystny wpływ nowych nawierzchni o obniżonej hałaśliwości na redukcję poziomu hałasu od ruchu samochodowego [33, 86].

#### 5.2.2.5. Badania współczynnika absorpcji i wodoprzepuszczalności nawierzchni porowatych

Zachowanie korzystnych właściwości akustycznych warstwy ścierniczej w czasie użytkowania drogi jest związane z zachowaniem zdolności do absorpcji dźwięków od ruchu samochodowego. Ustalenie współczynnika absorpcji dźwięków przez nawierzchnię drogową jest możliwe na rzeczywistych odcinkach drogowych [99, 100] lub w warunkach laboratoryjnych metodą rury Kundta [174].

Problem ten był analizowany w wielu ośrodkach naukowo-badawczych w innych krajach. Practicò i in. badali absorpcję dźwięków od strony teoretycznej, z uwzględnieniem krętości porów i współczynnika oporu przepływu powietrza oraz weryfikowali wyniki rozważań teoretycznych w ramach badań terenowych i laboratoryjnych [177, 179, 181]. Także w pracach [184, 188] przedstawiono wyniki badania współczynnika absorpcji na rzeczywistych nawierzchniach drogowych.

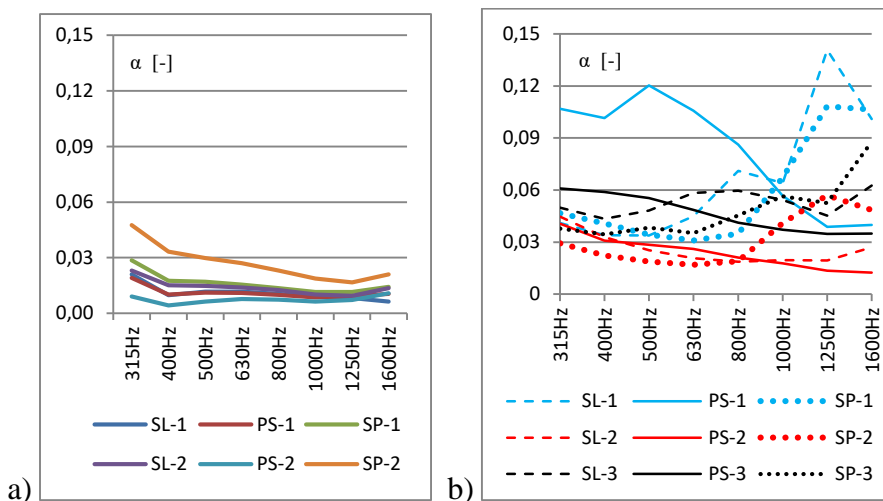
W celu rozpoznania problemu pochłaniania dźwięków przez górne warstwy nawierzchni stosowanych w Polsce w 2016 roku dokonano pomiarów współczynnika absorpcji na nawierzchni PAC8 na drodze wojewódzkiej nr 780 i na nawierzchni DPAC8+16 na drodze wojewódzkiej nr 967. Nawierzchnia z asfaltu porowatego była użytkowana przez sześć lat i nie była poddawana zabiegowi czyszczenia. Na nawierzchni DPAC8+16 podejmowano próby jej czyszczenia po pierwszym roku eksploatacji.

Na każdej nawierzchni wyznaczono po trzy przekroje, w których dokonano pomiaru współczynnika absorpcji dźwięku w zakresie częstotliwości od 315 Hz do 1600 Hz, zgodnie z normą ISO 13472-2 [100]. Na rysunku 5.17 pokazano zestaw *Spectronics ACUPAVE System* do pomiaru współczynnika absorpcji.



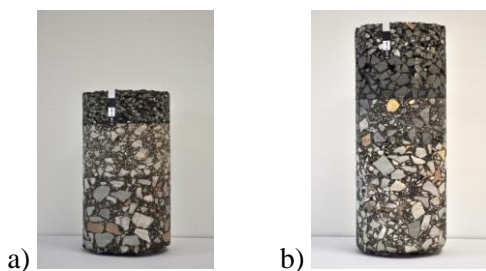
Rys. 5.17. Badanie współczynnika absorpcji na nawierzchni DPAC8+16

Wyniki pomiarów na rzeczywistych nawierzchniach przedstawiono na rysunku 5.18. Uzyskane wartości współczynnika absorpcji na nawierzchni PAC8 są zbliżone do wartości charakteryzujących nawierzchnie o zwartej strukturze, co oznacza bardzo duże jej zanieczyszczenie. W wypadku nawierzchni DPAC8+16 stwierdzono różnice pomiędzy współczynnikami absorpcji w zależności od lokalizacji przekroju badawczego oraz miejsca wykonania pomiaru (rys. 5.18b). Może to być wynikiem podejmowanej próby czyszczenia oraz zbyt krótkiego okresu eksploatacji przebudowanej drogi. Nawierzchnia DPAC8+16 w czasie pomiarów była na etapie zanieczyszczania jej struktury (1 rok eksploatacji). Wartości współczynnika absorpcji na tej nawierzchni należy uznać za zbyt niskie w porównaniu ze współczynnikami charakteryzującymi nawierzchnie porowate, ustalonymi w innych krajach w podobnym okresie eksploatacji.



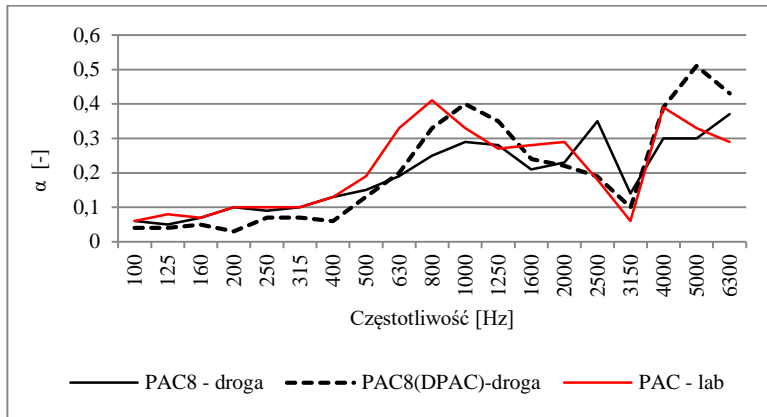
Rys. 5.18. Współczynniki absorpcji dźwięku na badanych nawierzchniach w 2 lub 3 przekrojach (SL – w śladzie lewym, SP – w śladzie prawym, PS – pomiędzy śladami): a) PAC8 – po 6 latach eksploatacji, b) DPAC – po 2 latach eksploatacji

W celu sprawdzenia właściwości akustycznych warstw porowatych Zarząd Dróg Wojewódzkich w Krakowie wykonał odwierty nawierzchni PAC8 i DPAC8+16 (rys. 5.19). Z warstwy ściernalnej wycięto próbki o grubości 3,3 cm do badania współczynnika absorpcji dźwięków metodą rury Kundta. Oczyszczono je ze wszelkich zanieczyszczeń. Dodatkowo, w warunkach laboratoryjnych, wykonano próbkę referencyjną z asfaltu porowatego PAC8. Trzy tak przygotowane próbki poddano badaniom współczynnika absorpcji metodą rury Kundta w Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie [114]. Na rysunku 5.20 pokazano wartości współczynnika absorpcji w zakresie częstotliwości od 100 Hz do 6300 Hz.



Rys. 5.19. Próbkę nawierzchni na odcinkach testowych: a) PAC8, b) DPAC8



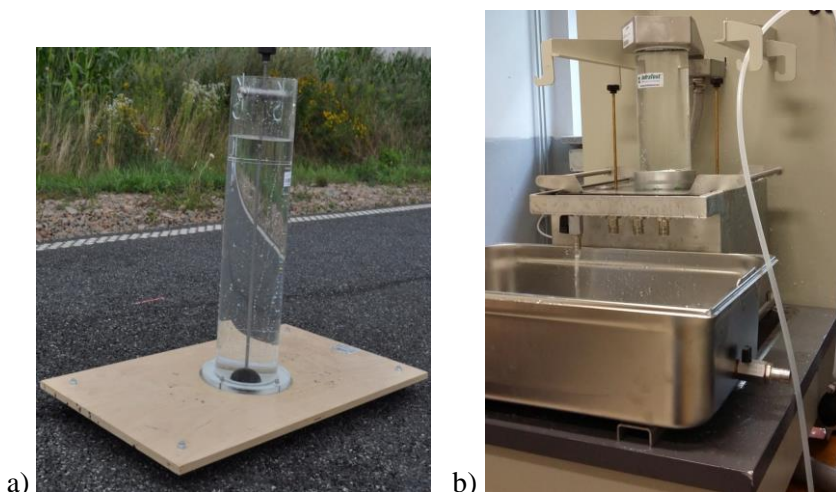


Rys. 5.20. Współczynniki absorpcji w zależności od częstotliwości i rodzaju nawierzchni

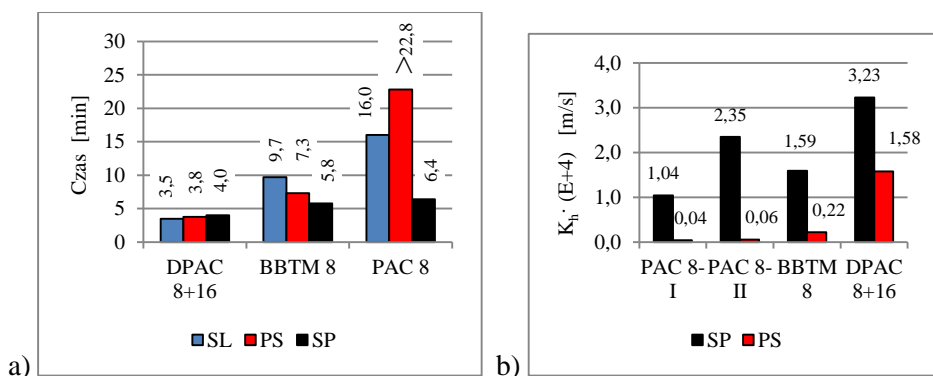
Porównanie wyników z badań terenowych i w warunkach laboratoryjnych potwierdza wpływ zanieczyszczenia nawierzchni na wartość współczynnika absorpcji. W badaniach metodą rury Kundta uzyskano porównywalne wyniki na próbkach z rzeczywistych nawierzchni i próbki wykonanej w warunkach laboratoryjnych. Jednak ustalone wartości współczynnika absorpcji przyjmowały mniejsze wartości niż wartości prezentowane w literaturze przez innych badaczy. Może to mieć związek z charakterystyką porów, będących wynikiem składu mieszanki mineralno-asfaltowej i jej zagęszczania.

Zróżnicowaną strukturę wewnętrzną warstw ze zwiększoną zawartością wolnych przestrzeni po kilku latach eksploatacji nawierzchni potwierdzono także w badaniach wodoprzepuszczalności. Zbadano wodoprzepuszczalność warstwy z asfaltu porowatego PAC8, warstwy z BBTM8 oraz dwóch warstw z asfaltu porowatego DPAC8+16 w warunkach terenowych i w laboratorium w Politechnice Białostockiej (rys. 5.21). Średnie wartości wodoprzepuszczalności nawierzchni na rzeczywistych odcinkach pokazano na rysunku 5.22a, a w warunkach laboratoryjnych – na rysunku 5.22b

Terenowe i laboratoryjne badania wodoprzepuszczalności potwierdziły najmniejsze zanieczyszczenie nawierzchni o dwóch warstwach z asfaltu porowatego DPAC8+16. Najbardziej zanieczyszczoną okazała się nawierzchnia z pojedynczą warstwą z asfaltu porowatego zlokalizowana pomiędzy śladami kół samochodowych. Lepszą wodoprzepuszczalność niż na nawierzchni PAC8 uzyskano na nawierzchni typu BBTM8, co mogło mieć wpływ na nieco niższą jej hałaśliwość po sześciu latach eksploatacji. Ustalone wyniki wskaźnika wodoprzepuszczalności w warunkach laboratoryjnych są niższe od wartości ustalonych w podobnych badaniach wykonanych w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów w Warszawie [95].



Rys. 5.21. Badanie wodoprzepuszczalności warstw o zwiększonej zawartości wolnych przestrzeni: a) w terenie, b) w warunkach laboratoryjnych



Rys. 5.22. Wyniki pomiarów wodoprzepuszczalności (SL – ślad lewy, SP – ślad prawy, PS – pomiędzy śladami): a) w terenie, b) w warunkach laboratoryjnych

Przedstawione wyniki badań pilotażowych współczynnika absorpcji oraz wodoprzepuszczalności warstw asfaltowych o zwiększonej zawartości wolnych przestrzeni nie pozwalają na obecnym etapie na ustalenie zależności pomiędzy współczynnikiem absorpcji (i wodoprzepuszczalnością) a poziomem hałasu toczenia pojazdów samochodowych. Konieczne są w tym celu rozszerzone i bardziej szczegółowe badania. Uzyskane wartości wskazują na zmiany zachodzące w strukturze warstw porowatych w czasie kilkuletniej eksploatacji, będące wynikiem systematycznego ich zanieczyszczenia.

### 5.3. Ocena akustyczna nawierzchni drogowych

#### 5.3.1. Nawierzchnia referencyjna

Ustalenie nawierzchni referencyjnej wynika z potrzeby porównywania hałaśliwości zarówno istniejących, jak i nowych nawierzchni drogowych. W Holandii jako nawierzchnię referencyjną przyjęto nawierzchnię z betonu asfaltowego AC16 (przy wyższych prędkościach referencyjnych) oraz tzw. „teoretyczną” nawierzchnię referencyjną, odpowiadającą charakterystyce uśrednionej nawierzchni z betonu asfaltowego AC11 i AC16 (przy średnich prędkościach referencyjnych) [23]. Okres eksploatacji takiej nawierzchni nie może przekraczać 2 lat. Wartości maksymalnego poziomu hałasu dla nawierzchni referencyjnych w Holandii są ustalone metodą SPB na wysokości 5 m nad powierzchnią jezdni.

W Wielkiej Brytanii nawierzchnia typu HRA (*Hot Rolled Asphalt*) z kruszywem o maksymalnym uziarnieniu 20 mm, o średniej głębokości tekstury  $MTD = 1,5$  mm (według metody objętościowej), o 12-miesięcznym okresie eksploatacji stanowi poziom odniesienia. W Danii jako nawierzchnię referencyjną ustalono nawierzchnię z betonu asfaltowego AC11 (lub SMA11) o 8-letnim okresie eksploatacji, a we Francji – z betonu asfaltowego DAC10.

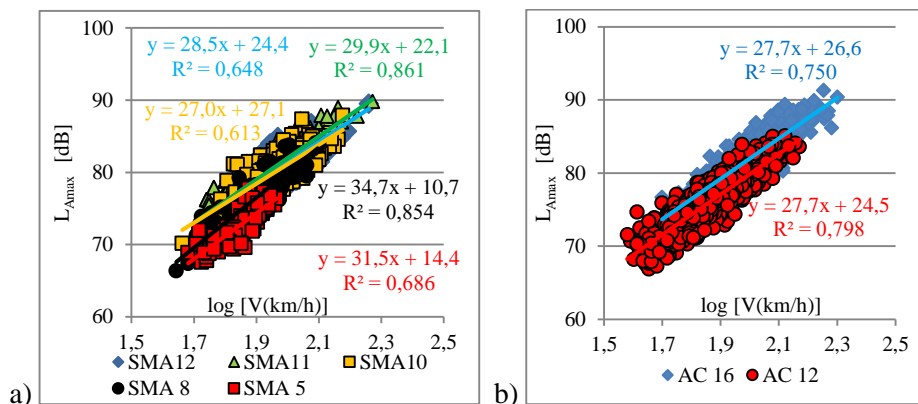
Wyniki analiz wykonanych w projekcie HARMONOISE stanowiły podstawę do wskazania jako nawierzchni referencyjnej tzw. nawierzchni wirtualnej, której akustyczną charakterystykę określa się na podstawie poziomów hałasu na warstwach ścieralnych z SMA11 i DAC11.

Powyższe zapisy pokazują, że nawierzchnie referencyjne w poszczególnych krajach mogą w zdecydowany sposób różnić się pod względem hałaśliwości. Potwierdzają to dane zamieszczone w tabeli 5.9 [23].

Tab. 5.9. Poziomy hałas toczenia i wartości różnic dla trzech kategorii pojazdów na nawierzchniach referencyjnych w Wielkiej Brytanii i w Holandii

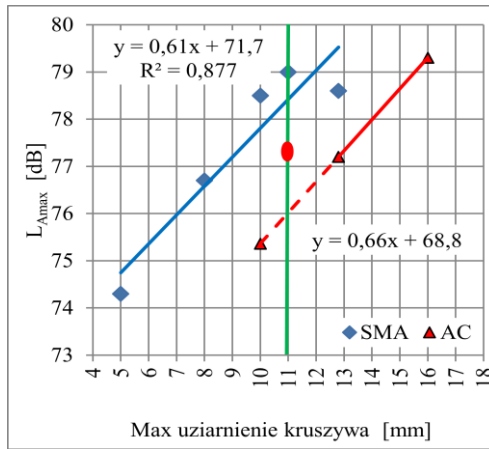
	$L_{veh,L}$	$L_{veh,H1}$	$L_{veh,H2}$
Wartości przyjmowane w Wielkiej Brytanii			
Prędkość [km/h]/ Poziom hałas [dB]	80/81,10 dB	70/83,80 dB	70/86,60 dB
Wartości przyjmowane w Holandii*)			
Prędkość [km/h]/ Poziom hałas [dB]	80/74,78 dB	70/80,94 dB	70/83,48 dB
Różnice			
Różnice pomiędzy wartościami poziomu hałasu na nawierzchniach referencyjnych	6,32 dB	2,86 dB	3,12 dB
*) – wartości w odniesieniu do wysokości 5 m nad poziomem nawierzchni			

Mając na uwadze założenia podane przez Sandberga [194], podjęto próbę określenia nawierzchni referencyjnej w Polsce. Uwzględniono przy tym wartości maksymalnego poziomu dźwięku od przejazdu pojedynczych pojazdów osobowych na wszystkich dotychczas badanych przez autora nawierzchniach z mastyksu grysowego i betonu asfaltowego (rys. 5.23).



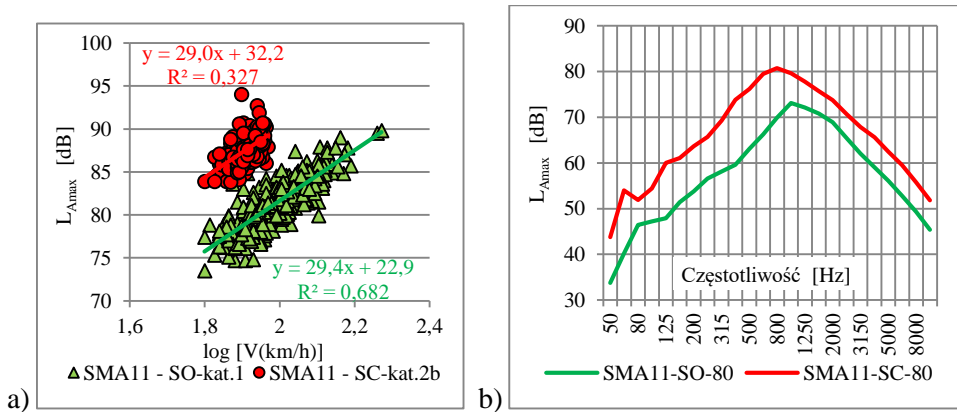
Rys. 5.23. Maksymalne poziomy dźwięku od przejazdu pojazdów osobowych: a) na nawierzchniach typu SMA, b) na nawierzchniach z betonu asfaltowego

Ustalone wartości poziomu hałasu na nawierzchniach z mastyksu grysowego i betonu asfaltowego, przy prędkości 80 km/h, w funkcji maksymalnego uziarnienia kruszywa wykazały zbyt duże różnice w poziomach hałasu pomiędzy tymi technologiami budowy warstwy ścieralnej (rys. 5.24). Przyczyną takiego stanu mogą być zróżnicowane zakresy uziarnienia kruszywa w górnych warstwach nawierzchni, teoretycznie ustalony poziom hałasu przy nawierzchni oraz różne okresy eksploatacji. Uwzględniając powyższe fakty, uznano, że optymalnym rozwiązaniem jest przyjęcie w Polsce jako nawierzchni referencyjnej nawierzchni z mastyksu grysowego typu SMA11.



Rys. 5.24. Próba ustalenia nawierzchni referencyjnej według założeń Sandberga

Charakterystyki akustyczne nawierzchni referencyjnej określono na podstawie wyników maksymalnego poziomu dźwięku na pięciu nawierzchniach z mastyksu grysowego typu SMA10, SMA11 i SMA12 (rys. 5.25), będących w zbliżonym stanie technicznym i podobnym okresie eksploatacji.



Rys. 5.25. Określenie poziomów dźwięku w odniesieniu do nawierzchni referencyjnej: a) wyniki pomiarów, b) widma dźwięku

W tabeli 5.10 podano wartości maksymalnego poziomu dźwięku odpowiadające nawierzchni referencyjnej, a w tabeli 5.11 – wartości poziomu dźwięków w pasmach tercjowych o środkowej wartości z przedziału od 50 Hz do 10000 Hz.

Tab. 5.10. Maksymalny poziom dźwięku na nawierzchni referencyjnej w zależności od prędkości pojazdów

	Prędkość statystycznego pojazdu [km/h]				
	50	70	80	85	110
Pojazd osobowy	72,8 dB	77,1 dB	78,9 dB	-	82,9 dB
Wielozłonowy pojazd ciężarowy	81,5 dB	85,7 dB	87,4 dB	88,2 dB	-

Tab. 5.11. Widma dźwięku na nawierzchni referencyjnej w pasmach 1/3-oktawowych przy prędkości 80 km/h

$f$ [Hz]	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630
$L(SO)$	33,7	40,2	46,5	47,2	47,9	51,4	53,8	56,6	58,2	59,6	63,1	66,2
$L(SC)$	43,8	54,0	51,9	54,5	60,0	61,0	63,7	65,7	69,3	73,8	76,2	79,5
$f$ [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
$L(SO)$	69,9	73,1	72,1	70,8	68,9	65,4	62,1	59,1	56,1	52,8	49,3	45,4
$L(SC)$	80,8	79,6	77,8	75,7	73,7	70,7	67,9	65,6	62,5	59,5	55,7	51,8

### 5.3.2. Systemy oceny akustycznej nawierzchni drogowych

Nawierzchnia drogowa powinna być tak wykonana, aby był zapewniony wymagany poziom hałasu zarówno po oddaniu drogi do eksploatacji, jak i w przyjętym okresie użytkowania. W tym celu potrzebna jest znajomość właściwości akustycznych górnych warstw nawierzchni już na etapie wyboru technologii ich wykonania. Po wybudowaniu nawierzchni powinna być dokonana ocena jej hałaśliwości, a w okresie eksploatacji monitorowanie właściwości akustycznych. Problemy związane z jednorodnością i trwałością akustyczną warstw ściernych o zwiększonej zawartości wolnych przestrzeni potwierdzają potrzebę opracowania jednolitego systemu ich oceny akustycznej.

W niektórych krajach zostały opracowane takie systemy, a do najbardziej kompleksowych rozwiązań należy zaliczyć [23]: system HAPAS (*Highway Agency Product Approval Scheme*) w Wielkiej Brytanii, system SRS w Danii i system stosowany w Holandii z wykorzystaniem współczynnika  $C_{road}$ . W ramach projektu SILVIA zaproponowano algorytmy postępowania przy certyfikacji technologii budowy nawierzchni, algorytmy oceny hałaśliwości nawierzchni po jej wybudowaniu i w trakcie eksploatacji [88]. W projekcie ROSANNE [9, 45] wprowadzono pewne zmiany w podejściu przedstawionym w projekcie SILVIA. Poniżej podano ogólną charakterystykę wyżej wymienionych systemów i algorytmów postępowania przy akustycznej ocenie nawierzchni drogowych.

W Wielkiej Brytanii projektowana warstwa ścierna o obniżonej hałaśliwości musi posiadać certyfikat HAPAS. Jego uzyskanie wymaga przeprowadzenia odpowiedniej procedury badawczej, zbliżonej do procedury zawartej w ISO 11819-1.

Dla każdej z trzech kategorii pojazdów ( $L$  – pojazdy osobowe,  $H_1$  – pojazdy ciężarowe i  $H_2$  – wielocłonowe pojazdy ciężarowe) ustala się zgodnie z metodą SPB zależność regresyjną pomiędzy maksymalnym poziomem dźwięku i prędkością przejazdu. Następnie oblicza się maksymalne wartości poziomu dźwięku od statystycznego pojazdu każdej z kategorii ( $L_L$ ,  $L_{H1}$ ,  $L_{H2}$ ) dla prędkości referencyjnych. Na ich podstawie określa się indeks  $RSI$  (Road Surface Influence) odpowiednio dla prędkości referencyjnej wysokiej ( $RSI_H$ ) i średniej ( $RSI_M$ ) [23]:

$$RSI_H = 10 \log \left( 7,8 \cdot 10^{\frac{L_L}{10}} + 0,578 \cdot 10^{\frac{L_{H1}}{10}} + 10^{\frac{L_{H2}}{10}} \right) - 95,9, \quad (5.4)$$

$$RSI_M = 10 \log \left( 11,8 \cdot 10^{\frac{L_L}{10}} + 0,629 \cdot 10^{\frac{L_{H1}}{10}} + 0,157 \cdot 10^{\frac{L_{H2}}{10}} \right) - 92. \quad (5.5)$$

Wartości  $RSI$  są ustalane w oparciu o wyniki uzyskane na dwóch odcinkach tej samej drogi z taką samą nawierzchnią. Nawierzchnia projektowana jako nawierzchnia redukująca hałas powinna charakteryzować się indeksem  $RSI$  (Road Surface Influence)  $\leq -2,5$  dB. Dodatkowo w metodzie prognozowania hałasu CRTN (*Calculation of Road Traffic Noise*), stosowanej w Wielkiej Brytanii, są wprowadzone współczynniki korygujące z uwagi na pogarszanie się właściwości akustycznych w czasie eksploatacji cienkich warstw asfaltowych i nawierzchni porowatych. Przyjmuje się, że dla cienkich warstw asfaltowych indeks  $RSI$  nie powinien być wyższy niż  $-3,5$  dB, a dla nawierzchni porowatych nie wyższy niż  $-5$  dB. Certyfikaty HAPAS są przyznawane na okres 5 lat i wydawane po potwierdzeniu, że w ciągu 24 miesięcy od oddania drogi do eksploatacji makrotekstura powierzchni będzie miała wartość  $MTD \geq 1,2$  mm.

W Danii opracowano SRS-system do oceny hałaśliwości i certyfikacji stosowanych technologii budowy górnych warstw nawierzchni drogowych. Bazuje on na wynikach pomiaru poziomu dźwięku metodą CPX. Przedsiębiorca przystępujący do przetargu na budowę nawierzchni powinien przedstawić dokument potwierdzający właściwości akustyczne proponowanej do zastosowania technologii wykonania górnej warstwy nawierzchni. Ocena hałaśliwości nawierzchni polega na pomiarze i ustaleniu wartości maksymalnego poziomu dźwięku metodą CPX na wybudowanym odcinku o długości minimum 100 m oraz ich porównaniu z wartościami indeksu  $CPXI$  na nawierzchni referencyjnej przy prędkości referencyjnej 50 km/h i 80 km/h (nawierzchnia referencyjna:  $CPXI(80) = 102$  dB;  $CPXI(50) = 94$  dB). Ustalono 3 klasy nawierzchni pod względem hałaśliwości (klasa A: bardzo dobra redukcja hałasu:  $\Delta CPXI \geq 7,0$  dB; klasa B: dobra redukcja hałasu:  $5,0 \leq \Delta CPXI < 7,0$  dB; klasa C: występuje redukcja hałasu:  $3,0 \leq \Delta CPXI < 5$  dB).

W Holandii podstawą oceny hałaśliwości nawierzchni jest współczynnik korygujący  $C_{road}$ , określający różnicę pomiędzy poziomami hałasu na badanej na-

wierzchni i na nawierzchni referencyjnej (w oparciu o metodę SPB). Jego wartości są ustalane w odniesieniu do całkowitego poziomu dźwięku i do wartości w pasmach oktawowych od 63 Hz do 8 kHz. Wartości współczynników korygujących są określane przez jednostkę odpowiadającą w tym kraju za ocenę nawierzchni pod względem hałaśliwości.

Przedsiębiorstwa budujące w Holandii drogi o nawierzchniach obniżających poziom hałasu powinny wykazać się certyfikatem potwierdzającym redukcję hałasu toczenia pojazdów samochodowych przez stosowane technologie. Jest to podstawą do ubiegania się przez inwestora o zwrot kosztów zrealizowanej inwestycji. Uzyskanie certyfikatu wymaga przeprowadzenia badań poziomu hałasu w pięciu miejscach na pięciu różnych drogach o nawierzchni wykonanej w tej samej technologii. Ocena hałaśliwości wybudowanej nawierzchni może być dokonana również metodą CPX, a na podstawie tych wyników i wcześniej opracowanych zależności pomiędzy metodami CPX i SPB ustala się poziomy dźwięku od statystycznego pojedynczo przejeżdżającego pojazdu danej kategorii. Tak obliczone poziomy hałasu są porównywane z wymaganiami określonymi w każdym roku przez administrację drogową.

Według projektu SILVIA ocena akustyczna nawierzchni drogowych obejmuje trzy podstawowe algorytmy: certyfikację technologii wykonywania nawierzchni, ocenę wybudowanej nawierzchni i jej monitoring. W odniesieniu do każdej procedury zaproponowano dwa scenariusze postępowania (scenariusz I – preferowany i scenariusz II) z punktu widzenia podejścia do ustalenia poziomu hałasu (tab. 5.12).

Tab. 5.12. Ocena hałaśliwości nawierzchni w scenariuszach postępowania według projektu SILVIA

	Nawierzchnie o zwartej strukturze		Nawierzchnie ze zwiększoną zawartością wolnych przestrzeni	
	standardowe	o podwyższonej elastyczności	standardowe	o podwyższonej elastyczności
Certyfikacja technologii budowy górnych warstw nawierzchni				
Scenariusz I- preferowany	SPB-CPX	SPB-CPX	SPB-CPX	SPB-CPX
Scenariusz II	SPB tekstura	SPB tekstura sztywność	SPB tekstura absorpcja	SPB tekstura sztywność absorpcja
Ocena hałaśliwości nowych nawierzchni i ich monitoring				
Scenariusz I- preferowany	CPX	CPX	CPX	CPX
Scenariusz II	tekstura	tekstura sztywność	tekstura absorpcja	tekstura sztywność absorpcja



Scenariusz I (preferowany) polega na wykorzystaniu metody CPX i metody statystycznego przejazdu SPB na etapie certyfikacji technologii budowy górnych warstw nawierzchni. Wymaga to minimum 10 pomiarów metodą CPX na segmentach drogi o długości 20 m każdy. W wypadku odcinka testowego krótszego od 200 m (lecz nie krótszego niż 100 m) pomiary należy wykonać dwukrotnie na każdym z odcinków. Na podstawie wyników według metody CPX ustala się lokalizację przekroju badawczego do wykonania pomiarów metodą SPB, które są podstawą określenia poziomu hałasu certyfikowanych technologii. Ocena akustyczną wybudowanych nawierzchni zaleca się przeprowadzić metodą CPX w terminie około 2 miesięcy po oddaniu drogi do użytkowania, a pomiary w ramach monitoringu co pięć lat na nawierzchni o zwartej strukturze i co dwa lata na nawierzchniach o zwiększonej zawartości wolnych przestrzeni.

