

HAŁAS TOCZENIA POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH W OCENIE HAŁAŚLIWOŚCI NAWIERZCHNI DROGOWYCH

**BADANIA I WERYFIKACJA STATYSTYCZNA
WYNIKÓW POMIARÓW**

**WŁADYSŁAW GARDZIEJCZYK
STANISŁAW SZPINEK
MAREK MOTYLEWICZ**



Władysław Gardziejczyk
Stanisław Szpinek
Marek Motylewicz

**HAŁAS TOCZENIA
POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH
W OCENIE HAŁAŚLIWOŚCI
NAWIERZCHNI DROGOWYCH
BADANIA I WERYFIKACJA STATYSTYCZNA
WYNIKÓW POMIARÓW**



OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI BIAŁOSTOCKIEJ
BIAŁYSTOK 2026

Recenzenci:
dr hab. inż. Karol J. Kowalski, prof. PW
dr hab. inż. Piotr Mioduszewski, prof. PG

Badania zostały wykonane w ramach Zadania Nr 8 w projekcie
„Innowacyjne metody redukcji hałasu drogowego i zasady ich stosowania (INREH)”,
realizowanym przez Konsorcjum: Politechnika Krakowska (lider) –
Politechnika Białostocka – Politechnika Rzeszowska – Politechnika Warszawska –
Politechnika Wrocławska, finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju
i Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad (Umowa nr RID2/0015/2022 –
Rozwój Innowacji Drogowych – RID II).

Redakcja i korekta językowa:
Katarzyna Duniewska

Skład i okładka:
Marcin Dominów

© Copyright by Politechnika Białostocka, Białystok 2026

ISBN 978-83-68673-23-4
ISBN 978-83-68673-24-1 (e-Book)
DOI: 10.24427/978-83-68673-24-1



Publikacja jest udostępniona na licencji
Creative Commons Uznanie autorstwa-Użycie niekomercyjne-Bez utworów zależnych 4.0
(CC BY-NC-ND 4.0).

Pełną treść licencji udostępniono na stronie
creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.pl.
Publikacja jest dostępna w internecie na stronie Oficyny Wydawniczej PB.

Druk: Agencja Reklamowa TOP Agnieszka Łuczak

Oficina Wydawnicza Politechniki Białostockiej
ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok
e-mail: oficina.wydawnicza@pb.edu.pl
www.pb.edu.pl

Spis treści

Ważniejsze symbole, skróty i oznaczenia	5
1. Wstęp	7
2. Badania i ocena właściwości akustycznych nawierzchni drogowych	11
2.1. Metody pomiaru hałasu toczenia opon i pojazdów samochodowych	11
2.1.1. Metoda CPX i metoda OBSI	11
2.1.2. Metoda SPB i metoda CPB.....	14
2.1.3. Analiza porównawcza	15
2.2. Współczynnik pochłaniania dźwięku i wodoprzepuszczalność w ocenie właściwości akustycznych nawierzchni drogowych.....	17
2.2.1. Współczynnik pochłaniania dźwięku.....	17
2.2.2. Wodoprzepuszczalność.....	19
2.2.3. Analiza porównawcza	20
2.3. Podsumowanie.....	22
3. Metoda statystycznego przejazdu według PN-EN ISO 11819-1:2023 – wymagania, założenia, zasady pomiaru i prezentacji wyników	25
3.1. Wymagania dla aparatury pomiarowej i jej lokalizacji	25
3.2. Odcinki testowe i przekroje badawcze.....	27
3.3. Wymagania dla warunków atmosferycznych oraz stanu nawierzchni.....	28
3.4. Kategorie dróg w zależności od kategorii i prędkości pojazdów.....	28
3.5. Wyniki pomiarów i ich prezentacja	30
4. Ocena akustyczna badanych technologii nawierzchni drogowych według metody SPB.....	33
4.1. Wybór przekrojów badawczych i charakterystyka ich nawierzchni.....	33
4.2. Ocena akustyczna badanych technologii nawierzchni drogowych.....	35
5. Statystyczna weryfikacja wyników pomiaru maksymalnego poziomu hałasu toczenia pojazdów według metody SPB	47
5.1. Model prognozy poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych.....	47
5.2. Analiza wyników badań poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych.....	54
5.2.1. Opis statystyczny danych pomiarowych.....	54
5.2.2. Analiza zależności poziomu hałasu toczenia pojazdów od prędkości	61

5.2.3. Użyteczny zakres prędkości.....	65
5.2.4. Ocena niepewności prognozowanego poziomu hałasu toczenia pojazdów według metody SPB.....	69
5.3. Podsumowanie.....	75
6. Statystyczna weryfikacja wyników pomiaru poziomu hałasu toczenia pojazdów według metody CPB.....	77
6.1. Wybór odcinków testowych i przekrojów badawczych oraz charakterystyka ich nawierzchni	77
6.2. Pojazdy testowe i ich charakterystyka.....	79
6.3. Wyniki pomiaru poziomów hałasu toczenia pojazdów samochodowych metodą CPB.....	79
6.4. Analiza statystyczna wyników badań poziomu hałasu toczenia pojazdów testowych.....	83
6.4.1. Opis statystyczny danych pomiarowych.....	83
6.4.2. Analiza zależności maksymalnego poziomu dźwięku od prędkości pojazdów	86
6.5. Podsumowanie.....	90
7. Wyniki badań poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych w ocenie hałaśliwości nawierzchni drogowych	91
7.1. Ocena nawierzchni drogowych pod względem hałaśliwości według metod SPB i CPB	91
7.2. Maksymalny poziom dźwięku jako kryterium klasyfikacji nawierzchni pod względem hałaśliwości	94
7.3. Statystyczny wskaźnik przejazdu (SPBI)	96
8. Podsumowanie.....	99
Literatura	103
Załączniki	109
Streszczenie	115
Summary	117
Spis tabel.....	119
Spis rysunków	121

Ważniejsze symbole, skróty i oznaczenia

Stosowane symbole	Według normy ISO	Jednostka	Wyjaśnienie
L_{Amax}	$L_{A,max,i,v}$	dB	Maksymalny poziom dźwięku A od przejeżdżającego i tego pojazdu z prędkością V [km/h]
$L_{SPB:Pv_r}$	$L_{SPB:P,vref}$	dB	Poziom hałasu toczenia według SPB (lub CPB) od pojazdu kategorii P (pojazd osobowy) przy prędkości referencyjnej V_r
$L_{CPB:Pv_r}$	$L_{CPB:P,vref}$		
$L_{SPB:Hv_r}$	$L_{SPB:H,vref}$	dB	Poziom hałasu toczenia według SPB od pojazdu kategorii H (pojazd ciężarowy) przy prędkości referencyjnej V_r
$L_{SPB:Gv_r}$	$L_{SPB:G,vref}$	dB	Poziom hałasu toczenia według SPB od pojazdu kategorii G (ogólnie oznaczenie pojazdu: osobowy – P, ciężarowy – H) przy prędkości referencyjnej V_r
SPBI	SPBI	dB	Indeks SPBI – parametr oceny poziomu hałasu od ruchu samochodowego według metody SPB
CPXI	CPXI	dB	Indeks CPXI – parametr oceny poziomu hałasu opona/nawierzchnia według metody CPX
A	A	–	Współczynnik przesunięcia liniowej funkcji regresji
B	B	–	Współczynnik nachylenia liniowej funkcji regresji równy wzrostowi poziomu hałasu toczenia według SPB przy 10-krotnym wzroście prędkości
Se	s	dB	Odchylenie standardowe reszt jako miara różnic między wynikami pomiaru L_{Amax} a wynikami uzyskanymi z liniowej funkcji regresji
V	v_{meas}	km/h	Zmierzona prędkość przejazdu swobodnego lub przejazdu kontrolowanego pojedynczego pojazdu
V_r V_{50}, V_{80}, V_{110}	v_{ref}	km/h	Prędkość referencyjna według metody SPB
E, D, u, U	–	–	Pierwsze litery umownych oznaczeń parametrów statystycznych opisujących zbiory danych pomiarowych: wartość średnia (E), odchylenie standardowe (D), niepewność standardowa (u) i niepewność rozszerzona (U)

Stosowane symbole	Według normy ISO	Jednostka	Wyjaśnienie
$ELA_{max}:G$	$L_{A,ave,G}$	dB	Wartość średniej arytmetycznej obliczona dla zbioru LA_{max}
$EV, EV:G$	$v_{ave,G}$	km/h	Wartość średniej arytmetycznej obliczona dla zbioru V
$DV, DV:G$	$sv_{ave,G}$	km/h	Odchylenie standardowe obliczone dla zbioru V
$ElogV, Elog:G$	–	–	Wartość średniej arytmetycznej obliczona dla zbioru $\log_{10}(V)$
$DlogV, Dlog:G$	–	–	Odchylenie standardowe obliczone dla zbioru $\log_{10}(V)$
$dsrV$	–	–	Standaryzowana odchyłka jako miara różnicy między V a EV
dsV	–	–	Standaryzowana odchyłka jako miara różnicy między $\log_{10}(V)$ a $ElogV$
$dsLA_{max}$	–	–	Standaryzowana odchyłka jako miara różnicy między LA_{max} a ELA_{max}

1. Wstęp

Jednym z głównych źródeł hałasu w środowisku jest hałas pochodzący od ruchu drogowego. Jego uciążliwość ma istotny wpływ na codzienne czynności, samopoczucie, a nawet na zdrowie psychiczne osób mieszkających w pobliżu hałaśliwych tras drogowych [52]. Obecnie stosowane środki poprawiające klimat akustyczny w otoczeniu dróg nie zawsze są wystarczające. Badania potwierdzają, że najlepsze rezultaty dają działania obniżające hałas u źródła. Zgodnie z zapisami w Dyrektywie END (2002/49/EC) [56] takim działaniem może być budowa nawierzchni o obniżonej hałaśliwości lub nawierzchni cichych.

Znajomość charakterystyki akustycznej nawierzchni w powiązaniu z charakterystyką ruchu drogowego jest istotna z punktu widzenia prognozowania poziomu hałasu w otoczeniu tras drogowych w metodzie CNOSSOS-EU (ang. *common noise assessment methods*) [24]. CNOSSOS-EU jest standardem obliczania poziomu hałasu od ruchu drogowego, kolejowego, lotniczego, przemysłowego i z innych źródeł, ustanowionym Dyrektywą 2015/996/EC z 19 maja 2015 roku [57] dla państw członkowskich UE, zgodnie z założeniami Dyrektywy END (2002/49/EC) [56]. Ze względu na to, że nawierzchnie drogowe są zróżnicowane pod względem akustycznym, w CNOSSOS-EU wyróżnia się 14 technologii górnych warstw nawierzchni i nawierzchnię referencyjną („wirtualną”) [43]. W załączniku II Dyrektywy END wskazano współczynniki korygujące wpływ nawierzchni drogowych na poziom emisji hałasu od jadących pojazdów, które zostały następnie skorygowane w 2021 roku Dyrektywą 2021/1226/EC [58].

Badania nad 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*), CIDRO (*Innovative Pavement Technology with Reduced Noise Emission*), PERSUADE (*PoroElastic Road SURface for Avoiding Damage to the Environment*), SEPOR (*Bezpieczna, proekologiczna poroelastyczna nawierzchnia drogowa*) oraz ROSANNE (*Rolling Resistance, Skid Resistance and Noise Emission Measurement Standards for Road Surfaces*). Szczegółowe

wyniki przeprowadzonych badań i analiz zawarto w raportach z realizacji projektów oraz w publikacjach i referatach, na przykład w pracach [5, 23, 28, 41, 42].

W ramach dotychczasowych badań ustalono m.in., że w przypadku nawierzchni o zwartej strukturze (beton asfaltowy – AC, mastyks asfaltowo-grysowy – SMA) o poziomie hałasu toczenia pojazdów samochodowych w głównym stopniu decyduje makrotekstura ich powierzchni, uzależniona od maksymalnego uziarnienia kruszywa i jego składu granulometrycznego. Problem ten szczegółowo omówiono m.in. w pracach [13, 44] i nie jest przedmiotem niniejszej monografii.

W przypadku nawierzchni typu asfalt porowaty (PA), cienkie warstwy z betonu asfaltowego (np. BBTM) oraz mastyks asfaltowo-grysowy o obniżonej hałaśliwości (SMA LA) dodatkowy wpływ na poziom emitowanych dźwięków od jadących pojazdów mają: zawartość wolnych przestrzeni i okres eksploatacji nawierzchni drogowej [13, 14, 36, 44]. Badania prowadzone nad dodatkiem granulatu gumowego do mieszanki poroelastycznej przeznaczonej do warstwy ścieralnej wykazały, że można uzyskać obniżenie poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych nawet do 10–12 dB [22, 42]. Wskazuje się jednak na problemy z trwałością akustyczną takich warstw, definiowaną jako pogorszenie właściwości akustycznych w czasie [5, 23]. Wynika to z faktu, że granulaty gumowy zastępujący część kruszywa mineralnego charakteryzuje się zdecydowanie innymi właściwościami i przyczynia się do obniżenia trwałości eksploatacyjnej nawierzchni, co z kolei wpływa na pogorszenie jej właściwości akustycznych. Badania nad poprawą tych aspektów były prowadzone także w innych laboratoriach [19, 26]. Należy podkreślić, że hałaśliwość nawierzchni z betonu cementowego w dużym stopniu zależy od techniki teksturowania ich powierzchni [15].

Przeprowadzona analiza akustyczna obecnie stosowanych rozwiązań w górnej warstwie nawierzchni na drogach zamiejskich w Polsce wykazała, że pod względem ich hałaśliwości należy wyróżnić osiem technologii [17]: nawierzchnie z betonu asfaltowego (AC11), z mastyksu asfaltowo-grysowego (SMA11), z mastyksu asfaltowo-grysowego (SMA8), z mastyksu asfaltowo-grysowego o obniżonej hałaśliwości (SMA8 LA), cienkie warstwy asfaltowe typu BBTM8, nawierzchnie z betonu cementowego teksturowane metodą odkrytego kruszywa (EAC8), teksturowane techniką rowkowania i szlifowania (ang. *grooving/grinding* – G&G) oraz teksturowane tkaniną jutową (CC-BuD). Istotne znaczenie ma więc wybór najbardziej korzystnego rozwiązania w zależności od znaczenia trasy drogowej, jej otoczenia oraz struktury rodzajowej ruchu samochodowego.

Hałaśliwość nawierzchni drogowych można prognozować na etapie projektowania mieszanek mineralno-asfaltowych i mieszanek betonowych. W tym celu określa się w warunkach laboratoryjnych zawartość wolnych przestrzeni, współczynnik pochłaniania dźwięku, wodoprzepuszczalność mieszanek mineralno-asfaltowych i makroteksturę powierzchni wykonanych próbek. W Politechnice Gdańskiej są także prowadzone badania hałasu toczenia i oporu toczenia opon samochodowych na replikach rzeczywistych nawierzchni na specjalnych stanowiskach badawczych [11]. Pozwala to uzyskać informacje o głośności opon na nawierzchniach o różnej

charakterystyce oraz ocenić właściwości akustyczne mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych w warstwie ścieralnej.

Właściwości akustyczne nawierzchni drogowych można określać różnymi metodami. Mogą to być badania współczynnika pochłaniania dźwięku i wodoprzepuszczalności lub pomiary maksymalnego poziomu dźwięków emitowanych w otoczeniu płaszczyzny opona/nawierzchnia (metoda CPX – ang. *Close Proximity method* [68], metoda OBSI – ang. *On-Board Sound Intensity* [55]) oraz pomiary poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych (metoda statystycznego przejazdu SPB – ang. *Statistical Pass-By method* [67], metoda kontrolowanego przejazdu CPB – ang. *Controlled Pass-By method*).

Według CNOSSOS-EU parametrem charakteryzującym poziom hałasu od jadącego pojazdu jest poziom mocy akustycznej. Jego wartość można ustalić na podstawie maksymalnego poziomu dźwięku pochodzącego od jadącego pojazdu, określonego według metod SPB i CPB. Prowadzone są badania nad wykorzystaniem do tego celu wyników pomiarów poziomu hałasu toczenia opon samochodowych według metody CPX [1, 2, 6, 9].

Obecnie stosowane są różne technologie budowy nawierzchni drogowych, często różniące się od wskazanych w załączniku II Dyrektywy END. W związku z tym w niektórych krajach są prowadzone prace nad opracowaniem współczynników korygujących wpływ nawierzchni na poziom hałasu toczenia pojazdów i dostosowaniem ich do założeń CNOSSOS-EU [2, 4, 7, 10, 12, 21, 29, 40, 45]. Ze względu na zmiany w parku samochodowym konieczne są także dalsze badania w celu określenia poziomów mocy akustycznej opisujących hałas toczenia oraz hałas pochodzący z innych źródeł jadącego pojazdu (układ napędowy, układ wydechowy). Przykładowo autorzy prac [8, 30, 39] przeanalizowali współczynniki korygujące dla pojazdów elektrycznych.

Mając powyższe na uwadze, w ramach projektu badawczego „Innowacyjne metody redukcji hałasu drogowego i zasady ich stosowania (INREH)”, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad, realizowanego przez konsorcjum pięciu uczelni: Politechniki Krakowskiej (lider), Politechniki Białostockiej, Politechniki Rzeszowskiej, Politechniki Warszawskiej i Politechniki Wrocławskiej, w zadaniu nr 8: „Analiza i ocena wpływu prędkości pojazdów na poziom hałasu toczenia pojazdów samochodowych w zależności od charakterystyki nawierzchni drogowych”, wykonywanym przez zespół z Politechniki Białostockiej, zaplanowano przeprowadzenie pomiarów poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych metodami statystycznego (SPB) i kontrolowanego (CPB) przejazdu. Ich wyniki będą podstawą do opracowania współczynników korygujących wpływ nawierzchni stosowanych w naszym kraju w porównaniu z nawierzchnią referencyjną.

W monografii przedstawiono ogólną charakterystykę metod oceny właściwości akustycznych nawierzchni drogowych wraz z prezentacją przykładowych wyników badań, omówiono podstawowe wymagania i zasady wykonywania pomiarów poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych według normy PN-EN ISO 11819-1:2023, a także przeprowadzono statystyczną weryfikację wyników maksymalnego poziomu

dźwięku według metod SPB i CPB oraz ocenę badanych nawierzchni z punktu widzenia ich klasyfikacji pod względem hałaśliwości. W badaniach poziomego hałasu toczenia pojazdów samochodowych prezentowanych w niniejszej monografii z ramienia Politechniki Białostockiej uczestniczyli: prof. dr hab. inż. Władysław Gardziejczyk, dr inż. Marek Motylewicz, dr hab. inż. Robert Ziółkowski, dr inż. Paweł Gierasimiuk, mgr inż. Andrzej Łaskiewicz i mgr inż. Dominik Grzyb.

2. Badania i ocena właściwości akustycznych nawierzchni drogowych

2.1. Metody pomiaru hałasu toczenia opon i pojazdów samochodowych

2.1.1. Metoda CPX i metoda OBSI

Metoda CPX (ang. *Close Proximity method*) jest obecnie najbardziej znaną i najczęściej stosowaną metodą oceny hałaśliwości nawierzchni w krajach europejskich. Zgodnie z wymaganiami normowymi pomiary maksymalnego poziomu dźwięku są wykonywane za pomocą dwóch mikrofonów zainstalowanych w pobliżu styku opony z nawierzchnią. Opona jest umieszczona w zamkniętej i odizolowanej akustycznie od środowiska zewnętrznego przyczepce ciągniętej przez pojazd (rysunek 2.1). Do oceny nawierzchni wykorzystuje się zgodnie z normą ISO/TS 11819-3:2021 [63] dwie opony referencyjne. Opona P1 (SRTT – Uniroyal Tigerpaw ASTM F2493) reprezentuje hałas toczenia samochodów osobowych, a opona H1 (AAV4 – Avon AV4) – hałas toczenia samochodów ciężarowych. Pomiary są wykonywane przy prędkościach referencyjnych (50 km/h, 80 km/h i 110 km/h).

Wynikiem pomiarów są: CPX Index (L_{CPX}) obliczony dla dwóch opon oraz CPX obliczony oddzielnie dla każdej z opon testowych ($L_{CPX:P}$ i $L_{CPX:H}$). CPX Index (CPXI) jest obliczany jako średnia arytmetyczna z poziomów hałasu toczenia dwóch opon referencyjnych, z uwzględnieniem współczynnika wagowego dla każdej opony 50%. Mierzone są również poziomy dźwięku w pasmach tercjowych dla środkowych częstotliwości od 315 do 5000 Hz.

W pracy [33] przedstawiono szczegółowe wyniki badań hałaśliwości nawierzchni metodą CPX. Na ich podstawie w tabeli 2.1 dokonano porównania wartości CPXI przy prędkości referencyjnej 80 km/h, ustalonych na n odcinkach w odniesieniu do nawierzchni w Polsce i w innych krajach w Europie. Podano wartości różnicy pomiędzy poziomami hałasu w ramach tych samych technologii (ΔI) i różnicy pomiędzy średnią wartością poziomu hałasu w ramach danej technologii a nawierzchnią SMA11 ($\Delta 2$).



RYSUNEK 2.1. Przyczepa testowa w metodzie CPX oraz dwie referencyjne opony P1 i H1

ŹRÓDŁO: [34].

TABELA 2.1. Porównanie wyników CPXI na nawierzchniach w Polsce i w innych krajach

Technologia	Polska						Inne kraje Europy					
	n	CPXI(80) [dB]			Różnica		n	CPXI(80) [dB]			Różnica	
		min	max	śred.	$\Delta 1$	$\Delta 2$		min	max	śred.	$\Delta 1$	$\Delta 2$
AC11	2	96,8	96,8	96,8	0,0	-1,9	31	96,6	102,2	99,0	5,6	-0,4
SMA11	13	97,4	100,1	98,7	2,7	0,0	26	97,6	100,6	99,4	3,0	0,0
SMA8	18	95,7	99,3	97,2	3,6	-1,5	15	94,4	100,2	97,9	5,8	-1,5
SMA8 LA	8	93,4	98,4	96,7	5,0	-2,0	-	-	-	-	-	-
BBTM8	23	93,5	97,6	95,3	4,1	-3,4	6	96,2	99,3	98,3	3,1	-1,1
PA8	9	93,5	95,9	94,5	2,4	-4,2	31	92,0	101,3	97,6	9,3	-1,8
EAC	10	97,2	100,0	97,9	2,8	-0,8	21	95,8	102,3	99,6	6,5	0,2
PERS	1	88,7	88,7	88,7	-	-10,0	11	89,1	92,2	90,3	3,1	-9,1

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Przedstawione wartości CPXI(80) potwierdzają stosunkowo duże różnice pomiędzy wynikami uzyskanymi w ramach tych samych technologii oraz pomiędzy wartościami na drogach w Polsce i w innych krajach. Oznacza to także, że nawet w odniesieniu do takich samych technologii niezbędne są dodatkowe informacje decydujące o poziomie hałasu toczenia opon samochodowych. Należą do nich z pewnością stan techniczny nawierzchni, makrotekstura powierzchni jezdni i okres jej użytkowania.

Metoda OBSI (ang. *On-Board Sound Intensity*) wprowadzona normą AASHTO T 360-16 [55] jest stosowana jako podstawowa metoda oceny hałaśliwości nawierzchni m.in. w Stanach Zjednoczonych i Australii. Pomiary poziomu hałasu toczenia opon samochodowych z wykorzystaniem tej metody były prowadzone także w naszym kraju w ramach projektu RID-I „Ochrona przed hałasem drogowym” [54], realizowanego przez konsorcjum: Politechnika Krakowska (lider) – Politechnika Lubelska – Politechnika Warszawska – Politechnika Wrocławska – Instytut Badawczy

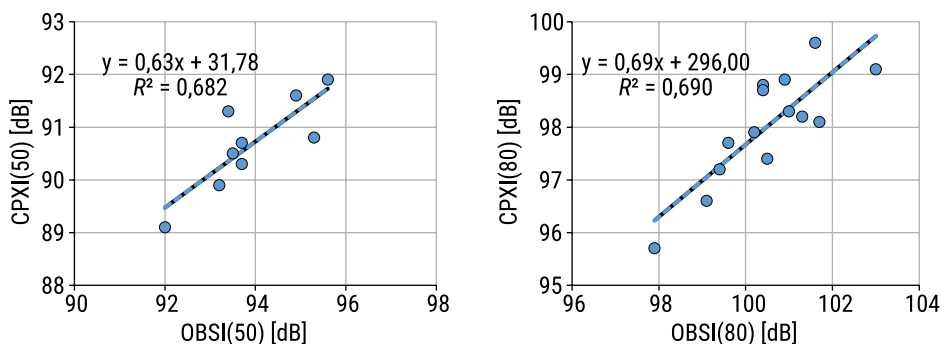
Dróg i Mostów, oraz są obecnie wykonywane w projekcie RID-II „Innowacyjne metody redukcji hałasu drogowego i zasady ich stosowania (INREH)”. Aparaturę badawczą w przypadku metody OBSI stanowią: mikrofony umieszczone przy oponie, przetwornik pomiarowy, wzmacniacz sygnału, źródło zasilania i jednostka zbierająca wyniki pomiarów. Badania polegają na pomiarze poziomu dźwięku za pomocą dwóch sond mikrofonowych zainstalowanych w pobliżu przedniej i tylnej krawędzi styku referencyjnej opony SRTT (P1) z nawierzchnią. Zestaw pomiarowy zamontowany jest w otwartej przestrzeni na piasku tylnego prawego koła pojazdu osobowego o napędzie na przednią oś (rysunek 2.2). Pomiar odbywa się przy stałej prędkości 72 km/h (alternatywnie 97 km/h, 84 km/h lub 48 km/h). Na podstawie uzyskanych wyników oblicza się ogólny ważony (A) poziom natężenia dźwięku jako średnią energetyczną poziomów natężenia dźwięku (IL) z dwóch sond mikrofonowych.



RYSUNEK 2.2. Badania hałaśliwości nawierzchni metodą OBSI

ŹRÓDŁO: [51, 54].

Na podstawie analizy wyników uzyskanych w ramach realizacji projektu pt. „Ochrona przed hałasem drogowym” (RID-I) [27, 54] potwierdzono dobrą korelację pomiędzy wynikami pomiarów metodami CPX i OBSI w odniesieniu do prędkości 50 km/h i 80 km/h (rysunek 2.3).



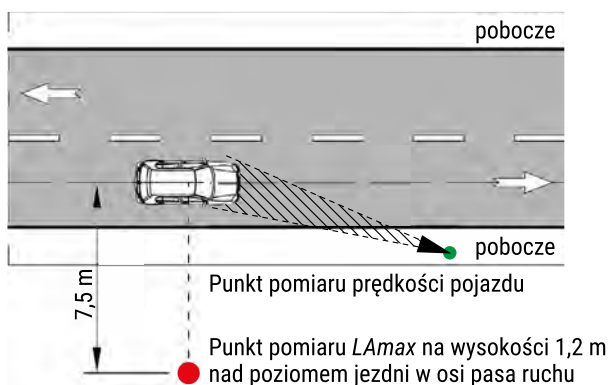
RYSUNEK 2.3. Zależności funkcyjne pomiędzy wynikami pomiarów poziomu hałasu toczenia według metod CPX i OBSI

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

2.1.2. Metoda SPB i metoda CPB

Metoda statystycznego przejazdu SPB zgodnie z normą PN-EN ISO 11819-1:2023 opiera się na pomiarze maksymalnego poziomu dźwięku L_{Amax} od przejazdu odpowiedniej liczby pojedynczych pojazdów poruszających się swobodnie ze stałą prędkością powyżej 45 km/h, przy równoczesnym pomiarze ich prędkości (rysunek 2.4). Badania prowadzi się dla trzech kategorii pojazdów: osobowe (P), ciężarowe dwuosiowe (H2) oraz ciężarowe wieloosiowe (H3+).

Wyniki pomiarów stanowią podstawę przy wyznaczaniu zależności regresyjnych $L_{Amax} = f(\log V)$, ustalanych niezależnie dla każdej z kategorii pojazdów. Zależności te umożliwiają określenie średniego maksymalnego poziomu dźwięku przy odpowiedniej prędkości referencyjnej dla danej drogi i kategorii pojazdu. Metoda pozwala na wyznaczenie indeksu SPBI służącego do klasyfikacji nawierzchni pod względem ich hałaśliwości, z uwzględnieniem struktury rodzajowej pojazdów i kategorii prędkości.



RYSUNEK 2.4. Schemat prowadzenia pomiarów metodami SPB i CPB oraz przykłady stanowisk pomiarowych SPB i CPB

ŹRÓDŁO: fot. M. Motylewicz.

Metodą pomiaru hałasu toczenia zbliżoną do metody SPB jest metoda CPB. Różnica polega na tym, że poziom dźwięku w metodzie CPB jest mierzony od jadących pojazdów testowych, a nie od pojazdów poruszających się w rzeczywistym potoku ruchu.

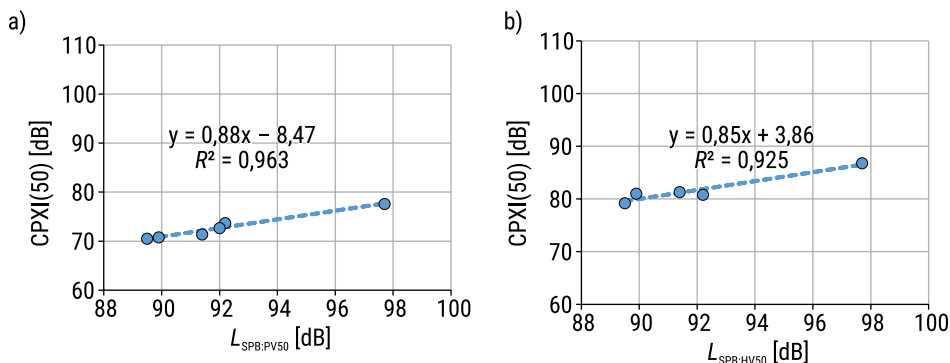
2.1.3. Analiza porównawcza

Szczegółową analizę porównawczą metod badania poziomu hałasu toczenia opon i hałasu toczenia pojazdów samochodowych przedstawiono m.in. w pracach [13, 44]. Poniżej wskazano tylko niektóre istotne różnice decydujące o ocenie hałaśliwości nawierzchni na badanym odcinku drogi.

W przypadku metod CPX i OBSI praktycznie nie ma ograniczeń odnośnie do lokalizacji odcinków badawczych, natomiast w metodach SPB i CPB dokonuje się wyboru przekroju pomiarowego, który musi spełniać wiele warunków. Wyniki badań prezentowane w literaturze potwierdzają dobrą korelację pomiędzy wynikami uzyskanymi za pomocą tych metod. Na przykład Licitra i in. [31] opisali zależności pomiędzy wynikami pomiarów według metody CPX oraz według metod SPB i CPB na pięciu rodzajach nawierzchni o różnej charakterystyce. Problem korelacji pomiędzy tymi metodami badano także w projekcie SILVIA [37]. W projekcie ROSANNE ustalono zależności funkcyjne pomiędzy poziomami hałasu przy wykorzystaniu opony P1 w metodzie CPX i odnotowanymi według metody SPB w odniesieniu do pojazdów osobowych oraz pomiędzy hałasem zmierzonym przy oponie testowej H1 i wieloosłonowym pojeździe ciężarowym według metody SPB [46].

Porównanie wyników uzyskanych metodami OBSI i CPX przeprowadzili badacze z Danii i Australii. Oddershede i in. ustalili na sześciu nawierzchniach wartości różnicy pomiędzy poziomami hałasu według metody OBSI i metody CPX [38]: $3,1 \pm 0,09$ dB przy prędkości 50 km/h oraz $2,4 \pm 0,04$ dB przy prędkości 80 km/h. W badaniach Tonina i in. [51], przeprowadzonych na większej liczbie odcinków, różnice przyjmowały wartości 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 z Danii.

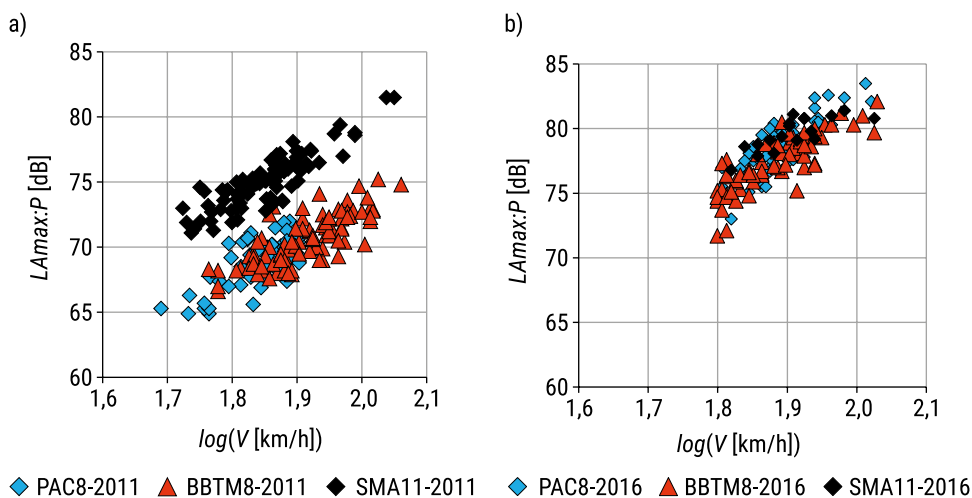
Na rysunku 2.5 porównano wyniki uzyskane w ramach projektu RID-I [27, 54] za pomocą metody SPB (w odniesieniu do pojazdu osobowego i wieloosłonowego pojazdu ciężarowego) z wynikami dla CPXI przy prędkości 50 km/h.



RYSUNEK 2.5. Zależności funkcyjne pomiędzy wynikami pomiarów poziomu hałasu toczenia według metod CPX i SPB

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

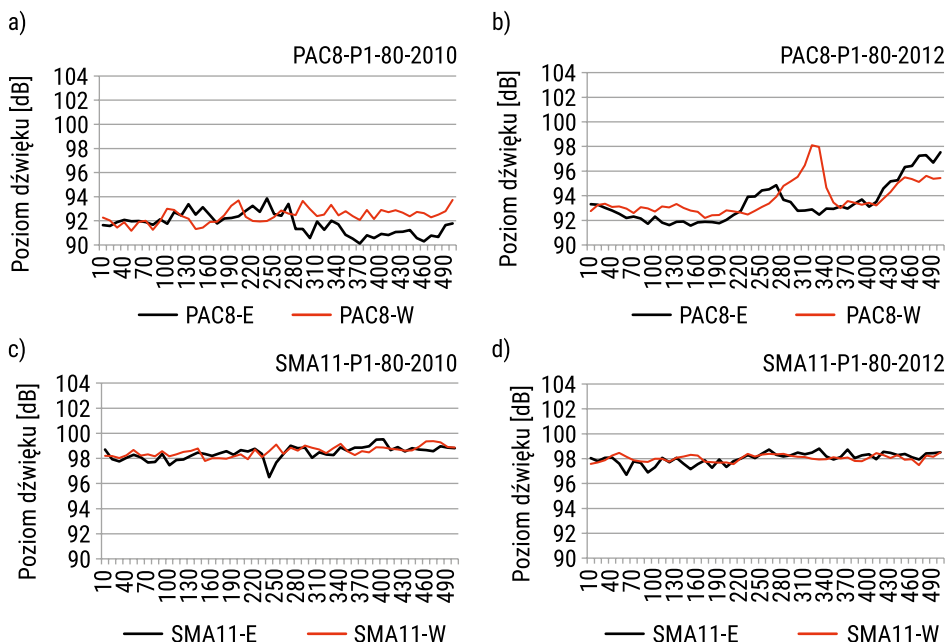
Warto podkreślić, że zarówno przy wykorzystaniu metody SPB, jak i CPX można ocenić trwałość akustyczną nawierzchni drogowych. Na rysunku 2.6 pokazano porównanie wyników pomiarów maksymalnego poziomu dźwięku od przejazdu pojedynczych pojazdów osobowych na nawierzchniach z asfaltu porowatego PAC8, BBTM8 i SMA11 według metody SPB w dwóch okresach pomiarowych [13], a na rysunku 2.7 – ocenę trwałości akustycznej nawierzchni PAC8 i SMA11 według metody CPX na przykładzie wyników ustalonych w latach 2010 i 2012 [35]. Dodatkowo wyniki otrzymane przy wykorzystaniu metody CPX pozwalają na ocenę jednorodności akustycznej nawierzchni na całym badanym odcinku drogi.