Scenariusz II polega na pomiarze w pierwszym etapie parametrów charakteryzujących nawierzchnię i decydujących o poziomie hałasu. Ich wartości są podstawą do sprawdzenia jednorodności nawierzchni pod względem akustycznym. Stanowi to także podstawę do ustalenia lokalizacji przekroju badawczego i przeprowadzenia pomiarów hałasu metodą SPB w celu dokonania certyfikacji danej technologii. W wypadku standardowych nawierzchni o zwartej strukturze (np. SMA, beton asfaltowy) takim parametrem jest makrotekstura, a w odniesieniu do nawierzchni o zwartej strukturze i zwiększonej elastyczności (np. z dodatkiem gumy) – makrotekstura i sztywność. Nawierzchnie porowate wymagają oceny tekstury i współczynnika absorpcji, a nawierzchnie poroelastyczne – dodatkowo oceny sztywności. Oceny akustycznej po wybudowaniu nawierzchni i w ramach ich monitoringu dokonuje się na podstawie wskazanych powyżej parametrów, obliczając poziom hałasu w oparciu o ustalone zależności funkcyjne.

Zgodnie z zapisami w projekcie ROSANNE pomiary poziomu hałasu powinno przeprowadzać się metodą CPX w okresie od 2 do 6 miesięcy po oddaniu drogi do użytkowania z uwzględnieniem obciążenia ruchem samochodowym. W pomiarach należy wykorzystywać oponę testową typu P (lub dwie opony: P i H). Poziomy dźwięku ustala się w odniesieniu do segmentów o długości 20 m wraz z określeniem standardowych odchyień. W ramach monitoringu zaproponowano dokonywanie oceny akustycznej nawierzchni o zwartej strukturze po trzech latach od przekazania drogi do eksploatacji, po pięciu latach, następnie co trzy lata, a na nawierzchniach porowatych – odpowiednio po jednym roku, po trzech latach, po pięciu latach, a następnie co trzy lata.

Szczegóły dotyczące algorytmów postępowania opracowanych w ramach projektu SILVIA, wartości dopuszczalnych różnic pomiędzy poziomami hałasu na etapie sprawdzania jednorodności akustycznej czy wykorzystania ustalonych

wartości poziomu dźwięku w klasyfikacji nawierzchni są podane w załącznikach C i D w pracy [88].

Systemowe podejście do oceny akustycznej nawierzchni drogowych zaproponowane w projekcie SILVIA, po dokonaniu niewielkich zmian w podanych algorytmach, zostało przyjęte i jest stosowane między innymi we Francji [12]. Wprowadzone zmiany dotyczą prędkości referencyjnych, czasu prowadzenia pomiarów w ramach monitoringu oraz liczby odcinków testowych na etapie certyfikacji technologii planowanych do zastosowania w nawierzchni drogowej.

### **5.3.3. Propozycja założeń do systemu oceny akustycznej nawierzchni drogowych w Polsce**

Zgodnie z [20] obecnie w krajach Unii Europejskiej są stosowane następujące podejścia do budowy i oceny akustycznej nawierzchni drogowych:

- a) w dokumentacji przetargowej jest ogólny zapis o konieczności wykonania nawierzchni redukującej hałas toczenia pojazdów samochodowych, lecz po jej wykonaniu nie sprawdza się właściwości akustycznych;
- b) opracowana jest klasyfikacja nawierzchni pod względem hałaśliwości, lecz brak jest zasad jej uwzględniania przy podejmowaniu decyzji o wyborze rodzaju nawierzchni i nie są prowadzone badania poziomu hałasu na nowych i eksploatowanych nawierzchniach;
- c) w dokumentacji przetargowej znajduje się zapis o wykonaniu nawierzchni redukującej hałas, z uwzględnieniem obowiązującej klasyfikacji pod względem hałaśliwości, a po jej wybudowaniu powinny być wykonane pomiary hałasu weryfikujące założone wymagania;
- d) w dokumentacji przetargowej jest zapis o wykonaniu nawierzchni redukującej hałas, a po jej wybudowaniu i w kolejnych latach (w ramach monitoringu) powinny być wykonane pomiary hałasu.

Dotychczas nie opracowano w Polsce systemu umożliwiającego ocenę akustyczną technologii budowy górnych warstw nawierzchni, ocenę hałaśliwości wybudowanych nawierzchni, a także ich monitoringu. Nie dokonano też jednoznacznych ustaleń odnośnie wyboru metody oceny hałaśliwości nawierzchni. Ponieważ wyniki pomiarów według CPX i OBSI nie mogą być bezpośrednio wykorzystane w prognozowaniu poziomu hałasu od ruchu samochodowego metodą CNOSSOS-EU, na obecnym etapie proponuje się przyjęcie metody SPB jako podstawowej w ocenie hałaśliwości nawierzchni drogowych. Maksymalne poziomy dźwięku od poruszającego się statystycznego pojazdu osobowego i wieloczołowego pojazdu ciężarowego mogą być ustalone w oparciu o wyniki uzyskane według metody

CPX po uwzględnieniu opracowanych zależności funkcyjnych pomiędzy tymi metodami.

Wyniki z pomiarów poziomu hałasu metodą CPX i OBSI powinny stanowić podstawę do oceny jednorodności akustycznej nawierzchni na dłuższych odcinkach i ustalenia lokalizacji przekroju do przeprowadzenia pomiarów metodą SPB.

Pomimo że w niektórych krajach są prowadzone badania współczynnika absorpcji i sztywności nawierzchni, dotychczas nie opracowano zależności opisujących ich wpływ na poziom hałasu od jadących pojazdów. Parametrem, który obecnie może być mierzony w sposób systematyczny na drogach w Polsce, jest makrotekstura nawierzchni. Jej pomiary są wykonywane przy wykorzystaniu metod stacjonarnych (metoda objętościowa, stacjonarny profilograf laserowy, CTM) i metod mobilnych (profilografy laserowe). Wykazany w poprzednich rozdziałach wpływ makrotekstury powierzchni na poziom hałasu pozwala przyjąć ten parametr jako podstawowy przy ocenie poziomu hałasu na nawierzchniach o zwartej strukturze.

Mając na uwadze powyższe stwierdzenia, założenia algorytmów opracowanych w ramach projektu SILVIA i ROSANNE, systemy oceny stosowane w innych krajach, wyniki badań własnych poziomu hałasu, poniżej przedstawiono propozycję założeń do systemu certyfikacji technologii i oceny hałaśliwości nowych i eksploatowanych nawierzchni na drogach w Polsce.

### **Poziom I: Certyfikacja technologii**

**Scenariusz A** (przedsiębiorstwo ubiega się o certyfikację technologii i ma zrealizowane inwestycje z nawierzchnią o obniżonej hałaśliwości):

- ocena poziomów hałasu na podstawie wyników pomiarów z minimum dwóch realizacji (zalecane z trzech realizacji);
- przy jednej realizacji – przedsiębiorstwo dodatkowo powinno wybudować jeden odcinek testowy o długości minimum 150 m (niezależnie od długości planowanego odcinka wbudowania certyfikowanego produktu i klasy technicznej drogi) przed wbudowaniem mieszanki mineralno-asfaltowej lub warstwy z betonu cementowego;
- wybudowany odcinek testowy powinien umożliwiać przeprowadzenie pomiarów hałasu metodą SPB (lub CPB) i metodą CPX (OBSI), z prędkością referencyjną z uwzględnieniem klasy technicznej i znaczenia planowanej drogi.

**Scenariusz B** (proponowana technologia nie była wcześniej stosowana przez przedsiębiorstwo):

- ocena na podstawie wyników badań poziomu hałasu na minimum trzech niezależnie wybudowanych odcinkach testowych o długości minimum 150 m każdy;

- odcinki testowe powinny być przystosowane do wykonania pomiarów z prędkością referencyjną przez przyczepę badawczą w metodzie CPX, pojazd testowy w metodzie OBSI i pojazdy testowe w metodzie CPB, odpowiednio do miejsca zastosowania proponowanej technologii (50 km/h – w obszarze zabudowanym, 80 km/h – odcinek zamiejski drogi ogólnodostępnej, 110 km/h – droga szybkiego ruchu).

Zaproponowana długość odcinka testowego (150 m) wynika z możliwości ustalenia wyników w ramach pomiarów na trzech jego częściach (o długości 50 m każda), a na każdej części na pięciu segmentach drogi o długości 10 m każdy. Każdy segment powinien być scharakteryzowany pod względem poziomu dźwięku według metody CPX i makrotekstury. Na tej podstawie nastąpi wyznaczenie lokalizacji przekroju do pomiaru poziomów hałasu metodą SPB. Uwzględniono przy tym standardową długość odcinka obliczeniowego przyjętą w Polsce w ramach oceny parametrów techniczno-eksploatacyjnych nawierzchni drogowych [47].

### **Poziom II: Ocena nowej nawierzchni pod względem akustycznym**

**Scenariusz C** (nawierzchnie o zwartej strukturze – zawartość wolnych przestrzeni do 8%):

- ocena wizualna nawierzchni w celu sprawdzenia, czy nie występują różnicowania powierzchni na długości całego odcinka;
- ocena jednorodności nawierzchni pod względem makrotekstury;
- sprawdzenie jednorodności akustycznej nawierzchni na podstawie wyników z pomiarów makrotekstury (lub ocena jednorodności akustycznej nawierzchni na podstawie wyników metody CPX lub OBSI);
- wybór przekroju do pomiaru poziomu hałasu metodą SPB lub CPB;
- przeprowadzenie pomiarów hałasu metodą SPB lub CPB,
- ocena zgodności uzyskanych poziomów hałasu z wymaganymi wartościami.

**Scenariusz D** (nawierzchnie o zawartości wolnych przestrzeni powyżej 8%):

- ocena wizualna nawierzchni w celu sprawdzenia, czy nie występują różnicowania powierzchni na długości całego odcinka;
- ocena jednorodności akustycznej nawierzchni według metody CPX lub OBSI;
- wybór przekroju do pomiaru poziomu hałasu metodą SPB lub CPB;
- przeprowadzenie pomiarów hałasu metodą SPB lub CPB;
- ocena zgodności uzyskanych poziomów hałasu z wymaganymi wartościami.

Jeżeli długość odcinka drogi z badaną nawierzchnią przekracza 500 m, proponuje się jego podział na odcinki o długości 500 m i na każdym z nich przeprowadzenie niezależnej analizy wyników poziomego hałasu. Ocena akustyczna nowej nawierzchni powinna być dokonana w okresie od 2 do 6 miesięcy po jej wykonaniu.

### **Poziom III: Monitoring nawierzchni**

**Scenariusz E** (nawierzchnia o zwartej strukturze – zawartość wolnych przestrzeni do 8%):

- ocena wizualna nawierzchni w celu sprawdzenia, czy nie występują różnicowania powierzchni na długości całego odcinka;
- ocena makrotekstury nawierzchni i jej jednorodności po trzech latach użytkowania, po pięciu latach użytkowania, a następnie po trzy lata;
- ocena hałaśliwości w oparciu o makrotekturę nawierzchni i ustalenie jednorodności akustycznej (lub ocena jednorodności pod względem akustycznym według metody CPX (lub OBSI) – w okresach jak powyżej;
- ocena zgodności uzyskanych poziomów hałasu z wymaganymi wartościami.

**Scenariusz F** (nawierzchnia o zwiększonej zawartości wolnych przestrzeni – zawartość wolnych przestrzeni powyżej 8%):

- ocena wizualna nawierzchni w celu sprawdzenia, czy nie występują różnicowania powierzchni na długości całego odcinka;
- ocena jednorodności akustycznej nawierzchni metodą CPX lub OBSI po roku użytkowania, po trzech latach, po pięciu latach, a następnie w każdym roku;
- ocena zgodności uzyskanych poziomów hałasu z wymaganymi wartościami.

Przedstawione powyżej założenia do opracowania systemu oceny akustycznej nawierzchni drogowych są propozycją i wskazaniem ogólnego kierunku działania w celu opracowania szczegółowych wytycznych certyfikacji technologii i oceny hałaśliwości nawierzchni w okresie jej użytkowania. Powinny one uwzględniać zarówno szczegółowe zasady prowadzenia pomiarów poszczególnymi metodami (poziomego dźwięku i makrotekstury), jak i analizę wyników, zgodnie z obowiązującymi standardami wskazanymi w opracowaniach normowych i wymaganiach technicznych dotyczących stosowanej aparatury badawczej. Wyniki analizy i ustalone zależności funkcyjne przedstawione w niniejszej monografii powinny być wykorzystane przy opracowywaniu systemu oceny akustycznej nawierzchni drogowych w naszym kraju.

## 6. Wpływ nawierzchni na poziom hałasu w otoczeniu dróg

### 6.1. Poziom emisji dźwięku od ruchu drogowego

#### 6.1.1. Metoda obliczania

Zakładając, że pojazd porusza się z prędkością „ $V$ ” na prostoliniowym odcinku drogi w odległości „ $d$ ” od odbiorcy, emisję hałasu pojedynczego samochodu osobowego ( $\varepsilon_1$ ) i pojedynczego wieloczęłowego pojazdu ciężarowego ( $\varepsilon_2$ ) można wyrazić za pomocą wzorów [141]:

$$\varepsilon_1 = 3,6 \cdot 10^{0,1a_1} \cdot \left(\frac{V_1}{V_0}\right)^{0,1b_1-1}, \quad (6.1)$$

$$\varepsilon_2 = 3,6 \cdot 10^{0,1a_2} \cdot \left(\frac{V_2}{V_0}\right)^{0,1b_2-1}, \quad (6.2)$$

gdzie:

$$V_0 = 1 \text{ km/h}$$

$a_1, b_1$  – współczynniki ustalone w odniesieniu do pojazdu osobowego na podstawie zależności:

$$L_{WA1} = a_1 + b_1 \log \frac{V_1}{V_0}, \quad (6.3)$$

zaś:

$a_2, b_2$  – współczynniki ustalone w odniesieniu do wieloczęłowego pojazdu ciężarowego na podstawie zależności:

$$L_{WA2b} = a_2 + b_2 \log \frac{V_2}{V_0}. \quad (6.4)$$

Wartości współczynników  $a_1, a_2, b_1$  i  $b_2$  można wyznaczyć w oparciu o wyniki pomiarów maksymalnego poziomu dźwięku metodą statystycznego przejazdu (SPB) uwzględniając zależność pomiędzy poziomem mocy akustycznej a poziomem ciśnienia akustycznego, podaną w pracy [140]:

$$L_{WA} \approx L_{pA} + 27, \quad (6.5)$$

gdzie:

$$L_{pA} = A + B \log \left( \frac{V}{V_0} \right), \quad (6.6)$$

jest wartością ustaloną według metody statystycznego przejazdu (SPB), w odniesieniu do statystycznego pojazdu kategorii 1 i 2b.

Średnie poziomy emisji hałasu  $\langle \varepsilon_1 \rangle$  i  $\langle \varepsilon_2 \rangle$  przyjmują zatem postać:

$$\langle \varepsilon_1 \rangle = 3,6 \cdot 10^{0,1a_1} \cdot \frac{1}{Q_1} \sum_{i=1}^{Q_1} \left( \frac{V_{1i}}{V_0} \right)^{0,1b_1-1}, \quad (6.7)$$

$$\langle \varepsilon_2 \rangle = 3,6 \cdot 10^{0,1a_2} \cdot \frac{1}{Q_2} \sum_{j=1}^{Q_2} \left( \frac{V_{2j}}{V_0} \right)^{0,1b_2-1}, \quad (6.8)$$

gdzie:

$Q_1, Q_2$  – liczba pojazdów odpowiednio kategorii 1 i kategorii 2b.

Uwzględniając średnią prędkość pojazdów osobowych  $\langle V_1 \rangle$  i wieloczlono-  
wych pojazdów ciężarowych  $\langle V_2 \rangle$ , poziomy emisji można obliczyć ze wzorów:

$$\langle \varepsilon_1 \rangle \approx 3,6 \cdot 10^{0,1a_1} \cdot \frac{\langle V_1 \rangle^{0,1b_1-1}}{V_0^2}, \quad (6.9)$$

$$\langle \varepsilon_2 \rangle \approx 3,6 \cdot 10^{0,1a_2} \cdot \frac{\langle V_2 \rangle^{0,1b_2-1}}{V_0^2}. \quad (6.10)$$

Ustalone w podany powyżej sposób średnie emisje hałasu pojazdów poszczególnych kategorii stanowią podstawę do ustalenia emisji hałasu drogowego od potoku pojazdów z uwzględnieniem procentowego udziału pojazdów ciężarowych [141]:

$$L_{em} = 10 \log \{ q[(1-p)\langle \varepsilon_1 \rangle] + p\langle \varepsilon_2 \rangle \}, \quad (6.11)$$

gdzie:

$$q = (Q_1 + Q_2) \frac{t_0}{T}, \quad p = \frac{Q_2}{Q}, \quad (6.12)$$

$Q_1$  – liczba pojazdów kategorii 1 w czasie  $T$ ,

$Q_2$  – liczba pojazdów kategorii 2b w czasie  $T$ ,

$q$  – udział pojazdów kategorii 1 w potoku pojazdów [-],

$p$  – udział pojazdów kategorii 2b w potoku pojazdów [-],

$t_0 = 1$  sek,

$T$  – czas [sek].

Równoważny poziom dźwięku w czasie  $T$  w otoczeniu trasy drogowej obciążonej płynnym ruchem samochodowym, złożonym głównie dwóch kategorii pojazdów, można obliczyć na podstawie zależności [141]:

$$L_{AeqT} = L_{em} - 10 \log \frac{d}{d_0} - 3, \quad (6.13)$$

gdzie:

$d$  – odległość odbiorcy od źródła dźwięku [m],

$d_0 = 1$  m.

Wartości równoważnego poziomu dźwięku w otoczeniu trasy drogowej można ustalić, uwzględniając natężenie ruchu na każdym z pasów ruchu, każdej z jezdni lub łączne natężenie ruchu w całym przekroju drogi, przyjmując odpowiednio odległość od środka każdego z pasów ruchu, środka jezdni lub od osi drogi. W wypadku analizy wykonanej niezależnie dla każdego z pasów ruchu lub każdej z jezdni ustalenie całkowitego równoważnego poziomu dźwięku w otoczeniu drogi wymaga sumowania obliczonych wartości.

### 6.1.2. Wybór nawierzchni do szczegółowej analizy

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów maksymalnego poziomu dźwięku metodą SPB na nawierzchniach w Polsce wytypowano dziesięć technologii budowy górnych warstw nawierzchni, dla których przeprowadzono analizę ich wpływu na poziom emisji hałasu od ruchu samochodowego w otoczeniu dróg. W tabeli 6.1 przedstawiono wykaz technologii objętych analizą w odniesieniu do pojazdów osobowych i wielocłonowych pojazdów ciężarowych wraz z informacją o lokalizacji odcinków, na których były prowadzone pomiary hałasu w odniesieniu do danej technologii. Do szczegółowej analizy wybrano od jednego do czterech odcinków reprezentujących daną technologię. Wyboru dokonano po porównaniu wyników pomiarów ustalonych na wszystkich odcinkach w danej technologii z wynikami na wybranych odcinkach do szczegółowej analizy. Pokazano to na przykładzie nawierzchni z mastyksu grysowego (rys. 6.1). Wartości maksymalnego poziomu dźwięku, określone w oparciu o podane zależności regresyjne, przyjmują zbliżone wartości w zakresie prędkości 50÷120 km/h.

Szczegółowa analiza wyników poziomu hałasu (rys. 3.11 i 3.12) wykazała, że niektóre technologie są bardzo zbliżone pod względem hałaśliwości i w związku z tym podjęto decyzję o połączeniu uzyskanych wyników we wspólne zbiory danych, na przykład:

- wyniki na odcinkach o nawierzchni SMA10, SMA11 i SMA12 połączono w jedną grupę i oznaczono jako SMA11,



- wyniki na odcinkach o nawierzchni powierzchniowo utrwalonej i nawierzchni typu Reflex – oznaczono jako PU (powierzchniowe utrwalenie),
- wyniki na odcinku o nawierzchni SMA8 i nawierzchni w postaci cienkiej warstwy z mieszanki o nieciąglym uziarnieniu MNU10 – oznaczono jako SMA8,
- wyniki na nowych nawierzchniach PAC8 i BBTM8 – oznaczono jako PAC8/BBTM8.

W grupie nawierzchni z betonu cementowego, w zależności od techniki teksturowania, wyróżniono trzy technologie:

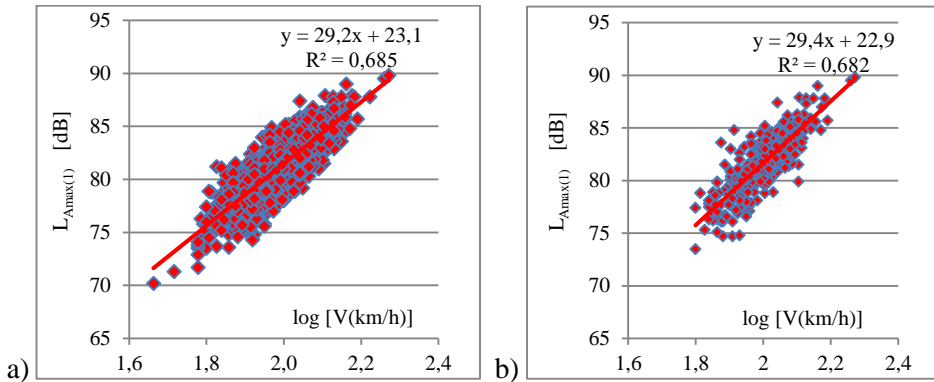
- CC (*Cement Concrete*) – nawierzchnia z betonu cementowego teksturowana metodą tkaniny jutowej lub szcztokowania (tekstura drobna i bardzo drobna),
- EACC-I (*Exposed Aggregate Cement Concrete*) – nawierzchnia betonowa z odkrytym kruszywem o makroteksturze  $MPD > 1,5$  mm,
- EACC-II – nawierzchnia betonowa z odkrytym kruszywem o makroteksturze  $MPD = 0,70 \div 1,50$  mm.

Tab. 6.1. Technologie budowy górnych warstw nawierzchni wraz z lokalizacją odcinków objętych analizą

Oznaczenie	Pojazdy osobowe	Pojazdy ciężarowe kategorii 2b
SMA11	DK8, DK10, DK50, S8	DK50, S8 (2 odcinki*), DK6
AC12	A2, DK8, DK22, DK1	A2, DK8, DK22, DK1
PU	DK8, DK17, DK11	DK8, DK17, DK11
CC	S8, A4, DK18	S8, A4, DK18
EACC-I	S8	S8
EACC-II	S8 (4*)	S8 (4*)
SMA5	DW 780	-----
SMA8	DK10, ulica w Białymstoku	DK10
PAC 8/BBTM8	DW780	DW780
Kostka kamienna	DK65, ulica w Białymstoku	DK65

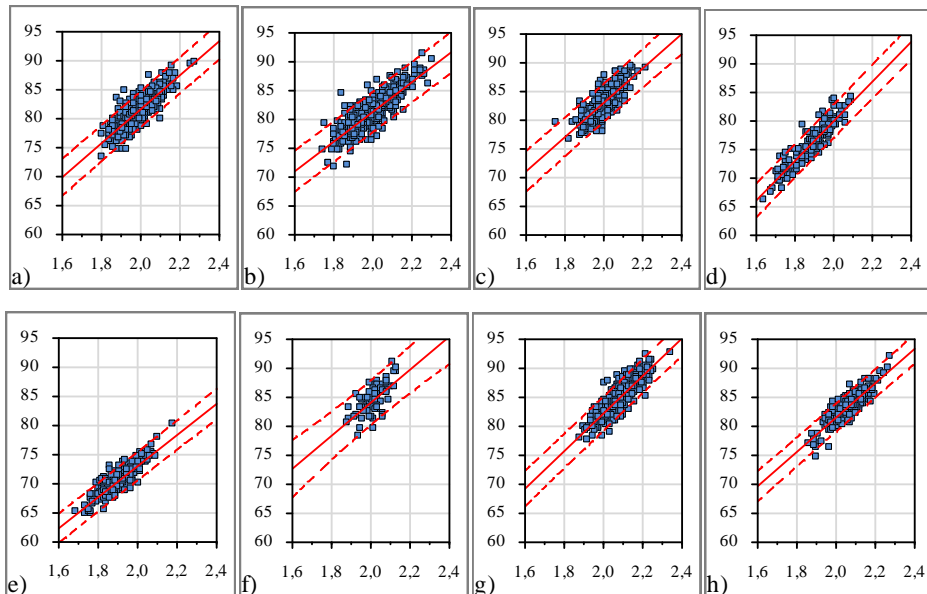
\*) – w nawiasach podano liczbę odcinków w ramach danej technologii

## 6. Wpływ nawierzchni na poziom hałasu w otoczeniu dróg

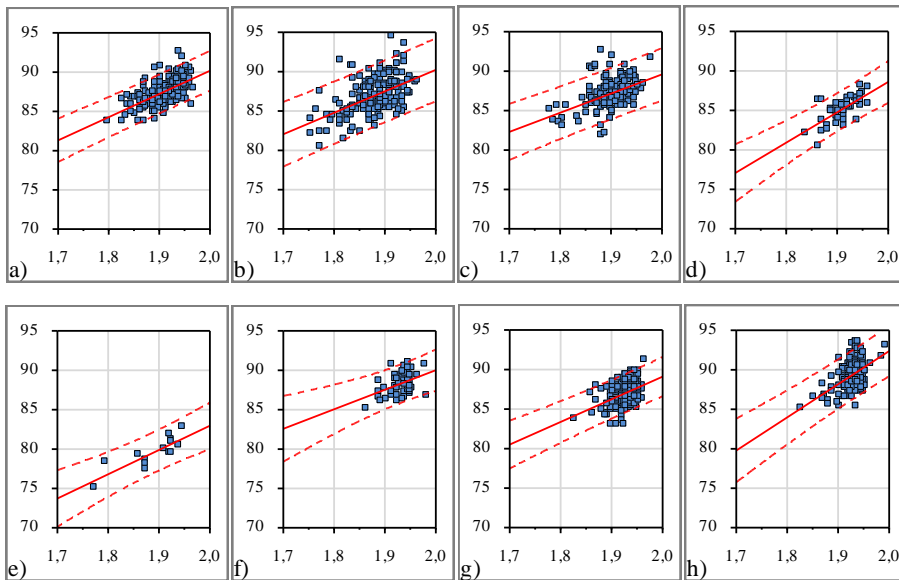


Rys. 6.1. Wyniki pomiarów maksymalnego poziomu dźwięku na nawierzchniach z mastyksu grysowego: a) na wszystkich dotychczas wykonanych nawierzchniach, b) na odcinkach wybranych do szczegółowej analizy

Na rysunkach 6.2 i 6.3 pokazano wyniki pomiarów maksymalnego poziomu dźwięku na ośmiu przykładowych wytypowanych technologiach budowy górnych warstw nawierzchni.



Rys. 6.2. Maksymalne poziomy hałas w odniesieniu do technologii i pojazdu osobowego (oś Y –  $L_{Amax}$ , oś X –  $\log [V(\text{km/h})]$ ) dla pojazdu SO: a) SMA11; b) AC12; c) PU; d) SMA8; e) PAC8; f) EACC-I; g) EACC-II; h) CC



Rys. 6.3. Maksymalne poziomy hałas w odniesieniu do technologii i wielocłonowego pojazdu ciężarowego (oś Y –  $L_{Amax}$ , oś X –  $\log [V(\text{km/h})]$ ) dla pojazdu SO: a) SMA11; b) AC12; c) PU; d) SMA8; e) PAC8; f) EACC-I; g) EACC-II; h) CC

W tabeli 6.2 podano współczynniki  $A$  i  $B$  zależności regresyjnych pomiędzy maksymalnym poziomem dźwięku a logarytmem prędkości statystycznego pojazdu, liczbę pojazdów w danej technologii uwzględnionych w analizie oraz współczynniki determinacji  $R^2$ , standardowe błędy estymacji  $S_e$  i niepewność rozszerzoną  $U$  przy 95% poziomie ufności.

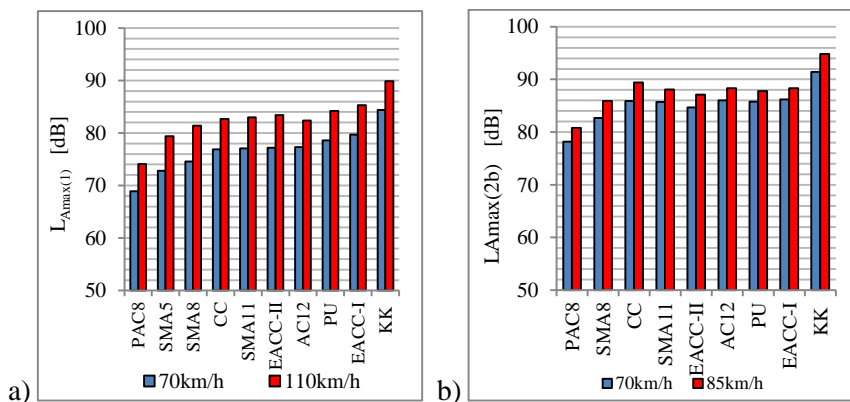
Ustalone wartości standardowego błędu estymacji  $S_e$ , współczynnika determinacji  $R^2$  i niepewności rozszerzonej przy 95% poziomie ufności, przy uwzględnieniu liczby pojazdów objętych analizą, potwierdzają spełnienie założeń podanych w normie ISO 11819-1, w odniesieniu do wartości  $S_e$  i  $U$ .

Na rysunku 6.4 przedstawiono wartości maksymalnego poziomu dźwięku od przejazdu statystycznego pojazdu osobowego z prędkością 70 km/h i 110 km/h oraz statystycznego wielocłonowego pojazdu ciężarowego z prędkością 70 km/h i 85 km/h na nawierzchniach wybranych do szczegółowej analizy. Widma generowanych dźwięków przy prędkości 70 km/h pokazano na rysunku 6.5.