RYSUNEK 2.6. Wyniki pomiarów maksymalnego poziomu dźwięku metodą SPB: a) w 2011 roku; b) w 2016 roku

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Analiza przedstawionych powyżej wyników pomiarów hałasu toczenia pojazdów i opon samochodowych metodami SPB, CPB, CPX i OBSI pozwala stwierdzić, że stosowane dwie grupy metod oceny hałaśliwości nawierzchni SPB i CPB oraz CPX i OBSI umożliwiają ocenę akustyczną nawierzchni drogowych. Występuje stosunkowo dobra korelacja pomiędzy wynikami pomiarów uzyskiwanych przy wykorzystaniu wszystkich powyższych metod.



RYSUNEK 2.7. Poziomy dźwięku w pasmach tercjowych na 10-metrowych segmentach nawierzchni z asfaltu porowatego PAC8 (a, b) i SMA11 (c, d); $V = 80 \text{ km/h}$

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

2.2. Współczynnik pochłaniania dźwięku i wodoprzepuszczalność w ocenie właściwości akustycznych nawierzchni drogowych

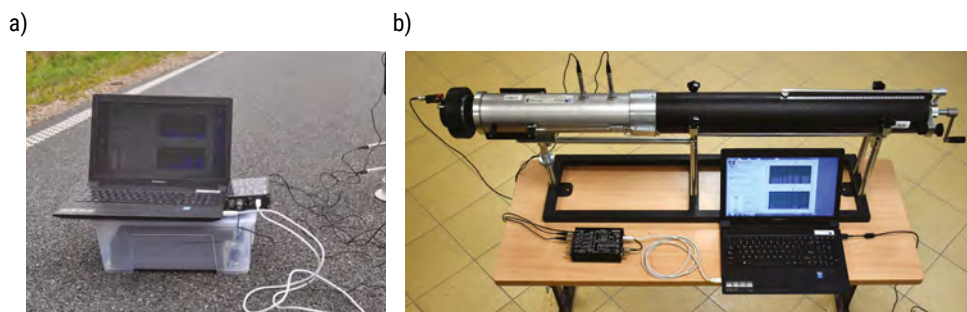
2.2.1. Współczynnik pochłaniania dźwięku

Jednym z podstawowych parametrów opisujących właściwości akustyczne mieszanek mineralno-asfaltowych i nawierzchni drogowych jest współczynnik pochłaniania dźwięku. Przyjmuje on wartości z przedziału od 0 (całkowite odbicie fali dźwiękowej) do 1 (całkowite pochłanianie dźwięku). Podstawowym urządzeniem do pomiaru współczynnika absorpcji dźwięku jest rura impedancyjna (tzw. rura Kundta) [60], która została rozszerzona do tzw. dwumikrofonowej metody pomiaru z zastosowaniem funkcji przejścia zgodnie z normą ISO 10534-2:1998 [61]. Jej działanie oparte jest na zjawisku powstawania płaskiej, stojącej fali dźwiękowej będącej wynikiem interferencji fali padającej na próbkę badanego materiału umieszczonego wewnątrz rury za metalowym tłokiem i fali odbitej od tej próbki. Przy pomocy pary mikrofonów zamontowanych w ścianie rury impedancyjnej w ściśle określonych odległościach

od badanej próbki ustala się ciśnienie akustyczne w strzałkach i węzłach fali stojącej, a następnie przy wykorzystaniu funkcji przejścia oblicza się współczynnik pochłaniania dźwięku [25]. Metoda ta znalazła również zastosowanie w pomiarach *in situ* współczynnika absorpcji dźwięku nawierzchni drogowych wprowadzonych normą ISO 13472-2:2010 [32, 62].

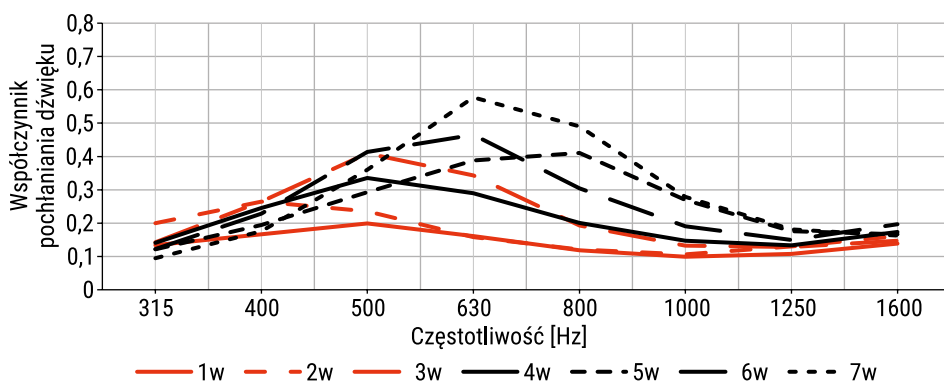
Na rysunku 2.8 pokazano badanie współczynnika absorpcji dźwięku przy wykorzystaniu systemu Spectronics Acupave odpowiednio: metodą *in situ* na nawierzchni i metodą dwumikrofonową na próbce umieszczonej wewnątrz rury impedancyjnej (z przystawką wykonaną w Politechnice Białostockiej).

Wykorzystanie tej metody w warunkach laboratoryjnych zbadano w ramach realizacji projektu badawczego pt. „Bezpieczna, proekologiczna poroelastyczna nawierzchnia drogowa (SEPOR)” [16]. Wartości współczynnika pochłaniania dźwięku siedmiu mieszanek mineralno-asfaltowych o różnej charakterystyce pokazano na rysunku 2.9.



RYSUNEK 2.8. Badania współczynnika pochłaniania dźwięku: a) metoda *in situ*; b) metoda laboratoryjna

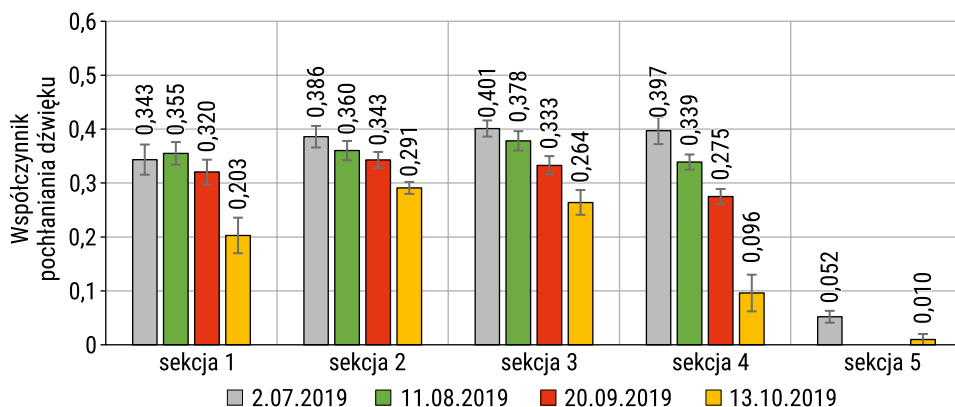
ŹRÓDŁO: fot. M. Motylewicz.



RYSUNEK 2.9. Średnie wartości współczynników pochłaniania dźwięku (wg Spectronics ACUPAVE System) ustalone na próbkach walcowych wyciętych z płyt testowych z siedmiu mieszanek mineralno-asfaltowych

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Innym przykładem wykorzystania Spectronics Acupave System w ramach projektu SEPOR było badanie trwałości akustycznej mieszanek poroelastycznych wbudowanych w nawierzchnię na pięciu odcinkach testowych. Mieszanki poroelastyczne wbudowane na sekcjach 1–4 różniły się składem, a na sekcji nr 5 wbudowano mieszankę z mastyksu grysowo-asfaltowego SMA11 (jako mieszanka referencyjna). Wyniki pokazane na rysunku 2.10 jednoznacznie wskazują na zmiany w trwałości akustycznej badanych mieszanek wraz z upływem czasu użytkowania odcinków testowych [16, 22].



RYSUNEK 2.10. Średnie wartości współczynników absorpcji na sekcjach testowych w czterech okresach pomiarowych

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

2.2.2. Wodoprzepuszczalność

Parametrem określającym właściwości akustyczne jest także wodoprzepuszczalność związana z zawartością wolnych przestrzeni oraz stopniem połączenia porów wewnątrz struktury nawierzchni. W badaniach laboratoryjnych wodoprzepuszczalność określa się według normy PN-EN 12697-19 [69]. Badanie polega na obciążeniu cylindrycznych próbek walcowych słupem wody o stałej wysokości 300 ± 1 mm oraz zmierzeniu ilości wody, która przesączy się przez próbkę w pionowym lub poziomym kierunku w odmierzonej czasie. Norma PN-EN 12697-40 [70] wprowadza również możliwość pomiaru zdolności przenikania wody przez nawierzchnię w terenie, którą określa się na podstawie czasu wypływu z cylindra 4 l wody. Na rysunku 2.11 pokazano badania wodoprzepuszczalności nawierzchni drogowych w warunkach laboratoryjnych i na rzeczywistych nawierzchniach.

a)



b)



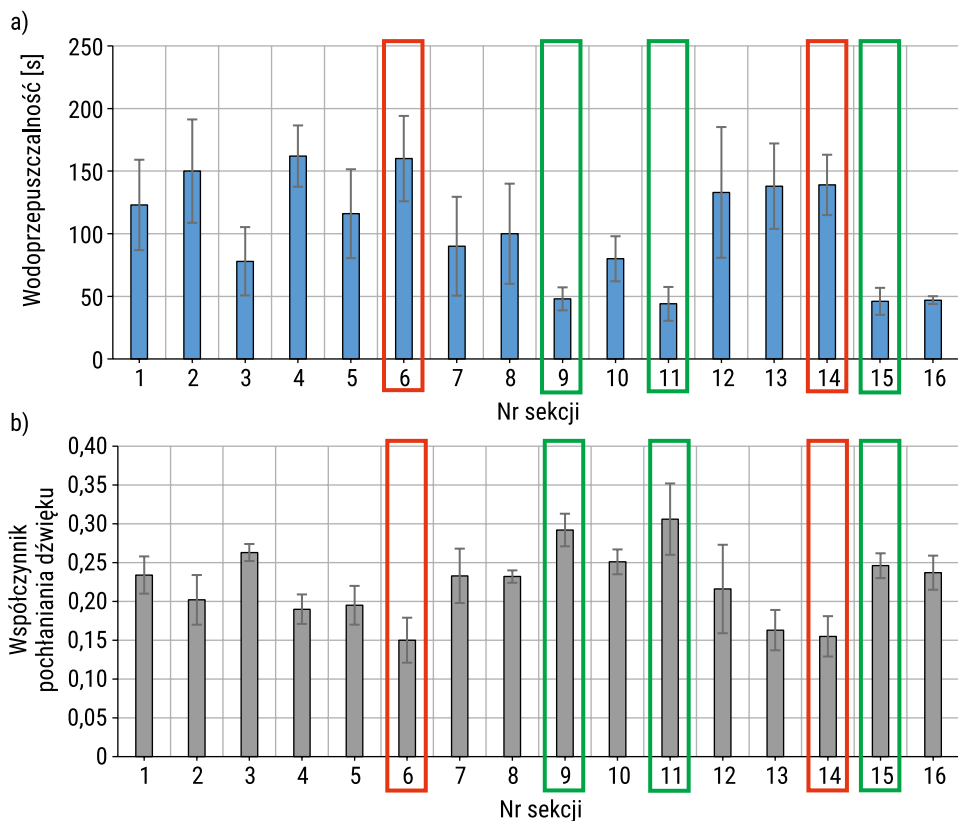
RYSUNEK 2.11. Badania wodoprzepuszczalności: a) urządzenie laboratoryjne; b) urządzenie terenowe

ŹRÓDŁO: fot. M. Motylewicz.

2.2.3. Analiza porównawcza

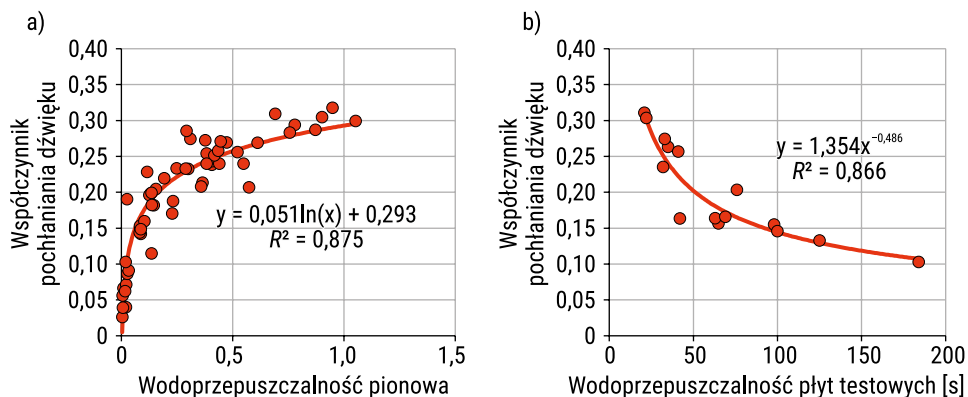
Na rysunku 2.12 pokazano najlepsze i najgorsze rozwiązania z punktu widzenia wodoprzepuszczalności i współczynnika pochłaniania dźwięku na 16 badanych sekcjach testowych [16, 18]. Warstwy ściernalne wykonane na odcinkach testowych nr 6 i 14 charakteryzowały się jednocześnie największymi wartościami czasu wypływu normowej objętości wody i najmniejszymi wartościami współczynnika pochłaniania dźwięku (najgorsze rozwiązania). Na sekcjach testowych z warstwą ściernalną w przypadku mieszanek nr 9 i 11 sytuacja była odwrotna – ustalono najmniejsze wartości wodoprzepuszczalności i największe wartości współczynnika pochłaniania dźwięku (najlepsze rozwiązania).

Na rysunku 2.13 pokazano ustalone zależności pomiędzy współczynnikiem pochłaniania dźwięku a wodoprzepuszczalnością pionową ustaloną w warunkach laboratoryjnych oraz współczynnikiem pochłaniania dźwięku i wodoprzepuszczalnością ustaloną na płytach testowych [16, 18].



RYSUNEK 2.12. Porównanie rozwiązań na krótkich sekcjach testowych z punktu widzenia: a) wodoprzepuszczalności; b) współczynnika pochłaniania dźwięku

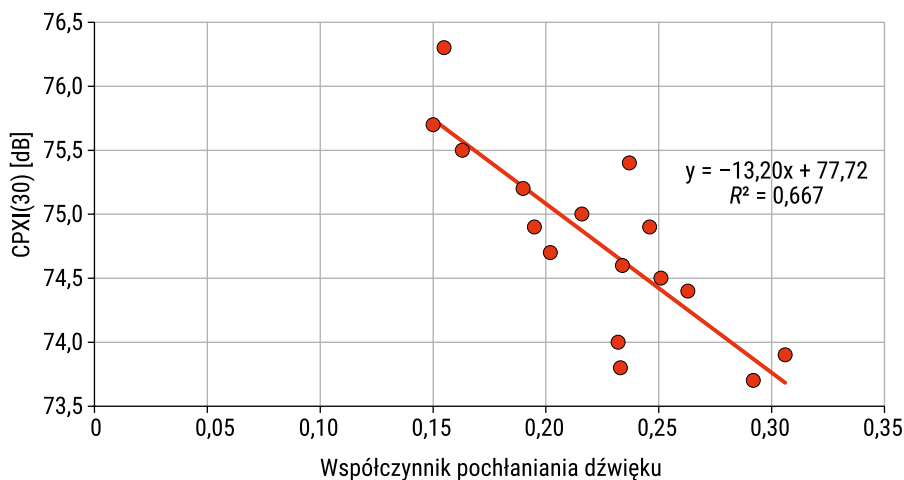
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYSUNEK 2.13. Współczynnik pochłaniania dźwięku w funkcji wodoprzepuszczalności mieszanek mineralno-gumowo-asfaltowych według metody: a) laboratoryjnej; b) terenowej

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Dodatkowo potwierdzono dobrą korelację pomiędzy współczynnikiem pochłaniania dźwięku i indeksem CPXI na badanych sekcjach testowych (rysunek 2.14). Wartości indeksu CPXI określone przez zespół z Politechniki Gdańskiej według metody CPX przy prędkości 30 km/h w ramach realizacji projektu SEPOR wyniosły odpowiednio: 75,7 dB (sekcja nr 6), 73,7 dB (sekcja nr 9), 73,9 dB (sekcja nr 11) i 76,3 dB (sekcja nr 14).



RYSUNEK 2.14. Zależność pomiędzy indeksem CPXI i współczynnikiem pochłaniania dźwięku

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

2.3. Podsumowanie

Poprawne z akustycznego punktu widzenia zaprojektowanie mieszanek mineralno-asfaltowych i mieszanek betonowych, a następnie właściwe ich wbudowanie w nawierzchnię drogową korzystnie wpływa na poziom hałasu od ruchu samochodowego. Badania współczynnika pochłaniania dźwięku i wodoprzepuszczalności w warunkach laboratoryjnych pozwalają na optymalny dobór technologii o zwiększonej zawartości wolnych przestrzeni w powiązaniu z maksymalnym uziarnieniem ziaren i wymaganym udziałem poszczególnych frakcji kruszywa.

Oceny nawierzchni pod względem akustycznym na rzeczywistych odcinkach drogowych można dokonać zarówno w ramach pomiarów poziomu hałasu toczenia opon (CPX, OBSI) i pojazdów samochodowych (SPB, CPB), jak i poprzez badania współczynnika pochłaniania dźwięku lub/i wodoprzepuszczalności. Należy przy tym pamiętać o dużym znaczeniu makrotekstury powierzchni jezdni mającej istotny wpływ na generowanie dźwięków w płaszczyźnie opona/nawierzchnia.

Zarówno wyniki badań prowadzonych przez zespół z Politechniki Białostockiej, jak i dane z literatury potwierdzają dobrą korelację pomiędzy współczynnikiem pochłaniania dźwięku i wodoprzepuszczalnością, a także pomiędzy metodami CPX i OBSI oraz metodami SPB i CPB. Uwzględniając jednak cele realizowanego projektu badawczego „Innowacyjne metody redukcji hałasu drogowego i zasady ich stosowania (INREH)”, przedmiotem szczegółowych rozważań w dalszej części niniejszej monografii będą wyniki pomiarów maksymalnego poziomu dźwięku ustalone według metod SPB i CPB.

3. Metoda statystycznego przejazdu według PN-EN ISO 11819-1:2023 – wymagania, założenia, zasady pomiaru i prezentacji wyników

3.1. Wymagania dla aparatury pomiarowej i jej lokalizacji

W skład aparatury pomiarowej wykorzystywanej podczas badań metodą SPB wchodzi:

- urządzenia do pomiaru poziomu dźwięku wraz ze statywami umożliwiającymi pomiar na wysokości $1,2 \pm 0,1$ m lub $3,0 \pm 0,1$ m nad płaszczyznę nawierzchni jezdni;
- urządzenia do pomiaru prędkości chwilowej pojazdów;
- aparatura do pomiarów temperatury i warunków atmosferycznych.

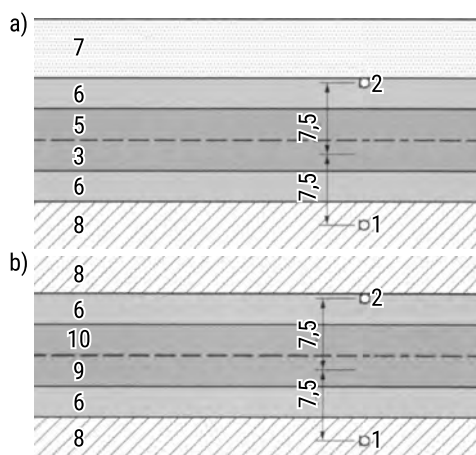
Urządzenia do pomiaru poziomu dźwięku powinny spełniać wymagania klasy 1 dokładności pomiaru określone w normie PN-EN 61672-1:2014 [65] oraz posiadać aktualne świadectwa wzorcowania. Zakres częstotliwości pomiarowych powinien obejmować pasma od 50 do 10 000 Hz, co umożliwia pełną rejestrację poziomów dźwięku generowanych zarówno przez kontakt opony z nawierzchnią, jak i przez elementy układu napędowego pojazdu. Urządzenie powinno umożliwiać rejestrację maksymalnego poziomu dźwięku oraz jego widma w pasmach tercjowych, skorygowanego krzywą A, ze stałą czasową FAST (*L_{Amax}*). Mikrofony powinny być wyposażone w osłony przeciwwietrzne o odpowiednich parametrach, ograniczające wpływ prędkości wiatru na wyniki pomiarów, niepowodujące jednocześnie istotnych zniekształceń sygnału akustycznego. Aparatura powinna być okresowo wzorcowana (kalibratory minimalnie raz na rok, analizatory dźwięku raz na dwa lata) w akredytowanych laboratoriach zgodnie z wymaganiami normy ISO/IEC 17025, co pozwala na kontrolę niepewności pomiarowej oraz zapewnienie wiarygodności uzyskiwanych wyników.

Urządzenia do pomiaru prędkości chwilowej pojazdów powinny umożliwiać pomiar prędkości w momencie przejazdu pojazdu przez przekrój pomiarowy z maksymalną dokładnością określoną niepewnością pomiarową $\pm 2,5\%$. Do tego celu mogą być stosowane radary, fotokomórki lub inne systemy pomiarowe, pod warunkiem, że ich działanie nie generuje dodatkowych źródeł hałasu oraz umożliwia precyzyjną

synchronizację danych prędkości z sygnałem akustycznym. Urządzenia te również powinny podlegać regularnej kontroli i wzorcowaniu. W przypadku urządzeń radarowych, z uwagi na wpływ poziomego kąta padania wiązki radarowej na wynik pomiaru prędkości, zaleca się, żeby urządzenie było skierowane możliwie równoległe do osi pasa ruchu i zlokalizowane tuż przy krawędzi tego pasa (chyba, że dany typ urządzenia umożliwia inne ustawienie zapewniające uzyskanie wymaganej dokładności pomiaru).

Aparatura do pomiarów temperatury i warunków atmosferycznych powinna umożliwiać pomiar dwóch temperatur powietrza oraz nawierzchni z dokładnością $\pm 1^{\circ}\text{C}$, a także kontrolę prędkości wiatru, która nie powinna przekraczać 5 m/s. Pomiar prędkości wiatru oraz temperatury powietrza powinien być wykonywany w sposób ciągły, z automatycznym zapisem wyników za pomocą aerometrów na wysokości mikrofonu. Pomiar temperatury nawierzchni jezdni prowadzi się za pomocą mierników podczerwieni. Wyniki pomiarów temperatury i warunków atmosferycznych powinny przedstawiać minimalne i maksymalne wartości podczas badań, stąd zaleca się ich możliwie częste lub automatyczne odczyty, zgodnie z wymaganiami normy ISO/TS 13471-2 [64].

Mikrofon pomiarowy jest zlokalizowany w stałej odległości $7,5\text{ m} \pm 0,1\text{ m}$ od osi pasa ruchu, po którym poruszają się badane pojazdy, na standardowej wysokości $1,2\text{ m} \pm 0,1\text{ m}$ lub opcjonalnej $3,0\text{ m} \pm 0,1\text{ m}$ nad płaszczyzną nawierzchni. Na rysunku 3.1 pokazano ustawienie mikrofonu pomiarowego w metodzie SPB.



RYSUNEK 3.1. Możliwe lokalizacje mikrofonu pomiarowego: a) droga dwujezdniowa 2/2; b) droga jednojezdniowa 1/2

Legenda: 1 – pozycja mikrofonu nr 1 ($7,5\text{ m}$ od osi pasa ruchu pomiarowego); 2 – pozycja mikrofonu nr 2 ($7,5\text{ m}$ od osi pasa ruchu pomiarowego); 3 – pas ruchu powolnego (pas pomiarowy) na jezdni drogi o przekroju 2/2; 5 – szybki pas ruchu na jezdni drogi o przekroju 2/2; 6 – pobocze; 7 – pas dzielący jezdnie drogi o przekroju 2/2; 8 – obszar przydrożny (niska roślinność lub grunt); 9 – pas do jazdy (pas pomiarowy) na jezdni drogi o przekroju 1/2; 10 – przeciwny pas ruchu na jezdni drogi o przekroju 1/2

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [67].

W przypadku drogi jednojezdniowej dwupasowej 1/2, gdy pobocze najbliższej pasa pomiarowego jest zbyt wąskie, aby zapewnić powierzchnię o odpowiednim współczynniku odbicia akustycznego, można użyć pozycji mikrofonu po drugiej stronie drogi (pozycja 2 na rysunku 3.1). W przypadku drogi dwujezdniowej 2/2, jeśli pobocze jest zbyt wąskie, aby zapewnić odpowiedni współczynnik odbicia akustycznego, należy najpierw rozważyć możliwość bezpiecznego przekierowania ruchu pojazdów na wewnętrzny, szybki pas ruchu. Jeśli nie jest to możliwe, można zamiast tego rozważyć pozycję mikrofonu w pasie dzielącym jezdnie (pozycja 2 na rysunku 3.1). Pomiar na opcjonalnej wysokości mikrofonu, $3,0\text{ m} \pm 0,1\text{ m}$ nad płaszczyznę nawierzchni jezdni, wykonuje się w sytuacji występowania w przekroju badawczym obiektów odbijających dźwięk, takich jak bariery bezpieczeństwa, lub w sytuacji braku możliwości zapewnienia odpowiednich warunków akustycznych dla obszaru pomiędzy mikrofonem a krawędzią pasa pomiarowego.

3.2. Odcinki testowe i przekroje badawcze

W normie PN-EN ISO 11819-1:2023 określono szczegółowe wymagania dla odcinków testowych i przekrojów badawczych, a wybrane z nich podano poniżej:

1. Odcinek testowy powinien charakteryzować się swobodnym i płynnym ruchem pojazdów.
2. Każdy odcinek testowy powinien mieć długość co najmniej 30 m wzdłuż drogi po obu stronach od lokalizacji mikrofonu. W przypadkach znacznego udziału w ruchu pojazdów ciężarowych o długości ponad 20 m, długość ta powinna być zwiększona do 50 m.
3. Odcinek testowy powinien być położony na prostej w planie sytuacyjnym oraz mieć jak najmniejsze pochylenie podłużne. Odcinki na łukach poziomych o dużym promieniu oraz o pochyleniu podłużnym $\leq 2\%$ są odpowiednie do prowadzenia pomiarów.
4. Nawierzchnia w przekroju badawczym powinna być jednorodna, w dobrym stanie technicznym i być reprezentatywna dla całego odcinka badanej drogi. Praktycznym sposobem oceny jednorodności nawierzchni jest wykonanie pomiaru poziomu hałasu opona/nawierzchnia metodą CPX (zgodnie z ISO 11819-2) lub w przypadku szczelnych i zwartych nawierzchni (np. beton asfaltowy, nawierzchnie betonowe) poprzez pomiar makrotekstury MPD (zgodnie z ISO 13473-1 [66]).
5. Obszar wokół mikrofonu o średnicy około 25 m powinien być wolny od obiektów odbijających innych niż podłoże gruntowe. Co najmniej połowa obszaru pomiędzy pozycją mikrofonu a osią pasa pomiarowego powinna mieć właściwości akustyczne zbliżone do badanej nawierzchni drogi, a rowy przydrożne lub inne znaczące zagłębienia terenu powinny znajdować się w odległości co najmniej 5 m od środka pasa pomiarowego.

6. W obrębie obszaru o wymiarach 30 m × 22 m nie mogą znajdować się żadne duże powierzchnie odbijające dźwięk (sztywne bariery bezpieczeństwa, duże znaki drogowe, nasypy).
7. Poziom dźwięku tła akustycznego powinien być niższy o co najmniej 10 dB od maksymalnego poziomu dźwięku ustalonego dla przejazdu najcięższego pojazdu.

3.3. Wymagania dla warunków atmosferycznych oraz stanu nawierzchni

Poza specyficznymi przypadkami badania wpływu warunków atmosferycznych na hałaśliwość nawierzchni zazwyczaj pomiary powinny być prowadzone przy suchej nawierzchni drogowej, w zakresie temperatury powietrza od 5°C do 35°C. Zaleca się przy tym wykonywanie pomiarów w okresach o temperaturze powietrza zbliżonej do referencyjnej wartości 20°C. W przypadku opadów atmosferycznych poprzedzających prowadzenie badań zaleca się – zwłaszcza w przypadku nawierzchni porowatych – kontrolę stanu wilgotności nawierzchni i przesunięcie badań w czasie w sytuacji stwierdzenia zawilgocenia. W przypadku nawierzchni szczelnych, jak betony asfaltowe, zaleca się przeprowadzenie oceny wizualnej w połączeniu z testem zawilgocenia kartki, aby ocenić, czy powierzchnia nawierzchni jest sucha. Dla nawierzchni z negatywną teksturą (SMA, EAC) zaleca się zaczekanie co najmniej trzy godziny od ustania opadu i przeprowadzenie oceny wizualnej w połączeniu z testem zawilgocenia kartki. Nawierzchnie z asfaltu porowatego mogą wymagać odczekania nawet od 24 do 48 godzin od ustania opadów do momentu wykonania badań. Należy przy tym pamiętać, że czas zanikania wilgoci zależy od nasłonecznienia, temperatury i wilgotności powietrza oraz prędkości wiatru. W specyficznych wiosennych i jesiennych okresach pomiar na nawierzchniach porowatych może być nawet niemożliwy z uwagi na zaleganie wilgoci wewnątrz porów. Takie resztkowe zawilgocenie może spowodować zwiększenie poziomu dźwięku nawet o 2 dB w stosunku do nawierzchni suchej.

3.4. Kategorie dróg w zależności od kategorii i prędkości pojazdów

Badania prowadzi się dla trzech kategorii pojazdów: osobowych (P), ciężarowych dwuosiowych (H2) i ciężarowych wieloosiowych (H3+). Do kategorii P zalicza się typowe pojazdy osobowe dwuosiowe do przewozu czterech lub pięciu osób, w tym również SUV-y oraz pojazdy o napędzie elektrycznym i hybrydowym. Pomija się pojazdy

o liczbie miejsc <4 lub >5 oraz pojazdy typu pick-up, smart, mini, terenowe i SUV-y z oponami terenowymi, sportowe o zwiększonej głośności oraz pojazdy w złym stanie technicznym.

Do kategorii pojazdów H2 zalicza się pojazdy ciężarowe (w tym ciągniki siodłowe bez naczep) oraz autobusy dwuosiove o czterech lub sześciu oponach i całkowitej masie pojazdu od 8 do 16 t. Pomija się pojazdy komunalne i służb drogowych oraz pojazdy typu van i bus. Do kategorii H3+ zalicza się pojazdy ciężarowe oraz autobusy o trzech i więcej osiach, w tym ciągniki siodłowe z naczepami oraz tzw. zestawy pojazd ciężarowy + przyczepa. Pomija się pojazdy budowlane z oponami terenowymi, takie jak wywrotki, oraz tzw. pociągi drogowe o >8 osi.

Podczas pomiarów typuje się pojedynczo przejeżdżające pojazdy, które są wyraźnie „oddzielone akustycznie” od innych pojazdów. Oznacza to, że w czasie przed i po przejeździe pojazdu pomiarowego chwilowe poziomy dźwięku LA powinny być o co najmniej 6 dB niższe od zmierzonego maksymalnego poziomu dźwięku LA_{max} wywołanego przejazdem tego pojazdu. W praktyce oznacza to, że wytypowany pojazd testowy na wysokości przekroju pomiarowego występuje samodzielnie w przekroju drogi, a wszystkie inne odjeżdżające i dojeżdżające do przekroju pomiarowego pojazdy na wszystkich pasach ruchu drogi znajdują się w znacznej odległości od pojazdu testowego (w oparciu o dotychczasowe doświadczenia zaleca się odległość 100 m).

Wytypowany pojazd powinien poruszać się ze stałą prędkością powyżej 45 km/h, bez przyspieszeń i hamowań, środkiem pasa pomiarowego. Pojazdy niespełniające tych warunków powinny być wykluczone z wyników pomiarów i badań. Dodatkowo z badań należy wykluczyć pojazdy emitujące dźwięki pochodzące z wadliwych lub nie naturalnie głośnych układów napędowego lub wydechowego, a także części konstrukcyjnych w złym stanie technicznym.

W celu zmniejszenia niepewności co do wyników pomiarów zaleca się przeprowadzenie badań i uzyskanie danych dla minimum 100 pojazdów lekkich kategorii P oraz 40 pojazdów ciężarowych kategorii H (łącznie H2 i H3+). Pomiar pojazdów kategorii H2 nie jest konieczny, jeżeli ten typ ma bardzo mały udział w ruchu lub w ogóle nie występuje, co jest typowe przede wszystkim na drogach podmiejskich i zamiejskich. Wyniki pomiarów LA_{max} ustalone dla każdego pojazdu kategorii H2 oraz ich widmo w pasmach tercjowych częstotliwości należy sprowadzić do poziomu ogólnego kategorii H3+ poprzez dodanie 2,7 dB.

Rozróżnia się trzy kategorie drogi w zależności od zakresu prędkości, z jaką odbywa się ruch pojazdów, z uwzględnieniem zagospodarowania terenu w jej otoczeniu:

- droga o niskich prędkościach (45–64 km/h),
- droga o średnich prędkościach (65–99 km/h),
- droga o wysokich prędkościach (>100 km/h – dotyczy tylko pojazdów osobowych).

Dla każdej kategorii drogi ustala się prędkość referencyjną V_r : odpowiednio 50 km/h, 80 km/h i 110 km/h (dla pojazdów kategorii P i 80 km/h dla pojazdów ciężarowych H).

3.5. Wyniki pomiarów i ich prezentacja

Na podstawie wyników pomiarów maksymalnego poziomu dźwięku L_{Amax} oraz prędkości uzyskanych dla każdego zmierzonego pojazdu osobowego P oblicza się zależność regresyjną:

$$L_{SPB:PV} = A + B \cdot \log(V), \quad (3.1)$$

gdzie: $L_{SPB:PV}$ – poziom dźwięku SPB dla pojazdów osobowych P w zależności od prędkości, A i B – stałe obliczane z regresji liniowej, V – prędkość pojazdu w km/h.

Podstawiając następnie do uzyskanej zależności za V wartość prędkości referencyjnej V_r , uzyskuje się poziom $L_{SPB:PV_r}$.

W przypadku pojazdów ciężarowych H z uwagi na fakt, że wartości maksymalnych poziomów dźwięku mają zwykle bardzo duży rozrzut przy relatywnie wąskim zakresie prędkości tych pojazdów, co skutkuje błędami oszacowania stałej B równania, należy uzyskane wyniki obliczeń sprowadzić do prędkości referencyjnej przy pomocy procedury normalizacyjnej. W tym celu najpierw oblicza się średni poziom dźwięku $EL_{Amax:H}$ i średnią prędkość $EV:H$ ze wszystkich uzyskanych wyników pomiaru maksymalnych poziomów dźwięku oraz prędkości dla pojazdów ciężarowych H. Następnie sprowadza się uzyskany z pomiarów średni poziom dźwięku do poziomu dźwięku przy prędkości referencyjnej za pomocą zależności: $L_{SPB:H} = EL_{Amax:H} - B \cdot \log(EV:H / V_r)$, gdzie: $L_{SPB:H}$ oznacza poziom dźwięku SPB dla pojazdów ciężarowych H przy ustalonej prędkości referencyjnej, $EL_{Amax:H}$ i $EV:H$ to średnie arytmetyczne z otrzymanych z pomiarów maksymalnych poziomów dźwięku i prędkości dla wszystkich pojazdów ciężarowych, natomiast B – stała równania przy prędkości referencyjnej, którą przyjmuje się równą odpowiednio: 30 dla nawierzchni z betonów cementowych, 25 dla nawierzchni porowatych oraz 25 dla innych typów nawierzchni o zawartości wolnych przestrzeni <18%. Podstawiając następnie do uzyskanego równania za $EV:H$ wartość prędkości referencyjnej V_r , uzyskuje się poziom $L_{SPB:HV_r}$.