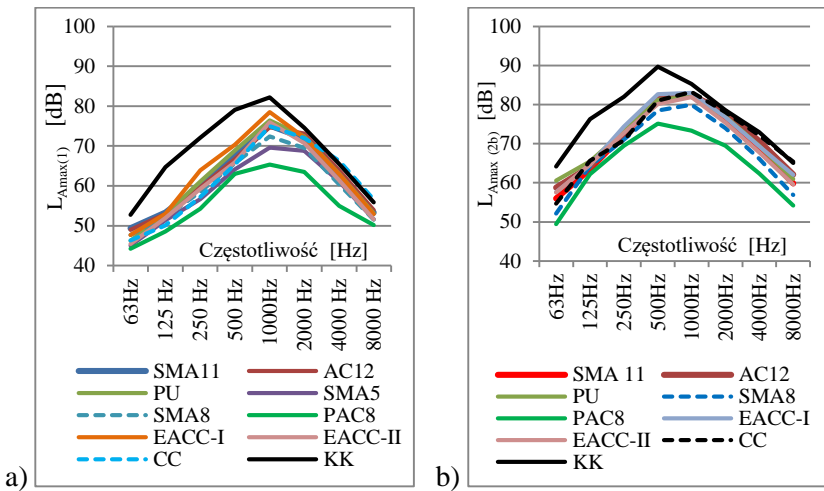
## 6. Wpływ nawierzchni na poziom hałasu w otoczeniu dróg

Tab. 6.2. Współczynniki regresyjne i charakterystyki statystyczne

Nawierzchnia	Charakterystyki					
	$n$	$A$	$B$	$R^2$	$S_e$	$U$
Pojazd osobowy – kategoria 1						
AC12	400	29,8	25,8	0,695	1,78	0,17
SMA11	348	22,9	29,4	0,682	1,56	0,16
SMA8	162	10,7	34,7	0,854	1,46	0,23
PAC8	194	19,6	26,7	0,757	1,23	0,17
SMA5	84	10,6	33,7	0,734	1,40	0,30
EACC-I	61	26,6	29,0	0,690	1,18	0,30
EACC-II	382	17,4	32,4	0,719	1,48	0,15
CC	243	22,3	29,6	0,745	1,23	0,16
PU	300	25,9	28,6	0,546	1,74	0,20
KK	164	32,7	28,1	0,829	1,94	0,30
Wielozłonowy pojazd ciężarowy – kategoria 2b						
AC12	192	35,7	27,3	0,255	1,99	0,28
SMA11	183	32,2	29,0	0,321	1,35	0,20
SMA8	45	11,6	38,5	0,454	1,18	0,36
PAC8	14	21,4	30,8	0,684	1,15	0,67
EACC-I	58	40,4	24,8	0,173	1,21	0,32
EACC-II	232	31,8	28,7	0,180	1,23	0,16
CC	180	8,4	42,0	0,238	1,57	0,23
PU	164	41,0	24,3	0,212	1,64	0,25
KK	54	17,5	40,0	0,798	1,89	0,52



Rys. 6.4. Porównanie poziomów dźwięku na wytypowanych nawierzchniach przy założonych prędkościach według metody SPB



Rys. 6.5. Widma dźwięku od przejazdu z prędkością 70 km/h statystycznego pojazdu: a) osobowego, b) wielocznionowego pojazdu ciężarowego

### 6.1.3. Ustalenie poziomów emisji dźwięku w zależności od charakterystyki ruchu i rodzaju nawierzchni

W tabeli 6.3 podano obliczone wartości współczynników  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $a_2$  i  $b_2$  na badanych nawierzchniach oraz założone trzy kategorie prędkości, odpowiadające odpowiednio drogom szybkiego ruchu (110/85: 110km/h – średnia prędkość statystycznego pojazdu osobowego, 85 km/h – średnia prędkość wielocznionowego pojazdu ciężarowego), drogom ogólnodostępnym (80/64) i drogom w obszarze zabudowanym (50/50). Dla każdej z przyjętych kategorii prędkości, w oparciu o zebrane wyniki pomiarów poziomu hałasu, zaproponowano 5 (lub 4) technologii wykonania górnej warstwy nawierzchni drogowej. Na rysunkach 6.6÷6.8 przedstawiono opracowane na podstawie wzorów 6.3÷6.12 nomogramy, prezentujące zależności pomiędzy poziomem emisji dźwięku w decybelach i natężeniem ruchu pojazdów samochodowych przejeżdżających w ciągu jednej godziny z uwzględnieniem procentowego udziału pojazdów ciężarowych. Nie opracowano nomogramu w odniesieniu do nawierzchni SMA5, gdyż na tej nawierzchni nie ustalono zależności pomiędzy poziomem hałasu a prędkością w odniesieniu do pojazdów kategorii 2b.

## 6. Wpływ nawierzchni na poziom hałasu w otoczeniu dróg

Tab. 6.3. Współczynniki regresyjne w odniesieniu do poziomu mocy akustycznej wraz z wytypowanymi technologiami objętymi analizą w odniesieniu do wskazanych prędkości

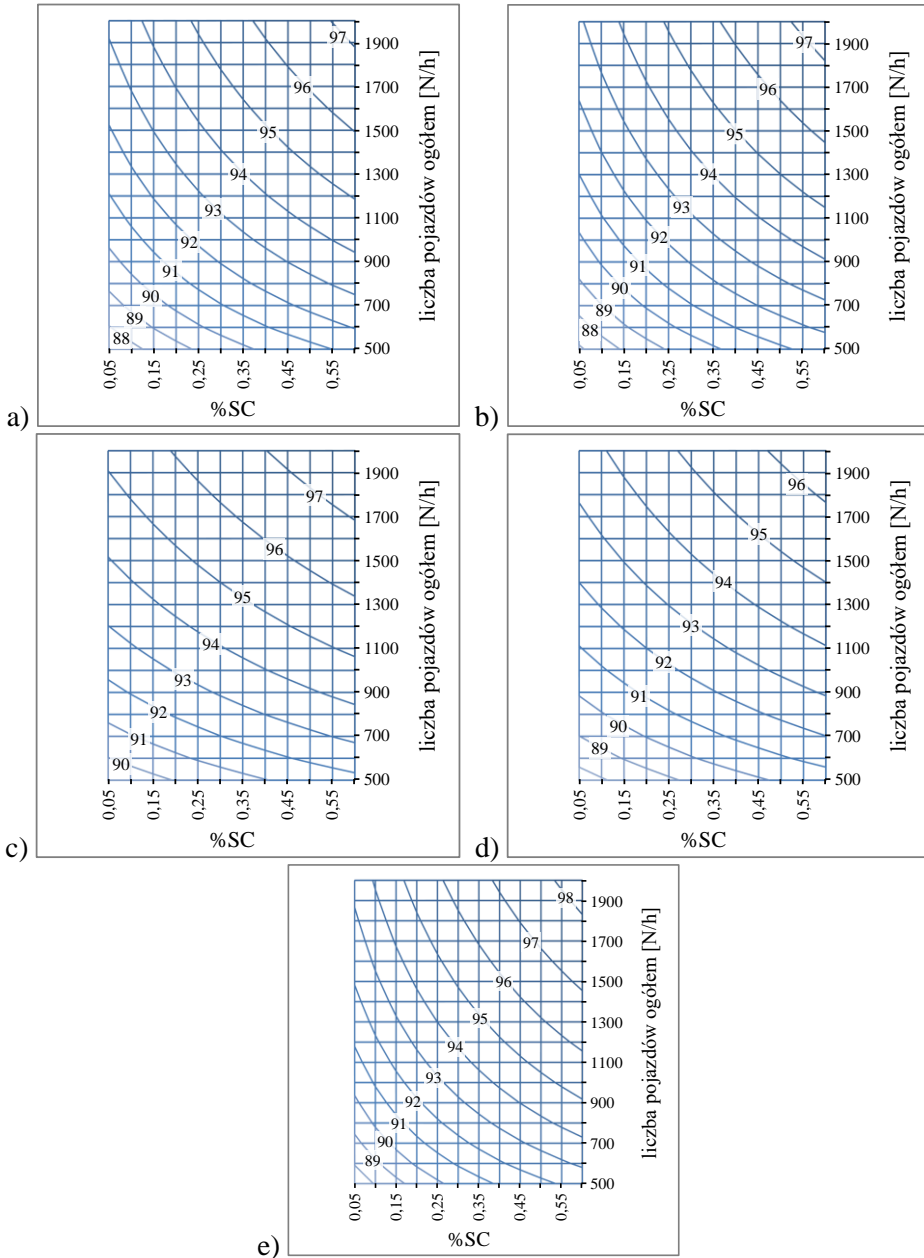
Lp.	Rodzaj nawierzchni	Pojazd osobowy		Pojazd ciężarowy		Średnie prędkości pojazdów $V_1/V_{2b}$		
		$a_1$	$b_1$	$a_2$	$b_2$	110/85	80/64	50/50
1.	AC12	56,8	25,8	62,7	27,3	+	-	-
2.	SMA11	49,9	29,4	59,2	29,0	+	+	+
3.	SMA8	37,7	34,7	38,6	38,5	-	+	+
4.	PAC8/BBTM8	46,6	26,7	48,4	30,8	-	+	+
5.	EACC-I	54,1	28,5	67,4	24,8	+	-	-
6.	EACC-II	44,4	32,4	58,8	28,7	+	-	-
7.	CC	49,3	29,6	35,4	42,0	+	-	-
8.	PU	52,9	28,6	68,0	24,3	-	+	-
9.	KK	59,7	28,1	44,5	40,0	-	+	+

„+” – oznaczenie przypadków objętych analizą (opracowano nomogramy)

W grupie nawierzchni w odniesieniu do prędkości 110/85 km/h nie występują zbyt duże różnice pomiędzy emisją hałasu. Na nawierzchniach typu SMA11 i AC12 poziomy emisji są praktycznie takie same. W przypadku nawierzchni z betonu cementowego, przy niewielkim udziale pojazdów ciężarowych, korzystniejszym rozwiązaniem jest nawierzchnia teksturowana tkaniną jutową lub techniką odkrytego kruszywa o makroteksturze w przedziale  $0,70 \div 1,50$  mm.

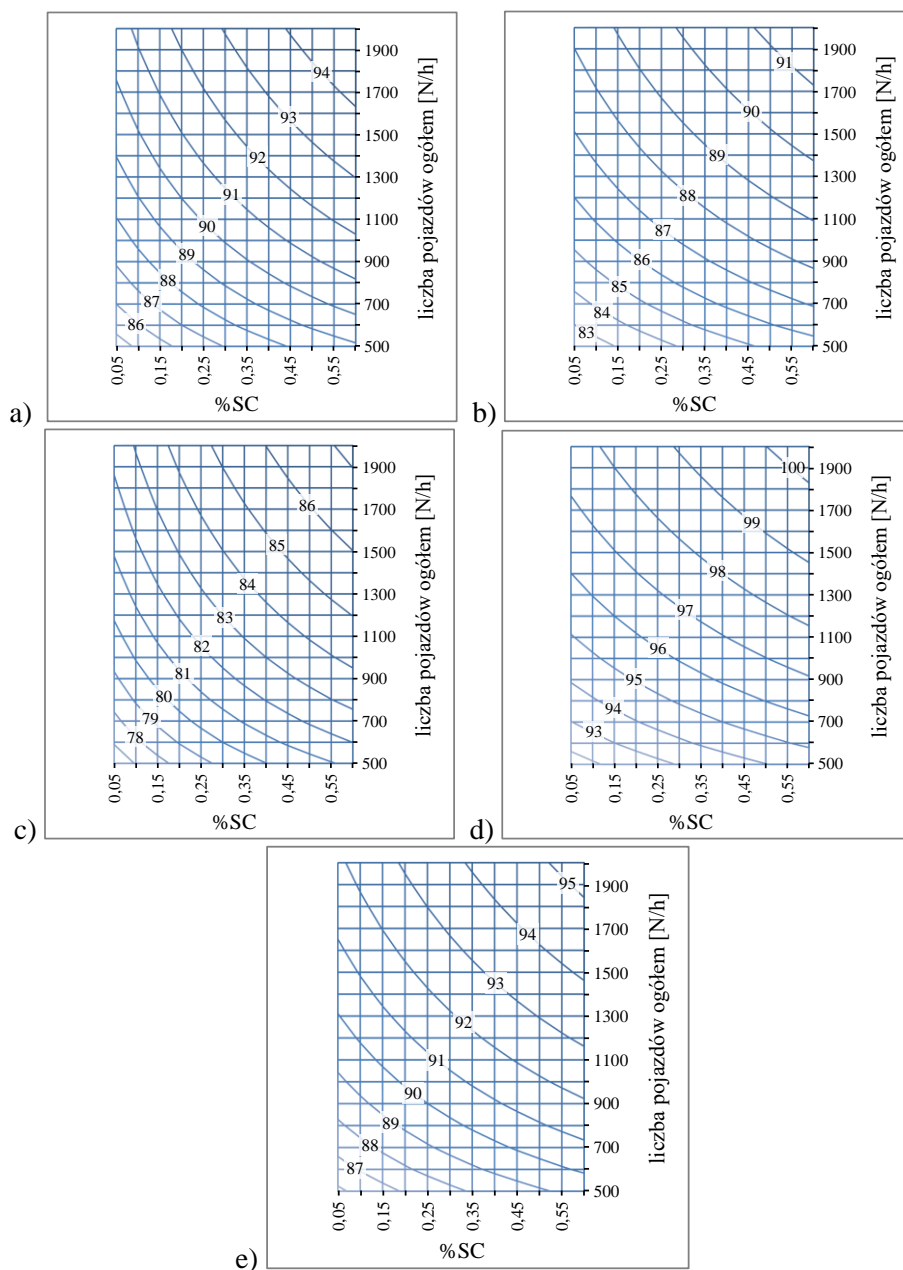
W grupie nawierzchni rozpatrywanych w odniesieniu do prędkości 80/64 km/h występują zdecydowanie większe różnice pomiędzy poziomami emisji hałasu od jadących pojazdów samochodowych przy takiej samej charakterystyce ruchu. Jednocześnie wzrost udziału pojazdów ciężarowych w podobny sposób wpływa na wzrost emisji hałasu w każdej z tych technologii. Najkorzystniejszym rozwiązaniem są technologie: SMA8 i PAC8/BBTM8.

W grupie nawierzchni wskazanych przy prędkości 50/50 km/h, podobnie jak przy prędkości 80/64 km/h, stwierdzono istotny wpływ technologii wykonania na poziom emisji i podobny wpływ udziału pojazdów ciężarowych na zmiany w poziomach emisji hałasu.



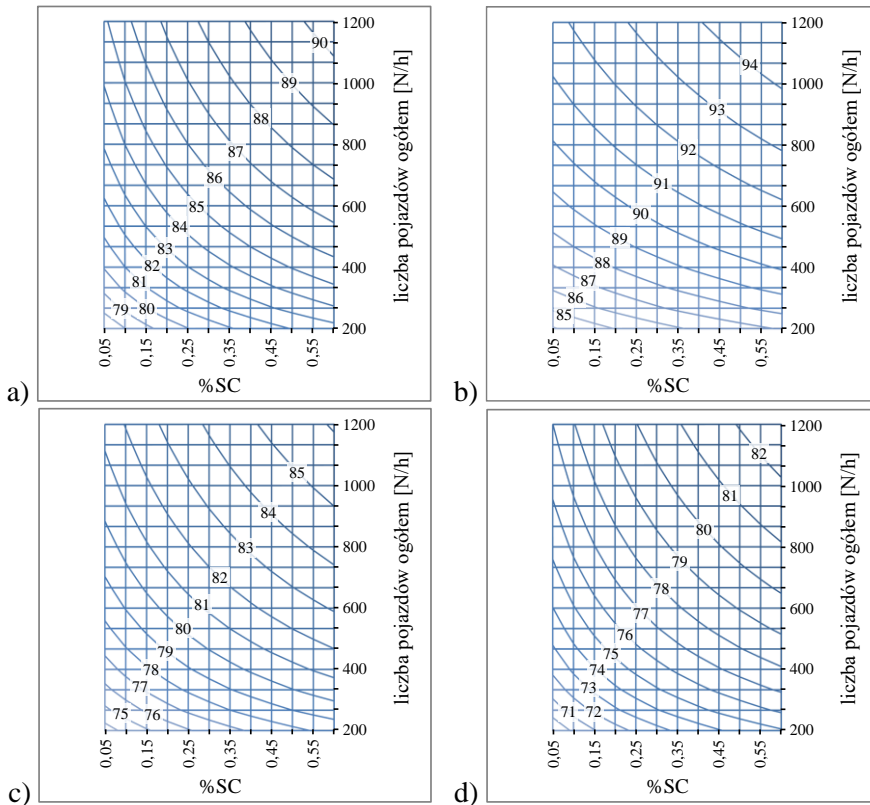
Rys. 6.6. Poziomy emisji hałasu drogowego ( $V_{1sr} = 110$  km/h,  $V_{2bsr} = 85$  km/h): a) SMA11-110/85, b) AC12, c) EACC-I, d) EACC-II, e) CC

## 6. Wpływ nawierzchni na poziomy hałas w otoczeniu dróg



Rys. 6.7. Poziomy emisji hałas drogowy ( $V_{1sr} = 80$  km/h,  $V_{2bsr} = 64$  km/h): a) SMA11, b) SMA8, c) PAC8/BBT8, d) kostka kamienna, e) PU





Rys. 6.8. Poziomy emisji hałasu drogowego ( $V_{1sr} = 50$  km/h,  $V_{2bsr} = 50$  km/h): a) SMA11, b) kostka kamienna, c) SMA8, d) PAC8/BBTM8

Sporządzenie nomogramów w odniesieniu do nawierzchni wykonanych w innych technologiach niż powyżej analizowane jest możliwe po ustaleniu współczynników  $a_1$  i  $a_2$  oraz  $b_1$  i  $b_2$ , na podstawie wyników pomiaru hałasu metodą SPB. Przykładem jest nomogram opracowany w odniesieniu do nawierzchni asfaltowej (uśrednionej pod względem akustycznym na podstawie pomiarów wykonanych do 2011 roku na drogach w Polsce), zamieszczony w pracy [67].

Wartości poziomów emisji hałasu od ruchu drogowego, ustalone w oparciu o opracowane nomogramy, mogą stanowić podstawę do obliczenia równoważnego poziomu dźwięku  $L_{Aeq}$  w otoczeniu drogi. Umożliwi to ocenę klimatu akustycznego w środowisku przy założonej charakterystyce ruchu samochodowego i przyjętym rodzaju nawierzchni.

## **6.2. Wpływ nawierzchni i kategorii pojazdów w prognozowaniu hałasu drogowego według metody CNOSSOS-EU**

### **6.2.1. Uwagi ogólne**

Wraz z pojawieniem się nowych technologii budowy górnych warstw nawierzchni, korzystnych z akustycznego punktu widzenia, zaistniała potrzeba uwzględnienia tego faktu w prognozowaniu poziomu hałasu w otoczeniu tras drogowych. Jest to związane z opracowywaniem map akustycznych i programów walki z nadmiernym hałasem w środowisku. W zależności od stosowanej metody wpływ nawierzchni jest uwzględniany w różny sposób. W niektórych metodach są podane konkretne wartości współczynników korygujących w odniesieniu do poszczególnych rodzajów nawierzchni, a w innych – oblicza się ich wartość w oparciu o makroteksturę nawierzchni, prędkość pojazdów czy procentowy udział tzw. pojazdów hałaśliwych. Podobnie sytuacja wygląda z charakterystyką pojazdów jako źródeł hałasu.

W tabeli 6.4, w oparciu o analizę porównawczą przedstawioną w pracy [79], podano przykładowe podejścia do uwzględniania wpływu nawierzchni i ruchu samochodowego w najbardziej znanych metodach prognozowania poziomu hałasu w otoczeniu tras drogowych. Wskazane metody są niekiedy oparte na różniących się modelach generowania dźwięku od poruszających się pojazdów, a wykorzystywane oprogramowanie wymaga nieco innego przygotowania danych wejściowych.

Przegląd i analiza sporządzonych w latach 2006-2007 map akustycznych i programów ograniczenia nadmiernego poziomu hałasu w środowisku wykazały istotne rozbieżności w rozwiązaniu tego problemu pomiędzy poszczególnymi krajami Unii Europejskiej. Wynikało to głównie ze stosowania różnych metod prognozowania hałasu, zróżnicowanego podejścia do ustalania poziomów mocy akustycznej źródeł dźwięku i jego propagacji, danych wejściowych dotyczących kategorii pojazdów, lokalizacji źródeł hałasu, charakterystyk nawierzchni czy stosowanego oprogramowania. W związku z powyższym w 2008 roku podjęto decyzję o opracowaniu wspólnej metody prognozowania poziomu hałasu w krajach Unii Europejskiej, a jej założenia określono w ramach projektu CNOSSOS-EU [107].

Tab. 6.4. Ogólna charakterystyka wybranych metod prognozowania hałasu drogowego w odniesieniu do ruchu pojazdów i nawierzchni drogowych

	CoRTN model	RLS 90 model	ASJ-RTN-Model 2008	HARMONOISE model	NORD 2000	NMPB-Routes -2008
Kraj, w którym opracowano metodę i jest ona stosowana	Wielka Brytania	Niemcy	Japonia	Propozycja do stosowania w krajach Unii Europejskiej	Norwegia, Dania, Szwecja, Finlandia	Francja
Możliwości w zakresie opisu warunków ruchu	Stała prędkość, zmiany prędkości, przyspieszanie, przerwy w ruchu	Stała prędkość, zmiany prędkości, przerwy w ruchu, ruch na skrzyżowaniach	Stała prędkość, przyspieszanie i zwalnianie, ruch na skrzyżowaniach bez i z sygnalizacją, ruch na węzłach	Stała prędkość, przyspieszanie, zwalnianie, korekta z uwagi na poślizg oraz zwalnianie i przyspieszanie	Możliwy opis warunków ruchu dla każdej kategorii drogi – od autostrady do drogi lokalnej	Stała prędkość, przyspieszanie i zwalnianie
Kategorie pojazdów	Osobowe i ciężarowe	Osobowe i ciężarowe	Osobowe, ciężarowe (2 podkategorie), motocykle	Osobowe, ciężarowe (3 podkategorie), motocykle	Osobowe, ciężarowe (2 podkategorie)	Osobowe, ciężarowe (2 podkategorie)
Dane wejściowe dotyczące ruchu drogowego	Natężenie, procent pojazdów ciężarowych, prędkość	Charakter ruchu, natężenie poszczególnych kategorii pojazdów	Charakter ruchu, natężenie, prędkość,	Natężenie i struktura rodzajowa ruchu, prędkość pojazdów, przyspieszanie, zwalnianie	Natężenie i struktura rodzajowa ruchu, prędkość pojazdów, obciążenie pasów ruchu	Natężenie i struktura rodzajowa ruchu, prędkość według kategorii pojazdów
Ustalane wskaźniki	$L_{10}$ (1h), $L_{10}$ (18h)	$L_{eq}$ , $L_m$ , $E$	$L_{WA}$ , $L_A$ , $L_{AEQ,T}$	$L_{AEQ,T}$ , $L_{den}$ , $L_n$	$L_{Aeq}$ , $L_{Aeq,T}$ , $L_{den}$ , $L_n$	$L_{Aeq}$ , $L_{Aeq,LT}$
Wpływ nawierzchni	Korekta w odniesieniu do nawierzchni cementowych i asfaltowych	Korekta z uwagi na rodzaj nawierzchni	Korekta w pasmach częstotliwości w zależności od rodzaju nawierzchni, głównie z uwagi na nawierzchnie porowate	Korekta z uwagi na rodzaj nawierzchni, temperaturę, kolcowane opony, zawilgocenie i okres eksploatacji	Korekta z uwagi na rodzaj nawierzchni, temperaturę, okres eksploatacji, maksymalne uziarnienie kruszywa	Trzy klasy nawierzchni, korekta z uwagi na okres eksploatacji i temperaturę

Dyrektywa Komisji (UE) 2015/996 z dnia 19 maja 2015 r. ustanowiła stosowanie metody CNOSSOS-EU w ocenie hałasu zgodnie z dyrektywą 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady. Szczegóły dotyczące opracowania i planowanego wdrażania metody przedstawiono między innymi w pracy [108]. W kolejnych podrozdziałach omówiono jej założenia jedynie w odniesieniu do wpływu nawierzchni i charakterystyki pojazdów w prognozowaniu poziomu hałasu drogowego.

### **6.2.2. Założenia metody CNOSSOS-EU w odniesieniu do ruchu samochodowego i nawierzchni drogowych**

Metoda CNOSSOS-EU, w porównaniu do dotychczas stosowanych metod, wprowadziła kilka istotnych zmian odnośnie do charakterystyki pojazdów i nawierzchni w prognozowaniu hałasu drogowego. Poziom hałasu jest ustalany poprzez sumowanie emisji hałasu pojazdów uczestniczących w ruchu, które są klasyfikowane w pięciu kategoriach [107]:

- kategoria 1: pojazdy osobowe, dostawcze, typu SUV,
- kategoria 2: pojazdy ciężarowe 2- i 3-osiowe,
- kategoria 3: wielocłonowe pojazdy ciężarowe,
- kategoria 4: dwukołowe pojazdy silnikowe (motocykle),
- kategoria 5: kategoria „otwarta”.

Poszczególne pojazdy są modelowane jako pojedyncze źródła hałasu umieszczone 0,05 m nad nawierzchnią, a dźwięki są emitowane w półprzestrzeni nad drogą. W pierwszym etapie prac nad metodą przyjęto zakres analizowanych częstotliwości dźwięków w pasmach oktawowych od 125 Hz do 4000 Hz. Ostatecznie jednak, w celu lepszej spójności z innymi rodzajami hałasu, rozszerzono do zakresu: 63 Hz÷8000 Hz.

Podstawę ustalenia współczynników korygujących wpływ nawierzchni oraz parametrów charakteryzujących pojazdy stanowiły wyniki wcześniej przeprowadzonych badań w ramach takich projektów, jak: NORD2000, HARMONOISE, IMAGINE oraz wyniki zespołów roboczych z krajów członkowskich uczestniczących w opracowaniu metody CNOSSOS-EU. Przyjęto następujące warunki referencyjne w odniesieniu do poziomu mocy akustycznej poruszającego się pojazdu samochodowego:

- stała prędkość przejazdu (prędkość referencyjna  $V_{ref} = 70$  km/h),
- nawierzchnia równa i sucha,
- temperatura otoczenia 20°C,
- nawierzchnia odpowiadająca tzw. „wirtualnej” nawierzchni referencyjnej (uśrednione charakterystyki akustyczne nawierzchni z betonu asfaltowego AC11 i SMA11),
- samochód bez kolcowanych opon.

Istotnymi problemami przy wdrożeniu metody CNOSSOS-EU jest (i będzie) dostosowanie krajowych metod do jej założeń oraz przygotowanie danych wejściowych w celu uzyskania spójnych rezultatów w zakresie opracowywanych map akustycznych. Są one wskazywane w pracach [109, 16, 209, 124] i dotyczą także charakterystyki pojazdów oraz wpływu nawierzchni drogowych na poziom hałasu w otoczeniu tras drogowych.

W ramach projektu ROSANNE analizowano między innymi dostosowanie obecnie posiadanych charakterystyk akustycznych nawierzchni drogowych, opisanych głównie wynikami badań metodą CPX, do założeń metody CNOSSOS-EU [11, 109]. W tabeli 6.5 przedstawiono porównanie założeń według metody CNOSSOS-EU z założeniami zaprezentowanymi w projekcie ROSANNE.

Z przedstawionego porównania wynika potrzeba dostosowania niektórych założeń przyjętych w projekcie ROSANNE do metody CNOSSOS-EU. Dotyczy to między innymi nawierzchni referencyjnej, współczynników korygujących wpływ nawierzchni na emisję hałasu toczenia i hałasu od układu napędowego oraz współczynników uwzględniających wpływ okresu eksploatacji na zmiany w emisji hałasu toczenia pojazdów samochodowych.

Analiza założeń metody CNOSSOS-EU w odniesieniu do nawierzchni drogowych wskazuje, że wymaga ona aktualizacji i dodatkowych uzupełnień. Przyjęty zestaw 14 nawierzchni, na przykładzie technologii stosowanych w Holandii, nie obejmuje najnowszych rozwiązań, a niektóre z zaproponowanych nawierzchni mają lokalny charakter. Z uwagi na różnorodne technologie i zmieniający się park samochodowy potrzebne są badania nad określeniem poziomów mocy akustycznej, charakteryzujących hałas toczenia i hałas pochodzący z innych źródeł (układu napędowego, układu wydechowego) poruszających się pojazdów samochodowych.

Dodatkowo w przedstawionej wersji metody prognozowania poziomu hałasu współczynniki korygujące nie uwzględniają wpływu prędkości na różnice w poziomach dźwięku w pasmach oktawowych. Przyjęte stałe wartości współczynnika  $\beta$  są dużym uproszczeniem i wymagają uzupełnienia w odniesieniu do częstotliwości generowanych dźwięków.

## 6. Wpływ nawierzchni na poziom hałasu w otoczeniu dróg

Tab. 6.5. Porównanie założeń przyjętych w metodzie CONSSOS-EU i w projekcie ROSANNE

Kryterium	CNOSSOS-EU	ROSANNE
Źródło hałasu	Przejeżdżający pojazd samochodowy – odległość 7,5 m od położenia mikrofonu	Płaszczyzna kontaktu opona/nawierzchnia – mikrofony położone bezpośrednio przy oponie testowej
Typ źródła hałasu	Kategorie pojazdów: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Kategoria 1: pojazdy osobowe</li> <li>– Kategoria 2: pojazdy ciężarowe (poniżej 4 osi)</li> <li>– Kategoria 3: wielocłonowe pojazdy ciężarowe</li> <li>– Kategoria 4: pojazdy dwukołowe silnikowe (motocykle)</li> <li>– Kategoria 5 (tzw. otwarta): np. pojazdy o napędzie elektrycznym i hybrydowym</li> </ul>	Opony testowe: <ul style="list-style-type: none"> <li>– P1 – reprezentuje pojazdy osobowe</li> <li>– H1 – reprezentuje pojazdy ciężarowe</li> </ul>
Metoda pomiaru	SPB	CPX
Wskaźniki oceny	$L_1, L_2, L_3, L_4, L_5$	$CPXI, LCPXP, LCPXH$
Zakres częstotliwości	Pasma oktawowe: 63Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz, 8000 Hz	Pasma tercjowe w zakresie od 315 Hz do 5 000 Hz
Prędkości referencyjne	70 km/h (zakres od 30 km/h do 130 km/h, dostosowany do badanych nawierzchni i sytuacji ruchowo-terenowych)	50 km/h, 80 km/h, 110 km/h
Nawierzchnia referencyjna	„Wirtualna” – reprezentująca nawierzchnie DAC11 i SMA11, zgodnie z koncepcją Sandberga	Brak ustalonej nawierzchni referencyjnej – wyniki pomiaru charakteryzują badaną nawierzchnię (ewentualnie odniesienie do klasyfikacji nawierzchni pod względem hałaśliwości)
Warunki pomiaru	Natężenie ruchu umożliwiające pomiar hałasu od jadących pojazdów ze stałą prędkością, odcinek prosty, nawierzchnia sucha, temperatura referencyjna: 20°C	Pomiar możliwy w większości sytuacji, minimalna długość odcinka pomiarowego 20 m (zalecana minimalna długość – 100 m), nawierzchnia sucha, temperatura referencyjna: 20°C

### 6.2.3. Modelowanie hałasu od jadącego pojazdu samochodowego

W metodzie CNOSSOS-EU pojazdy samochodowe są modelowane jako dwa źródła hałasu [107]. Jednym z nich jest oddziaływanie opon z nawierzchnią jako hałas toczenia ( $L_{WR,i,m}$ ), a drugim – układ napędowy wraz z układem wydechowym ( $L_{WP,i,m}$ ). Całkowity poziom mocy akustycznej  $L_{W,i,m}$  w pasmach oktaowych „i” pojazdów kategorii  $m$  ( $m = 1, 2, 3$ ), poruszających się z prędkością  $V_m$  w warunkach różnych od referencyjnych oblicza się ze wzoru:

$$L_{W,i,m}(V_m) = 10 \cdot \log \left( 10^{\frac{L_{WR,i,m}(V_m)}{10}} + 10^{\frac{L_{WP,i,m}(V_m)}{10}} \right). \quad (6.14)$$

Emisja hałasu toczenia pojazdu samochodowego wyraża się wzorem:

$$L_{WR,i,m} = A_{R,i,m} + B_{R,i,m} \cdot \log \left( \frac{V_m}{V_{ref}} \right) + \Delta L_{WR,i,m}, \quad (6.15)$$

gdzie:

$\Delta L_{WR,i,m}$  – suma współczynników korygujących emisję hałasu toczenia w konkretnych warunkach drogowych odbiegających od warunków referencyjnych:

$$\Delta L_{WR,i,m} = \Delta L_{WR,road,i,m} + \Delta L_{stud\ tyres,i,m} + \Delta L_{WR,acc,i,m} + \Delta L_{W,temp}, \quad (6.16)$$

$\Delta L_{WR,road,i,m}$  – współczynnik korygujący emisję hałasu toczenia ze względu na nawierzchnię,

$\Delta L_{stud\ tyres,i,m}$  – współczynnik korekcji uwzględniający stosowanie opon kolcowanych,

$\Delta L_{WR,acc,i,m}$  – współczynnik uwzględniający zmiany prędkości, na przykład na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną lub na rondzie,

$\Delta L_{W,temp}$  – współczynnik korygujący wpływ temperatury w porównaniu z temperaturą referencyjną.

Emisję hałasu od układu napędowego i wydechowego oblicza się ze wzoru:

$$L_{WP,i,m} = A_{P,i,m} + B_{P,i,m} \cdot \frac{(V_m - V_{ref})}{V_{ref}} + \Delta L_{WP,i,m}, \quad (6.17)$$

gdzie:

$\Delta L_{WP,i,m}$  – suma współczynników korygujących hałas od układu napędowego i układu wydechowego w konkretnych warunkach drogowych odbiegających od warunków referencyjnych:

$$\Delta L_{WP,i,m} = \Delta L_{WP,road,i,m} + \Delta L_{WP,grad,i,m} + \Delta L_{WP,acc,i,m}, \quad (6.18)$$

$\Delta L_{WP,road,i,m}$  – współczynnik korygujący oddziaływanie nawierzchni na hałas jednostki napędowej, związany z absorpcją dźwięków pomiędzy źródłem hałasu a odbiorcą,

$\Delta L_{WP,grad,i,m}$  – współczynnik korygujący oddziaływanie pochylenia drogi na hałas od układu napędowego i wydechowego,

$\Delta L_{WP,acc,i,m}$  – współczynnik korygujący wpływ przyspieszania i zwalniania pojazdu na hałas od układu napędowego i wydechowego.

Zasady ustalania wyżej podanych współczynników korygujących hałas toczenia oraz układu napędowego i układu wydechowego są szczegółowo omówione w pracy [107]. Sposób uwzględniania wpływu temperatury przedstawiono w punkcie 3.1 niniejszej monografii, a współczynniki korygujące wpływ nawierzchni różnych od nawierzchni referencyjnej  $\Delta L_{WR,road,i,m}$  są przedmiotem rozważań w podrozdziałach 6.2.4 i 6.3.

W wypadku pojazdów kategorii 4 (dwukołowe pojazdy silnikowe) w metodzie CNOSSOS-EU nie uwzględnia się hałasu toczenia, a jedynie hałas pochodzący od układu napędowego.

Pojawienie się pojazdów o napędzie elektrycznym lub hybrydowym stworzyło dodatkową możliwość obniżenia poziomu hałasu od ruchu drogowego, dzięki eliminacji hałasu układu napędowego. Pojazdy o napędzie elektrycznym i hybrydowym w metodzie CNOSSOS-EU mogą być włączone do tzw. kategorii „otwartej” pojazdów (kategoria 5) lub stanowić podkategorię pojazdów osobowych.

Problem hałaśliwości pojazdów elektrycznych i hybrydowych badano w ramach projektu FOREVER (*Future Operational Impacts of Electric Vehicles on National European Roads*), a uzyskane wyniki przedstawiono między innymi w pracy [172]. W tym projekcie mierzono poziom hałasu od przejazdu każdego z ośmiu wytypowanych pojazdów osobowych o różnej charakterystyce metodą kontrolowanego przejazdu. W badaniach na nawierzchni typu DAC testowano pięć pojazdów jadących z różnymi prędkościami (do 110 km/h), a na nawierzchni typu SMA – trzy pojazdy z niskimi prędkościami (do 50 km/h). Maksymalne poziomy dźwięku (poziom całkowity i w pasmach oktawowych od 125 Hz do 4000 Hz) ustalono w odległości 7,5 m od osi toru jazdy pojazdów, na wysokości 1,2 m nad nawierzchnią. Przeanalizowano także poziomy generowany hałas na nawierzchni AC przy takich samych stałych prędkościach jazdy (od 10 km/h do 110 km/h), lecz z wykorzystaniem każdorazowo opon o różnej charakterystyce (9 zestawów). Na tej podstawie opracowano model hałasu emitowanego przez elektryczny pojazd osobowy, który autorzy proponują do uwzględnienia w metodzie CNOSSOS-EU. Model w odniesieniu do poziomu hałasu toczenia pojazdów



elektrycznych przy obecnym stanie wiedzy nie różni się od pojazdów z silnikiem spalinowym. W odniesieniu do hałasu od układu napędowego zaproponowano współczynniki korygujące (tab. 6.6).

Tab. 6.6. Współczynniki korygujące hałasu od układu napędowego w pasmach oktaowych [172]

Pasma częstotliwości [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Współczynnik korygujący [dB]	-1,7	-4,2	-15,0	-15,0	-15,0	-13,8

Autorzy wykazali, że standardowy model CNOSSOS-EU jest błędny w odniesieniu do pojazdów o napędzie elektrycznym, gdyż wyraźnie zawyża poziom hałasu w większości pasm oktaowych przy niższych prędkościach. Wskazali także na potrzebę bardziej szczegółowych badań tego problemu z uwzględnieniem nawierzchni porowatych, w odniesieniu do których mechanizm generowania dźwięków opona/nawierzchnia i pochłaniania dźwięków od układu napędowego jest inny niż w wypadku rozwiązań standardowych.

W pracy [43] przeanalizowano wpływ zmiany pojazdów osobowych na pojazdy o napędzie elektrycznym na poziom hałasu w środowisku. W oparciu o model prognozowania poziomu hałasu NMPB ROUTES symulowano cztery sytuacje: pojazdy osobowe elektryczne w ruchu płynnym, pojazdy osobowe elektryczne wyposażone w system ostrzegania pieszych, pojazdy osobowe elektryczne w ruchu miejskim i pojazdy osobowe elektryczne w ruchu miejskim z systemem ostrzegania pieszych. Wyniki symulacji, przy uwzględnieniu w ruchu jedynie pojazdów osobowych, wykazały, że korzyści ze stosowania pojazdów elektrycznych w płynnym ruchu zamiejskim są nieznaczne, a wypadku ruchu miejskiego (średnia prędkość około 30 km/h) można uzyskać redukcję poziomu hałasu o około 2 dB. Jednak jeżeli będą używane sygnały ostrzegawcze, to redukcja spadnie do 1 dB. W oparciu o sporządzone przykładowe mapy akustyczne ustalono, że poprawę klimatu akustycznego przy zamianie pojazdów standardowych na pojazdy o napędzie elektrycznym odczuje 10% mieszkańców, a przy wykorzystywaniu sygnałów ostrzegających pieszych – 6%.

Badania Ejsmonta i in. [58] opon samochodowych dedykowanych do pojazdów o napędzie elektrycznym, przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych i na rzeczywistych nawierzchniach metodą CPX, potwierdziły, że nie są one „cichsze” niż inne typowe opony stosowane w standardowych osobowych pojazdach silnikowych. Wskazano tym samym kierunek dalszych badań. Stwierdzono przy tym duże obniżenie poziomu hałasu toczenia na tzw. cichych nawierzchniach w warunkach miejskich oraz zwrócono uwagę na niższy poziom oporu toczenia, co przyczynia się do zmniejszenia kosztów eksploatacji pojazdów samochodowych.

### 6.2.4. Współczynniki korygujące wpływ nawierzchni

Zgodnie z założeniami metody CNOSSOS-EU współczynnik korygujący wpływ nawierzchni, różniącej się od nawierzchni referencyjnej, na poziom emisji hałasu toczenia pojazdu kategorii „m” w „l” pasmie oktawowym wyraża się wzorem [107]:

$$\Delta L_{WR,road,i,m} = \alpha_{i,m} + \beta_m \cdot \log\left(\frac{V_m}{V_{ref}}\right), \quad (6.19)$$

a na emisję hałasu od układu napędowego i wydechowego wzorem:

$$\Delta L_{WP,road,i,m} = \min(\alpha_{i,m}; 0). \quad (6.20)$$

Wartości współczynników korygujących wpływ nawierzchni w prognozowaniu hałasu metodą CNOSSOS-EU zostały ustalone w odniesieniu do nawierzchni stosowanych na drogach w Holandii. Jako nawierzchnię referencyjną przyjęto tzw. nawierzchnię „wirtualną”, o uśrednionych właściwościach akustycznych nawierzchni z betonu asfaltowego DAC11 i z mastyksu grysowego SMA11. W tabeli 6.7 podano wartości współczynników regresyjnych ( $A_R$  i  $B_R$  – emisja hałasu toczenia,  $A_P$  i  $B_P$  – emisja hałasu układu napędowego) w odniesieniu do nawierzchni referencyjnej i dwóch podstawowych kategorii pojazdów (osobowych – kategoria 1 i wielozłonowych pojazdów ciężarowych – kategoria 3), a w tabeli 6.8 – wartości współczynników korygujących wpływ przykładowych pięciu nawierzchni w porównaniu z nawierzchnią referencyjną wraz ze wskazaniem zakresów prędkości.

Tab. 6.7. Współczynniki regresji w zależnościach poziomu mocy akustycznej i prędkości pojazdów kategorii 1 i 3

		Wartości współczynników regresji w pasmach oktawowych							
		63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Kategoria 1	$A_R$	79,7	85,7	84,5	90,2	97,3	93,9	84,1	74,3
	$B_R$	30,0	41,5	38,9	25,7	32,5	37,2	39,0	40,0
	$A_P$	94,5	89,2	88,0	85,9	84,2	86,9	83,3	76,1
	$B_P$	-1,3	7,2	7,7	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Kategoria 3	$A_R$	87,0	91,7	94,1	100,7	100,8	94,3	87,1	82,5
	$B_R$	30,0	33,5	31,3	25,4	31,8	37,1	38,6	40,6
	$A_P$	104,4	100,6	101,7	101,0	100,1	95,9	91,3	85,3
	$B_P$	0,0	3,0	4,6	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0

Tab. 6.8. Współczynniki korygujące wpływ nawierzchni na hałas toczenia pojazdów kategorii 1 i 3 w odniesieniu do nawierzchni referencyjnej

Typ naw.	Prędkość (km/h)	Kat. poj.	Współczynnik $\alpha$								$\beta$
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
A	50÷130	1	0,5	3,3	2,4	3,2	-1,3	-3,5	-2,6	0,5	-6,5
		3	0,9	1,4	1,8	-0,4	-5,2	-4,6	-3,0	-1,4	0,2
B	40÷80	1	0,3	0,0	0,0	-0,1	-0,7	-1,3	-0,8	-0,8	-1,0
		3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	70÷80	1	-0,2	-0,7	0,6	1,0	1,1	-1,5	-2,0	-1,8	1,0
		3	-0,3	1,0	-1,7	-1,2	-1,6	-2,4	-1,7	-1,7	-6,6
D	70÷120	1	1,1	-0,5	2,7	2,1	1,6	2,7	1,3	-0,4	7,7
		3	0,0	3,3	2,4	1,9	2,0	1,2	0,1	0,0	3,7
E	40÷130	1	0,4	-1,3	-1,3	-0,4	-5,0	-7,1	-4,9	-3,3	-1,5
		3	1,6	1,3	0,9	-0,4	-1,8	-2,1	-0,7	-0,2	0,5

A – 1 warstwa asfaltu porowatego, B – SMA-NL8; C- beton cementowy teksturowany metodą szcztokowania podłużnego, D – beton cementowy o drobnej teksturze, E – cienka warstwa asfaltowa typu B

Analiza współczynników  $\alpha$ , przy prędkości referencyjnej 70 km/h ( $\beta = 0$ ), wskazuje, że najkorzystniejszym rozwiązaniem z punktu widzenia redukcji hałasu toczenia pojazdów osobowych jest nawierzchnia w postaci cienkiej warstwy asfaltowej, a w wypadku pojazdów ciężarowych kategorii 3 – nawierzchnia z jedną warstwą asfaltu porowatego.

Biorąc pod uwagę zmianę hałaśliwości nawierzchni wraz ze wzrostem prędkości (patrz wartość współczynnika  $\beta$ ), najlepszą technologią z punktu widzenia pojazdów osobowych jest nawierzchnia z jedną warstwą asfaltu porowatego, a w wypadku pojazdów ciężarowych – beton cementowy teksturowany metodą szcztokowania podłużnego. Najbardziej niekorzystnym rozwiązaniem w wypadku dwóch analizowanych kategorii pojazdów, zarówno przy prędkości 70 km/h, jak i przy wzroście prędkości, jest nawierzchnia z betonu cementowego o drobnej teksturze.

### 6.3. Nawierzchnie drogowe w Polsce w świetle zapisów metody CNOSSOS-EU

Wyniki pomiarów maksymalnego poziomu dźwięku od jadącego pojazdu samochodowego, ustalone metodą SPB, obejmują zarówno hałas toczenia opon samochodowych, jak i hałas od układu napędowego i układu wydechowego. Uwzględniany jest także efekt propagacji dźwięku i ewentualnej ich absorpcji w wypadku nawierzchni porowatych. Potrzebę łącznego uwzględniania hałasów pochodzących z dwóch głównych źródeł poruszającego się pojazdu w metodzie prognozowania jest sugerowane w pracy [92]. Ułatwi to bezpośrednie wykorzystanie wyników pomiarów maksymalnego poziomu dźwięku metodą SPB w proponowanej metodzie oceny klimatu akustycznego w otoczeniu dróg.

W związku z powyższym analizę przeprowadzono w odniesieniu do maksymalnego poziomu dźwięku ustalonego w odniesieniu do statystycznego pojazdu osobowego (kategoria 1 według metody CNOSSOS-EU) oraz wieloczołowego pojazdu ciężarowego (kategoria 3 według metody CNOSSOS-EU). Jako nawierzchnię referencyjną przyjęto nawierzchnię z mastyksu grysowego typu SMA11, o parametrach akustycznych podanych w rozdziale 5. Ustalono współczynniki korygujące wpływ technologii budowy górnych warstw nawierzchni stosowanych w Polsce (wskazanych w podrozdz. 6.1.2) w odniesieniu do nawierzchni referencyjnej.

W tym celu w pierwszym etapie opracowano zależności pomiędzy maksymalnym poziomem dźwięku od jadącego pojedynczego pojazdu osobowego i wieloczołowego pojazdu ciężarowego a logarytmem ze stosunku prędkości do prędkości referencyjnej (70 km/h – przyjętej w metodzie CNOSSOS-UE), w odniesieniu do pasm oktawowych: 63 dB, 125 dB, 250 dB, 500 dB, 1000 dB, 2000 dB, 4000 dB, 8000 dB i do całego zakresu częstotliwości. W tabelach 6.9 i 6.10 podano wartości współczynników regresyjnych  $A_i$  i  $B_i$ , zgodnie ze wzorem:

$$L_{A_{\max 1(2b)}} = A_i + B_i \cdot \log(V/V_o), \quad (6.21)$$

gdzie:

$A_i$  i  $B_i$  – współczynniki regresyjne według metody SPB, z uwzględnieniem  $V_o = 70$  km/h.

Weryfikację statystyczną zależności pomiędzy poziomem hałasu i logarytmem prędkości przeprowadzono w oparciu o wartości współczynników determinacji  $R^2$  oraz standardowe błędy estymacji  $S_e$ , odpowiednio dla statystycznego pojazdu osobowego i wieloczołowego pojazdu ciężarowego (tab. 6.11 i 6.12).

Tab. 6.9. Współczynniki regresji ustalone na wybranych nawierzchniach w odniesieniu do pojazdu osobowego

		Rodzaj nawierzchni									
		SMA 0/11	AC 0/12	PU	SMA 0/5	SMA 0/8	PAC 0/8	EACC-I	EACC-II	CC	KK
<i>n</i>		348	400	300	84	162	194	77	382	243	164
Cały zakres	<i>At</i>	77,1	77,3	78,6	72,8	74,6	68,9	79,7	77,2	76,9	84,4
	<i>Bt</i>	29,4	25,8	28,6	33,8	34,7	26,7	28,5	32,4	29,6	28,1
63	<i>At</i>	49,4	49,0	46,2	45,0	47,7	44,2	47,7	45,4	46,3	52,7
	<i>Bt</i>	3,3	3,9	10,5	22,9	9,1	7,0	5,4	22,1	19,9	-0,2
125	<i>At</i>	53,3	53,0	52,9	51,4	52,2	48,6	53,0	51,9	50,1	64,7
	<i>Bt</i>	27,3	32,9	35,9	30,8	31,7	39,8	26,1	39,4	44,5	16,0
250	<i>At</i>	60,0	59,6	61,1	56,7	58,5	54,3	63,9	59,2	57,2	72,1
	<i>Bt</i>	25,6	26,6	28,5	31,6	30,9	30,9	15,1	36,5	40,1	23,9
500	<i>At</i>	67,5	66,7	68,9	64,1	65,7	63,0	70,3	65,9	65,3	79,1
	<i>Bt</i>	20,3	18,3	23,5	10,3	24,0	15,2	20,8	33,6	33,0	32,1
1000	<i>At</i>	75,1	74,7	76,4	69,6	72,4	65,3	78,5	75,9	75,0	82,2
	<i>Bt</i>	29,3	22,2	29,9	37,6	36,0	29,3	30,6	32,6	29,1	26,5
2000	<i>At</i>	71,9	73,1	72,4	68,8	69,5	63,5	72,2	70,7	72,0	74,6
	<i>Bt</i>	30,9	25,3	30,9	34,7	35,5	32,0	21,7	29,1	29,4	25,2
4000	<i>At</i>	63,0	63,9	63,0	61,1	60,4	55,0	62,9	61,4	66,3	65,5
	<i>Bt</i>	27,3	28,8	29,2	33,8	27,7	31,8	25,8	33,0	24,7	19,0
8000	<i>At</i>	53,3	53,9	53,1	51,6	51,5	50,2	52,9	51,6	56,6	55,9
	<i>Bt</i>	29,6	29,9	31,6	38,2	26,3	6,6	30,3	39,6	28,4	18,3

Tab. 6.10. Współczynniki regresji ustalone na wybranych nawierzchniach w odniesieniu do wielo-  
członowego pojazdu ciężarowego

		Rodzaj nawierzchni									
		SMA 0/11	AC 0/12	PU	SMA 0/5	SMA 0/8	PAC 0/8	EACC-I	EACC-II	CC	KK
<i>n</i>		183	192	164	0	45	14	58	232	180	54
Cały zakres	<i>At</i>	85,7	86,0	85,8	-	82,7	78,2	86,2	84,7	85,9	91,4
	<i>Bt</i>	29,0	27,3	24,3	-	38,5	30,8	24,8	28,7	42,0	40,0
63	<i>At</i>	56,0	58,8	60,6	-	52,1	49,4	57,6	57,5	54,7	64,2
	<i>Bt</i>	23,9	14,3	5,5	-	59,1	43,8	9,7	10,3	53,9	7,7
125	<i>At</i>	63,5	64,2	65,5	-	64,3	62,2	64,6	64,7	65,6	76,3
	<i>Bt</i>	14,8	21,3	27,0	-	1,5	-0,9	14,5	23,8	15,3	25,9

## 6. Wpływ nawierzchni na poziom hałasu w otoczeniu dróg

Tab. 6.10. Współczynniki regresji ustalone na wybranych nawierzchniach w odniesieniu do wielo-  
członowego pojazdu ciężarowego – cd.

250	<i>At</i>	72,5	72,9	73,2	-	71,0	69,5	74,4	72,8	70,9	82,0
	<i>Bt</i>	-6,2	-7,8	8,4	-	6,3	26,7	3,8	10,2	25,2	33,3
500	<i>At</i>	81,2	81,5	81,2	-	78,5	75,1	82,7	80,1	81,0	89,7
	<i>Bt</i>	22,3	19,3	29,5	-	38,6	30,0	15,1	28,5	34,8	44,2
1000	<i>At</i>	82,3	82,4	82,1	-	80,0	73,3	83,0	81,9	83,2	85,3
	<i>Bt</i>	38,4	32,5	30,1	-	36,3	28,1	33,7	33,9	49,1	38,3
2000	<i>At</i>	76,7	78,2	76,9	-	74,0	69,5	76,8	75,4	78,1	78,6
	<i>Bt</i>	33,7	23,1	27,4	-	37,7	27,4	18,6	30,2	29,6	28,9
4000	<i>At</i>	69,0	70,6	69,4	-	66,1	62,4	69,3	67,8	72,1	72,9
	<i>Bt</i>	29,8	19,1	22,9	-	29,0	34,3	13,4	22,4	25,7	27,9
8000	<i>At</i>	59,8	62,1	61,0	-	56,9	54,2	62,0	59,6	65,4	65,1
	<i>Bt</i>	30,9	18,8	18,7	-	28,2	34,3	8,4	31,1	17,5	28,2

Tab. 6.11. Wartości charakterystyk statystycznych w odniesieniu do pojazdu osobowego

		Rodzaj nawierzchni									
		SMA 0/11	AC 0/12	PU	SMA 0/5	SMA 0/8	PAC 0/8	EACC-I	EACC-II	CC	KK
<i>n</i>		348	400	300	84	162	194	61	382	243	164
Cały zakres	<i>S<sub>e</sub></i>	1,56	1,78	1,74	1,75	1,46	1,23	1,91	1,48	1,23	1,94
	<i>R<sup>2</sup></i>	0,682	0,695	0,546	0,634	0,854	0,757	0,434	0,719	0,745	0,829
63	<i>S<sub>e</sub></i>	4,72	4,83	3,54	4,50	4,95	4,64	3,29	2,66	3,14	3,29
	<i>R<sup>2</sup></i>	0,003	0,007	0,038	0,108	0,034	0,015	0,009	0,268	0,169	0,000
125	<i>S<sub>e</sub></i>	3,34	3,99	3,16	3,71	3,91	3,15	2,27	2,00	2,32	2,01
	<i>R<sup>2</sup></i>	0,288	0,425	0,365	0,243	0,406	0,512	0,314	0,674	0,650	0,596
250	<i>S<sub>e</sub></i>	2,66	3,13	2,75	3,35	3,36	3,25	2,22	1,97	2,29	1,75
	<i>R<sup>2</sup></i>	0,361	0,440	0,323	0,292	0,467	0,374	0,137	0,646	0,609	0,813
500	<i>S<sub>e</sub></i>	2,35	2,95	2,62	2,79	2,57	1,74	2,10	2,00	2,14	2,30
	<i>R<sup>2</sup></i>	0,313	0,295	0,263	0,060	0,477	0,335	0,253	0,601	0,547	0,820
1000	<i>S<sub>e</sub></i>	1,81	2,07	2,02	2,11	1,66	1,41	1,97	1,58	1,45	2,33
	<i>R<sup>2</sup></i>	0,615	0,554	0,494	0,596	0,830	0,742	0,454	0,693	0,670	0,751
2000	<i>S<sub>e</sub></i>	1,81	1,78	2,26	1,67	1,71	1,68	2,38	2,14	1,67	2,07
	<i>R<sup>2</sup></i>	0,637	0,688	0,453	0,666	0,818	0,704	0,223	0,497	0,612	0,777
4000	<i>S<sub>e</sub></i>	1,92	2,15	2,33	1,79	2,17	1,66	1,86	1,65	2,04	2,45
	<i>R<sup>2</sup></i>	0,552	0,659	0,413	0,623	0,629	0,708	0,400	0,680	0,426	0,584
8000	<i>S<sub>e</sub></i>	2,14	2,76	2,97	2,33	2,65	4,01	2,09	1,82	2,15	2,33
	<i>R<sup>2</sup></i>	0,536	0,560	0,335	0,555	0,505	0,018	0,420	0,716	0,468	0,591

Tab. 6.12. Wartości charakterystyk statystycznych w odniesieniu do wieloczołowego pojazdu ciężarowego na badanych nawierzchniach

		Rodzaj nawierzchni									
		SMA 0/11	AC 0/12	PU	SMA 0/5	SMA 0/8	PAC 0/8	EACC-I	EACC-II	CC	KK
<i>n</i>		183	192	164	0	45	14	58	232	180	54
Cały zakres	<i>S<sub>e</sub></i>	1,35	1,99	1,64	-	1,18	1,15	1,21	1,23	1,57	1,89
	<i>R<sup>2</sup></i>	0,321	0,255	0,212	-	0,454	0,684	0,173	0,180	0,238	0,798
63	<i>S<sub>e</sub></i>	3,95	5,41	4,99	-	5,36	3,76	3,64	3,61	3,23	3,67
	<i>R<sup>2</sup></i>	0,037	0,012	0,002	-	0,087	0,292	0,004	0,003	0,109	0,037
125	<i>S<sub>e</sub></i>	2,82	3,06	3,25	-	4,36	2,10	2,10	2,80	2,27	2,17
	<i>R<sup>2</sup></i>	0,028	0,081	0,078	-	0,000	0,001	0,023	0,028	0,020	0,556
250	<i>S<sub>e</sub></i>	2,92	4,08	3,39	-	3,39	3,37	1,75	2,54	2,69	2,10
	<i>R<sup>2</sup></i>	0,005	0,007	0,008	-	0,003	0,160	0,002	0,006	0,037	0,688
500	<i>S<sub>e</sub></i>	2,27	3,06	2,18	-	2,09	1,65	1,80	1,90	2,77	2,00
	<i>R<sup>2</sup></i>	0,092	0,068	0,183	-	0,211	0,501	0,034	0,083	0,065	0,812
1000	<i>S<sub>e</sub></i>	1,54	1,72	1,54	-	1,49	2,13	1,25	1,50	2,17	2,09
	<i>R<sup>2</sup></i>	0,395	0,394	0,317	-	0,319	0,345	0,265	0,170	0,183	0,747
2000	<i>S<sub>e</sub></i>	1,30	1,87	1,94	-	1,41	1,63	1,19	1,26	1,92	2,76
	<i>R<sup>2</sup></i>	0,413	0,217	0,196	-	0,360	0,461	0,109	0,190	0,094	0,493
4000	<i>S<sub>e</sub></i>	1,90	2,30	2,44	-	1,85	2,06	1,61	1,68	2,76	2,87
	<i>R<sup>2</sup></i>	0,207	0,111	0,091	-	0,162	0,456	0,033	0,067	0,037	0,453
8000	<i>S<sub>e</sub></i>	2,44	3,23	3,61	-	2,36	3,05	2,35	2,61	2,88	2,78
	<i>R<sup>2</sup></i>	0,145	0,058	0,032	-	0,101	0,277	0,006	0,054	0,016	0,476

W odniesieniu do całkowitego zakresu częstotliwości, jak wskazano w podrozdziale 6.1.2, ustalone wartości statystyk *S<sub>e</sub>* i *U* są zgodne w wymaganiach ISO 11819-1. W tym standardzie brak jest ustalonych wartości dopuszczalnych w odniesieniu do powyższych statystyk w pasmach oktawowych. W wypadku pojazdu osobowego określone błędy estymacji w pasmach oktawowych 63 Hz, 250 Hz, 500 Hz i 800 Hz zawierają się w przedziale 1,74÷4,95 dB, a współczynniki determinacji *R<sup>2</sup>* od 0,000 do 0,820; w pasmach oktawowych: 1000, 2000 i 4000 Hz – od 1,41 do 2,95, a współczynniki determinacji od 0,223 do 0,818.

W wypadku wieloczołowego pojazdu ciężarowego błędy estymacji w pasmach 63 Hz, 250 Hz, 500 Hz i 8000 Hz wynoszą od 1,65 do 5,41, a współczynniki determinacji od 0,000 do 0,812, zaś w pasmach 1000 Hz, 2000 Hz, i 4000 Hz: od 1,19 do 2,87, a współczynniki determinacji od 0,033 do 0,747.

Podane wartości wskazują, że w szczególności w zakresie częstotliwości 63 Hz w wypadku pojazdu osobowego oraz częstotliwości 63 Hz, 125 Hz i 250 Hz w wypadku pojazdu ciężarowego wskazane jest uwzględnianie w szczegółowych analizach poza logarytmem prędkości także innych dodatkowych parametrów.

Na podstawie współczynników regresyjnych  $A_i$  i  $B_i$ , podanych w tabelach 6.9 i 6.10, obliczono wartości współczynników korygujących poziomy dźwięku na analizowanych nawierzchniach od pojazdu osobowego i wielocłonowego pojazdu ciężarowego w stosunku do nawierzchni referencyjnej (SMA11). Ich wartości przedstawiono w tabelach 6.13 i 6.14. Z uwagi na brak danych w wypadku warstwy ścieralnej z mastyksu grysowego SMA5 nie ustalono wartości tych współczynników w odniesieniu do pojazdu kategorii 2b.