Uzyskane wartości $L_{SPB:PV_r}$ oraz $L_{SPB:HV_r}$ należy następnie skorygować z uwzględnieniem referencyjnej temperatury powietrza 20°C, w oparciu o procedurę określoną w normie ISO/TS 13471-2. Wyniki pomiarów L_{Amax} uzyskane na opcjonalnej wysokości mikrofonu $3,0 \pm 0,1$ m nad poziomem nawierzchni powiększa się o wartość 1,0 dB dla zamkniętych typów nawierzchni (jak betony asfaltowe) oraz o 0,7 dB dla otwartych typów nawierzchni (o zawartości wolnych przestrzeni >18%), tak aby odzwierciedlić wartości uzyskiwane na standardowej wysokości mikrofonu.

Prezentacja wyników z pomiarów przeprowadzonych metodą SPB powinna zawierać:

- informacje ogólne: data, godzina rozpoczęcia i zakończenia pomiarów, instytucja realizująca pomiary i cel pomiarów, aparatura pomiarowa, pozycja mikrofonu;
- informacje o odcinku badawczym: lokalizacja, kategoria drogi z przypisaną prędkością referencyjną, plan sytuacyjny z pokazaniem lokalizacji mikrofonu i opisem

obszaru między mikrofonem a pasem pomiarowym, rysunek przekroju poprzecznego (opcjonalnie zdjęcie), liczba pojazdów, dla jakich wykonano pomiar;

- informacje o rodzaju i konstrukcji nawierzchni drogowej: wiek, typ, technologia wykonania, stan techniczny, maksymalny wymiar kruszywa, grubość warstwy nawierzchni (dla nawierzchni porowatych), inne informacje o konstrukcji i wykonaniu nawierzchni mogące mieć wpływ na właściwości akustyczne, zdjęcie nawierzchni, makrotekstura (MPD);
- informacje o czynnikach środowiskowych: opady atmosferyczne, wyniki pomiaru temperatury powietrza i nawierzchni, prędkość wiatru;
- ustalone i obliczone poziomy dźwięku: $L_{SPB:PVr}$ dla pojazdów osobowych P oraz $L_{SPB:HVR}$ dla pojazdów ciężarowych H, indeks SPBI, współczynniki regresji liniowej ustalone dla zależności pomiędzy maksymalnymi poziomami dźwięku a logarytmem prędkości niezależnie dla pojazdów osobowych P i ciężarowych H, dane o widmie tercjowym maksymalnego poziomu dźwięku dla pojazdów osobowych P i ciężarowych H sprowadzone do prędkości referencyjnej według specjalnej procedury.

Szczegółowe informacje o prezentacji poszczególnych punktów raportu podano w normie PN-EN ISO 11819-1:2023.

4. Ocena akustyczna badanych technologii nawierzchni drogowych według metody SPB

4.1. Wybór przekrojów badawczych i charakterystyka ich nawierzchni

W ramach projektu „Innowacyjne metody redukcji hałasu drogowego i zasady ich stosowania (INREH)” realizowanego w ramach konkursu RID-II w 2024 roku wykonano pomiary *L_{Amax}* metodą statystycznego przejazdu w 26 przekrojach badawczych o nawierzchniach asfaltowej i betonowej. Wybór odcinków testowych i przekrojów badawczych poprzedzono szczegółową analizą wyników pomiarów prowadzonych wcześniej przez zespół z Politechniki Białostockiej oraz w ramach projektu RID-I [27, 54]. Uwzględniono przy tym informacje na temat technologii budowy nawierzchni uzyskane w 16 oddziałach Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad oraz wybranych zarządcach dróg wojewódzkich.

Przed podjęciem decyzji o zakwalifikowaniu danego odcinka drogowego do badań hałaśliwości nawierzchni i wyborem lokalizacji przekroju badawczego dokonano sprawdzenia „w terenie” jego przydatności do wykonywania pomiarów hałasu toczenia pojazdów metodą statystycznego przejazdu (SPB). W tabeli 4.1 podano charakterystykę nawierzchni w wytypowanych przekrojach badawczych. Poza podaniem informacji o typie nawierzchni (A – asfaltowa, B – betonowa), technologii jej wykonania (AC11, SMA11, SMA8 LA, SMA8, BBTM8, G&G, CC-BuD, EAC8), makroteksturze nawierzchni MPD i jej wieku wskazano także numer drogi, przyjęte symbole przekrojów badawczych oraz kody pojazdów potrzebne do dalszych analiz. W załączniku Z1 przedstawiono widok nawierzchni w 26 przekrojach badawczych.

TABELA 4.1. Charakterystyka nawierzchni w przekrojach badawczych

Lp.	Typ nawierzchni	Droga	Technologia	Kod technologii	Rok wykonania lub wiek nawierzchni	MPD [mm]	Nr przekroju	Pojazd			
								osobowy	kod	ciężarowy	kod
1.	A	DK61	AC11	T1	>10 lat	0,66	A01	P	PA01	H	HA01
2.	A	DK91	AC11	T1	2015	1,02	A02	P	PA02	H	HA02

Lp.	Typ nawierzchni	Droga	Technologia	Kod technologii	Rok wykonania lub wiek nawierzchni	MPD [mm]	Nr przekroju	Pojazd			
								osobowy	kod	ciężarowy	kod
3.	A	DW673	AC11	T1	>10 lat	0,64	A03	P	PA03	–	–
4.	A	S8	SMA11	T2	2017	0,98	A04	P	PA04	H	HA04
5.	A	S8	SMA11	T2	2017	0,98	A05	P	PA05	H	HA05
6.	A	S51	SMA11	T2	2018	1,03	A06	P	PA06	H	HA06
7.	A	DK62	SMA11	T2	>10 lat	1,48	A07	P	PA07	H	HA07
8.	A	S51	SMA8 LA	T3	2018	1,14	A08	P	PA08	H	HA08
9.	A	DK36	SMA8 LA	T3	2021	0,86	A09	P	PA09	H	HA09
10.	A	S7	SMA8	T4	2021	1,57	A10	P	PA10	H	HA10
11.	A	DK78	SMA8	T4	2021	1,92	A11	P	PA11	H	HA11
12.	A	DK91	BBTM8	T5	2023	1,02	A12	P	PA12	H	HA12
13.	A	DW791	BBTM8	T5	2022	0,91	A13	P	PA13	H	HA13
14.	A	DW935	BBTM8	T5	2022	1,21	A14	P	PA14	H	HA14
15.	B	DK50	G&G	T6	2021	0,34	B01	P	PB01	H	HB01
16.	B	S8	G&G	T6	2020	0,59	B02	P	PB02	H	HB02
17.	B	S8	CC-BuD	T7	>10 lat	0,26	B03	P	PB03	H	HB03
18.	B	A18	CC-BuD	T7	>10 lat	0,39	B04	P	PB04	H	HB04
19.	B	S7	EAC8	T8	2022	1,28	B05	P	PB05	H	HB05
20.	B	S7	EAC8	T8	2022	1,27	B06	P	PB06	H	HB06
21.	B	S8	EAC8	T8	2017	1,57	B07	P	PB07	H	HB07
22.	B	S8	EAC8	T8	2018	0,96	B08	P	PB08	H	HB08
23.	B	S8	EAC8	T8	2018	0,74	B09	P	PB09	H	HB09
24.	B	A18	EAC8	T8	2023	1,05	B10	P	PB10	H	HB10
25.	B	A18	EAC8	T8	2023	0,95	B11	P	PB11	H	HB11
26.	B	S61	EAC8	T8	2021	1,65	B12	P	PB12	H	HB12
Technologie asfaltowe: SMA – mastyks asfaltowo-grysowy, AC – beton asfaltowy, SMA LA – mastyks asfaltowo-grysowy o obniżonej hałaśliwości, BBTM – beton asfaltowy do bardzo cienkich warstw. Technologie z betonu cementowego: G&G (ang. <i>grooving/grinding</i>) – teksturowanie techniką rowkowania i szlifowania, EAC – beton cementowy z odkrytym kruszywem, CC-BuD – beton cementowy teksturowany tkaniną jutową. Drogi: A – autostrada, S – droga ekspresowa, DK – ogólnodostępna droga krajowa, DW – droga wojewódzka											

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Na rysunku 4.1. pokazano lokalizację przekrojów badawczych, w których wykonano pomiary maksymalnego poziomu dźwięku od przejeżdżających pojazdów.



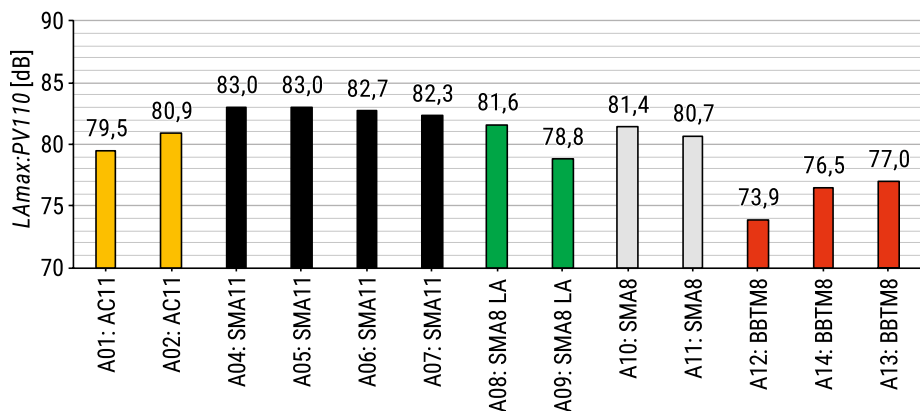
RYSUNEK 4.1. Lokalizacja przekrojów badawczych w pomiarach metodą SPB (nawierzchnie asfaltowe i betonowe)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie Google Maps.

4.2. Ocena akustyczna badanych technologii nawierzchni drogowych

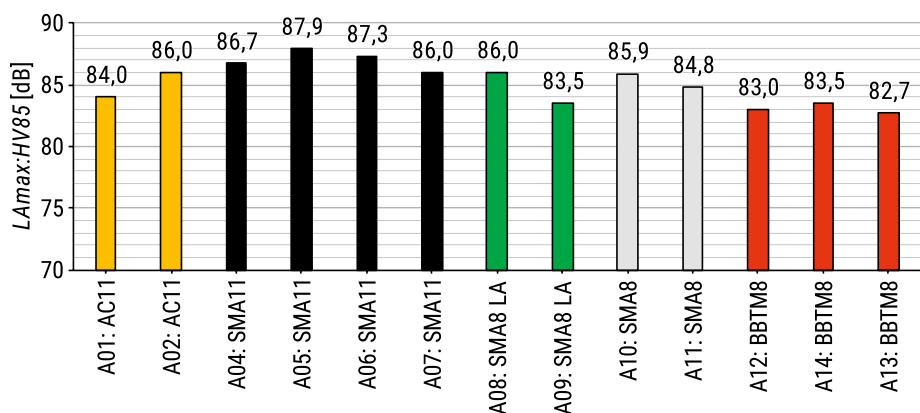
Na podstawie danych pomiarowych (L_{Amax}), zgodnie z zapisami normy PN-EN ISO 11819-1:2023, ustalono zależności regresyjne pomiędzy maksymalnymi poziomami dźwięku i logarytmem prędkości pojedynczo jadących pojazdów. Ponieważ pomiary prowadzono przy temperaturach z zakresu 17–23°C zmieniających się w czasie ich trwania o $\pm 2^\circ\text{C}$, w analizie wyników nie wprowadzono korekty temperaturowej.

W celu porównania badanych nawierzchni z akustycznego punktu widzenia na rysunkach 4.2 i 4.3 pokazano wartości L_{Amax} odpowiednio dla statystycznego pojazdu osobowego jadącego z prędkością 110 km/h i wielozłonowego pojazdu ciężarowego (kategoria H3+) jadącego z prędkością 85 km/h na nawierzchniach asfaltowych, natomiast na rysunkach 4.4 i 4.5 na nawierzchniach betonowych.



RYSUNEK 4.2. Wartości L_{max} od przejazdu statystycznego pojazdu osobowego z prędkością 110 km/h – nawierzchnie asfaltowe

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

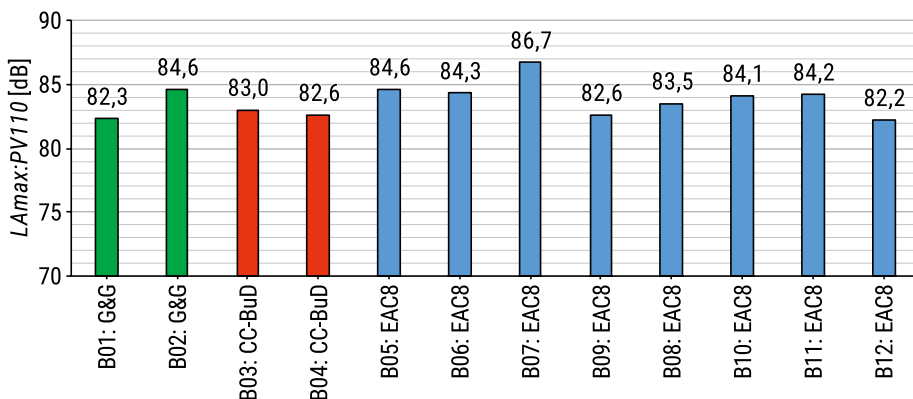


RYSUNEK 4.3. Wartości L_{max} od przejazdu statystycznego wielocłonowego pojazdu ciężarowego z prędkością 85 km/h – nawierzchnie asfaltowe

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

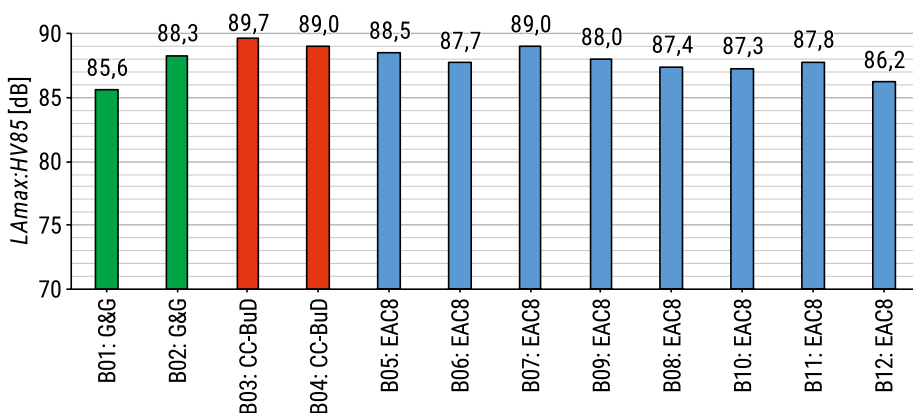
Jak wynika z analizy przedstawionych wartości, w przypadku niektórych przekrojów badawczych o nawierzchni wykonanej w takiej samej technologii różnice pomiędzy poziomami L_{max} są nieistotne, natomiast w przypadku innych technologii stwierdzono stosunkowo duże różnice. W tabeli 4.2 przedstawiono maksymalne różnice pomiędzy maksymalnymi poziomami hałasu toczenia od pojazdu osobowego przejeżdżającego z prędkością 110 km/h i wielocłonowego pojazdu ciężarowego przejeżdżającego z prędkością 85 km/h w ramach tych samych technologii. Największe różnice ustalono na nawierzchniach SMA8 LA oraz nawierzchniach betonowych EAC8 i G&G. W celu wyjaśnienia tego problemu przeprowadzono analizę widmową dźwięków emitowanych od przejazdu statystycznego pojazdu osobowego

(kategoria P) z prędkością 110 km/h i wielozłonowego pojazdu ciężarowego (kategoria H3+) z prędkością 85 km/h.