Tab. 6.13. Współczynniki korygujące wpływ nawierzchni – pojazdy kategorii 1

		Nawierzchnia									
		SMA 0/11	AC 0/12	PU	SMA 0/5	SMA 0/8	PAC 0/8	EACC-I	EACC-II	CC	KK
Cały zakres	$\alpha_i$	0,0	0,2	1,5	-4,3	-2,5	-8,2	2,6	0,1	-0,2	7,3
	$\beta_i$	0,0	-3,6	-0,8	4,4	5,3	-2,7	-0,9	3,0	0,2	-1,3
63	$\alpha_i$	0,0	-0,4	-3,2	-4,4	-1,7	-5,2	-1,7	-4,0	-3,1	3,3
	$\beta_i$	0,0	0,6	7,2	19,6	5,8	3,7	2,1	18,8	16,6	-3,5
125	$\alpha_i$	0,0	-0,3	-0,4	-1,9	-1,1	-4,7	-0,3	-1,4	-3,2	11,4
	$\beta_i$	0,0	5,6	8,6	3,5	4,4	12,5	-1,2	12,1	17,2	-11,3
250	$\alpha_i$	0,0	-0,4	1,1	-3,3	-1,5	-5,7	3,9	-0,8	-2,8	12,1
	$\beta_i$	0,0	1,0	2,9	6,0	5,3	5,3	-10,5	10,9	14,5	-1,7
500	$\alpha_i$	0,0	-0,8	1,4	-3,4	-1,8	-4,5	2,8	-1,6	-2,2	11,6
	$\beta_i$	0,0	-2,0	3,2	-10,0	3,7	-5,1	0,5	13,3	12,7	11,8
1000	$\alpha_i$	0,0	-0,4	1,3	-5,5	-2,7	-9,8	3,4	0,8	-0,1	7,1
	$\beta_i$	0,0	-7,1	0,6	8,3	6,7	0,0	1,3	3,3	-0,2	-2,8
2000	$\alpha_i$	0,0	1,2	0,5	-3,1	-2,4	-8,4	0,3	-1,2	0,1	2,7
	$\beta_i$	0,0	-5,6	0,0	3,8	4,6	1,1	-9,2	-1,8	-1,5	-2,4
4000	$\alpha_i$	0,0	0,9	0,0	-1,9	-2,6	-8,0	-0,1	-1,6	3,3	2,5
	$\beta_i$	0,0	1,5	1,9	6,5	0,4	4,5	-1,5	5,7	-2,6	-8,3
8000	$\alpha_i$	0,0	0,6	-0,2	-1,7	-1,8	-3,1	-0,4	-1,7	3,3	2,6
	$\beta_i$	0,0	0,3	2,0	8,6	-3,3	-2,3	0,7	10,0	-1,2	-11,3



Tab. 6.14. Współczynniki korygujące wpływ nawierzchni w odniesieniu do wielocłonowego pojazdu ciężarowego

		Nawierzchnia									
		SMA 0/11	AC 0/12	PU	SMA 0/5	SMA 0/8	PAC 0/8	EACC-I	EACC-II	CC	KK
Cały zakres	$\alpha_t$	0,0	0,3	0,1	-	-3,0	-7,5	0,5	-1,0	0,2	5,7
	$\beta_t$	0,0	-1,7	-4,7	-	9,5	1,8	-4,2	-0,3	13,0	11,0
63	$\alpha_t$	0,0	2,8	4,6	-	-3,9	-6,6	1,6	1,5	-1,3	8,2
	$\beta_t$	0,0	-9,6	-18,4	-	35,2	19,9	-14,2	-13,6	30,0	-16,2
125	$\alpha_t$	0,0	0,7	2,0	-	0,8	-1,3	1,1	1,2	2,1	12,8
	$\beta_t$	0,0	6,5	12,2	-	-13,3	-15,7	-0,3	9,0	0,5	11,1
250	$\alpha_t$	0,0	0,4	0,7	-	-1,5	-3,0	1,9	0,3	-1,6	9,5
	$\beta_t$	0,0	-1,6	14,6	-	12,5	32,9	10,0	16,4	31,4	39,5
500	$\alpha_t$	0,0	0,3	0,0	-	-2,7	-6,1	1,5	-1,1	-0,2	8,5
	$\beta_t$	0,0	-3,0	7,2	-	16,3	7,7	-7,2	6,2	12,5	21,9
1000	$\alpha_t$	0,0	0,1	-0,2	-	-2,3	-9,0	0,7	-0,4	0,9	3,0
	$\beta_t$	0,0	-5,9	-8,3	-	-2,1	-10,3	-4,7	-4,5	10,7	-0,1
2000	$\alpha_t$	0,0	1,5	0,2	-	-2,7	-7,2	0,1	-1,3	1,4	1,9
	$\beta_t$	0,0	-10,6	-6,3	-	4,0	-6,3	-15,1	-3,5	-4,1	-4,8
4000	$\alpha_t$	0,0	1,6	0,4	-	-2,9	-6,6	0,3	-1,2	3,1	3,9
	$\beta_t$	0,0	-10,7	-7,8	-	-0,8	4,5	-16,4	-7,4	-4,1	-1,9
8000	$\alpha_t$	0,0	2,3	1,2	-	-2,9	-5,6	2,2	-0,2	5,6	5,3
	$\beta_t$	0,0	-12,1	-12,2	-	-2,7	3,4	-22,5	0,2	-13,4	-2,7

Na podstawie ustalonych wartości współczynników korygujących wpływ nawierzchni w prognozowaniu hałasu od ruchu drogowego w stosunku do nawierzchni referencyjnej przeprowadzono analizę ich hałasliwości z punktu widzenia pojazdu osobowego i pojazdu ciężarowego kategorii 3. Przyjmując prędkość pojazdów równą 70 km/h (prędkość referencyjna, współczynniki  $\beta_t = 0$ ), sformułowano następujące wnioski:

- a) najkorzystniejszym rozwiązaniem z punktu widzenia hałasu toczenia pojazdów osobowych i ciężarowych kategorii 3 (w całym zakresie częstotliwości) są nawierzchnie z asfaltu porowatego oraz z mastyksu grysowego (SMA8 i SMA5);
- b) zbliżoną hałasliwością do nawierzchni referencyjnej, z punktu widzenia pojazdu osobowego, charakteryzują się nawierzchnie z betonu asfaltowego, z betonu cementowego teksturowane metodą odkrytego kruszywa o makro-

- teksturze 0,70÷1,50 mm (według *MPD*) i nawierzchnie z betonu cementowego teksturowane tkaniną jutową;
- c) zbliżoną hałaśliwością do nawierzchni referencyjnej, z punktu widzenia pojazdu ciężarowego kategorii 3, charakteryzującą się nawierzchnie z betonu asfaltowego, z betonu cementowego teksturowane metodą odkrytego kruszywa, nawierzchnie z betonu cementowego teksturowane tkaniną jutową i nawierzchnie powierzchniowo utrwalone;
  - d) najbardziej niekorzystnym rozwiązaniem z punktu widzenia pojazdu osobowego są nawierzchnie powierzchniowo utrwalane oraz nawierzchnie z betonu cementowego teksturowane metoda odkrytego kruszywa o makroteksturze *MPD* powyżej 1,50 mm;
  - e) hałaśliwość nawierzchni z kostki kamiennej jest wyższa o 7,3 dB w wypadku samochodu osobowego i o 5,7 dB – w wypadku pojazdu ciężarowego w porównaniu z nawierzchnią typu SMA11;
  - f) w zakresie pasm oktawowych zanotowano zbliżone zróżnicowanie nawierzchni pod względem hałaśliwości jak w przypadku całego zakresu częstotliwości, jednak z większymi przedziałami zmienności.

W oparciu o ustalone współczynniki  $\beta_i$  stwierdzono, że wzrost prędkości w sposób bardziej zróżnicowany wpływa na zmiany w poziomie hałasu w pasmach oktawowych niż na poziom hałasu w całym zakresie częstotliwości. W całym zakresie częstotliwości dźwięków w wypadku pojazdu osobowego najbardziej niekorzystnie na wzrost poziomu hałasu wpływa wzrost prędkości na nawierzchniach typu SMA5, SMA8 i nawierzchni z betonu cementowego z odkrytym kruszywem o makroteksturze poniżej 1,50 mm, a w wypadku pojazdów ciężarowych – na nawierzchni SMA8, nawierzchni z betonu cementowego teksturowanego tkaniną jutową i nawierzchni z kostki kamiennej.

W wypadku pojazdu ciężarowego ustalone wartości współczynnika  $\beta_i$  charakteryzują się szerokim zakresem zmienności, w szczególności w odniesieniu do pasm częstotliwości 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz i 8000 Hz, i stąd trudno jest jednoznacznie ustalić wpływ zmiany prędkości na zmiany poziomu hałasu.

Współczynniki  $\alpha$  i  $\beta$  w metodzie CNOSSOS-UE są korektami w odniesieniu do poziomu mocy akustycznej źródeł hałasu, a podane w tabelach 6.13 i 6.14 wartości współczynników korygujących  $\alpha_i$  i  $\beta_i$  dotyczą maksymalnego poziomu hałasu toczenia pojazdów kategorii 1 i 3, według metody SPB. Przyjęcie odpowiedniego modelu generowania dźwięków od przejeżdżających pojazdów kategorii 1 i 3 pozwoli na ich uwzględnienie w metodzie prognozowania hałasu CNOSSOS-EU.

W odniesieniu do nawierzchni z asfaltu porowatego PAC8, nawierzchni z mastyksu grysowego typu SMA5 i SMA8 oraz nawierzchni betonowej z odkrytym kruszywem o makroteksturze powyżej 1,50 mm ustalone współczynniki korygują-

ce powinny być poddane dalszej weryfikacji z uwagi na stosunkowo małą liczbą badanych pojazdów, zarówno osobowych, jak i ciężarowych. Bardziej szczegółowym analizom powinny być poddane także poziomy hałas od wieloczołonowych pojazdów ciężarowych.

Pomimo tylko częściowego dostosowania powyższej analizy do założeń metody CNOSSOS-EU w zakresie współczynników korygujących wpływ nawierzchni, przedstawione dane stanowią istotny przyczynek do uwzględniania rzeczywistych technologii budowy nawierzchni, stosowanych w Polsce, w metodzie prognozowania poziomu hałasu w otoczeniu tras drogowych.

## Podsumowanie i wnioski

Nawierzchnie drogowe powinny charakteryzować się wymaganą nośnością, zapewniać komfort jazdy oraz ograniczać ujemny wpływ ruchu samochodowego na środowisko. Hałas w otoczeniu tras drogowych jest dużym problemem i wymaga skutecznych działań, gdyż ujemnie wpływa na zdrowie ludzi, a koszty społeczne z tym związane stale rosną. Od kilku lat w pełni są akceptowane nawierzchnie drogowe obniżające hałas toczenia opon samochodowych jako skuteczna metoda walki z nadmiernym hałasem. Znanych i stosowanych w świecie jest wiele technologii budowy tzw. cichych warstw ściernalnych, a wśród nich największe uznanie znajduje asfalt porowaty i cienkie warstwy z betonu asfaltowego.

Udoskonalone metody teksturowania nawierzchni betonowych doprowadziły do sytuacji, że nawierzchnie z odkrytym kruszywem lub zastosowanie metod opartych na powiązaniu rowkowania i szlifowania (lub śrutowania), znanych pod nazwą *Next Generation Cement Surface* lub *Grinding & Grooving*, są porównywalne pod względem hałaśliwości z nawierzchniami asfaltowymi.

Najbardziej perspektywicznymi konstrukcjami z akustycznego punktu widzenia są warstwy poroelastyczne. Rozwiązanie problemu ich trwałości, współczynnika tarcia oraz poprawnego powiązania z warstwami niżej leżącymi zapewni redukcję hałasu o ponad 10 dB.

W monografii przeprowadzono szeroką analizę wyników pomiarów maksymalnego poziomu dźwięków generowanych przez przejeżdżające pojazdy na drogach w Polsce zgodnie z metodą SPB, zalecaną w metodzie prognozowania hałasu CNOSSOS-EU. Zbadano wpływ rodzaju opony testowej na poziom generowanych dźwięków w tzw. polu bliskim w zależności od rodzaju nawierzchni w metodzie CPX oraz sprawdzono przydatność metody CPB w ocenie hałaśliwości nawierzchni drogowych. Dużo uwagi poświęcono właściwościom akustycznym nawierzchni asfaltowych i nawierzchni betonowych. Przedmiotem poszerzonej analizy była ich makrotekstura, charakteryzowana parametrem *MPD*, w aspekcie generowanego poziomu hałasu. Zaproponowano nawierzchnię referencyjną oraz dokonano uszczegółowienia opracowanej wcześniej klasyfikacji nawierzchni pod względem hałaśliwości. W odniesieniu do nawierzchni o zwiększonej zawartości wolnych przestrzeni zbadano problem ich jednorodności i trwałości akustycznej w porównaniu z nawierzchniami z mastyksu grysowego typu SMA. Przedstawiono propozycję założeń do systemu oceny akustycznej górnych warstw nawierzchni drogowych

z uwzględnieniem etapu certyfikacji technologii, badania ich hałasliwości po wykonaniu nawierzchni oraz monitoringu.

Mając na uwadze Dyrektywę Komisji (UE) 2015/996 z dnia 19 maja 2015 r., przeanalizowano technologie budowy nawierzchni drogowych w Polsce pod kątem ich uwzględniania w prognozowaniu poziomu hałasu w otoczeniu dróg według metody CNOSSOS-EU. W tym celu dla każdej z tych technologii ustalono współczynniki korygujące w odniesieniu do maksymalnego poziomu dźwięku od przejeżdżających pojazdów kategorii 1 i 3 na nawierzchni referencyjnej z mastyksu grysowego typu SMA11.

Wyniki przeprowadzonych badań i analiz stanowiły podstawę do sformułowania następujących wniosków:

1. Hałasliwość nawierzchni drogowych może być oceniana przy wykorzystaniu takich metod, jak: SPB, CPX, OBSI czy CPB. Mając jednak na uwadze metodę CNOSSOS-EU, przyjętą jako metodę prognozowaniu hałasu drogowego zgodnie z Dyrektywą Komisji UE 2015/996 z dnia 19 maja 2015 r., za podstawową metodę oceny hałasliwości nawierzchni proponuje się przyjmując metodę SPB.
2. Liczba pojazdów objętych analizą według metody SPB, po odrzuceniu wartości odstających, powinna być zbliżona do  $80 \div 100$  – w wypadku pojazdów osobowych i  $30 \div 40$  – w wypadku pojazdów ciężarowych każdej z dwóch kategorii (2a i 2b). Jeżeli na badanej nawierzchni ustalenie wiarygodnych wyników w odniesieniu pojazdów kategorii 2a jest praktycznie niemożliwe, proponuje się wykonanie pomiarów na zwiększonej liczbie pojazdów kategorii 2b (minimum 80) i ustalenie wartości indeksu *SPBI* w oparciu o wyniki uzyskane dla dwóch kategorii pojazdów (1 i 2b). Ocena hałasu toczenia pojazdów ciężarowych typu 2a (według metody SPB) oraz pojazdów o napędzie elektrycznym i hybrydowym wymaga dalszych badań i analiz.
3. Parametr *MPD* może być podstawową charakterystyką makrotekstury nawierzchni o zwartej strukturze z punktu widzenia hałasliwości. Dotychczasowe badania nie umożliwiają prognozowania poziomu hałasu na nawierzchniach porowatych w oparciu o współczynnik absorpcji dźwięku, a nawierzchni poroelastycznych w oparciu o współczynnik absorpcji i sztywność nawierzchni.
4. Nawierzchnie z betonu cementowego teksturowane metodą odkrytego kruszywa, przy zachowaniu makrotekstury w zakresie  $0,7 \div 1,5$  mm, nie różnią się w sposób istotny pod względem hałasliwości od nawierzchni z mastyksu grysowego typu SMA11. Wdrożenie nawierzchni betonowych teksturowanych techniką NGCS (*Next Generation Concrete Surface*), znanej także jako

*Grinding & Groving*, jest wyzwaniem na najbliższe lata, a doświadczenia innych krajów w tym zakresie potwierdzają potrzebę takich działań.

5. Ustalenie poziomu emisji hałasu z uwzględnieniem rodzaju nawierzchni i charakterystyki ruchu samochodowego umożliwia ustalenie równoważnego poziomu dźwięku w otoczeniu tras drogowych.
6. Jednorodność akustyczna nawierzchni drogowych jest uzależniona od technologii ich wykonania i zmienia się w różnym zakresie w zależności od rodzaju warstwy ścieralnej, okresu eksploatacji, doświadczenia wykonawców oraz lokalizacji drogi.
7. Trwałość konstrukcyjna i trwałość akustyczna warstw ścieralnych o zwiększonej zawartości wolnych przestrzeni jest mniejsza niż trwałość standardowych warstw o zwartej strukturze typu beton asfaltowy czy SMA. Fakty te powinny być uwzględnione zarówno w planowaniu robót utrzymaniowych, jak też remontów i przebudów.
8. Sformułowana w monografii propozycja założeń do certyfikacji technologii budowy warstw ścieralnych redukujących poziom hałasu toczenia pojazdów samochodowych oraz oceny hałaśliwości nawierzchni powinna być przyczynkiem do opracowania w naszym kraju systemu oceny akustycznej nawierzchni drogowych.
9. Podane w monografii wartości współczynników korygujących wpływ nawierzchni na poziom hałasu od jadących pojazdów osobowych i wielocznopowych pojazdów ciężarowych mogą być uwzględnione w metodzie CNOSSOS-EU, w prognozowaniu klimatu akustycznego w otoczeniu tras drogowych w Polsce.

---

## Bibliografia

1. AASHTO TP-10. *Standard method of test for measurement of tire/pavement noise using the On-Board Sound Intensity (OBSI) method*. Washington DC, USA: American Association of State and Highway Transportation Officials, 2010.
2. Abbott P.G., Morgan P.A., McKell B.: *A review of current research on road surface reduction techniques. Project TRL/001/08*. Transport Research Laboratory, 2010. [www.highways.gov.uk](http://www.highways.gov.uk).
3. Adamczyk J.: *Problemy eksploatacyjne stosowania ekranów akustycznych*. I Seminarium Ochrona środowiska przed hałasem drogowym. Kraków, 2013.
4. Adamczyk J., Stryczniewicz L., Szałyga-Osypanka D.: *Ekrany akustyczne – panaceum? Drogi: lądowe, powietrzne, wodne* 9/2008, 64-71.
5. Aksnes J.: *Environmentally Friendly Pavements. Rapport Teknologivdelingen nr 2578*. Norwegian Public Roads Administration. Oslo, 2009.
6. Altreuther B., Männel M.: *New concepts for low noise concrete road surfaces*. Proc. of Inter-Noise. Hamburg, Germany, 2016.
7. Anderson, K.W., Uhlmeyer J.S., Russel M., Weston J.: *Evaluation of Long-Term Pavement Performance and Noise Characteristics of the Next Generation Concrete Surface. Report No. WA-RD 767.1*. Washington State Department of Transportation. Washington WA, 2011.
8. Anderson K.W., Sexton T., Uhlmeyer J.S., Russel M., Weston J.: *Concrete Pavement Noise. Report No. WA-RD 814*. Washington State Department of Transportation. Washington WA, 2013.
9. Anfosso-Lédée F.: *ROSANNE – Deliverable D2.5: Report on the compatibility of the proposed noise characterization procedure with CNOSSOS-EU and national calculation methods*; [www.roasanne-project.eu](http://www.roasanne-project.eu).
10. Anfosso-Lédée F., Brosseau Y.: *Acoustic monitoring of low noise road pavements*. Noise Control Engineering Journal 57(2), 2009, 50-62.
11. Anfosso-Lédée F., Dutilleux G., Conter M.: *Compatibility of the ROSANNE noise characterization procedure for road surfaces with CNOSSOS-EU model*. Proc. of Inter-Noise. Hamburg, 2016.
12. Anfosso-Lédée F., Leroux C.: *A methodology to evaluate pavement noise performances for characterisation, checking and monitoring purposes*. 7<sup>th</sup> Symposium on Pavement Surface Characteristics (SURF 2012). France. 2012.

13. Anfosso-Lédée F., Pichaud Y.: *Temperature effect on tyre-road noise*. Applied Acoustics 68, 2007, 1-16.
14. Angst Ch., Francoise B., Dieter B., Hans-Jörg G., Hansueli P.: *Low-noise road surfaces in urban areas. Final report 2007 – Condensed Version*. Federal Office for the Environment, Bern. Switzerland.
15. ASME B46.1-2002. *Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay)*.
16. Bartolomaeus W.: *Conversion of national road emission data into CNOSSOS-EU*. 23<sup>rd</sup> International Congress on Sound & Vibration. Athens, Greece, 2016.
17. Beckenbauer T., Kuijpers A.: *Prediction of pass – by levels depending on road surface parameters by means of a hybrid model*. Proc. of Inter-Noise. Hague, Netherlands, 2001.
18. Bendtsen H., Andersen B., Kalman B., Cesbron J.: *The first poroelastic test section in PERSUADE*. Proc. of Inter-Noise. Innsbruck, Austria, 2013.
19. Bendtsen H., Andersen B., Oddershede J., Iversen L.M.: *Long time effect of noise reducing thin layer pavements*. Proc. of Inter-Noise. New York, USA, 2012.
20. Bendtsen H., Gspan K.: *Technical Report 2017-01. State of the art in managing road traffic noise: noise-reducing pavements*. CEDR – Conference of European Directors of Roads, 2017.
21. Bendtsen H., Lu Q., Kohler E.: *Acoustic Aging of Asphalt Pavements: A Californian/Danish Comparison. Report: UCPRC-RP-2010-01*. The Danish Road Institute – California Department of Transportation, 2010; [www.ucprc.ucdavis.edu/pdf/UCPRC-RP-2010-01.pdf](http://www.ucprc.ucdavis.edu/pdf/UCPRC-RP-2010-01.pdf).
22. Bendtsen H., Kohler E., Lu Q., Rymer B.: *California-Denmark study on acoustic aging of road pavements*. Transportation Research Record 2158, 2010, 122-128.
23. Bendtsen H., Kragh J., Nielsen E.: *Use of noise reducing pavements – European experience*. Danish Road Institute – Technical Note 69, 2008.
24. Bendtsen H., Larsen H.J.E.: *Traffic Management and Noise*. Road Directorate. Danish Road Institute, 2007.
25. Bendtsen H., Stahlfest R.: *Performance of Eight Test Sections. Report nr 547*. Vejdirektoratet, 2015.
26. Berge T.: *Noise performance of the SRTT tyre compared to normal passenger car tyres*. Proc. of Inter-Noise. Innsbruck, Austria, 2013.
27. Berge T., Storeheier S.Å.: *Low noise pavements in a Nordic climate. Results from a four year project in Norway*. Proc. of Inter-Noise. Ottawa, Canada, 2009.
28. Bernhard. R., Wayson R.L.: *An Introduction to Tire/Pavement Noise. Report No. SQDH 2005-1*. The Institute for Safe, Quiet, and Durable Highways, Purdue University, West Lafayette, IN, 2005.



29. Birkner C., Adesiyun A., Greene M., Conter M., Haider M., Schmidt B., Sandberg U., Scharnigg K.: *ROSANNE. Final Summary Report*, 2016.
30. Bogdański B.: *Ciche warstwy ściernalne na drogach Wielkopolski. Przeszłość i przyszłość*. Materiały konferencyjne, Niedzica, 2013.
31. Bohatkiewicz J.: *Modelowanie i ocena rozwiązań chroniących przed hałasem drogowym*. Monografie. Politechnika Lubelska. Lublin, 2017.
32. Bohatkiewicz J.: *Wpływ geometrii, warunków i organizacji ruchu na klimat akustyczny w otoczeniu skrzyżowań*. Praca doktorska. Politechnika Krakowska. Kraków, 1999.
33. Bohatkiewicz J., Hałucha M.: *The Impact of Quiet Pavements' Usage Traffic Noise on People in Loosely Built-up Areas*. Traffic Noise – Exposure, Health Effects and Mitigation. Acoustic Research Technology. Nova Science Publishers. New York, 2017.
34. Bohatkiewicz J., Adamczyk J., Tracz M. i in.: *Podręcznik dobrych praktyk wykonywania pracochłonnych środowiskowych dla dróg krajowych*. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad. Warszawa – Kraków, 2008.
35. Bohatkiewicz J., Biernacki S.: *Badania wpływu rond na redukcję hałasu*. Materiały konferencyjne Konferencji Naukowo-Technicznej „Projektowanie rond – doświadczenia i nowe tendencje”. Kraków, 2010.
36. Bohatkiewicz J., Biernacki S., Jamrozik K.: *Wpływ wprowadzenia środków uspokojenia ruchu na hałas komunikacyjny w miastach*. Metody ochrony środowiska przed hałasem – teoria i praktyka. Zakopane, 2013.
37. Bohatkiewicz J., Czarnecka W., Jamrozik K., Biernacki S., Hałucha M.: *Wpływ uspokojenia ruchu na klimat akustyczny w otoczeniu ulic*. Materiały konferencyjne V Międzynarodowej Konferencji Ochrony Środowiska i Estetyki w Budownictwie Komunikacyjnym. Kazimierz Dolny, 2014.
38. Bohatkiewicz J., Tracz M.: *Effects of traffic conditions on traffic noise at signalized intersection*. Proc. of International INCE Symposium Euro-Noise. Lyon, France, 1995.
39. Bohatkiewicz J., Tracz M.: *Relationships between level of noise and level of service measures at traffic signal approaches*. Proc. of the Second International Symposium on Highway Capacity. Australian Road Research Board, Transportation Research Board. Sydney, Canada, 1994.
40. Bühlmann E., Hammer E.: *Towards semi-dense asphalt mixtures that guarantee acoustic performance and durability*. Proc. of Inter-Noise. Hong Kong, 2017.
41. Bühlmann E., Ziegler T.: *Interpreting measured acoustic performance on Swiss low-noise road surfaces using a tyre/road interaction model*. Acoustic. Hong Kong, 2012.

42. Cackler E. T., Rasmussen R. O., Ferragut T., Harington D. S.: *Evaluation of U.S. and European concrete pavement noise reduction methods*. Federal Highway Administration, National Concrete Pavement Technology Center, Ames, USA, 2006.
43. Campello-Vicente H., Peral-Orts R., Campillo-Davo N., Velasco-Sanchez E.: *The effect of electric vehicles on urban noise maps*. Applied Acoustics 116 (2017), 59-64.
44. Cesbron J., Klein P.: *Correlation between tyre/road noise levels measured by the Coast-By and the Close-ProXimity methods*. Applied Acoustics 126 (2017), 36-46.
45. Conter M., Aichinger C., Wehr R.: ROSANNE – Deliverable D2.6: *Report of the procedure for characterization of noise properties of road surfaces including updated draft standard*; www.rosanne-project.eu.
46. Descornet G., Goubert L.: *Noise classification of road pavements. Task 1 - Technical background information, Draft Report 05*. Directorate-General Environment, European Commission, 2006.
47. *Diagnostyka Stanu Nawierzchni. Wytyczne stosowania. Załącznik do Zarządzenia nr 34 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 30.04.2015 r.*
48. Donovan P.R.: *Comparative measurement of tire/pavement noise in Europe and the United States – NITE Study. Report No FHWA/CA/MI-2006/09*. California Department of Transportation. Petaluma, USA, 2006.
49. Donovan P.R.: *Initial and Long-Term Evaluation of the Tire-Pavement Noise Produced by Various Portland Cement Concrete Surface Textures. Measurements on the State Route KN 58 Mojave Bypass 2003 to 2010*. California Department of Transportation. Petaluma, USA, 2011.
50. Donovan P.R., Lodico, D.M.: *Measuring Tire-Pavement Noise at the Source. NCHRP Report 630. American Association of State Highway*. Transportation Officials, Federal Highway Administration, Washington, WA, 2009.
51. *Dyrektywa Komisji (UE) 2015/996 z dnia 19 maja 2015., ustanawiająca wspólne metody oceny hałasu zgodne z dyrektywą 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady*. Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L 168/1 1.7.2015.
52. Ejsmont J.A.: *Hałas opon samochodowych – wybrane zagadnienia*. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej. Mechanika nr 68. Gdańsk, 1992.
53. Ejsmont J.A., Mioduszewski P.: *Certification of vehicles used for tire/road noise evaluation by CPX method*. Noise Control Engineering Journal 57 (2), 2009, 121-128.

54. Ejsmont J.A., Mioduszewski P., Gardziejczyk W., Wisiołek A., Sandberg U., Padmos C., Roovers C., Morgan P., Anfosso-Lédée F., Ronowski G., Taryma S., Wisiołek M.: *Development of procedures for certifying noise testing equipment*. Gdańsk University of Technology, Project SILVIA, No GRD222-2000-31801-S12.335701, ISBN 83-7348-121-4. Gdańsk, 2005.
55. Ejsmont J.A., Goubert L., Ronowski G., Świczko-Żurek B.: *Ultra Low noise Poroelastic Road Surfaces*. Coatings 6/2016.
56. Ejsmont J.A., Ronowski G., Świczko-Żurek B., Sommer S.: *Road texture influence on tyre rolling resistance*. Road Materials and Pavement Design, 2016.
57. Ejsmont J.A., Sandberg U., Świczko-Żurek B., Mioduszewski P.: *Tyre/road noise reduction by a poroelastic road surface*. Proc. of Inter-Noise. Melbourne, Australia, 2014.
58. Ejsmont J.A., Świczko-Żurek B., Taryma S.: *Low noise tires for hybrid and electric vehicles*. 21<sup>st</sup> International Congress on Sound and Vibration, ICSV. Beijing, China, 2014.
59. Ellebjerg L.: *Effectiveness and Benefits of Traffic Flow Measures on Noise Control*. European Sixth FP SILENCE WP H1, 2007.
60. Engel Z.: *Ochrona środowiska przed drganiem i hałasem*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa, 2001.
61. Everest A.T.: *Podręcznik akustyki*. Wydanie IV. Wydawnictwo SONIA DRAGA Sp. z o.o, Katowice, 2009.
62. Ferragut T., Rasmussen R.O., Wiegand P., Mun E., Cacler E.T.: *ISU-FHWA-ACPA Concrete Pavement Surface Characteristics Program Part 2: Preliminary Field Data Collection*. Report No. DTFH61-01-X-00042 (Project 15, Part 2). Federal Highway Administration, American Concrete Pavement Association, Washington, WA, 2007.
63. Freitas E.F.: *The effect of time on the contribution of asphalt rubber mixtures to noise abatement*. Noise Control Engineering Journal 60(1), 2012.
64. Freitas E.F., Mendonca C., Santos J.A., Murteira C., Ferreira J.P.: *Traffic noise abatement: How different pavements, vehicle speeds and traffic densities affect annoyance levels*. Transportation Research Part D 17(2012), 321-326.
65. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M.: *Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka*. WKiŁ, Warszawa, 2008.
66. Gardziejczyk W.: *Comparison of vehicle noise on dry and wet road surfaces*. Foundations of Civil and Environmental Engineering 9 (2007), 5-15.
67. Gardziejczyk W.: *Generowanie hałasu przez samochody osobowe i ciężarowe. Osłony przeciwhałasowe w ruchu drogowym*. Studia i Materiały z. 64. Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Warszawa, 2011, 46-61.

68. Gardziejczyk W.: Hałas od przejeżdżającego pojazdu w zależności od jego prędkości i charakterystyki nawierzchni drogowej. *Magazyn Autostrady* 7/2015, 22-27.
69. Gardziejczyk W.: *Influence of road pavement macrotexture on tyre/road noise of vehicles*. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 9 (3), 182-192, 2014.
70. Gardziejczyk W.: *Nawierzchnie kostkowe – problem hałasu toczenia pojazdów samochodowych*. *Transport Miejski* 1/2004, 17-23.
71. Gardziejczyk W.: *Problem hałasu generowanego podczas robót drogowych na obszarach chronionych i na terenach zurbanizowanych*. *Przegląd Budowlany* 2/2010, 45-51.
72. Gardziejczyk W.: *Tekstura nawierzchni drogowych – metody pomiaru, wskaźniki oceny i jej wpływ na hałas toczenia*. *Drogi i Mosty* 2/2002, 5-29.
73. Gardziejczyk, W.: *The effect of time on acoustic durability of low noise pavements – The case studies in Poland*. *Transportation Research Part D*. 44, 2016, 93-104.
74. Gardziejczyk W.: *Wpływ technologii wykonania i tekstury nawierzchni drogowych na hałas pojazdów samochodowych*. Dział Wydawnictw i Poligrafii. Politechnika Białostocka. Rozprawy Naukowe nr 121. Białystok, 2005.
75. Gardziejczyk W., Gierasimiuk P.: *Influence of texturing method on tyre/road noise of cement concrete pavement*. *International Journal of Pavement Engineering*, 2016.
76. Gardziejczyk W., Gierasimiuk P., Motylewicz M.: *Ekrany akustyczne – analiza ich skuteczności na wybranych przykładach*. *Magazyn Autostrady* 12/2011, 38-45.
77. Gardziejczyk W., Gierasimiuk P., Motylewicz M.: *Hałaśliwość nawierzchni betonowych – przykładowe wyniki badań*. *Drogownictwo* 10, 2014, 319-326.
78. Gardziejczyk W., Motylewicz M.: *Noise level in the vicinity of signalized roundabouts*. *Transportation Research Part D*, vol. 46 (2016), 128-144.
79. Garg N., Maji S.: *A critical review of principal traffic noise models: Strategies and implications*. *Environmental Impact Assessment Review* 46 (2014), 68-81.
80. Gärtner K.: *Neues zu AC D LOA und SMA LA*. *Asphalt* 3/2014, 10-12.
81. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad. *Ogólne Specyfikacje Techniczne – Nawierzchnia Betonowa D-05.03.04*, 2013.
82. Gierasimiuk P., Gardziejczyk W.: *Makrotekstura nawierzchni drogowych – wybrane aspekty jej oceny*. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska* z. 59, cz. 4. Rzeszów, 2012, 191-198.
83. Gisi A.: *Concrete Pavement Surface Characteristics Program, Site Evaluation Report 211-1, 211-2. Report Version 3.0*. Kansas Department of Transportation, Ames, IA, 2008.
84. Gołębski R., Makarewicz R., Nowak M., Preis A.: *Traffic noise reduction due to the porous road surface*. *Applied Acoustics* 64 (2003), 481-494.

85. Goubert L., Sandberg U.: *The PERSUADE project: developing the concept of poroelastic road surface into a powerful tool for abating traffic noise*. Proc. of Inter-Noise. Lisbon, Portugal, 2010.
86. Grabka A.: *Praktyczne aspekty zastosowania cichych nawierzchni na drogach wojewódzkich w Małopolsce*. Małopolskie Forum Drogowe. ZDW Kraków. Raławice, 2015.
87. Guada I.M., Rezali A., Harvey J.T., Spinner D.: *Evaluation of Grind and Groove (Next Generation Concrete Surface) Pilot Projects in California*. Report No.: UCPRC-RR-2013-01. California Department of Transportation, Division of Research, Innovation and Spatial Information, Berkeley, CA, 2013.
88. *Guidance manual for the implementation of low-noise road surfaces*. FEHRL Report 2006/02.
89. *Guide to state highway road surface noise*. NZ Transport Agency. New Zealand Government, Version 1.0, 2014.
90. Hall K., Dawood D., Vanikar S., Tally Jr R., Cacler T. et al.: *Long-Life Cement Concrete Pavements in Europe and Canada*. Report No. FHWA-PL-07-027. Office of International Programs, Office of Policy, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, American Association of State Highway, Transportation Officials Alexandria, VA, 2007.
91. Hall J.W., Smith K.L.: *Texturing of Concrete Pavements*. NCHRP Report 634, American Association of State Highway, Transportation Officials, Federal Highway Administration. Washington, D.C., 2009.
92. Hamet J.F., Besnard F., Doisy S., Lelong J., le Duc E.: *New vehicle noise emission for French traffic noise prediction*. Applied Acoustics 71(2010), 861-869.
93. Hanson, D., Waller B.: *Evaluation of the noise characteristics of Minnesota pavements*. Minnesota Department of Transportation. Minnesota, MN, 2005.
94. Ho K.Y., Hung W.T., Ng Ch.F., Lam Y.K., Leung R., Kam E.: *The effects of road surface and tyre deterioration on tyre/road noise emission*. Applied Acoustics 74(2013), 921-925.
95. Horodecka R., Bańkowski W., Mirski K.: *Ocena przydatności prototypowego aparatu do badania wodoprzepuszczalności asfaltu porowatego*. Drogownictwo 9/2012, 97-301.
96. Hung W.T., Lam Y.K., Mak K.L.: *Impacts of age and texture of porous asphalt on tyre/road noise in Hong Kong*. Proc. of Inter-Noise. New York, USA, 2012.
97. *ISO 11819-1: 1997. Acoustics – Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1: The statistical pass-by method*. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland, 1997.

98. *ISO/DIS 11819-2: 2012. Acoustics – Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: The close-proximity method.* International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland, 2012.
99. *ISO 13472-1. Acoustics – Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ – Part 1: Extended surface method,* 2002.
100. *ISO 13472-2. Acoustics – Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ – Part 2: Spot method for reflective surfaces.*
101. *ISO 13473: Characterization of pavement texture by use of surface profiles. Part 1, 2, 3.* 1999.
102. Iwański M.: *Szorstkość nawierzchni w aspekcie uziarnienia mieszanki mastykowo-grysowej SMA.* IX Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe. Kielce, 2003, 51-58.
103. Izevbekhai B.I., Khazanovich L.: *Acoustic enhancement of concrete pavement surface through diamond grinding.* International Journal of Pavement Engineering, 14 (6), 2013, 579-589.
104. Jonasson H., Sandberg U., van Blokland G., Ejsmont J., Watts G., Luminari M.: *Source modeling of road vehicles. Project HARMONOISE – HAR11TR-041210-SP10,* 2004.
105. Kaczmarek T., Kokowski P., Pękala P.: *Pomiar izolacyjności akustycznej ekranów przeciwhałasowych in situ. Zagadnienia decydujące o hałasie drogowym. Osłony przeciwhałasowe w ruchu drogowym.* Studia i Materiały z.64. Instytut Badawczy Drógi Mostów. Warszawa, 2011.
106. Kalman B., Biligiri K.P., Sandberg U.: *Project PERSUADE: Optimization of poroelastic road surfaces in the laboratory.* Proc. of Inter-Noise. Osaka, Japan, 2011.
107. Kephelopoulos S., Paviotti M., Anfosso-Ledee F.: *Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU). Reference Reports.* Joint Research Centre of the European Commission, 2012.
108. Kephelopoulos S., Paviotti M.: *Common Noise Assessment Methods for Europe (CNOSSOS-EU): Implementation challenges in the context of EU noise policy developments and future perspectives.* 23<sup>rd</sup> International Congress on Sound & Vibration. Athens, Greece, 2016.
109. Kephelopoulos S., Paviotti M., Anfosso-Ledee F., Van Maercke D., Shilton S., Jones N.: *Advances in the development of common noise assessment methods in Europe: the CNOSSOS-EU framework for strategic environmental noise mapping.* Science of the Total Environment 482-483 (2014), 400-410.
110. Knabben R.M., Trichês G., Gerges S.N.Y., Vergara E.F.: *Evaluation of sound absorption capacity of asphalt mixtures.* Applied Acoustics 114 (2016), 266-274.

111. Kneib G., Bechler D., Beckenbauer T., Beyeler H-P.: *Continuous road traffic noise monitoring and aging of asphalt surfaces*. Inter Noise 2016, Hamburg.
112. Kokowski P.: *Lokalizacja i geometria ekranów przeciwhałasowych – projekt akustyczny ekranu*. Osłony przeciwhałasowe w ruchu drogowym. Studia i Materiały z.64. Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Warszawa, 2011, 73-85.
113. Kompała J.: *Ocena hałasu drogowego – dopuszczalne poziomy w Polsce i UE*. Osłony przeciwhałasowe w ruchu drogowym. Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Studia i Materiały z.64. Warszawa, 2011, 7-25.
114. Kosała K.: *Określenie fizycznego współczynnika pochłaniania dźwięku materiału zgodnie z normą ISO 10534-1*. Raport z badania (praca niepublikowana). Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica. Kraków, 2016.
115. Kowalski K.J., Dare T., Mcdaniel R.S., Olek J., Bernhard R.: *Research on a laboratory technique for tire-pavement noise assessment of asphalt mixes*. Archives of Civil Engineering vol. LIX, 4, 2013, 561-577.
116. Kowalski K.J.: *Selection of quiet pavement technology for Polish climate conditions on the example of CIDRO project*. Proc. of 6<sup>th</sup> Transport Research Arena 2016, Warsaw, Poland .
117. Kragh J., Bendtsen H., Hildebrand G.: *Noise classification for tendering quiet asphalt wearing courses*. Proc. of Transport Research Arena 2012, Athens, Greece, 570-579.
118. Kragh J., Iversen L.M., Sandberg U.: *Road Surface Texture for Low Noise and Low Rolling Resisatnce. NORDTEX Final Report 506/2013*. Danish Road Directorate.
119. Kragh J., Olsen E., Bendtsen H., Nielsen E., Handberg K., Sandberg U.: *DVS-DRI Super Quiet Traffic. International Research for Pavement Providing 10 dB Noise Reduction*. Road Directorate. Danish Road Institute. Report 178-2009.
120. Kropp W., Larson K., Wullens F., Andersson P.: *The modelling of tyre/road noise – a quasi three – dimensional model*. Proc. of Inter-Noise. Hague, Netherlands, 2001.
121. Kucharski J.R., Szymański Z.K.: *Projektowanie ekranów akustycznych*. Magazyn Autostrady 11/2008, 59-63.
122. Kuemmel, D.A., Sontag R.C., Croveti J.A., Becker Y.: *Noise and Texture on PCC Pavements - Results of a Multi-State Study. Report No. WI/SPR-08-99*. Wisconsin Department of Transportation, Division of Transportation Infrastructure Development, Bureau of Highway Construction, Pavements Section/Technology Advancement Unit 3502 Kinsman Blvd., Madison, WI 53704-2507, Milwaukee, WI, 2000.

123. Kuemmel, D.A., Jaeckel J., Satanovsky A. et al.: *Noise characteristics of pavement surface texture in Wisconsin*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1544, 1996, 24-35.
124. Larsson K.: *Updated road traffic noise emission models in Sweden*. Proc. of Inter-Noise. Hamburg, Germany, 2016.
125. Lelong J., Anfosso-Ledee F., Soldano B.: *A Round Robin Test of CPX devices for the characterization of road surface noise properties*. Proc. of Inter-Noise. Hong Kong, 2017.
126. Li M., van Keulen W., Tijss E., van de Ven M., Molenaar A.: *Sound absorption measurement of road surface with in situ technology*. Applied Acoustics 88 (2015), 12-21.
127. Licitra G., Teti L., Cerchiai M., Ascari E., Chetoni M.: *SPB and CPX results of rubberized surfaces in the Italian urban and extra-urban context*. Proc. of Inter-Noise. Melbourne, Australia, 2014.
128. Licitra G., Cerchiai M., Teti L., Ascari E., Fredianelli L.: *Durability and variability of the acoustical performance of rubberized road surfaces*. Applied Acoustics 94 (2015), 20-28.
129. Licitra G., Cerchiai M., Teti L., Bianco F., Chetoni M., Ascari E.: *Relationship between Pass By results, CPX ones and roadside long-term measures: some considerations*. Proc. of Inter-Noise. Hamburg, Germany, 2016.
130. Licitra G., Teti L., Cerchiai M., Bianco F.: *The influence of tyres on the use of the CPX method for evaluating the effectiveness of a noise mitigation action based on low-noise road surfaces*. Transportation Research Part D 55 (2017), 217-226.
131. Licitra G., Teti L., Cerchiai M.: *A modified Close Proximity method to evaluate the time trends of road pavements acoustical performances*. Applied Acoustics 76 (2014), 169-179.
132. Liu M., Huang X., Xue G.: *Effects of double layer porous asphalt pavement of urban streets on noise reduction*. International Journal of Sustainable Built Environment (2016) 5, 183-196.
133. Loprencipe G., Cantisani G.: *Unified Analysis of Road Pavement Profiles for Evaluation of Surface Characteristics*. Modern Applied Science vol. 7, no. 8, 2013.
134. Lorenzen A.: *Low Noise Road Traffic – The German research program, 'LeiStra2'*. Noise Control Engineering Journal 57 (2), 2009.
135. Luong J., Bueno M., Vázquez V.F., Paje S.E.: *Ultrathin porous pavement made with high viscosity asphalt rubber binder: A better acoustic absorption?* Applied Acoustics 79 (2014), 117-123.



136. Mackiewicz P., Szydło A., Krawczyk B.: *Wpływ technologii wykonania nawierzchni betonowych na teksturę i równość*. Roads and Bridges – Drogi i Mosty 17(2018), 111-126.
137. Maennel M., Altreuther B.: *Ageing of low noise surfaces*. Proc. of Inter-Noise. Hamburg, 2016.
138. Makarewicz R.: *Dźwięki i fale*. Wydawnictwo Naukowe UAM. Poznań, 2017.
139. Makarewicz R.: *Dźwięk w środowisku*. Ośrodek Wydawnictw Naukowych. Poznań, 1994.
140. Makarewicz R.: *Hałas w środowisku*. Ośrodek Wydawnictw Naukowych. Poznań, 1996.
141. Makarewicz R.: *Zjawiska decydujące o hałasie drogowym*. Osłony przeciwhałasowe w ruchu drogowym. Studia i Materiały z. 64. Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Warszawa, 2011, 26-45.
142. McGhee K.K., Flintsch G.W.: *High-speed texture measurement of pavements. Final Report. VTRC 03-09*. Charlottesville, Virginia, 2009.
143. Miljković M., Radenberg M.: *Thin noise-reducing asphalt pavements for urban areas in Germany*. Internatioanl Journal of Pavement Engineering vol. 13, no. 6, 2012. 569-578.
144. Miljkovic M., Radenberg M., Gottaut Ch.: *Characterization of Noise-Reducing Capacity of Pavement by Means of Surface Texture Parameters*. Journal of Materials in Civil Engineering, February 2014, 240-249.
145. Mioduszewski P.: *Low-noise pavements in Poland*. Proc. of Inter-Noise. New York, USA, 2012.
146. Mioduszewski P.: *Przegląd hałaśliwości różnych typów nawierzchni drogowych na podstawie wyników pomiarów metodą CPX*. III Ogólnopolskie Forum Specjalistyczne „Nawierzchnie drogowe 2015”, Kraków, 2015.
147. Mioduszewski P., Ejsmont J.A.: *Directivity of tire/road noise emission for selected tires and pavements*. Noise Control Engineering Journal 57 (2), 2009, 129-138.
148. Mioduszewski P., Gardziejczyk W.: *Inhomogeneity of low-noise wearing courses evaluated by tire/road noise measurements using the close-proximity method*. Applied Acoustics 111 (2016), 58-66.
149. Mioduszewski P., Gardziejczyk W.: *Noise measurements on low noise pavements - problems with inhomogeneity of wearing course*. Proc. of Inter-Noise. Innsbruck, Austria, 2013.
150. Mioduszewski P., Taryma S., Woźniak R.: *Temperature influence on tyre/road noise frequency spectra*. Proc. of Inter-Noise. Hamburg, Germany, 2016.

151. Morgan P. (ed.) et al.: *Guidance manual for the implementation of low-noise road surfaces, FEHRL Report 2006/02. EU Fifth Framework Project "SILVIA – Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control"*. FEHRL, Brussels, Belgium, 2006.
152. Morgan P.A., Nelson P.M., Steven H.: *Integrated assessment of noise reduction measures in the road transport sector. PR SE/652/03, ETD/FIF.20020051*. Enterprise DG, European Commission, 2003.
153. Morgan P.A., Stait R.E., Reeves S., Clifton M.: *The feasibility of using twin layer porous asphalt surfaces in the UK*. Transport Research Laboratory. Project Record: 210(387) HTRL, 2007.
154. Morgan P.A., Stait R.E., Reeves S., Clifton M.: *The feasibility of using twin layer porous asphalt surfaces in the UK*. Transport Research Laboratory. Project UPR IE/158/2007, [www.highways.gov.uk](http://www.highways.gov.uk).
155. Merska O., Mieczkowski P., Żymelka D.: *Low-noise thin surface course – evaluation of the effectiveness of noise reduction*. 6<sup>th</sup> Transport Research Area, April 18-21, 2016. Transportation Research Procedia 14 (2016), 2688 – 2697.
156. Motylewicz M.: *Klimat akustyczny w otoczeniu skrzyżowań z wyspą centralną*. Rozprawa doktorska. Politechnika Białostocka. Białystok, 2017.
157. *National Concrete Pavement Technology Center. Texturing Concrete Pavement for Reduced Tire/Pavement Noise using Artificial Turf Drag, Guide Specification for Highway Construction, CPSCP GS 2-11*, 2011.
158. *National Concrete Pavement Technology Center. Texturing Concrete Pavement for Reduced Tire/Pavement Noise using Longitudinal Tining, Guide Specification for Highway Construction, CPSCP GS 3-11*, 2011.
159. *National Concrete Pavement Technology Center. Texturing Concrete Pavement for Reduced Tire/Pavement Noise using Transverse Tining, Guide Specification for Highway Construction, CPSCP GS 4-11*, 2011.
160. *National Concrete Pavement Technology Center. Texturing Concrete Pavement for Reduced Tire/Pavement Noise using Diamond Grinding, Guide Specification for Highway Construction, CPSCP GS 1-11*, 2011.
161. Neithalath, N., Garcia R., Weiss J., Olek J.: *Tire-Pavement Interaction Noise: Recent Research on Concrete Pavement Surface Type and Texture*. Proc. of 8th International Conference on Concrete Pavements, Colorado Springs, Colorado, USA, 2005, 88-105.
162. *NF S31-119-1. Caractérisation in situ des qualités acoustiques des revêtements de chaussées*. Paris, 1993.

163. *NF S31-119-2. Acoustique – Caracterisation in situ des qualities acoustiques des revetements de chaussées – Mesurages acoustiques au passage – Partie 2: procedure vehicule maitrise*, 2000.
164. Nilsson M.E., Bengtsson J., Klæboe R.: *Environmental Methods for Transport Noise Reduction*. CRC Press. Taylor & Francis Group. Boca Raton, London, New York, 2015.
165. Nita P.: *Budowa i utrzymanie nawierzchni lotniskowych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa, 2008.
166. Oddershede J., Bendtsen H., Kragh J., Sohaney R., Rasmussen R.: *CPX-OBSI Relation in Tyre/Road Noise Measurement Results*. Proc. of Inter-Noise. Innsbruck. Austria, 2013.
167. Olszacki J.: *Hałas ruchu drogowego. Część 3. Efektywność tłumienia hałasu przez nawierzchnie drogowe – wyniki badań laboratoryjnych*. Drogownictwo 5/2008, 164-170.
168. Paje S.E., Bueno M., Terán F., Miró R., Pérez-Jiménez F., Martínez A.H.: *Acoustic field evaluation of asphalt mixtures with crumb rubber*. Applied Acoustics 71 (2010), 578-582.
169. Paje S.E., Luong J., Vázquez V.F., Bueno M., Miró R.: *Road pavement rehabilitation using a binder with a high content of crumb rubber: Influence on noise reduction*. Construction and Building Materials 47 (2013), 789-798.
170. Paje S.E., Bueno M., Terán F., Viñuela U., Luong J.: *Assessment of asphalt concrete acoustic performance in urban streets*. Journal of the Acoustical Society of America 123 (3), 2008, 1439-1445.
171. Paje S.E., Bueno M., Terán F., Viñuela U.: *Monitoring road surfaces by close proximity noise of the tire/road interaction*. Journal of the Acoustical Society of America 122 (5), 2007, 2636-2641.
172. Pallas M.A., Berengier M., Chatagnon R., Czuka M., Conter M., Muirhead M.: *Towards a model for electric vehicle noise emission in the European prediction method CNOSSOS-EU*. Applied Acoustics 113 (2016), 89-101.
173. Parnell J., Samuels S.: *A comparison of tyre/road noise generated on NSW pavements to international studies*. Proc. of Acoustics 2006. Christchurch, New Zealand 2006, 369-375.
174. *PN-EN ISO 10534-1-2004 Akustyka: Określenie współczynnika pochłaniania dźwięku i impedancji akustycznej w rurach impedancyjnych. Część I: Metoda wykorzystująca współczynnik fal stojących*.
175. *PN-87/B-02151/02. Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem pomieszczeń w budynkach. Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku w pomieszczeniach*, 1987.

176. Praca zbiorowa. *Innowacyjna technologia nawierzchni drogowych o obniżonej hałaśliwości*. Mostostal Warszawa S.A., Warszawa, 2015.
177. Praticò F.G.: *On the dependence of acoustic performance on pavement characteristics*. Transportation Research Part D (2014), 79-87.
178. Praticò F.G., Anfosso-Lédée F.: *Trends and Issues in Mitigating Traffic Noise Through Quiet Pavements*. Procedia – Social and Behavioral Sciences 53 (2012), 203-2012.
179. Praticò F.G., Fedele R., Vizzari D.: *Significance and reliability of absorption spectra of quiet pavements*. Construction and Building Materials 140 (2017), 274-281.
180. Praticò F.G., Swanlud M., George L.A ., Anfosso-Ledee F., Tremblay G., Tellez R., Kamiya K., Cerro J.: *Quiet Pavement Technologies*. World Road Association Technical Committee D2 – Road Pavements. 2013, www.piarc.org.
181. Praticò F.G., Vaiana R.: *Permeable friction courses: area based vs. line-based surface performance and indicators*. Proc. of Inter-Noise. Innsbruck, Austria, 2013.
182. Radosz S.: *Analiza wybranych parametrów ruchu i drogi w aspekcie ochrony akustycznej środowiska*. Praca doktorska. Politechnika Krakowska, 1985.
183. 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 – zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad. Warszawa, 2013.
184. Raimundo I., Freitas E., Inacio O., Pereira P.: *Sound absorption coefficient of wet gap graded asphalt mixtures*. Proc. of Inter-Noise. Lisbon, Portugal, 2010.
185. Ranieri V., Kowalski K., Berloco N., Colonna P., Perrone P.: *Influence of wax additives on the properties of porous asphalts*. Construction and Building Materials 145 (2017), 261-271.
186. Rasmussen R.O., Bernhard R.J., Sandberg U., Mun E.P.: *The Little Book of Quieter Pavements. Technical Report No. FHWA/IF/08/004*. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. The TRANSTEC GROUP, 2007.
187. Rasmussen R. O., Wiegdan P. D., Fick G. J., Harrington D. S.: *How to Reduce Tire-Pavement Noise: Better Practices for Constructing and Texturing Concrete Pavement Surfaces*. Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation, Washington, USA, 2012.
188. Rochat J.L., Donovan P., Syebert A., Dare T.: *Pavement sound absorption measurements in the U.S*. Proc. of Inter-Noise. New York, USA, 2012.

189. Roo F., Gerretsen E., Muldner E.H.: *Predictive performance of the tyre – road noise model TRIAS*. Proc. of Inter-Noise. Hague, Netherlands, 2001.
190. *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 października 2002 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinien odpowiadać program ochrony przed hałasem* (Dz.U. z 2002 r., nr 179, poz. 1498).
191. *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).
192. *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).
193. Sadowski J.: *Podstawy akustyki urbanistycznej*. Arkady. Warszawa, 1982.
194. Sandberg U.: *Concept of Virtual Reference Surface for Noise Prediction and Comparison Purposes*. Proc. of Inter-Noise Honolulu, Hawaii, USA, 2006.
195. Sandberg U.: *Gaining extra noise reduction and lower rolling resistance by grinding a porous asphalt pavement*. Proc. of Inter-Noise. New York, USA, 2012.
196. Sandberg U.: *Noise characteristics of an exposed aggregate cement concrete surface*. 14<sup>th</sup> International Congress on Sound & Vibration. Cairns, Australia, 2007.
197. Sandberg U. (ed.) et al.: *Optimization of Thin Asphalt Layers – State-of-the-Art Review, Deliverable no. 1 of ERA-NET ROAD Project*, 2011.  
[www.brrc.be/pdf/15/doc/OPHTHINAL\\_SoA.pdf](http://www.brrc.be/pdf/15/doc/OPHTHINAL_SoA.pdf).
198. Sandberg U.: *The global experience in using low-noise road surfaces: A benchmark report. Final report. Report made in response to Hong Kong Environmental Protection Department project No.AN 06-004*, 2009.
199. Sandberg U., Bühlmann E., Conter M., Mioduszewski P., Wehr R.: *Improving the CPX method by specifying reference tyres and including corrections for rubber hardness and temperature*. Proc. of Inter-Noise. Hamburg, 2016.
200. Sandberg U., Descornet G.: *Road surface influence on tire/road noise – Part I and II*. Proc. of Inter-Noise. Miami. New York, USA, 1980.
201. Sandberg U., Ejsmont J.A.: *Texturing of Cement Concrete Pavements to Reduce Traffic Noise Emission*. TRD, 77<sup>th</sup> Annual Meeting. Washington, D.C., 1998.
202. Sandberg U., Ejsmont J.A.: *Tyre/road noise reference book*. Sweden, Informex, 2002.
203. Sandberg U., Goubert L.: *Poroelastic Road Surface: A review of 30 years of R&D work*. Proc. of Inter-Noise. Osaka, Japan, 2011.

204. Sandberg U., Goubert L.: *PERSUADE – A European project for exceptional noise reduction by means of poroelastic road surfaces*. Proc. of Inter-Noise. Osaka, Japan, 2011.
205. Sandberg U., Mioduszewski P.: *The importance for noise reduction of the bottom layer in double-layer porous asphalt*. Proc. of Acoustics. Hong Kong, 2012.
206. Sandberg U., Ejsmont J.A., Gardziejczyk W.: *Influence of road surface wetness on tyre/road noise. Part 1 – Evaluation of measurements. Project HARMONOISE – HAR11TR-020901-TUG01.doc*. Gdańsk, 2002.
207. Schubert S., Mannel M., Ertsey M., Hoever C.: *Influence of the tyre impedance on CPX level used to evaluate tyre/road noise*. Proc. of Inter-Noise. Hamburg, 2016.
208. Scofield L.: *Development of the Next -Generation, Low-Maintenance Concrete Surface*. Proc. of National Conference on Preservation, Repair, and Rehabilitation of Concrete Pavements. Missouri, USA, 2009, 269-286.
209. Shilton S.J., Anfosso-Lédée F., van Leeuwen H.: *Conversion of existing road source data to use CNOSSOS-EU*. EuroNoise 2015, Maastricht.
210. Skarabis, J., Stockert, U.: *Noise emission of concrete pavement surfaces produced by diamond grinding*. Journal of Traffic and Transportation Engineering vol. 2, 2015, 81-92,
211. Skov R.S.H.: *Analysis and comparison of methods, CPX and SPB, for measuring noise properties of road surfaces*. Proc. of Inter-Noise. Hamburg, Germany, 2016.
212. Smith K.L., Hall J.W., Littleton P.: *Texturing of Concrete Pavements. NCHRP Report 634*. Transportation Research Board. Washington, 2009.
213. Soares F., Freitas E.F., Cunha C., Silva C.C., Lamas J., Mouta S., Santos J.A.: *Annoyance assessment of real and virtual sounds based on close proximity measurements*. Transportation Research Part D 52 (2017), 399-407.
214. Stanisław A.: *Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach medycy. Tom 1, 2, 3*. StatSoft. Kraków, 2007.
215. Suchorzewski W.: *Rola transportu w kształtowaniu struktury funkcjonalno-przestrzennej miast*. Transport a logistyka formy urbanistycznej. Projekty dla polskich metropolii. Czasopismo Techniczne Architektura. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, z.3, 2010.
216. Sybilski D., Jezierska D.: *Ocena wpływu typu i technologii wykonania nawierzchni drogowej na hałaśliwość ruchu drogowego i jego uciążliwość dla środowiska. Temat WS-05*. Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Warszawa, 2005 (praca niepublikowana).

217. Sybilski D., Horodecka R., Maliszewski M.: *Możliwości stosowania cichych nawierzchni drogowych w Polsce*. Materiały Budowlane 8/2011.
218. Szpinek S.: *Opracowanie algorytmu weryfikującego wyniki badań poziomu hałasu uzyskanych przy wykorzystaniu różnych metod*. Raport i Aneks do raportu. Warszawa, 2017 (praca niepublikowana).
219. Szydło A.: *Nawierzchnie z betonu cementowego. Teoria, wymiarowanie, realizacja*. Polski Cement Sp. z o.o. Kraków, 2004.
220. Szydło A., Mackiewicz P.: *Badania hałasu generowanego przez nawierzchnie betonowe*. VI Międzynarodowa Konferencja Śląskie Forum Drogownictwa. Polski Kongres Drogowy. Katowice, 2018.
221. Szydło A., Mackiewicz P.: *Czynniki wpływające na hałaśliwość nawierzchni betonowych*. II Wschodnie Forum Drogowe: Kruszywo – Cement – Beton. Polski Kongres Drogowy. Suwałki, 2018.
222. Świczko-Żurek B., Ejsmont J.A., Motrycz G., Stryjek P.: *Risks related to car fire on innovative Poroelastic Road Surfaces-PERS*. Fire and Materials, vol. 39, is. 2, 2015, 95-108.
223. Świczko-Żurek B., Ejsmont J.A., Ronowski G.: *How efficient is noise labeling of tires?* The 21<sup>st</sup> International Congress on Sound and Vibration. Beijing, China, 2014.
224. Świczko-Żurek B., Ejsmont J.A., Ronowski G., Taryma S.: *Comparison of road and laboratory measurements of tyre/road noise*. Proc. of Inter-Noise. Melbourne, Australia, 2014.
225. Świczko-Żurek B., Jaskuła P., Ejsmont J.A., Kędzierska A., Czajkowski P.: *Rolling resistance and tyre/road noise on rubberised asphalt pavement in Poland*. Road Materials and Pavement Design, 2016.
226. Tian B., Liu Y., Niu K., Li S., Xie J., Li X., Masce M.: *Reduction of Tire-Pavement Noise by Porous Concrete Pavement*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 233-239.
227. Tonin R., Chan D., Huang G.: *RONDA open frame CPX trailer – Certification in accordance with ISO/CD 11819-2*. Proc. of Inter-Noise. Hamburg, Germany, 2016.
228. Tonin R., Saurer T.: *Comparison of CPX and OBSI noise measurements for different road surfaces*. Proc. of Inter-Noise. Hong Kong, 2017.
229. Tracz M., Bohatkiewicz J.: *Impact of traffic conditions on the level of noise at traffic signals*. Proc. of the 3th 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*. Proc. of the Third In-

- ternational 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*. Computing in Civil Building Engineering. Berlin, 1995.
232. Tracz M., Kowalski K., Szydło A., Zofka A., Bohatkiewicz J.: *Program RID – Rozwój Innowacji Drogowych GDDKiA i NCBiR 2015-2018. Ochrona przed hałasem drogowym*. V Śląskie Forum Drogownictwa. Katowice, 2017.
233. 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.
234. Van Blokland G., Skov R.S.H.: *Uncertainty in the CPX method (ISO 11819-2/3) and its implications for pavement evaluation*. Proc. of Inter-Noise. Hamburg, 2016.
235. Van Blokland G., Tollenaar Ch., van Loon R.: *Modelling of Acoustic Aging of Road Surfaces. QUESTIM. Deliverable D2.2 8/2014*. CEDR.
236. Van Keulen W., Duskov M.: *Inventory study of basic knowledge on tyre/road noise. IPG. Report DWW-2005-022*. Delft, 2005.
237. Van Loon Ronald, Tollenaar Ch., van Blokland G.: *Mechanisms of acoustic aging of road surfaces*. EuroNoise 2015, Maastricht, 1013-1018.
238. Vázquez V.F., Paje S.E.: *Dynamic Stiffness Assessment of Construction Materials by the Resonant and Non-resonant Methods*, 2016.
239. Vázquez V.F., Paje S.E.: *Mechanical impedance and CPX noise of SMA pavements*. Proc. of the Acoustics. Nantes, France, 2012, 169-171.
240. Vázquez V.F., Paje S.E.: *Study of the road surface properties that control the acoustic performance of a rubberized asphalt mixture*. Applied Acoustics 102 (2016), 33-39.
241. Vuye C., Bergiers A., Vanhooreweder B.: *The acoustical durability of thin reducing asphalt layers*. Coatings 2016, 6, 21, 1-19.
242. Vuye C., Devroye G., Stuer W., van Beveren M., van den Bergh W.: *Acoustical and Mechanical Impedance Measurements on PoroElastic Road Surfaces*. EuroNoise 2015. Maastricht, 1357-1367.
243. Wasilewska M., Gardziejczyk W., Gierasimiuk P.: *Assessment of skid resistance using DFTester and CTMeter*. The 9<sup>th</sup> International Conference “Environmental Engineering. Vilnius, Lithuania, 2014.
244. Wasilewska M., Gardziejczyk W., Gierasimiuk P., Motylewicz M.: *Ocena właściwości przeciwpślizgowych nawierzchni drogowych przy wykorzystaniu urządzeń TWO, CTM i DFT*. Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury z. 63, nr 1, t. 2 (2016), 375-382.