RYSUNEK 4.4. Wartości L_{Amax} od przejazdu statystycznego pojazdu osobowego z prędkością 110 km/h – nawierzchnie betonowe

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYSUNEK 4.5. Wartości L_{Amax} od przejazdu statystycznego wielozłonowego pojazdu ciężarowego z prędkością 85 km/h – nawierzchnie betonowe

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

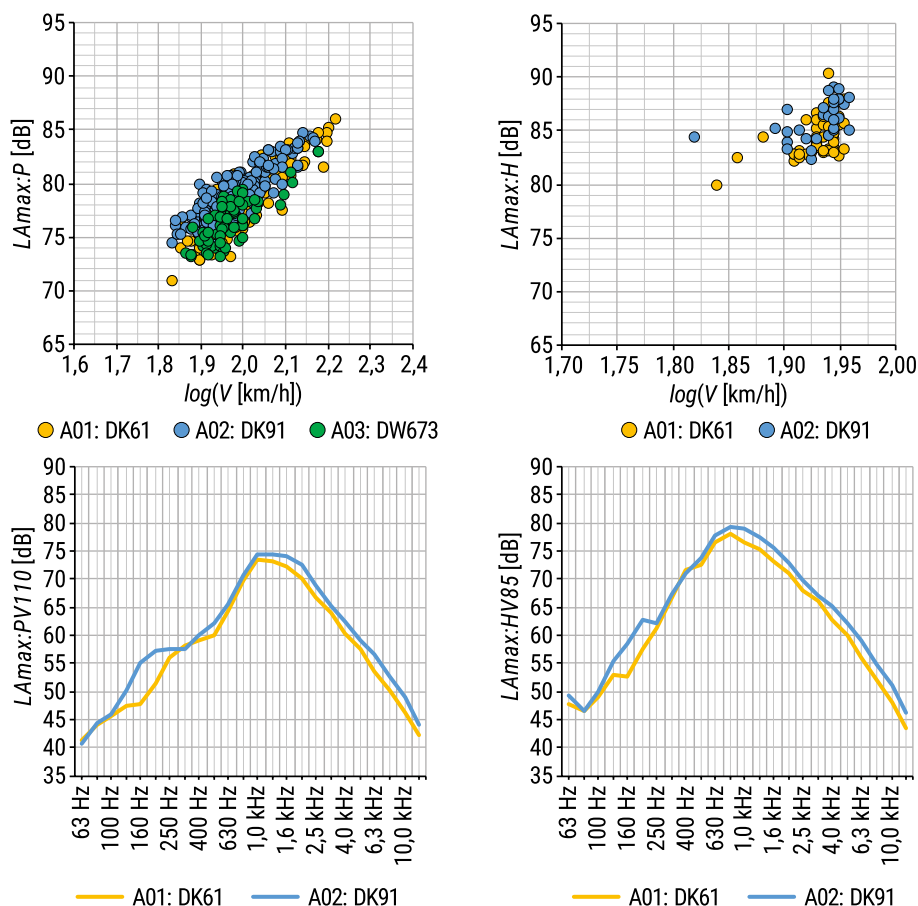
TABELA 4.2. Maksymalne różnice pomiędzy poziomami hałasu toczenia w przekrojach badawczych o nawierzchni wykonanej w takiej samej technologii

Technologia	Pojazd P [dB]	Pojazd H3+ [dB]	Technologia	Pojazd P [dB]	Pojazd H3+ [dB]
AC11	1,4	2,0	EAC8	4,5	2,8
SMA11	0,1	1,9	CC-BuD	0,4	0,7

Technologia	Pojazd P [dB]	Pojazd H3+ [dB]	Technologia	Pojazd P [dB]	Pojazd H3+ [dB]
SMA8	0,7	1,1	G&G	2,3	2,7
SMA8 LA	2,8	2,5			
BBTM8	2,1	0,8			

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

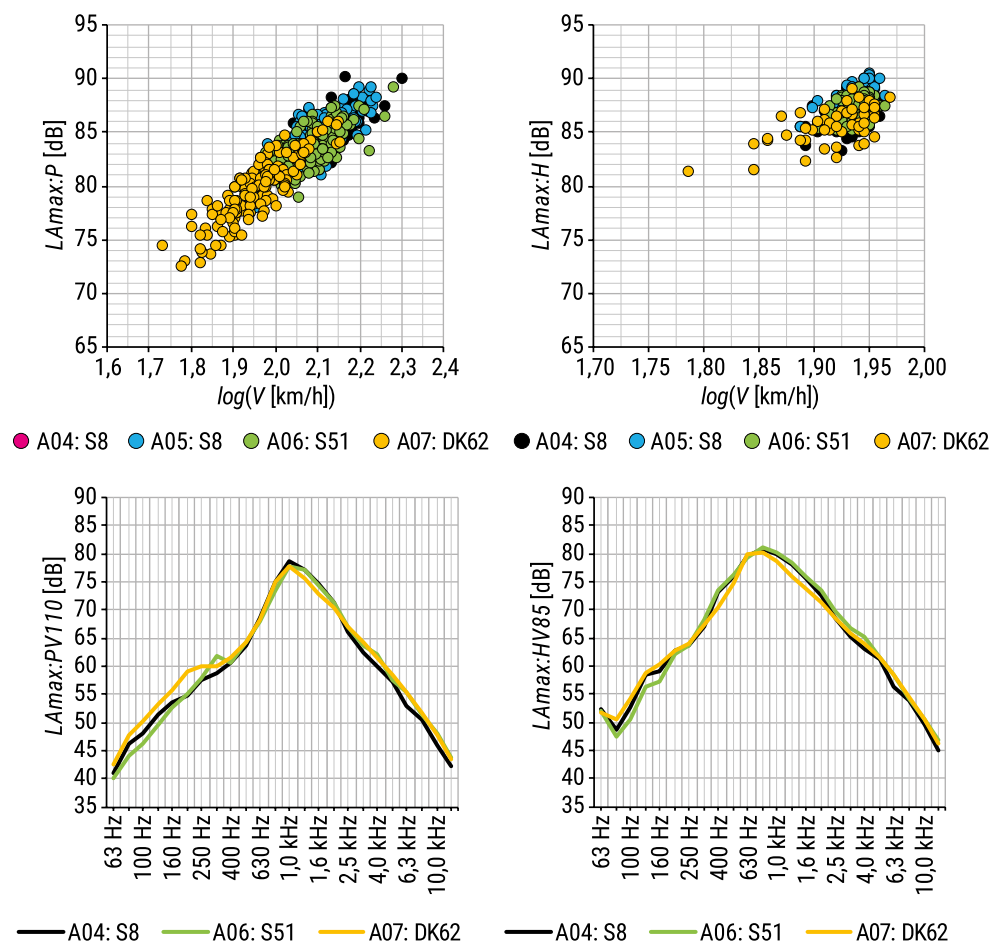
Wizualizację wyników pomiarów i widm emitowanych dźwięków w odniesieniu do badanych technologii i kategorii pojazdów pokazano na rysunkach 4.6–4.13. W komentarzach wskazano na prawdopodobną przyczynę wystąpienia różnic pomiędzy ustalonymi wynikami w różnych lokalizacjach w ramach takiej samej technologii.



RYSUNEK 4.6. Maksymalne poziomy dźwięku od jadących pojazdów – nawierzchnia AC11

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

W przypadku nawierzchni z betonu asfaltowego AC11 pomiary L_{Amax} wykonano w trzech przekrojach, z tym że w przekroju na drodze wojewódzkiej DW673 (A03) nie określono poziomu hałasu toczenia od przejazdu pojazdów kategorii H3+ z uwagi na niemalże brak w potoku ruchu pojazdów ciężarowych, a te już przejeżdżające były w średnim i złym stanie technicznym. Wyższą hałaśliwością charakteryzuje się nawierzchnia na drodze DK91 (A02) – odpowiednio o 1,4 dB w przypadku pojazdu osobowego i o 2,0 dB w przypadku pojazdu ciężarowego. Prawdopodobną przyczyną jest większa makrotekstura (MPD = 1,02 mm) powierzchni jezdni na tej drodze w porównaniu z nawierzchnią na drodze DK61 (A01) (MPD = 0,66 mm). Analiza widm pokazuje, że różnica w hałaśliwości badanych nawierzchni AC11 wynika z większych poziomów maksymalnego poziomu dźwięku w zakresie częstotliwości 100–250 Hz w pasmach tercjowych i w pasmach powyżej 800 Hz.

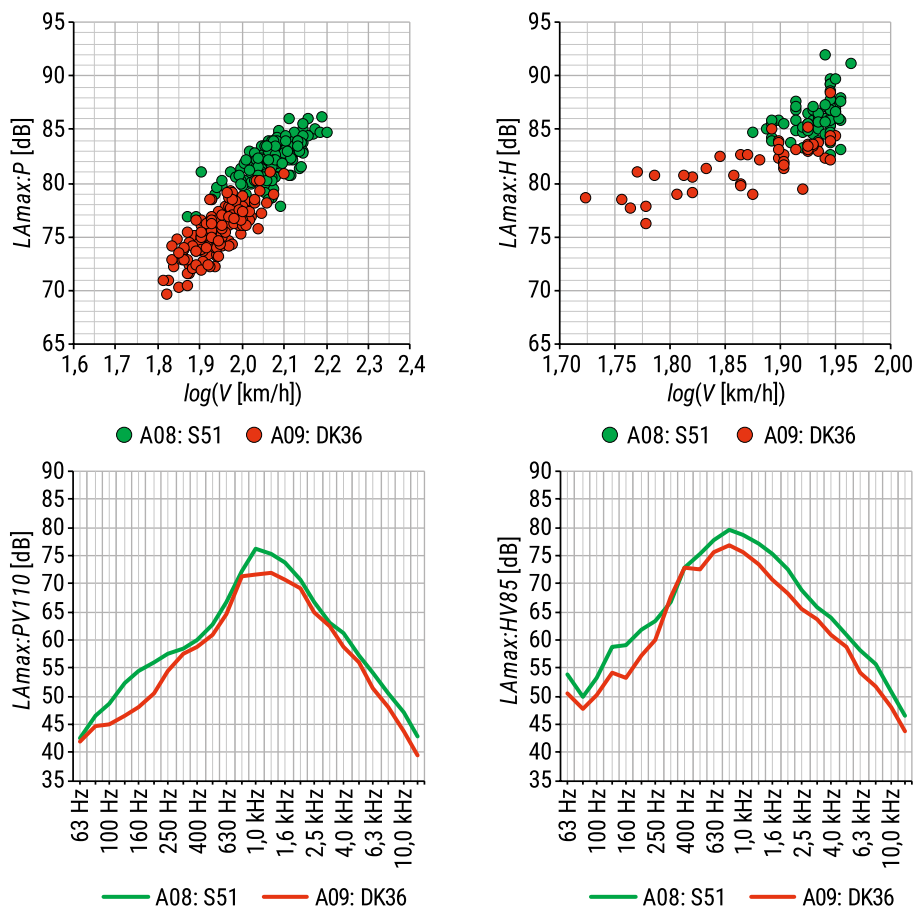


RYSUNEK 4.7. Maksymalne poziomy dźwięku od jadących pojazdów – nawierzchnia SMA11

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Nawierzchnie typu SMA11 badano w czterech przekrojach na dwóch drogach szybkiego ruchu (S8 – A04 i A05 oraz S51 – A06) oraz na drodze krajowej DK62 (A07). Na nawierzchni na drogach szybkiego ruchu ustalono różnice pomiędzy maksymalnymi poziomami od jadącego pojazdu osobowego mniejsze niż 0,4 dB w przypadku pojazdu osobowego i mniejsze niż 1,3 dB w przypadku pojazdu ciężarowego. Porównywalne wartości poziomu hałasu toczenia pojazdów na drogach S8 i S51 (A04 i A06) świadczą o dobrym przygotowaniu wykonawców do budowy nawierzchni SMA11, niezależnie od ich lokalizacji i firmy realizującej zadanie.

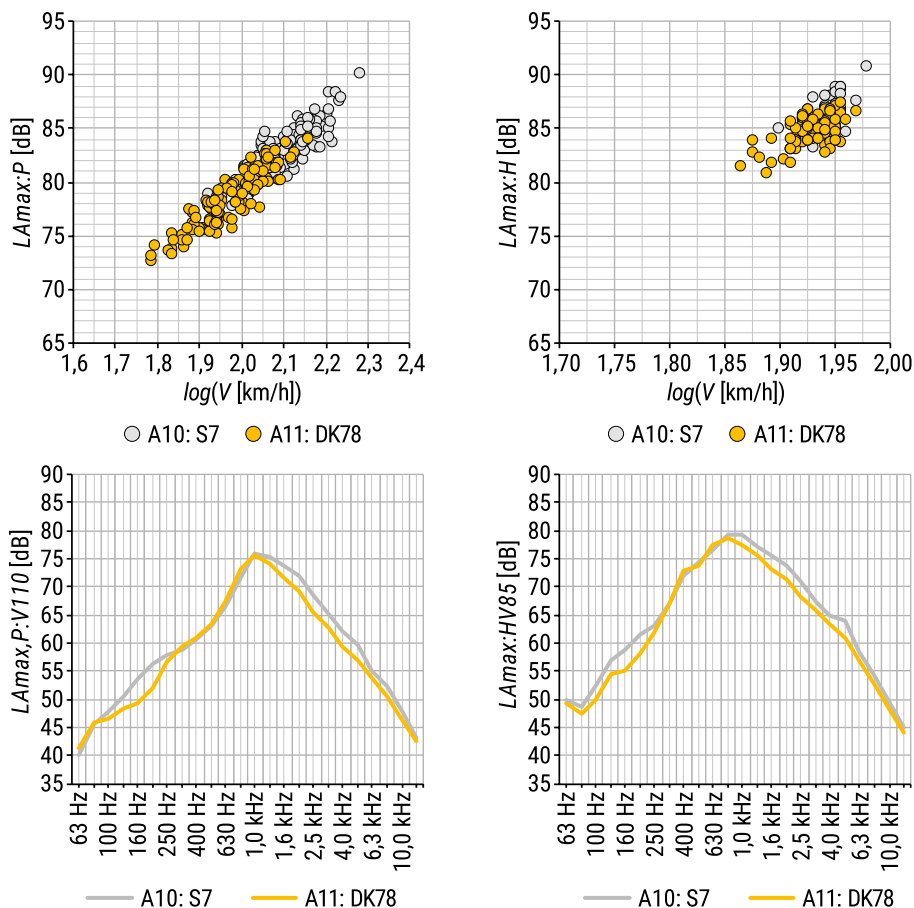
Niższe wartości poziomu hałasu toczenia pojazdów, zarówno osobowego, jak i ciężarowego, uzyskano na drodze DK62 (A07). Przyczyniły się do tego prawdopodobnie, pomimo większej makrotekstury na DK62, różnice w charakterystyce pojazdów uczestniczących w ruchu na ogólnodostępnej drodze krajowej i drogach szybkiego ruchu.



RYSUNEK 4.8. Maksymalne poziomy dźwięku od jadących pojazdów – nawierzchnia SMA8 LA

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Pośród dwóch badanych nawierzchni typu SMA8 LA zdecydowanie mniej hałaśliwa okazała się nawierzchnia na drodze DK36 (A08). Potwierdzenie stanowią pokazane widma emitowanych dźwięków, a przyczyną tego jest z pewnością krótszy okres eksploatacji nawierzchni na drodze DK36, co ma istotne znaczenie przy rozwiązaniach o zwiększonej zawartości wolnych przestrzeni w mieszance wbudowanej w warstwę ścieralną. Dodatkowo nawierzchnia na DK36 ma mniejszą makroteksturę.

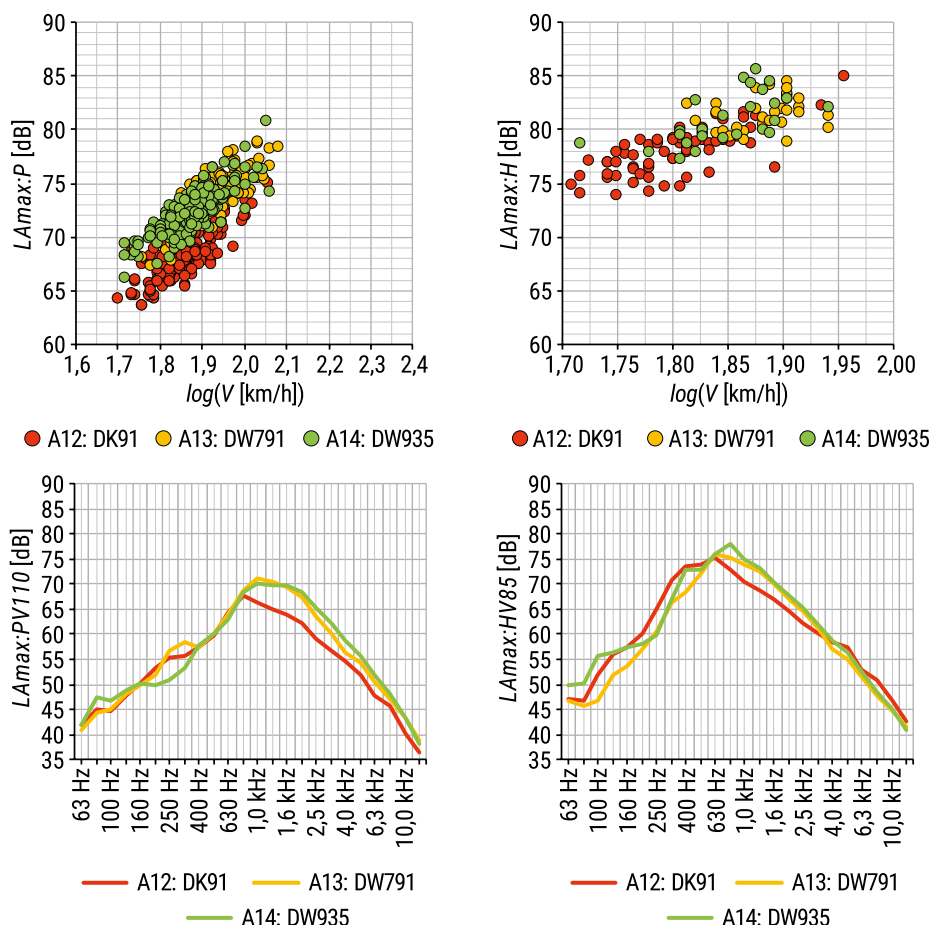


RYSUNEK 4.9. Maksymalne poziomy dźwięku od jadących pojazdów – nawierzchnia SMA8

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Na podstawie charakterystyki nawierzchni oraz wyników L_{Amax} i widm dźwięku ustalono, że pomimo takiego samego okresu eksploatacji drogi i nieco większej makrotekstury powierzchni jezdni na drodze DK78 (A11) nieznacznie cichszym rozwiązaniem okazała się nawierzchnia na ogólnodostępnej drodze krajowej. Jak wynika z analizy widm emitowanych dźwięków, prawdopodobną przyczyną występującej różnicy są mechanizmy aerodynamiczne (m.in. rezonans powietrza w rowkach bieżnika,

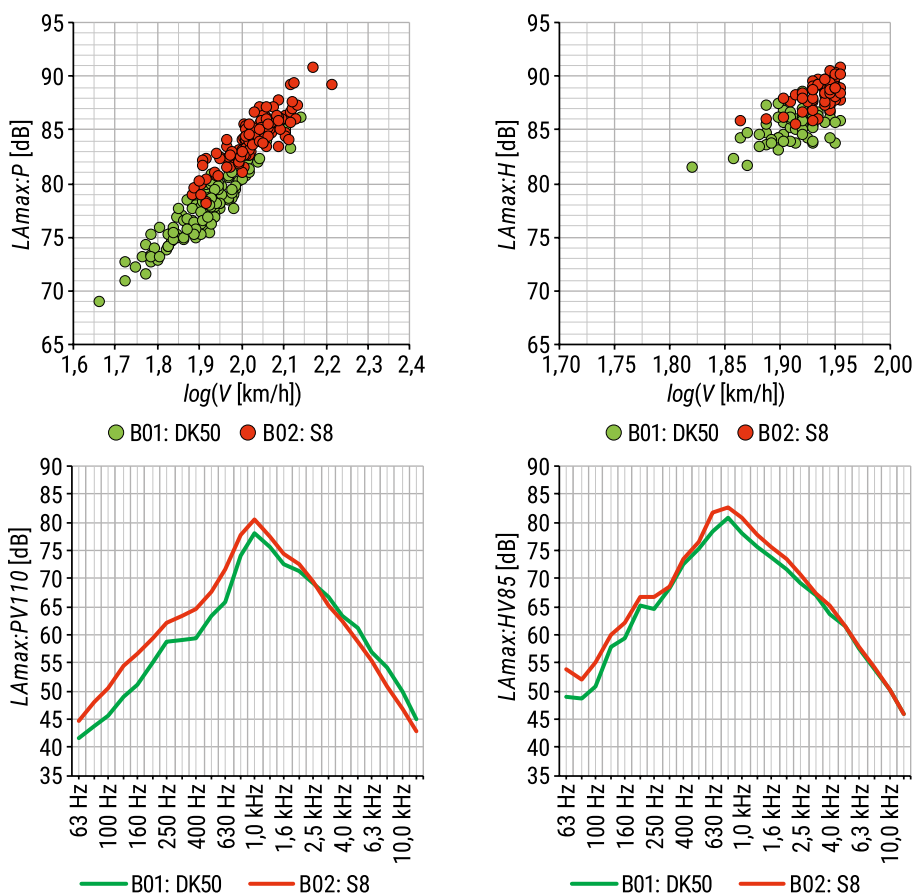
pompowanie powietrza – ang. *air pumping*, rezonans Helmholtza) mające większy wpływ w zakresie częstotliwości powyżej 800 Hz. Nawierzchnie o grubszej makro-teksturze są w tym przypadku korzystniejszym rozwiązaniem.