245. Wszolek T.: *Skuteczność akustyczna walu, wykopu, pasa zieleni*. Studia i Materiały z. 64. Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Warszawa, 2011, 62-72.
246. Yamamoto K.: *Road traffic prediction model „ASJ RTN-Model 2008”*: Report of the Research Committee on Road Traffic Noise. Acoustic Science & Technique 31, 1 (2010).
247. Zakaria N.M., Yusoff N.I. Md., Hardwiyonos S., Nayan K.A.M., El-Shafie A.: *Measurements of the Stiffness and Thickness of the Pavement Asphalt Layer Using the Enhanced Resonance Search Method*. The Scientific World Journal, 2014.
248. Zelelew H.M., Papagiannakis A.T., de Leon Izeppi E.D.: *Pavement macrotecture analysis using wavelets*. International Journal of Pavement Engineering 2013, 14 (8), 725-735.
249. Zofka A., Maliszewski M.: Unikalna metoda oceny hałaśliwości nawierzchni drogowych OBSIe. II Krakowskie Dni Nawierzchni. Konferencje Specjalistyczne. Kraków, 2015.
250. Zofka E., Zofka A., Maliszewski M.: Pomiary hałaśliwości nawierzchni drogowych z wykorzystaniem metody OBSI. Nowoczesna Diagnostyka i Naprawy Nawierzchni Drogowych – Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa-Kielce, 2018.
251. Żabicki P., Gardziejczyk W.: *Acoustic barriers in the vicinity of Zambrów and Wiśniewo bypass – problem analysis*. Environmental Engineering – Through a Young Eye vol. 3. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej. Białystok, 2013, 232-240.

# HAŁAŚLIWOŚĆ NAWIERZCHNI DROGOWYCH

## Streszczenie

Nawierzchnie ciche są skuteczną i efektywną metodą walki z nadmiernym hałasem. Mogą się przyczynić do obniżenia jego poziomu w rejonie płaszczyzny kontaktu opon z nawierzchnią nawet o 10 dB. Wymaga to jednak zastosowania odpowiedniej technologii wykonania warstwy ścieralnej i właściwego jej utrzymania w okresie użytkowania drogi. Obecnie do takich nawierzchni są zaliczane nawierzchnie z asfaltu porowatego oraz cienkie warstwy asfaltowe o maksymalnym uziarnieniu kruszywa nie większym niż 8 mm. Prowadzone są także badania nad wdrożeniem nawierzchni poroelastycznych. W grupie nawierzchni betonowych korzystnym rozwiązaniem jest teksturowanie powierzchni metodą odkrytego kruszywa, a w ostatnich latach – teksturowanie z wykorzystaniem tarcz diamentowych (techniki określane jako: *Next Generation Concrete Surface* lub *Grinding & Grooving*). Pod względem akustycznym są one porównywalne z nawierzchniami asfaltowymi z mastyksu grysowego.

W monografii zaprezentowano zagadnienia związane z całokształtem problemów dotyczących hałaśliwości nawierzchni drogowych. Wyniki pomiarów maksymalnego poziomu dźwięku stanowiły podstawę do oceny metody statystycznego przejazdu (SPB). Wykazano, że uzyskane wyniki w trakcie pomiarów terenowych metodą SPB powinny być poddane analizie z uwzględnieniem wymaganego standardowego błędu estymacji ( $S_e$ ) i niepewności rozszerzonej  $U$  przy 95% przedziale ufności. Na tej podstawie mogą być wyłączone z dalszych analiz tzw. wartości odstające. Analiza wyników pomiarów hałasu metodami CPX i CPB potwierdziła ich przydatność w ocenie hałaśliwości nawierzchni. W wypadku metody CPX wskazano na konieczność zwrócenia szczególnej uwagi na opony testowe, a w metodzie CPB – na wybór pojazdów testowych.

Przeprowadzone rozważania potwierdziły wpływ makrotekstury na poziom generowanych dźwięków w wypadku nawierzchni asfaltowych o zwartej strukturze oraz nawierzchni betonowych z odkrytym kruszywem. Opracowano zależności funkcyjne pomiędzy wartością ( $MPD$ ) i logarytmem prędkości. Ustalono, że nawierzchnia z mastyksu grysowego typu SMA11 może być przyjęta w naszym kraju jako nawierzchnia referencyjna, dla której określono wartości maksymalnego poziomu dźwięku od przejazdu statystycznego pojazdu osobowego i wielocłonowe-

go pojazdu ciężarowego oraz widma dźwięku w pasmach tercjowych. Uaktualniono także opracowaną wcześniej propozycję klasyfikacji nawierzchni pod względem hałasliwości w oparciu o dwa równoważne kryteria: maksymalny poziom dźwięku od przejeżdżającego pojazdu osobowego z prędkością 80 km/h (według metody SPB) i wartość indeksu  $L_{CPX}$  (80 km/h) (według metody CPX).

Błędy związane z produkcją mieszanek mineralno-asfaltowych, wykonaniem warstwy ścieralnej czy teksturowaniem nawierzchni betonowych mogą skutkować ich niejednorodnością akustyczną bezpośrednio po wykonaniu i w okresie eksploatacji. Dotyczy to głównie warstw ze zwiększoną zawartością wolnych przestrzeni. W monografii zaproponowano propozycję założeń do systemu certyfikacji technologii budowy nawierzchni drogowych pod względem akustycznym i oceny hałasliwości nawierzchni po ich wykonaniu i na etapie użytkowania. W odniesieniu do warstw asfaltowych o zwartej strukturze i nawierzchni betonowych z odkrytym kruszywem przewidziano w tym celu wykorzystanie metody SPB wraz z oceną makrotekstury nawierzchni. W wypadku nawierzchni ze zwiększoną zawartością wolnych przestrzeni i nawierzchni betonowych o izotropowym charakterze powierzchni – zaleca się metodę CPX (ewentualnie OBSI) i SPB.

W monografii przedstawiono nomogramy prezentujące poziomy emisji hałasu drogowego w zależności od charakterystyki nawierzchni, natężenia i struktury rodzajowej ruchu, które mogą być podstawą do obliczenia równoważnego poziomu dźwięku w otoczeniu trasy drogowej.

Zgodnie z Dyrektywą Komisji UE 2015/996 z dnia 19 maja 2015 r. prognozowanie poziomu hałasu drogowego powinno być realizowane z wykorzystaniem metody CNOSSOS-EU i uwzględniać właściwości akustyczne nawierzchni drogowych. Wyniki badań poziomu hałasu metodą SPB stanowiły podstawę do ustalenia współczynników korygujących wpływ nawierzchni, które po uwzględnieniu modelu generowania hałasu od jadącego pojazdu mogą być włączone do prognozowania hałasu metodą CNOSSOS-EU, w odniesieniu do pojazdów osobowych i wieloosłonowych pojazdów ciężarowych.

# NOISINESS OF ROAD SURFACES

## Summary

Low-noise pavements are an effective method of fighting excessive noise. They can contribute to the reduction of tyre/road noise level by even up to 10 dB. However, it requires the use of appropriate technology for the wearing course and its proper maintenance during the use of the road. Currently, this type of pavement surfaces include porous asphalt and thin asphalt layers with a maximum grain size of no more than 8 mm. Research is also being carried out on the implementation of poroelastic pavements. Among the cement concrete pavements, the preferred choice of solution is texturing the surface by exposed aggregate cement concrete, and in recent years - texturing using diamond discs (techniques known as Next Generation Concrete Surface and Grinding & Grooving). In terms of acoustics, they are comparable with asphalt surfaces made of stone mastic asphalt.

The monograph presents issues related to the overall problems related to the noisiness of road surfaces. The results of the maximum sound level measurements were the basis for the assessment of the SPB - Statistical Pass-By method. It was shown that the results obtained during field measurements using the SPB method should be analysed taking into account the required standard estimation error ( $S_e$ ) at a 95% confidence interval. As a result, the so-called outliers can be excluded from further analyses. The analysis of the results of noise measurements conducted with the methods CPX (Close-Proximity method) and CPB (Controlled Pass-By method) confirmed their usefulness in the assessment of noise of the surface. In the case of the CPX method, it was pointed out that special attention should be paid to the test tyre, and in the CPB method - to the choice of test vehicles.

The results of considerations confirmed the effect of macrotexture on the level of generated sounds in the case of dense asphalt concrete and exposed aggregate cement concrete (EACC). Functional relations between the noise level and mean profile depth ( $MPD$ ) and the logarithm of speed were developed. It was established that the stone mastic asphalt type SMA11 can be accepted in our country as the reference surface, for which the maximum sound level values were determined from the statistical passenger car and multi-axle heavy vehicle and third-octave band frequency. The previously proposed surface classification for noise has also been updated based on two equivalent criteria: maximum sound level from a pass-

ing statistical passenger car at 80 km/h (according to the SPB method) and the value of the  $L_{CPX}$  (80 km/h) (according to the CPX method).

Errors associated with the production of asphalt mixes, laying of the wearing course or texturing of concrete surfaces may result in their acoustic inhomogeneity immediately after and during the period of operation. This applies mainly to layers with increased air void content. The monograph contains a proposition of assumptions of a system for the certification of technology for the construction of road surfaces in terms of acoustics and a method for assessing the noise of the surfaces at the stage of their use. For dense asphalt concrete and exposed aggregate cement concrete the SPB method is used, along with the assessment of the surface macrotexture. In the case of a surface with an increased air void content and concrete isotropic surfaces - the CPX (possibly OBSI) and SPB methods are applied. The monograph presents nomograms of levels of road noise emissions depending on the characteristics of the surface, intensity and structure of the traffic, which may be the basis for calculating the equivalent sound level in the vicinity of the road.

Pursuant to the EU Commission Directive 2015/996 of 19 May 2015, forecasting of the level of road noise should be implemented using the CNOSSOS-EU method and take into account the acoustic properties of road surfaces. SPB noise level results were used as the basis for determining the factors correcting the surface effect, which, after taking into account the noise generation model from a passing vehicle, may be included in the CNOSSOS-EU noise forecasting for vehicles of category 1 and 3.

# Załączniki

Załącznik Z1. Zestawienie zależności regresyjnych w odniesieniu do nawierzchni badanych metodą SPB

Z1.1. Analiza wyników pomiarów metodą SPB – pojazdy osobowe

Z1.2. Analiza wyników pomiarów metodą SPB – wielozłonowe pojazdy ciężarowe (kategoria 2b)

Z1.3. Analiza wyników pomiarów metodą SPB – wielozłonowe pojazdy ciężarowe (kategoria 2a)

Z1.4. Analiza wyników pomiarów metodą CPB – pojazdy osobowe

Załącznik Z2. Poziomy hałas według metody CPX na odcinkach testowych

Z.2.1. Poziomy dźwięków na nawierzchni BBTM8

Z.2.2. Poziomy dźwięków na nawierzchni PAC8

Z.2.3. Poziomy dźwięków na nawierzchni SMA5

Z.2.4. Poziomy dźwięków na nawierzchni SMA11

## Z1.1. Analiza wyników pomiarów metodą SPB – pojazdy osobowe

Oznaczenie drogi	Przed eliminacją wyników odstających						Po eliminacji wyników odstających													
	A	B	n	V <sub>gr</sub>	R <sup>2</sup>	S <sub>e</sub>	Poziomy ufności			V <sub>gr</sub>	R <sup>2</sup>	S <sub>e</sub>	Poziomy ufności							
							V <sub>gr</sub>	70	80				110	V <sub>gr</sub>	70	80	110			
Nawierzchnie asfaltowe (AC16)																				
A2	31,1	25,3	132	124,2	0,63	1,53	0,26	0,89	0,70	0,32	30,4	25,6	131	124,0	0,64	1,49	0,26	0,86	0,68	0,31
DK1	32,3	24,1	99	93,1	0,63	1,72	0,34	0,57	0,42	0,43	31,2	25,2	97	93,4	0,71	1,50	0,30	0,51	0,37	0,38
DK1	26,4	27,6	152	85,6	0,61	1,87	0,30	0,43	0,32	0,49	26,0	27,7	141	86,3	0,72	1,46	0,24	0,36	0,26	0,39
DK6	22,8	30,1	159	96,3	0,68	1,71	0,27	0,52	0,37	0,33	14,2	34,4	151	97,0	0,81	1,30	0,21	0,44	0,31	0,26
DK22	17,7	32,4	162	84,57	0,68	1,55	0,24	0,37	0,25	0,47	18,3	32,2	160	84,0	0,69	1,47	0,23	0,36	0,24	0,45
Nawierzchnie asfaltowe (AC12)																				
DK8	38,2	21,1	106	90,8	0,42	1,97	0,38	0,66	0,46	0,55	32,7	23,8	94	91,8	0,62	1,47	0,30	0,55	0,38	0,43
DK8	31,5	24,7	99	85,9	0,31	2,26	0,45	0,79	0,51	0,91	27,9	26,4	79	87,1	0,59	1,35	0,30	0,56	0,35	0,59
DK22	12,7	33,3	156	91,2	0,67	1,74	0,27	0,51	0,35	0,41	9,4	34,9	149	91,2	0,76	1,48	0,24	0,44	0,30	0,36
Ulica	25,9	27,6	88	52,3	0,63	1,39	0,29	0,65	0,89	1,50	25,9	27,6	88	52,3	0,63	1,39	0,29	0,65	0,89	1,50
Ulica	32,1	23,2	76	57,6	0,46	1,39	0,32	0,59	0,89	1,66	33,1	22,6	74	57,5	0,49	1,30	0,30	0,55	0,84	1,56
Ulica	12,7	34,4	114	64,6	0,75	1,43	0,27	0,30	0,44	0,90	12,7	34,4	114	64,6	0,75	1,43	0,27	0,30	0,44	0,90
Ulica	12,9	33,9	78	57,9	0,70	1,28	0,29	0,51	0,76	1,43	12,9	33,9	78	57,9	0,70	1,28	0,29	0,51	0,76	1,43
Ulica	15,8	32,3	99	61,2	0,66	1,70	0,34	0,44	0,65	1,25	9,1	36,1	96	61,2	0,75	1,45	0,29	0,38	0,57	1,11
Ulica	25,7	26,9	98	58,1	0,69	1,60	0,32	0,44	0,60	1,05	26,9	26,3	95	58,3	0,72	1,48	0,30	0,41	0,56	0,99

Z1.1. Analiza wyników pomiarów metodą SPB – pojazdy osobowe – cd.

Oznaczenie drogi	Przed eliminacją wyników odstających										Po eliminacji wyników odstających									
	A	B	n	V <sub>gr</sub>	R <sup>2</sup>	S <sub>e</sub>	Poziomy ufnosci			V <sub>gr</sub>	R <sup>2</sup>	S <sub>e</sub>	Poziomy ufnosci							
							V <sub>gr</sub>	70	80				110	V <sub>gr</sub>	70	80	110			
Nawierzchnie asfaltowe (SMA12)																				
DK1	28,1	26,6	114	91,8	0,52	1,60	0,30	0,64	0,41	0,48	27,2	27,1	112	92,0	0,57	1,48	0,28	0,60	0,39	0,45
DK6	28,3	27,0	143	101,1	0,49	1,62	0,27	0,78	0,54	0,32	25,9	28,2	140	101,5	0,55	1,48	0,25	0,73	0,51	0,29
DK8	29,1	25,9	92	92,9	0,62	1,77	0,37	0,64	0,46	0,48	26,8	27,0	84	93,0	0,76	1,35	0,29	0,50	0,36	0,38
DK8	39,5	21,1	156	87,0	0,54	1,60	0,25	0,39	0,28	0,41	41,3	20,2	153	87,3	0,55	1,49	0,24	0,37	0,26	0,38
DK8	29,5	25,7	144	88,2	0,62	1,62	0,27	0,43	0,30	0,42	26,3	27,3	142	88,5	0,69	1,48	0,25	0,40	0,28	0,38
DK8	24,8	28,2	139	94,5	0,57	1,74	0,29	0,62	0,42	0,40	28,9	26,2	131	95,4	0,62	1,43	0,25	0,54	0,37	0,33
DK10	26,5	27,4	158	98,7	0,61	1,55	0,24	0,58	0,40	0,29	23,0	29,1	153	99,2	0,69	1,35	0,22	0,52	0,36	0,26
Nawierzchnie asfaltowe (SMA11)																				
S8	24,9	28,5	63	108,6	0,82	0,99	0,25	0,70	0,52	0,25	24,9	28,5	63	108,6	0,82	0,99	0,25	0,70	0,52	0,25
S8	22,9	29,9	69	104,2	0,71	1,24	0,30	0,86	0,61	0,32	22,9	29,9	69	104,2	0,71	1,24	0,30	0,86	0,61	0,32
DK50	17,1	32,1	27	93,7	0,67	1,31	0,52	1,30	0,83	0,83	34,3	23,3	17	93,1	0,87	0,59	0,30	0,68	0,44	0,47
DK50	25,7	28,2	29	93,9	0,63	1,11	0,42	1,16	0,73	0,72	14,4	33,8	20	95,0	0,88	0,63	0,29	0,88	0,55	0,50
DW50	24,4	28,7	80	103,5	0,77	1,13	0,25	0,65	0,47	0,27	24,4	28,7	80	103,5	0,77	1,13	0,25	0,65	0,47	0,27
DW780	24,1	27,6	87	71,3	0,77	1,01	0,22	0,22	0,27	0,66	24,1	27,6	87	71,3	0,77	1,01	0,22	0,22	0,27	0,66
DW780	18,4	30,4	50	88,7	0,65	1,12	0,32	0,74	0,43	0,68	18,8	30,2	49	88,7	0,68	1,05	0,30	0,70	0,41	0,65



Z1.1. Analiza wyników pomiarów metodą SPB – pojazdy osobowe – cd.

Oznaczenie drogi	Przed eliminacją wyników odstających										Po eliminacji wyników odstających										
	A	B	n	V <sub>gr</sub>	R <sup>2</sup>	S <sub>e</sub>	Poziomy ufnosci			A	B	n	V <sub>gr</sub>	R <sup>2</sup>	S <sub>e</sub>	Poziomy ufnosci					
							V <sub>gr</sub>	70	80							110	V <sub>gr</sub>	70	80	110	
Nawierzchnie asfaltowe (SMA11 - cd.)																					
DW780	13,3	33,0	95	86,1	0,84	1,02	0,21	0,34	0,23	0,38	13,3	33,0	95	86,1	0,84	1,02	0,21	0,34	0,23	0,38	
DW780	25,6	27,8	66	83,9	0,51	1,25	0,31	0,61	0,34	0,85	28,8	26,2	65	84,1	0,50	1,20	0,30	0,61	0,33	0,83	
DW780	41,9	19,8	18	80,9	0,62	0,82	0,41	0,66	0,41	1,17	41,9	19,8	18	80,9	0,62	0,82	0,41	0,66	0,41	1,17	
Ulica	26,0	27,8	95	70,7	0,62	1,28	0,26	0,26	0,36	0,90	26,0	27,8	95	70,7	0,62	1,28	0,26	0,26	0,36	0,90	
Nawierzchnie asfaltowe (SMA10)																					
DK5	29,3	26,4	146	86,6	0,59	1,34	0,22	0,40	0,25	0,44	29,3	26,4	146	86,6	0,59	1,34	0,22	0,40	0,25	0,44	
DK8	33,7	23,8	109	102,7	0,46	1,67	0,32	0,89	0,63	0,35	35,3	23,0	105	103,1	0,51	1,47	0,29	0,80	0,57	0,31	
DK10	26,6	26,7	150	84,5	0,64	1,61	0,26	0,37	0,27	0,46	26,4	26,8	145	84,8	0,70	1,41	0,23	0,33	0,24	0,40	
Nawierzchnie asfaltowe (SMA8)																					
Ulica	16,1	31,1	49	60,5	0,75	1,26	0,36	0,49	0,73	1,41	16,3	31,1	45	60,3	0,82	1,00	0,30	0,42	0,63	1,22	
Nawierzchnie asfaltowe (SMA5)																					
Ulica	14,1	31,8	85	68,2	0,57	1,73	0,37	0,38	0,56	1,30	14,4	31,5	83	68,2	0,69	1,36	0,30	0,30	0,44	1,03	
Nawierzchnie asfaltowe (MNU, GUF)																					
DK10	23,3	28,3	118	85,4	0,67	1,58	0,29	0,43	0,31	0,50	22,0	28,9	117	85,5	0,71	1,45	0,27	0,40	0,28	0,46	
DK11	16,7	31,6	146	94,5	0,67	1,59	0,26	0,54	0,37	0,36	14,3	32,8	142	94,7	0,76	1,32	0,22	0,46	0,31	0,29	
Nawierzchnie asfaltowe (Ruflex)																					
DK11	36,7	22,6	108	94,8	0,46	1,43	0,27	0,68	0,44	0,41	36,7	22,6	106	94,8	0,49	1,43	0,27	0,68	0,44	0,41	
DK92	27,8	27,6	146	90,0	0,59	1,61	0,26	0,49	0,33	0,42	28,9	27,0	144	90,2	0,63	1,47	0,24	0,45	0,30	0,38	

Z1.1. Analiza wyników pomiarów metodą SPB – pojazdy osobowe – cd.

Oznaczenie drogi	Przed eliminacją wyników odstających						Po eliminacji wyników odstających													
	A	B	n	V <sub>gr</sub>	R <sup>2</sup>	S <sub>e</sub>	Poziomy ufnosci			A	B	n	V <sub>gr</sub>	R <sup>2</sup>	S <sub>e</sub>	Poziomy ufnosci				
							V <sub>gr</sub>	70	80							110	V <sub>gr</sub>	70	80	110
Nawierzchnie asfaltowe powierzchniowo utrwalone																				
DK8	29,1	27,4	118	98,7	0,54	1,55	0,28	0,75	0,51	0,36	27,3	28,4	115	98,9	0,59	1,46	0,27	0,71	0,48	0,34
DK17	30,5	26,4	148	105,1	0,55	1,67	0,27	0,75	0,54	0,28	26,5	28,4	145	104,8	0,63	1,49	0,25	0,68	0,49	0,26
DW253	12,2	35,4	117	73,7	0,77	1,60	0,29	0,30	0,32	0,69	13,6	34,7	114	73,9	0,79	1,49	0,28	0,29	0,30	0,64
Nawierzchnia asfaltowa porowata (PAC11)																				
DK50-2011	29,9	24,9	36	92,2	0,44	1,69	0,57	1,30	0,83	0,95	35,6	22,2	20	95,2	0,84	0,71	0,30	0,72	0,49	0,45
DK50-2012	19,3	31,3	36	96,7	0,75	1,59	0,54	1,04	0,75	0,64	18,4	31,6	27	95,6	0,94	0,76	0,30	0,55	0,40	0,37
DK50-2014	34,6	23,8	72	99,6	0,53	1,17	0,27	0,86	0,58	0,36	34,6	23,8	72	99,6	0,53	1,17	0,27	0,86	0,58	0,36
Cienka warstwa z betonu asfaltowego (BBTM8)																				
DW780-2011	26,7	22,9	88	81,8	0,60	1,23	0,26	0,38	0,26	0,58	26,7	22,9	88	81,8	0,60	1,23	0,26	0,38	0,26	0,58
DW780-2012	13,2	30,6	93	88,2	0,74	1,13	0,23	0,45	0,28	0,43	13,2	30,6	93	88,2	0,74	1,13	0,23	0,45	0,28	0,43
DW780-2014	18,6	30,0	67	81,6	0,71	1,17	0,28	0,43	0,29	0,68	18,6	30,0	67	81,6	0,71	1,17	0,28	0,43	0,29	0,68
DW780-2014	22,5	29,2	71	76,5	0,74	1,17	0,28	0,32	0,29	0,71	22,5	29,2	71	76,5	0,74	1,17	0,28	0,32	0,29	0,71
Nawierzchnia asfaltowa porowata (PAC8)																				
DW780-2011	16,6	28,3	106	81,2	0,83	1,19	0,23	0,28	0,23	0,40	16,6	28,3	106	81,2	0,83	1,19	0,23	0,28	0,23	0,40
DW780-2012	11,6	32,0	110	74,0	0,65	1,63	0,31	0,33	0,34	0,83	9,7	33,0	106	73,8	0,73	1,42	0,27	0,29	0,31	0,74
DW780-2014 (sucha)	16,4	31,9	43	80,4	0,83	1,14	0,35	0,44	0,35	0,71	17,6	31,3	40	80,5	0,88	0,94	0,30	0,38	0,30	0,60
DW780-2014 (wilgotna)	14,6	33,6	95	71,6	0,73	1,56	0,32	0,32	0,38	0,42	15,5	33,1	94	71,6	0,77	1,42	0,29	0,29	0,34	0,77
DW780-2016	7,9	37,4	53	78,3	0,69	1,25	0,35	0,49	0,35	1,11	15,7	33,3	47	78,8	0,73	1,03	0,30	0,44	0,31	0,94

Z1.1. Analiza wyników pomiarów metodą SPB – pojazdy osobowe – cd.

Oznaczenie drogi	Przed eliminacją wyników odstających						Po eliminacji wyników odstających													
	A	B	n	V <sub>gr</sub>	R <sup>2</sup>	S <sub>e</sub>	Poziomy ufności			n	V <sub>gr</sub>	R <sup>2</sup>	S <sub>e</sub>	Poziomy ufności						
							70	80	110					70	80	110				
Dwuwarstwowa nawierzchnia asfaltowa porowata (DPAC8+16)																				
DW967-2014	12,2	31,1	59	75,4	0,73	1,18	0,31	0,35	0,33	0,88	14,2	30,0	58	75,2	0,75	1,09	0,29	0,32	0,31	0,83
DW967-2016	15,9	31,7	68	68,9	0,80	1,20	0,29	0,29	0,38	0,84	15,9	31,7	68	68,9	0,80	1,20	0,29	0,29	0,38	0,84
Nawierzchnie kostkowe (kostka kamienna)																				
DK65	23,8	32,9	115	76,6	0,68	1,82	0,34	0,37	0,34	0,74	19,6	35,1	107	76,4	0,79	1,44	0,28	0,31	0,29	0,62
Ulica	24,0	33,5	82	41,9	0,56	2,13	0,47	1,56	1,93	2,84	14,5	39,8	62	41,3	0,85	1,17	0,30	1,04	1,19	1,88
Nawierzchnie z betonu cementowego (teksturowanie: tkanina jutowa, metoda szczotkowania)																				
DK8	24,8	28,9	140	85,9	0,43	2,47	0,41	0,65	0,45	0,73	16,1	33,2	129	86,6	0,72	1,50	0,26	0,42	0,29	0,46
DK50	48,3	17,0	130	101,2	0,28	1,99	0,35	0,84	0,60	0,39	48,6	16,9	117	102,3	0,50	1,48	0,27	0,68	0,49	0,30
DK50	6,9	37,6	85	83,5	0,74	1,66	0,36	0,52	0,37	0,69	9,6	36,2	79	84,0	0,81	1,33	0,30	0,44	0,31	0,56
A4	16,6	32,5	139	103,7	0,73	1,28	0,33	0,61	0,44	0,34	23,0	29,4	137	104,3	0,69	1,17	0,20	0,62	0,22	0,21
A4	28,2	27,5	117	117,0	0,58	1,33	0,24	0,99	0,75	0,27	28,2	27,5	117	117,0	0,58	1,33	0,24	0,99	0,75	0,27
A4	36,2	23,1	81	108,1	0,53	1,21	0,27	0,96	0,69	0,27	36,2	23,1	81	108,1	0,53	1,21	0,27	0,96	0,69	0,27
DK18	18,9	31,3	114	124,2	0,75	1,16	0,22	0,86	0,68	0,28	18,9	31,3	114	124,2	0,75	1,16	0,22	0,86	0,68	0,28
DK18	18,0	31,1	116	126,9	0,76	1,11	0,20	0,87	0,69	0,29	18,0	31,1	116	126,9	0,76	1,11	0,20	0,87	0,69	0,29
S8	20,4	30,4	43	106,1	0,70	1,25	0,39	1,20	0,86	0,40	36,8	22,3	38	108,4	0,64	0,91	0,30	1,12	0,81	0,30
Droga lokalna	16,3	31,7	92	60,1	0,72	1,70	0,35	0,45	0,63	1,15	17,3	31,2	88	60,1	0,78	1,42	0,30	0,38	0,53	0,98
Nawierzchnie z betonu cementowego (teksturowanie: metoda odkrytego kruszywa)																				
A4	15,1	33,6	141	128,3	0,78	1,30	0,22	0,82	0,65	0,30	15,1	33,6	141	128,3	0,78	1,30	0,22	0,82	0,65	0,30
S8	14,5	33,7	181	126,4	0,77	1,26	0,18	0,72	0,57	0,22	14,5	33,7	181	126,4	0,77	1,26	0,18	0,72	0,57	0,22
S8	12,9	35,1	164	122,6	0,74	1,37	0,21	0,82	0,64	0,26	12,9	35,1	164	122,6	0,74	1,37	0,21	0,82	0,64	0,26
S8	12,2	34,2	134	125,6	0,82	1,07	0,18	0,72	0,57	0,24	12,2	34,2	134	125,6	0,82	1,07	0,18	0,72	0,57	0,24
S8	20,6	30,2	87	110,1	0,81	1,19	0,25	0,67	0,51	0,25	20,6	30,2	87	110,1	0,81	1,19	0,25	0,67	0,51	0,25
S8	19,6	31,1	133	125,4	0,80	1,26	0,22	0,72	0,57	0,27	19,6	31,1	133	125,4	0,80	1,26	0,22	0,72	0,57	0,27
S8	27,1	28,5	77	104,8	0,43	1,91	0,43	1,38	0,98	0,46	26,6	29,0	61	104,7	0,69	1,18	0,30	0,93	0,66	0,32
S8	29,3	26,4	82	110,8	0,66	1,16	0,25	0,87	0,64	0,25	29,3	26,4	82	110,8	0,66	1,16	0,25	0,87	0,64	0,25

Z1.2. Analiza wyników pomiarów metodą SPB – wieloclonowe pojazdy ciężarowe (kategoria 2b)

Lokalizacja przekroju badawczego	Przed eliminacją wyników odstających							Po eliminacji wyników odstających												
	A	B	n	V <sub>gr</sub>	R <sup>2</sup>	S <sub>e</sub>	Poziomy ufności			A	B	n	V <sub>gr</sub>	R <sup>2</sup>	S <sub>e</sub>	Poziomy ufności				
							V <sub>gr</sub>	70	80							85	V <sub>gr</sub>	70	80	85
Nawierzchnie asfaltowe (AC16)																				
A2	46,3	21,4	44	76,1	0,19	1,88	0,57	0,76	0,65	0,88	42,0	23,6	41	76,1	0,27	1,67	0,53	0,72	0,58	0,78
DK1	32,0	29,6	61	77,0	0,28	2,22	0,57	0,77	0,60	0,78	31,0	30,0	58	77,0	0,35	1,88	0,49	0,67	0,53	0,68
DK1	43,0	23,7	61	75,0	0,15	2,19	0,56	0,71	0,70	0,99	51,6	19,0	58	74,7	0,32	1,97	0,52	0,65	0,66	0,94
DK6	45,1	22,2	49	82,1	0,23	1,70	0,49	0,96	0,51	0,52	46,6	21,4	47	82,1	0,27	1,50	0,44	0,86	0,46	0,47
DK22	30,2	29,9	45	76,3	0,28	1,76	0,53	0,77	0,61	0,88	30,2	29,9	45	76,3	0,28	1,76	0,53	0,77	0,61	0,88
Nawierzchnie asfaltowe (AC12)																				
DK8	40,1	24,9	42	74,8	0,28	1,79	0,56	0,67	0,67	0,90	40,1	24,9	42	74,8	0,28	1,79	0,56	0,67	0,67	0,90
DK8	19,0	36,2	46	72,4	0,42	1,39	0,41	0,45	0,70	0,99	19,0	36,2	46	72,4	0,42	1,39	0,41	0,45	0,70	0,99
DK22	44,8	22,0	47	80,1	0,08	2,55	0,75	1,51	0,75	0,95	27,4	31,1	39	79,8	0,27	1,79	0,58	1,15	0,58	0,74
Nawierzchnie asfaltowe powierzchniowo utrwalone																				
DK8	15,4	37,5	48	81,0	0,20	1,94	0,56	1,51	0,58	0,73	10,4	40,0	44	81,0	0,28	1,69	0,50	1,34	0,52	0,64
DK17	36,9	26,4	64	80,4	0,35	1,28	0,32	0,64	0,32	0,39	36,9	26,4	64	80,4	0,35	1,28	0,32	0,64	0,32	0,39
DW253	90,1	-2,3	36	68,5	0,00	2,60	0,88	0,90	1,40	1,75	32,4	28,4	29	70,9	0,30	1,37	0,52	0,55	0,97	1,37
Nawierzchnie kostkowe (kostka kamienna)																				
DK65	17,5	40,0	54	58,6	0,80	1,89	0,52	0,67	0,92	1,04	17,5	40,0	54	58,6	0,80	1,89	0,52	0,67	0,92	1,04

Z1.2. Analiza wyników pomiarów metodą SPB – wieloczlónowe pojazdy ciężarowe (kategoria 2b) – cd.