RYSUNEK 4.10. Maksymalne poziomy dźwięku od jadących pojazdów – nawierzchnia BBTM8

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

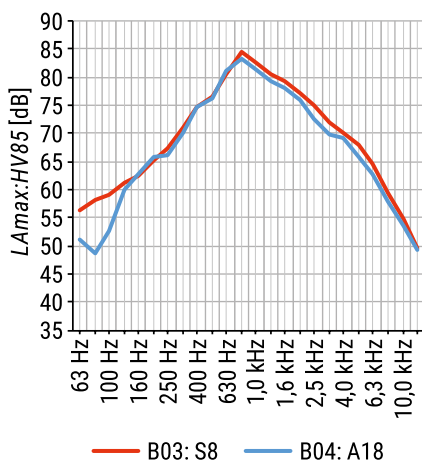
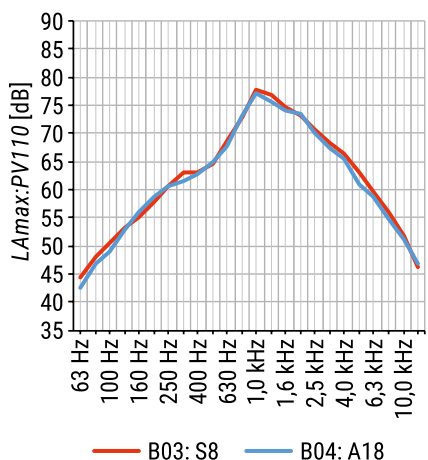
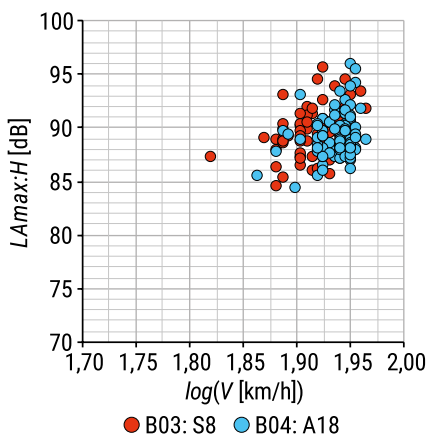
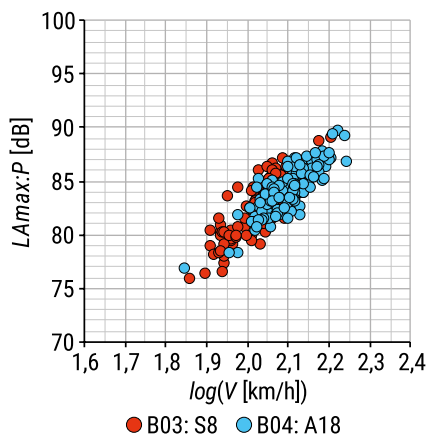
W przypadku technologii BBTM8 najcichszą nawierzchnią w odniesieniu do pojazdu osobowego okazało się rozwiązanie na drodze DK91 (A12). Najbardziej prawdopodobnymi przyczynami takiej sytuacji były różnice w jakości wykonania nawierzchni na drodze krajowej i na drodze wojewódzkiej (A13 i A14) oraz gorszy stan pojazdów kategorii P poruszających się po drogach wojewódzkich, realizujących głównie przejazdy o znaczeniu lokalnym. Przy przejeździe wielocłonowego pojazdu ciężarowego nie stwierdzono tak istotnych różnic.



RYSUNEK 4.11. Maksymalne poziomy dźwięku od jadących pojazdów – nawierzchnia G&G

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Przedstawione wyniki wykazały, że w przypadku nawierzchni betonowych teksturowanych techniką *grooving/grinding* (G&G) wystąpiły istotne różnice w poziomach hałasu toczenia pojazdów. Zdecydowanie korzystniejszym rozwiązaniem w odniesieniu do pojazdu osobowego okazała się nawierzchnia na drodze DK50 (B01). Wynika to z faktu, że jej makrotekstura wynosiła 0,34 mm, a w przekroju na drodze S8 (B02) – 0,59 mm. Dodatkowo nawierzchnia na drodze S8 charakteryzowała się dużą niejednorodnością powierzchni jezdni, co zadecydowało o wyższych wartościach generowanych poziomów hałasu opona/nawierzchnia. Stwierdzono przy tym, że na dwóch analizowanych odcinkach w wyniku teksturowania uzyskano powierzchnie różniące się między sobą głębokością i rozstawem rowków, a także mikroteksturą.

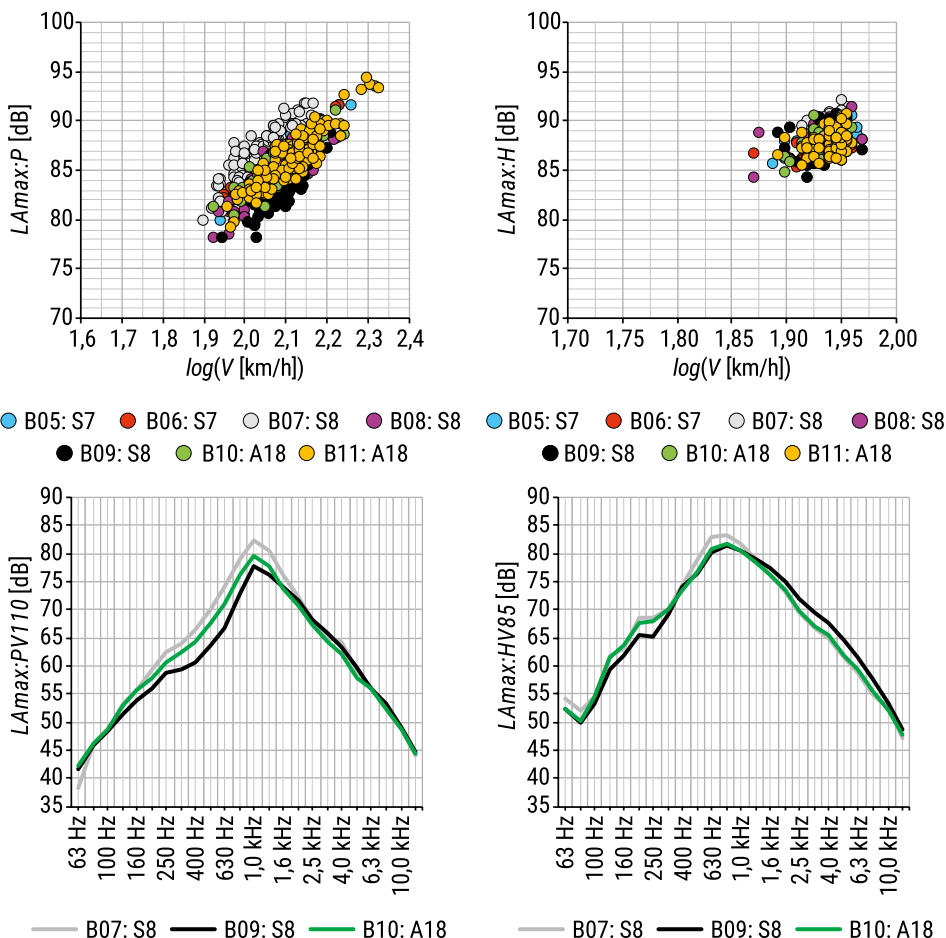


RYSUNEK 4.12. Maksymalne poziomy dźwięku od jadących pojazdów – nawierzchnia CC-BuD

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wyniki ustalone na nawierzchni betonowej teksturowanej tkaniną jutową w dwóch przekrojach badawczych, pomimo różnej ich lokalizacji, są bardzo podobne. Zbliżony okres eksploatacji oraz podobne wartości makrotekstury zadecydowały, że poziomy emitowanych dźwięków, także w zakresie analizowanych częstotliwości, nie różni się między sobą.

Pomiary maksymalnego poziomu dźwięku od jadących pojazdów kategorii P i H wykonano na nawierzchni typu EAC8 w ośmiu przekrojach badawczych na drogach szybkiego ruchu. Wyniki w przekrojach B07 i B09 na drodze S8, w szczególności w odniesieniu do pojazdu osobowego, różniły się od pozostałych. W przypadku przekrojów na S8 (B07 i B09), przy takiej samej charakterystyce potoku pojazdów, istotny wpływ na tak dużą różnicę (4,1 dB) miała makrotekstura MPD (1,57 i 0,74 mm).



RYSUNEK 4.13. Maksymalne poziomy dźwięku od jadących pojazdów – nawierzchnia EAC8

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Stosunkowa niska hałaśliwość nawierzchni na S61 (B12) w odniesieniu do pojazdu ciężarowego (rysunek 4.5), pomimo wysokiej wartości MPD (1,65 mm), wynika prawdopodobnie z bardzo dobrego stanu nawierzchni i jednorodnej jej powierzchni.

W przypadku wieloczołowego pojazdu ciężarowego na drodze S8 ustalono różnice pomiędzy poziomami emitowanych dźwięków o wartości 1,6 dB. Różnice pomiędzy wszystkimi przekrojami o nawierzchni typu EAC8 wynoszą już jednak 4,1 dB. Oznacza to, że w przypadku nawierzchni z betonu cementowego teksturowanych metodą odkrytego kruszywa duże znaczenie z akustycznego punktu widzenia ma jakość wykonania górnej warstwy nawierzchni.

Analiza widmowa dźwięków generowanych przez jadące pojazdy w niektórych przypadkach potwierdziła przyczynę istotnych różnic pomiędzy poziomami hałasu toczenia w różnych przekrojach badawczych o nawierzchni wykonanej w takiej samej

technologii. Jest to w pewnym stopniu zgodne z wartościami różnic pomiędzy indeksami CPXI podanymi w tabeli 2.1. Przyczyny zróżnicowania w innych sytuacjach nie można ustalić na podstawie zgromadzonych danych. Można jedynie przypuszczać, że miały na to wpływ inne czynniki, na przykład związane z charakterystyką pojazdów i jakością wykonanych robót nawierzchniowych.

W związku z powyższym w rozdziałach 5 i 6 zaplanowano wykonanie bardziej szczegółowej analizy statystycznej wyników badań uzyskanych na wybranych nawierzchniach, według metod statystycznego (SPB) i kontrolowanego (CPB) przejazdu.

5. Statystyczna weryfikacja wyników pomiaru maksymalnego poziomu hałasu toczenia pojazdów według metody SPB (opracowano na podstawie raportu [48])

5.1. Model prognozy poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych

Zagadnienie prognozowania maksymalnego poziomu hałasu toczenia podczas przejazdu pojedynczego pojazdu (L_{Amax} , dB) na założonym poziomie ufności 95% dla ustalonej prędkości (V , km/h) składa się z dwóch części. Część pierwsza dotyczy oszacowania metodą najmniejszych kwadratów wartości dwóch składowych parametrów równania linii prostej opisującej badaną zależność na podstawie zbiorów danych empirycznych w celu normalizacji oszacowanego poziomu hałasu toczenia dla prędkości referencyjnej, a część druga – szczegółowej oceny dopasowania i wielkości oszacowanych przedziałów niepewności w aspekcie wymagań normy PN-EN ISO 11819-1:2023.

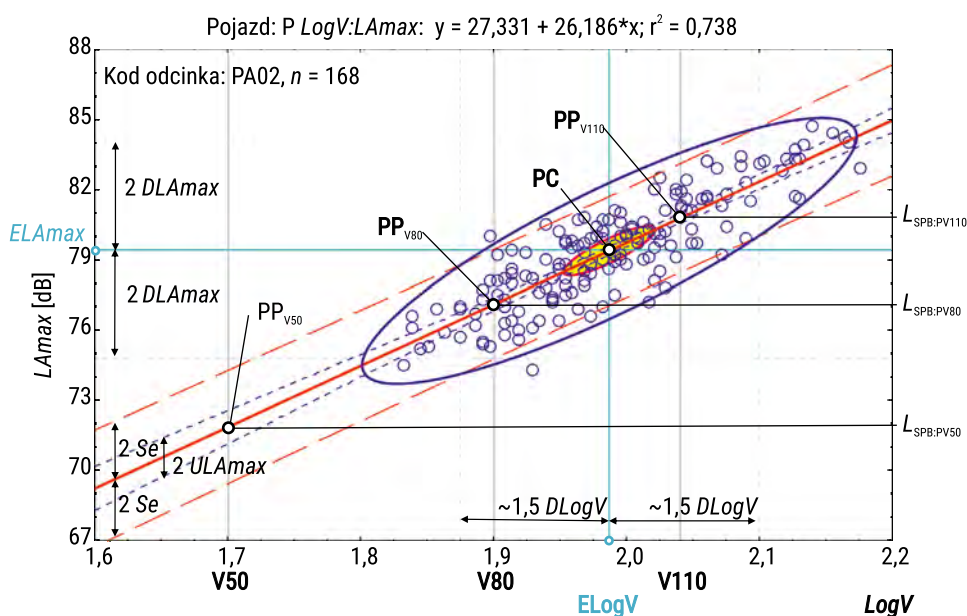
Zgodnie z założeniami metody statystycznego przejazdu (SPB) i metody kontrolowanego przejazdu (CPB) przedmiotem każdego pomiaru, jako i -tej obserwacji, są dwie wielkości: V_i i L_{Amax_i} . Oczekiwana zależność między nimi jest opisywana dla zbioru danych empirycznych o liczebności n funkcją regresji liniowej $y = \alpha + \beta x + \varepsilon$ według zależności [20]:

$$y_i = A + B x_i + e_i \quad (5.1)$$

gdzie: $y_i = L_{Amax_i}$ – maksymalny poziom hałasu toczenia dla i -tego pojazdu [dB];
 $x_i = \log_{10}(V_i)$ – logarytm dziesiętny prędkości przejazdu i -tego pojazdu (V_i [km/h]);
 A – współczynnik przesunięcia, nieznany składnik α modelu liniowego [dB];
 B – współczynnik kierunkowy (nachylenie), nieznany składnik β modelu liniowego;
 $L_{SPB;GVr} = A + B x_r$ – prognozowana wartość poziomu hałasu toczenia $L_{SPB;GVr}$ według modelu liniowego dla $x_r = \log_{10}(V_r)$, gdzie V_r [km/h] jest ustaloną prędkością referencyjną dla wybranego pojazdu G (osobowego – P, ciężarowego – H); e_i – składnik resztowy [dB] jako zmienna losowa ε o rozkładzie normalnym – $N(0, Se)$; Se – odchylenie

standardowe reszt jako miara precyzji metody pomiarowej wyrażona poprzez odchylenia pojedynczych wyników pomiaru od modelu liniowego [dB]; i – numer obserwacji w zbiorze danych empirycznych od 1 do n ; n – liczba par obserwacji w zbiorze danych empirycznych (V, LA_{max}).

Przykład graficznej prezentacji zbioru wyników pomiaru maksymalnego poziomu hałasu toczenia od przejeżdżających w przekroju drogi pojazdów osobowych (P) pokazano na rysunku 5.1. Na ogół tworzą one owalną chmurę punktów wokół linii prostej $LA_{max} = A + B \log(V)$, która przechodzi przez punkt centralny (PC) o współrzędnych $E(x)$ i $E(y)$. Położenie tego punktu wyznaczają dwie miary skupienia danych empirycznych odpowiadające wartościom średnich arytmetycznych, $ElogV = E(x)$ i $ELA_{max} = E(y)$, które są obliczane dla zbiorów elementów $x_i = \log_{10}(V_i)$ i $y_i = LA_{max,i}$, gdzie $i = 1, 2, \dots, n$. Zgodnie ze wzorem (5.1) między tymi średnimi zachodzi relacja $ELA_{max} = A + B ElogV$. Miarą rozproszenia elementów x wokół wartości średniej $E(x)$ jest natomiast odchylenie standardowe $DlogV = D(x)$, a elementów y wokół $E(y)$ – $DLA_{max} = D(y)$.