Oznaczenie drogi	Przed eliminacją wyników odstających										Po eliminacji wyników odstających									
	A	B	n	V <sub>gr</sub>	R <sup>2</sup>	S <sub>e</sub>	Poziomy ufnosci			A	B	n	V <sub>gr</sub>	R <sup>2</sup>	S <sub>e</sub>	Poziomy ufnosci				
							V <sub>gr</sub>	70	80							85	V <sub>gr</sub>	70	80	85
Nawierzchnie asfaltowe (SMA12)																				
DK1	43,8	22,3	67	79,3	0,22	1,35	0,33	0,65	0,33	0,45	42,1	23,1	64	79,3	0,27	1,26	0,31	0,62	0,32	0,43
DK6	49,8	19,8	57	81,4	0,13	1,75	0,46	1,00	0,48	0,53	52,0	18,5	49	81,4	0,31	1,00	0,29	0,60	0,29	0,33
DK8	37,3	26,3	58	77,0	0,18	1,99	0,52	0,82	0,58	0,84	32,6	28,7	56	77,0	0,27	1,66	0,45	0,70	0,49	0,71
DK8-mokra	46,8	21,9	40	72,7	0,50	1,21	0,39	0,40	0,49	0,62	46,8	21,9	40	72,7	0,50	1,21	0,39	0,40	0,49	0,62
DK8-wilgot.	47,0	20,9	45	73,2	0,38	1,44	0,43	0,46	0,54	0,69	47,0	20,9	45	73,2	0,38	1,44	0,43	0,46	0,54	0,69
DK8-sucha	55,2	16,4	58	79,8	0,11	1,69	0,44	0,83	0,44	0,56	40,7	20,9	55	79,8	0,34	1,06	0,29	0,52	0,29	0,37
DK10	12,4	38,9	46	82,9	0,40	1,77	0,53	1,18	0,57	0,55	12,4	38,9	46	82,9	0,40	1,77	0,53	1,18	0,57	0,55
Nawierzchnie asfaltowe (SMA11)																				
S8	18,0	36,4	42	84,9	0,31	0,98	0,30	1,49	0,54	0,30	18,0	36,4	42	84,9	0,31	0,98	0,30	1,49	0,54	0,30
S8	29,3	30,7	35	82,8	0,34	1,31	0,45	1,20	0,50	0,48	29,3	30,7	35	82,8	0,34	1,31	0,45	1,20	0,50	0,48
DK50-2011	20,7	34,3	66	81,0	0,37	1,30	0,32	0,78	0,32	0,40	20,7	34,3	66	81,0	0,37	1,30	0,32	0,78	0,32	0,40
DK50-2014	28,2	30,9	49	78,8	0,52	1,01	0,29	0,53	0,30	0,40	28,2	30,9	49	78,8	0,52	1,01	0,29	0,53	0,30	0,40
Nawierzchnie asfaltowe (SMA10)																				
DK5	19,6	35,2	55	78,5	0,41	1,31	0,36	0,68	0,37	0,53	19,6	35,2	55	78,5	0,41	1,31	0,36	0,68	0,37	0,53
DK8	37,3	25,7	55	80,6	0,26	1,28	0,35	0,80	0,35	0,44	37,3	25,7	55	80,6	0,26	1,28	0,35	0,80	0,35	0,44
DK10	33,9	27,2	50	75,2	0,33	2,01	0,57	0,67	0,65	0,83	23,4	33,0	48	74,9	0,59	1,37	0,40	0,47	0,46	0,60
Nawierzchnie asfaltowe (MNU, GUF1)																				
DK10	11,6	38,5	45	81,4	0,45	1,18	0,36	0,92	0,37	0,43	11,6	38,5	45	81,4	0,45	1,18	0,36	0,92	0,37	0,43
DK11	39,6	24,5	39	78,4	0,15	2,05	0,67	1,16	0,69	0,95	39,4	24,7	36	78,2	0,25	1,82	0,62	1,05	0,64	0,87

Z1.2. Analiza wyników pomiarów metodą SPB – wielocłonowe pojazdy ciężarowe (kategoria 2b) – cd.

Oznaczenie drogi	Przed eliminacją wyników odstających							Po eliminacji wyników odstających												
	A	B	n	V <sub>gr</sub>	R <sup>2</sup>	S <sub>e</sub>	Poziomy ufnosci			A	B	n	V <sub>gr</sub>	R <sup>2</sup>	S <sub>e</sub>	Poziomy ufnosci				
							V <sub>gr</sub>	70	80							85	V <sub>gr</sub>	70	80	85
Nawierzchnie asfaltowe (Ruflex)																				
DK11	39,4	25,4	52	76,6	0,26	1,64	0,46	0,66	0,51	0,72	39,4	25,4	52	76,6	0,26	1,64	0,46	0,66	0,51	0,72
DK92	27,8	31,9	72	76,2	0,53	1,12	0,26	0,37	0,31	0,43	27,8	31,9	72	76,2	0,53	1,12	0,26	0,37	0,31	0,43
Nawierzchnia asfaltowa porowata (PAC11)																				
DK50-2011	21,2	32,6	97	83,7	0,16	1,83	0,37	1,23	0,47	0,38	23,3	31,2	86	83,7	0,39	0,99	0,21	0,70	0,27	0,22
DK50-2012	33,8	26,8	86	83,9	0,18	1,40	0,30	1,04	0,40	0,31	12,4	38,0	84	83,9	0,37	1,14	0,25	0,87	0,33	0,26
DK50-2014	28,6	29,8	17	83,5	0,26	1,24	0,64	2,21	0,82	0,67	28,6	29,8	17	83,5	0,26	1,24	0,64	2,21	0,82	0,67
Cienka warstwa z betonu asfaltowego (PAC8 - BBTM8)																				
DW780-2011	5,0	39,8	21	78,6	0,45	2,26	1,03	1,49	1,05	1,26	21,4	30,8	14	77,5	0,68	1,15	0,67	0,89	0,70	0,85
DW780-2014	-20,8	55,3	14	75,4	0,69	1,00	0,58	0,95	0,84	1,35	-20,8	55,3	14	75,4	0,69	1,00	0,58	0,95	0,84	1,35
Dwuwarstwowa nawierzchnia asfaltowa porowata (DPAC8+16)																				
DW967-2016	56,1	14,2	19	64,5	0,11	1,60	0,77	1,06	2,07	2,58	71,7	5,3	17	63,9	0,03	1,31	0,67	0,98	1,88	2,33

Z1.2. Analiza wyników pomiarów metodą SPB – wieloczlónowe pojazdy ciężarowe (kategoria 2b) – cd.

Oznaczenie drogi	Przed eliminacją wyników odstających										Po eliminacji wyników odstających											
	A	B	n	V <sub>gr</sub>	R <sup>2</sup>	S <sub>e</sub>	Poziomy ufnosci					A	B	n	V <sub>gr</sub>	R <sup>2</sup>	S <sub>e</sub>	Poziomy ufnosci				
							V <sub>gr</sub>	70	80	85	V <sub>gr</sub>							70	80	85		
Nawierzchnie z betonu cementowego (teksturowanie: tkanina jutowa, metoda szrotkowania)																						
DK8	-10,8	53,2	52	76,4	0,42	2,52	0,70	0,98	0,79	1,09	4,6	44,9	48	75,9	0,47	1,92	0,56	0,75	0,65	0,90		
DK50	40,4	26,0	86	80,0	0,14	2,43	0,52	0,98	0,52	0,64	24,4	34,4	72	80,3	0,26	1,81	0,43	0,93	0,43	0,55		
DK50	51,9	19,5	20	80,3	0,08	1,59	0,75	2,13	0,75	1,12	46,5	22,2	19	80,4	0,13	1,36	0,66	1,85	0,66	0,96		
A4	45,4	22,8	52	84,4	0,07	1,72	0,48	1,93	0,72	0,48	45,4	22,8	52	84,4	0,07	1,72	0,48	1,93	0,72	0,48		
A4	25,0	34,5	32	86,2	0,08	1,41	0,51	3,92	1,49	0,57	25,0	34,5	32	86,2	0,08	1,41	0,51	3,92	1,49	0,57		
A4	117,4	-13,8	25	85,6	0,04	2,88	1,19	7,88	2,89	1,23	-40,8	68,2	21	85,4	0,27	1,51	0,69	4,68	1,67	0,70		
DK18	-5,3	48,9	86	86,2	0,24	1,27	0,27	1,72	0,67	0,30	-6,8	49,6	84	86,2	0,26	1,22	0,27	1,67	0,64	0,28		
DK18	16,1	37,9	81	86,4	0,08	1,58	0,35	2,61	1,01	0,40	-5,3	49,1	64	86,4	0,25	1,12	0,28	1,95	0,75	0,31		
S8	-31,5	63,1	42	84,0	0,57	1,57	0,49	1,47	0,61	0,50	-31,5	63,1	42	84,0	0,57	1,57	0,49	1,47	0,61	0,50		
Nawierzchnie z betonu cementowego (teksturowanie: metoda odkrytego kruszywa)																						
A4	54,1	17,3	49	85,0	0,07	1,39	0,40	1,66	0,64	0,40	42,4	23,3	42	85,0	0,26	0,87	0,27	1,11	0,44	0,27		
S8	44,8	21,9	50	85,8	0,08	1,36	0,39	1,95	0,75	0,40	44,8	21,9	50	85,8	0,08	1,36	0,39	1,95	0,75	0,40		
S8	26,0	32,0	37	84,9	0,26	0,89	0,30	1,57	0,56	0,30	26,0	32,0	37	84,9	0,26	0,89	0,30	1,57	0,56	0,30		
S8	26,9	31,6	68	84,6	0,25	1,43	0,35	1,15	0,47	0,35	26,9	31,6	68	84,6	0,25	1,43	0,35	1,15	0,47	0,35		
S8	19,8	34,7	16	79,2	0,71	0,96	0,52	0,85	0,52	0,64	19,8	34,7	16	79,2	0,71	0,96	0,52	0,85	0,52	0,64		
S8	27,3	30,8	81	85,1	0,16	1,22	0,27	1,35	0,50	0,27	25,1	31,9	71	85,1	0,27	0,81	0,19	1,12	0,41	0,19		
S8	40,4	24,8	58	85,8	0,17	1,21	0,32	1,32	0,54	0,32	25,7	32,4	56	85,8	0,29	1,10	0,29	1,25	0,51	0,30		
S8	25,9	31,8	64	85,9	0,35	1,10	0,27	0,91	0,36	0,28	25,9	31,8	64	83,9	0,35	1,10	0,27	0,91	0,36	0,28		

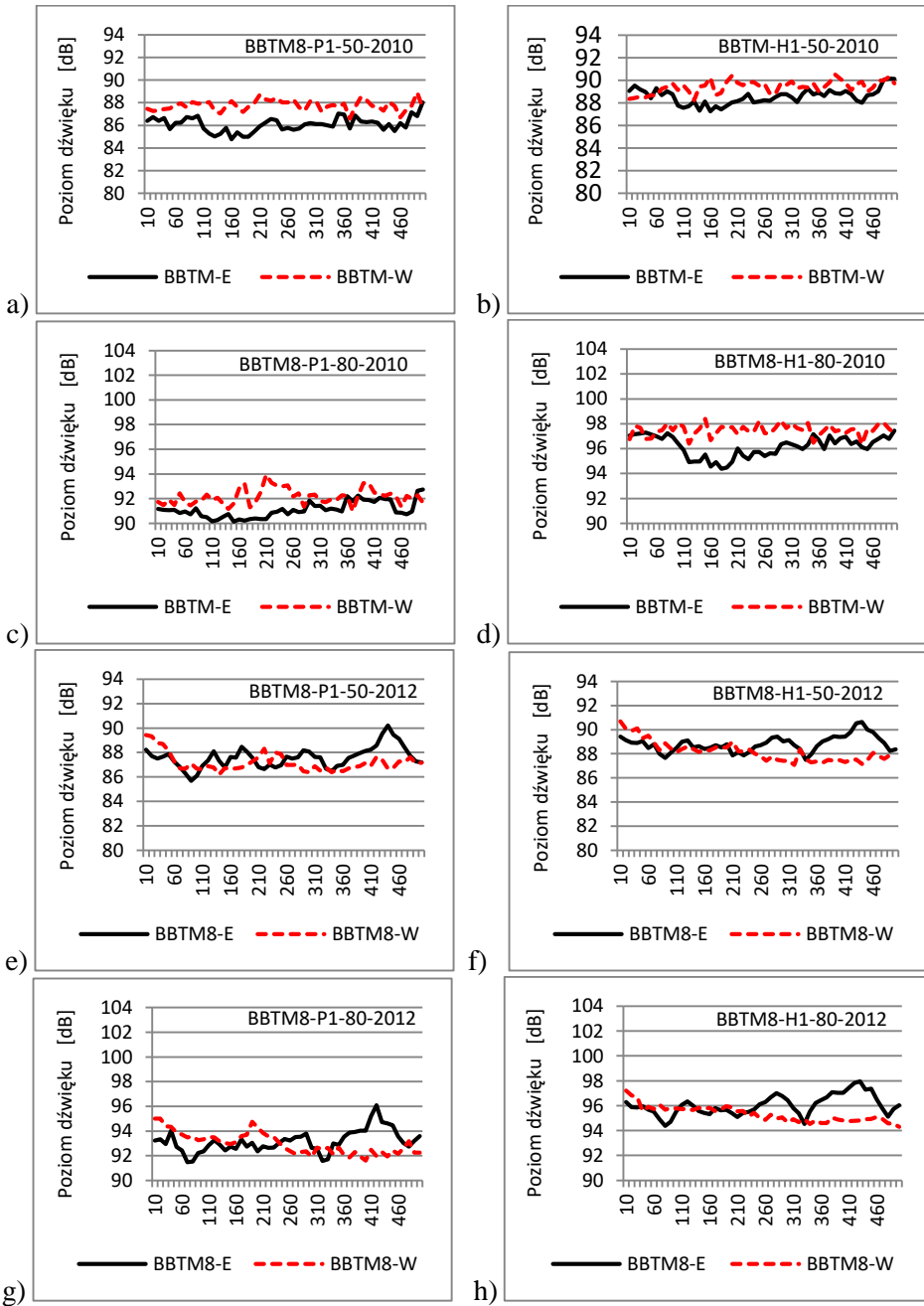
### Z1.3. Analiza wyników pomiarów metodą SPB – pojazdy ciężarowe (kategoria 2a)

Oznaczenie drogi i typ nawierzchni	Statystyki wyników pomiarów										
	A	B	n	$V_{sr}$	$R^2$	$S_e$	Pozytymy ufnosci				
							$V_{sr}$	70	80	85	
DK1-AC16	-25,1	57,7	27	75,1	0,39	3,14	1,24	1,53	1,49	2,02	
DK22-AC16	16,8	36,1	25	72,6	0,26	3,41	1,41	1,47	1,79	2,28	
DK6 - AC16	32,2	27,7	31	75,1	0,18	3,25	1,19	1,37	1,34	1,70	
DK8-AC12	48,5	19,0	32	73,6	0,13	2,78	1,00	1,08	1,20	1,52	
DK8-AC12	79,3	2,6	34	70,6	0,00	3,35	1,17	1,17	1,64	2,07	
DK22-AC12	13,9	36,4	31	74,2	0,36	3,07	1,13	1,22	1,28	1,57	
DK10-SMA12	51,1	17,5	30	75,0	0,17	2,38	0,89	1,00	0,98	1,21	
DK1-SMA12	64,5	10,0	31	76,6	0,05	1,83	1,33	1,87	1,47	2,01	
DK8-SMA10	71,5	6,7	30	74,6	0,02	1,96	0,73	0,87	0,89	1,20	
DK5-SMA10	42,6	22,4	29	73,3	0,27	1,79	0,68	0,74	0,88	1,17	
DK10-SMA10	5,7	41,4	30	73,1	0,29	3,34	1,25	1,33	1,59	2,05	
DK11-GUFI	40,4	22,9	32	77,6	0,12	3,36	1,21	1,60	1,25	1,53	
DK92-RUFLEX	52,4	17,4	34	73,0	0,17	2,01	0,70	0,75	0,89	1,16	
DK17-PU	52,8	16,7	31	77,3	0,20	2,15	0,79	0,97	0,81	0,95	
DW253-PU	28,4	30,1	28	66,4	0,37	2,50	0,97	1,07	1,67	2,02	
DK8-CC	0,5	46,1	20	70,3	0,26	3,27	1,54	1,54	2,66	3,54	

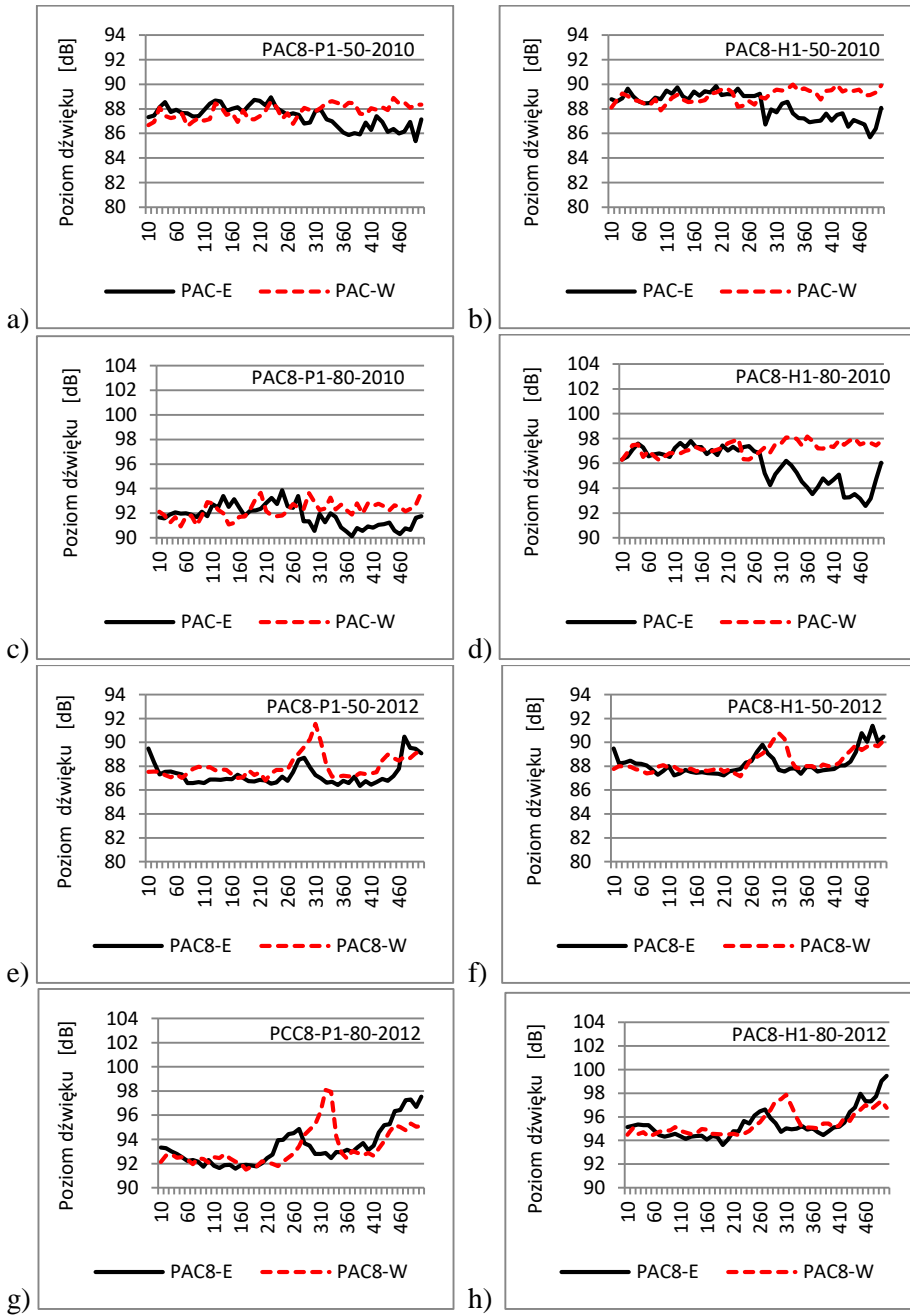


## Z1.4. Analiza wyników pomiarów metodą CPB – pojazdy osobowe

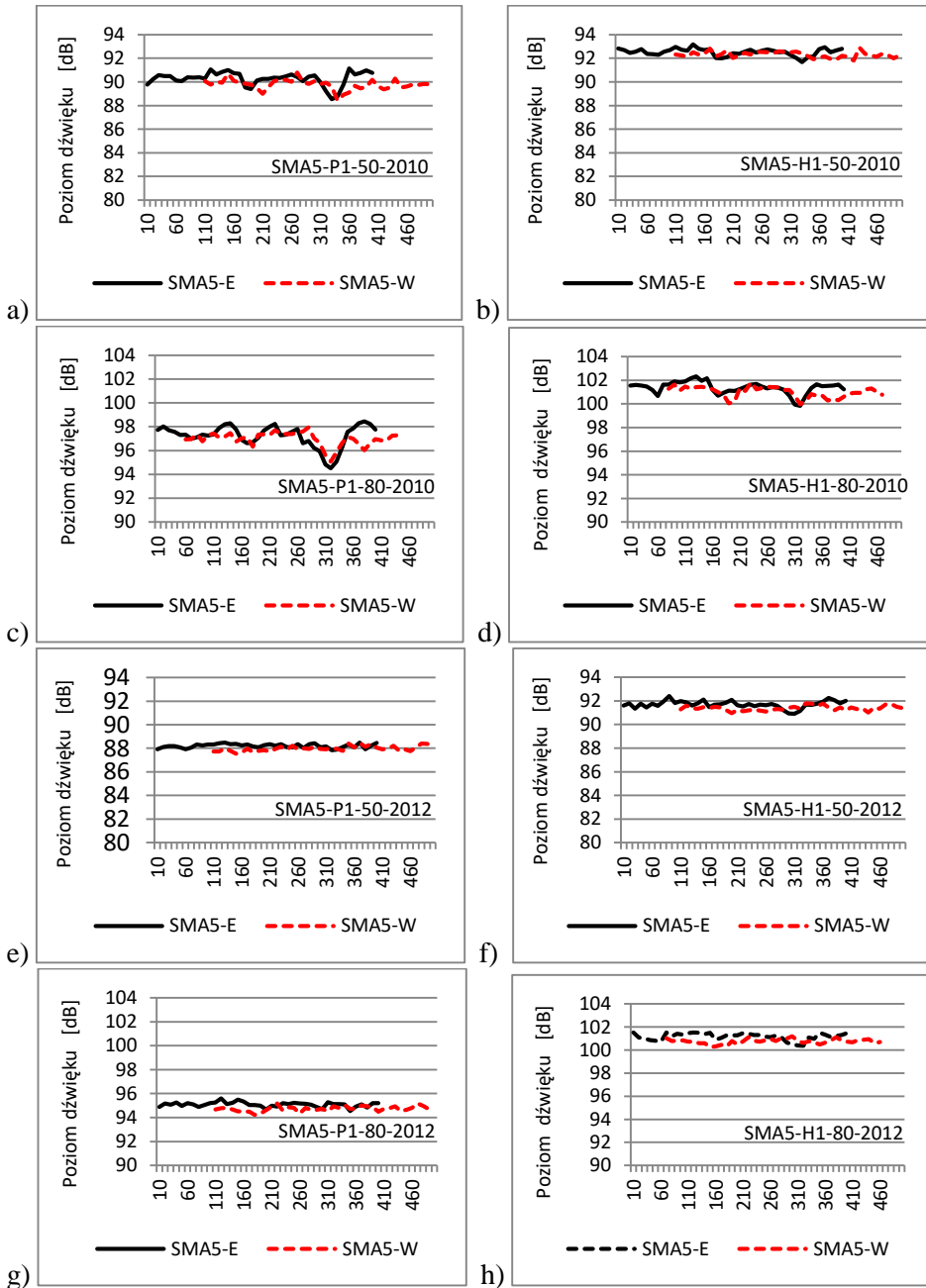
Typ i charakterystyka nawierzchni	Statystyki wyników pomiarów									
	A	B	n	$V_{sr}$	$R^2$	$S_e$	$V_{sr}$			$V_{sr}$
AC12 – 3 pojazdy – naw. mokra	11,5	35,5	24	69,4	0,91	1,59	0,68	0,68	0,74	1,22
AC12 – 3 pojazdu – naw.	18,1	31,4	21	76,9	0,82	1,77	0,81	0,86	0,82	1,37
SMA12 – 3 pojazdy – naw. sucha	10,6	35,0	24	73,3	0,87	1,82	0,77	0,78	0,80	1,31
SMA12 – 3 pojazdy – naw. mokra	23,4	29,8	23	68,0	0,86	1,60	0,69	0,70	0,79	1,33
KK – 3 pojazdy naw. mokra	15,8	37,4	24	66,2	0,95	1,06	0,45	0,46	0,55	0,94
KK – 3 pojazdy – naw. sucha	12,5	38,5	24	67,2	0,98	0,74	0,31	0,31	0,36	0,58
SMA12 – 4 pojazdy – naw. sucha	16,3	33,0	36	62,5	0,96	1,16	0,39	0,41	0,46	0,68
SMA12 – 4 pojazdy – naw. wilgotna	20,0	31,1	32	68,3	0,95	1,17	0,42	0,42	0,46	0,69
SMA12 – 4 pojazdy – naw. mokra	28,5	27,4	40	63,6	0,95	1,10	0,35	0,36	0,41	0,62
SMA11 – SMA11 (nowa) – 5 pojazdów	14,8	32,8	38	77,0	0,87	1,36	0,45	0,48	0,45	0,79
SMA11 – SMA11 (nowa) – 5 pojazdów	19,8	30,3	42	77,4	0,87	1,39	0,43	0,46	0,44	0,71
CC – pas L2 – 3 pojazdy	11,4	38,2	28	84,5	0,97	0,91	0,35	0,42	0,36	0,47
CC – pas L3 – 3 pojazdy	6,9	38,4	22	74,9	0,97	0,89	0,40	0,41	0,41	0,70
CC – pas L1 – 1 pojazd	9,9	36,6	10	79,1	0,99	0,38	0,27	0,30	0,27	0,45
CC – pas L2 – 1 pojazd	10,2	38,8	13	76,4	0,98	0,61	0,37	0,39	0,38	0,64
CC – pas L3 – 1 pojazd	9,3	37,2	13	74,7	0,99	0,54	0,33	0,34	0,34	0,56



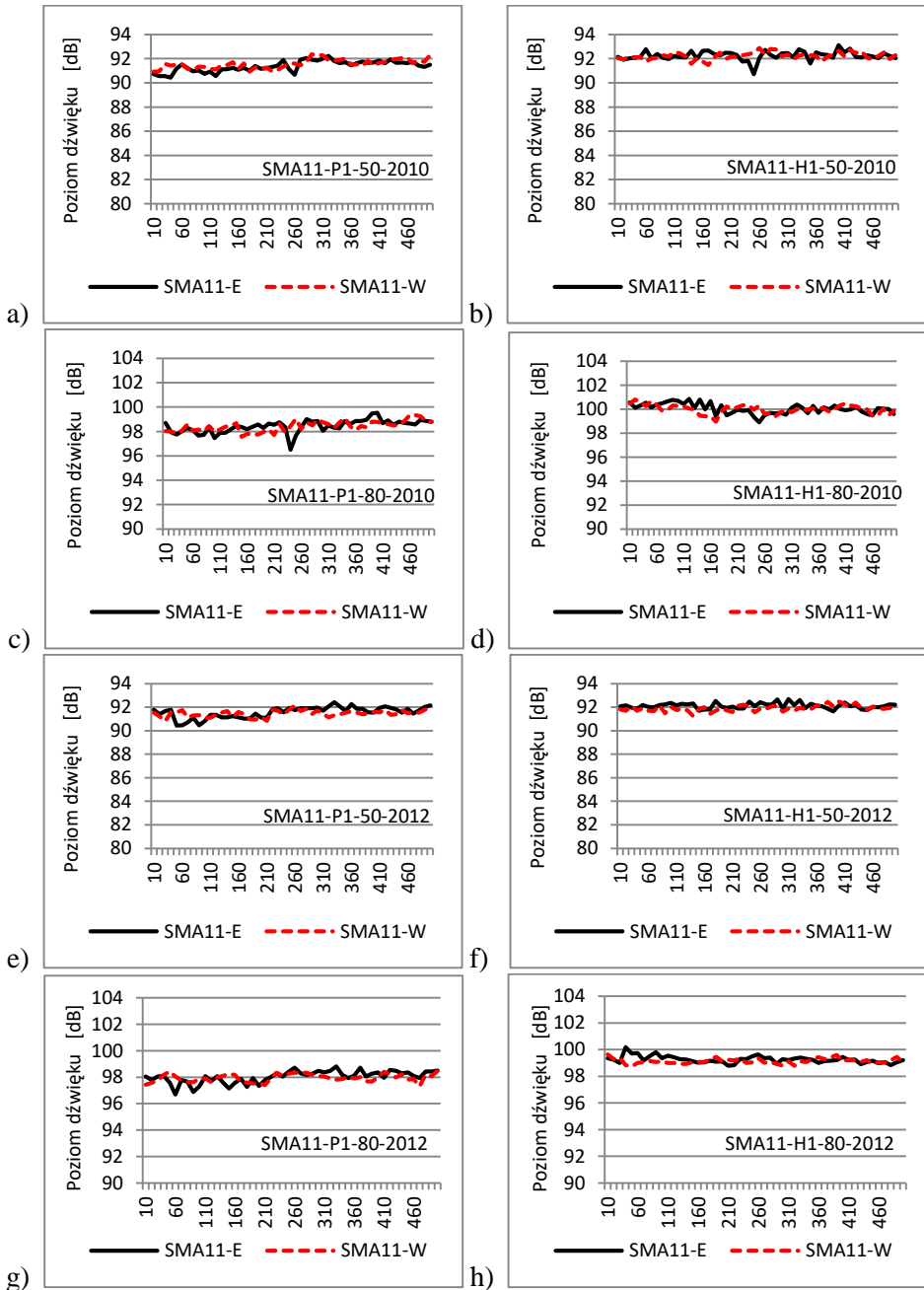
Z2.1. Poziomy dźwięków na nawierzchni BBTM8



Z2.2. Poziomy dźwięków na nawierzchni PAC8



Z2.3. Poziomy dźwięków na nawierzchni SMA5



Z2.4. Poziomy dźwięków na nawierzchni SMA11