RYSUNEK 5.1. Przykład prezentacji wyników pomiaru poziomu hałasu toczenia pojazdów osobowych według metody SPB w przykładowym przekroju drogi

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Pokazane na rysunku 5.1 dwie różnej wielkości elipsy wyznaczają obwiednie dwóch 95% obszarów, gdzie większy odpowiada rozproszeniu pojedynczych wyników pomiaru, a mniejszy – niepewności lokalizacji współrzędnych punktu centralnego PC. Na tej samej linii prostej znajdują się także punkty prognozy (PP) dla trzech

ustalonych prędkości referencyjnych, przy czym odcięte na osi logarytmów prędkości ($\log V$) to umownie V50, V80 i V110, a odpowiadające im rzędne, jako prognozowane wartości poziomu hałasu toczenia, to: $L_{\text{SPB:PV50}}$, $L_{\text{SPB:PV80}}$ i $L_{\text{SPB:PV110}}$, oraz ich 95% przedziały niepewności rozszerzonej ($\pm UL_{\text{Amax}}$). Dwie z trzech prędkości referencyjnych znajdują się wewnątrz przedziału $E\log \pm 1,5 D\log V$ pokrywającego około 87% obserwacji.

Odchylenie standardowe składnika resztowego (Se), nazywane także średnim błędem dopasowania albo niepewnością standardową odchylenia wyniku pomiaru od jego prognozy, informuje, o ile różnią się rzeczywiste wartości rzędnych od wartości teoretycznych obliczonych za pomocą modelu liniowego. W praktyce, po eliminacji ze zbiorów źródłowych obserwacji odstających, stanowi ono miarę precyzji danej metody pomiarowej, gdyż jest wypadkową udziału wszystkich niezdefiniowanych (nierozpoznanych) czynników składowych jako losowych źródeł niepewności. Dopasowanie modelu liniowego do zbioru danych empirycznych jest tym lepsze, im mniejsza jest wartość Se .

Obserwacje odstające na wykresie zależności L_{Amax} od $\log V$ znajdują się na ogół poza 95% obszarem rozproszenia pojedynczych wyników pomiaru poziomu hałasu toczenia pojazdów. Poprawę statystycznych ocen dopasowania parametrów modelu liniowego można uzyskać poprzez stopniową eliminację (wykreślenie) ze zbioru źródłowego obserwacji najbardziej oddalonych od wyznaczonego wzdłuż modelu liniowego pasma o szerokości $\pm 2 Se$ (rysunek 5.1). Na ogół zakłada się, że obserwacji odstających nie powinno być więcej niż 5%.

Współczynnik determinacji (R^2) jest niemianowaną miarą oceny dopasowania modelu liniowego, którego konstrukcja, zgodnie ze wzorem (5.2), jest oparta na odpowiednio ważonym liczbą obserwacji (n) ilorazie wariancji wyników pomiaru wokół funkcji regresji (Se^2) i ich wariancji ogólnej Dy^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{(n-2)Se^2}{(n-1)Dy^2}. \quad (5.2)$$

Nieco inną względną miarą dopasowania danych do modelu liniowego jest współczynnik zmienności losowej (Ve) określony jako stosunek odchylenia standardowego Se do obliczonej dla zbioru danych empirycznych wartości średniej arytmetycznej Ey , który informuje, jaki procent średniego poziomu modelowanego zjawiska stanowi losowy błąd dopasowania (niepewność) modelu. Im jest on mniejszy, tym mniejsza będzie wartość Ve [49].

Użyteczny zakres prędkości jest nowym pojęciem, wprowadzonym w normie PN-EN ISO 11819-1:2023, jakie stosuje się do zbioru bezpośrednio zmierzonych prędkości przejazdu V [km/h], opisanego za pomocą wartości średniej arytmetycznej $EV = E(V)$ i odchylenia standardowego $DV = D(V)$. Aby taki zbiór danych pomiarowych można było przyjąć do obliczeń funkcji regresji i normalizacji do prędkości odniesienia (Vr) w punkcie prognozy (PP), obliczony moduł różnicy prędkości $|Vr - EV|$ nie powinien być większy od $1,5 DV$. Z tego wynika, że granice użytecznego

zakresu prędkości jako horyzont prognozy mają zawierać się w przedziale ($V_{\min}$, $V_{\max}$). Tak sformułowane kryterium kwalifikacyjne zbioru danych pomiarowych do obliczeń regresji metodą SPB i normalizacji do prędkości referencyjnej można zapisać jako $|dsrV| \leq 1,5$, gdzie standaryzowaną różnicę prędkości oblicza się ze wzoru:

$$dsrV = \frac{Vr - EV}{DV} . \quad (5.3)$$

W przypadku braku takiej kwalifikacji zbiór danych pomiarowych i obliczona wartość $dsrV$ mogą być wykorzystane, jednak z pominięciem regresji liniowej, do normalizacji poziomu hałasu toczenia pojazdów według opisanej w normie PN-EN ISO 11819-1:2023 metody zależności alternatywnej (tabela 5.1b).

Obliczenia regresji metodą SPB (tabela 5.1a) są natomiast prowadzone dla logarytmów prędkości przejazdu V , czyli dla zbioru elementów $x = \log_{10}(V)$, który opisuje się za pomocą wartości średniej arytmetycznej $E\log V = E(x)$ i odchylenia standardowego $D\log V = D(x)$. Na takiej podstawie wyznacza się wartości dwóch współczynników liniowego modelu prognozy wraz z ocenami ich niepewności, które propagują niepewność prognozowanego poziomu hałasu toczenia pojazdów dla założonej prędkości odniesienia. Standaryzowaną odległość dsV pomiędzy punktami prognozy i centralnym oblicza się według wzoru:

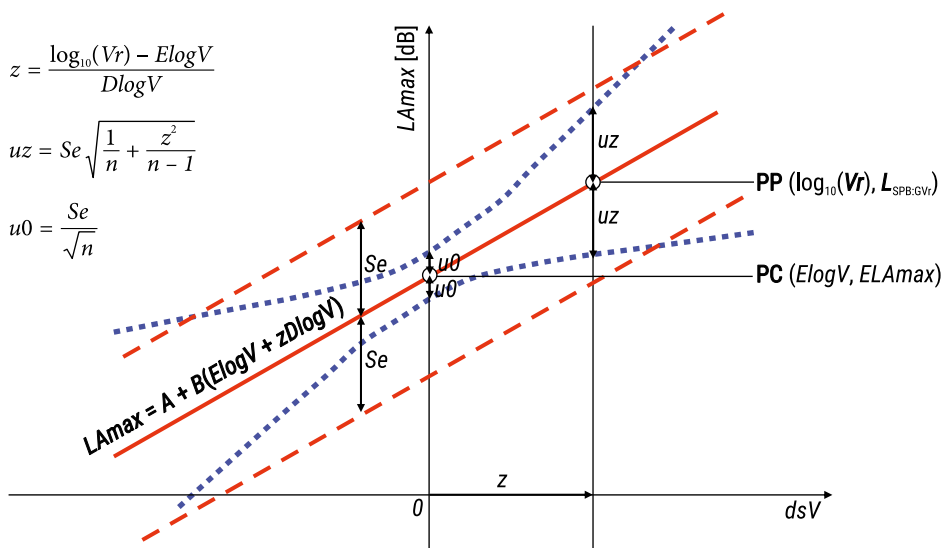
$$dsrV = \frac{\log_{10}(Vr) - E\log V}{D\log V} . \quad (5.4)$$

Z przeprowadzonych badań porównawczych obu standaryzowanych wielkości, $dsrV$ i dsV , z jakich korzysta się w analizie danych pomiarowych, wynika, że nie są one tożsame, a różnica między nimi zależy od zakresu odnotowanych prędkości w przekroju drogi. Im ten zakres jest szerszy, tym występują większe różnice między statystycznymi parametrami opisującymi oba zbiory danych wyjściowych, jakie według normy PN-EN ISO 11819-1:2023 należy przyjąć do kwalifikacji i prognozy poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych i jego niepewności. Na przykład z porównania średniej prędkości EV z prędkością równą odwrotności logarytmu wartości odciętej punktu centralnego $V_{pc} = 10^{E\log V}$ [km/h] wynika, że $V_{pc} < EV$ i nie zachodzi między nimi relacja funkcyjna, a jedynie przybliżona.

Niepewność pomiaru jest pojęciem odnoszącym się do jego określonego wyniku, charakteryzującym rozrzut (dyspersję) wartości, które w sposób uzasadniony można przypisać mierzonej wielkości [3, 53]. Niepewność wyniku pomiaru wynika z tego, że z założenia jest on zawsze niedokładny, co może być skutkiem nie tylko niedoskonałości aparatury i zmysłów obserwatora, ale nawet nieodłączną cechą takiej operacji. Niepewność standardowa wyniku obliczeń (u) jest to niepewność wyrażona w formie odchylenia standardowego dla otrzymanej wielkości (współczynnika, parametru, statystyki itp.) na podstawie określonego przekształcenia danych wyjściowych z udziałem pojedynczego wyniku pomiaru o ustalonej niepewności Se . W zależności

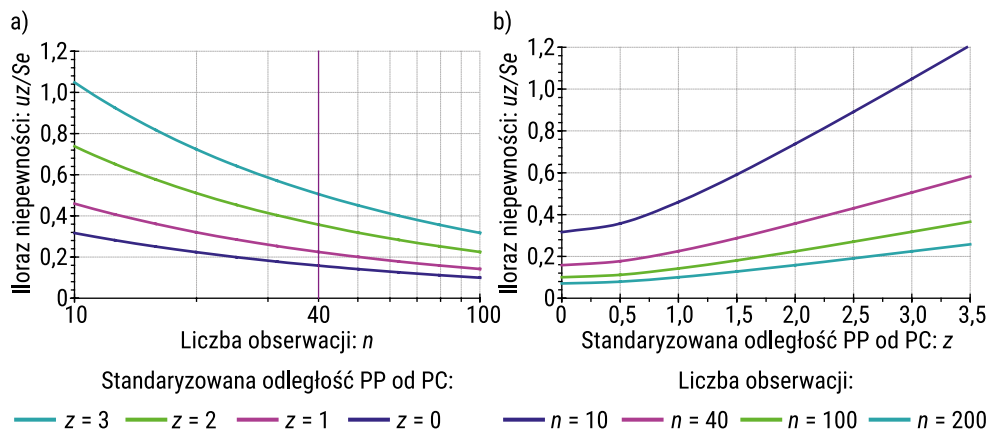
od liczebności zbioru danych (n) propaguje ona niepewność standardową wartości średniej poziomu hałasu toczenia pojazdów w punkcie centralnym PC ($u0$), jak i dalej – niepewność standardową prognozowanej wartości hałasu toczenia w punkcie prognozy PP (uz), którego odległość (z) od punktu centralnego jest wyrażona według standaryzowanej miary odległości na osi odciętych dsV . Przeważnie zakłada się, że przedział niepewności standardowej, zgodnie z rozkładem normalnym, pokrywa prognozowane położenie wartości prawdziwej z prawdopodobieństwem około 68%.

Znajomość pokazanych na rysunku 5.2 zależności pomiędzy parametrami n , z , Se , $u0$ i uz przy określonych założeniach ma istotne znaczenie w planowaniu eksperymentów i ocenie precyzji oszacowania znormalizowanego poziomu hałasu toczenia pojazdów $L_{SPB:GVr}$ dla prędkości referencyjnej Vr . Zgodnie z założeniami normy PN-EN ISO 11819-1:2023 liczba pojazdów wymagana do obliczeń przedziałów ufności wokół prognozowanych poziomów hałasu toczenia pojazdów wynosi 100 samochodów osobowych i 40 samochodów ciężarowych. Bardzo przydatna w praktyce eksperymentalnej jest znajomość ilorazu standardowej niepewności poziomu hałasu toczenia pojazdów uz w punkcie prognozy i standardowej niepewności pojedynczego wyniku pomiaru Se w zależności od liczebności zbioru danych (n) oraz standaryzowanej odległości na osi odciętych (z) między punktami PC i PP. Krzywe ilustrujące przebieg tej zależności dla wybranych wartości z i n pokazano na rysunku 5.3.



RYSUNEK 5.2. Przedziały niepewności standardowej dla oszacowanych poziomów hałasu toczenia w punkcie centralnym (PC) i punkcie prognozy (PP)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

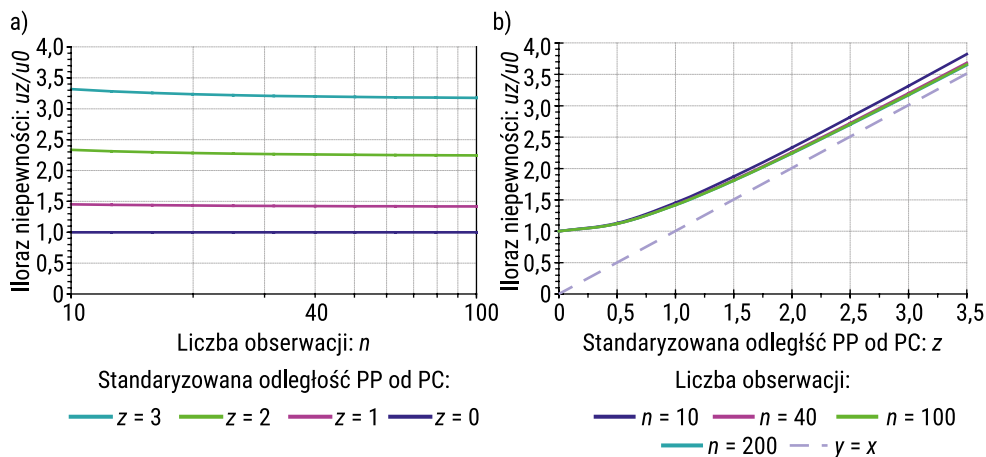


RYSUNEK 5.3. Zależności ilorazu standardowych niepewności u_z i u_0 od: a) liczbej zbioru danych empirycznych; b) standaryzowanej odległości między punktem prognozy a punktem centralnym

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Jeśli $z = 0$, to PP pokrywa się z PC i $u_z = u_0$, a gdy $z > 3$, to zgodnie z rozkładem normalnym zmiennej z można przyjąć z dużym prawdopodobieństwem, że odcięta punktu PP znajduje się już poza zakresem zbioru danych eksperymentalnych. Z porównania pokazanych zależności funkcyjnych wynika, że przy większej liczbie obserwacji (n) w punkcie centralnym PC występuje mniejsza szerokość przedziału standardowej niepewności (u_0). W punkcie prognozy PP szerokość przedziału standardowej niepewności rzędnej (u_z) jest natomiast tym większa, im dalej znajduje się on od punktu PC ($z > 0$ i $n = \text{const.}$). Bezpośredni wpływ każdego z dwóch parametrów, n i z , na szerokość przedziału niepewności poziomu hałasu toczenia pojazdów w punkcie prognozy PP względem szerokości takiego przedziału w punkcie centralnym PC (u_z/u_0) przedstawiono na rysunku 5.4.

Z pokazanych zależności wynika, że zmiana szerokości przedziału standardowej niepewności dla prognozowanego poziomu hałasu toczenia pojazdów $L_{\text{SPB:GVr}}$ w większym stopniu zależy od odległości między punktami PP i PC niż od zmiany liczbej zbioru obserwacji (np. wskutek eliminacji obserwacji odstających w zbiorach danych o dużej liczbej, $n > 30$). Należy także zauważyć, że lokalizacja punktu prognozy PP wewnątrz ustalonego przedziału standaryzowanej prędkości, na przykład $|z| \leq 1,5$, zapewnia w skrajnym przypadku, iż długość przedziału niepewności dla prognozowanego poziomu hałasu toczenia pojazdów nie będzie większa od podwojonej długości takiego przedziału niepewności z punktu centralnego.



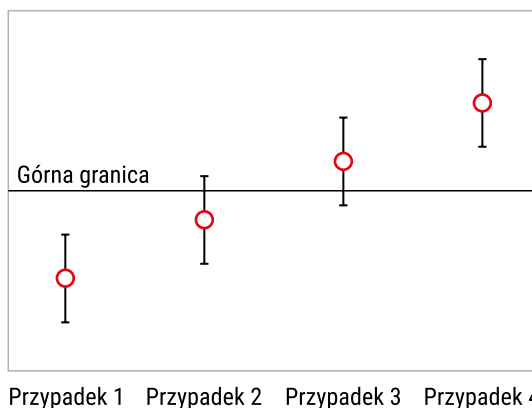
RYSUNEK 5.4. Zależności ilorazu standardowych niepewności u_z i u_0 od: a) liczebności zbioru danych pomiarowych; b) standaryzowanej odległości punktu prognozy od punktu centralnego

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Niepewność rozszerzona wyniku obliczeń (U), nazywana także przedziałem ufności, jest to przedział wokół otrzymanego wyniku obliczeń (np. wartości średniej) pokrywający prognozowane położenie wartości prawdziwej z założonym prawdopodobieństwem 95% – zazwyczaj wtedy, gdy $n > 30$, to $U \approx 2u$. W przypadku modelu liniowego szerokość takiego przedziału zwiększa się wraz z odległością położenia punktu prognozy na osi odciętych od punktu centralnego. Szerokość przedziału niepewności uważa się także za miarę precyzji wyniku obliczeń – im on jest mniejszy, tym precyzja jego oszacowania będzie większa (lepsz).

Zgodnie z ogólnymi zasadami teorii niepewności pomiaru można przyjąć założenie o podziale całej przestrzeni możliwego rozkładu wyników na trzy obszary (rysunek 5.5):

1. Pole zgodności – przypadek 1, gdy odrzucamy hipotezę zerową mówiącą o równości wyniku pomiaru z wartością wymaganą na rzecz hipotezy alternatywnej mówiącej o tym, że ten wynik pomiaru jest mniejszy.
2. Pole niezgodności – przypadek 4, gdy odrzucamy hipotezę zerową mówiącą o równości wyniku pomiaru z wartością wymaganą na rzecz hipotezy alternatywnej mówiącej o tym, że ten wynik pomiaru jest większy.
3. Pole niepewności (równości) – przypadki 2 i 3, gdy nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej mówiącej o równości wyniku pomiaru z wartością wymaganą na rzecz założonej hipotezy alternatywnej o jego nierówności.



RYSUNEK 5.5. Przypadki badań zgodności mierzonej wielkości fizycznej z wartością wymaganą ze specyfikacji (górna granica) przy założonym poziomie ufności 95% dla niepewności rozszerzonej

ŹRÓDŁO: [59].

5.2. Analiza wyników badań poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych

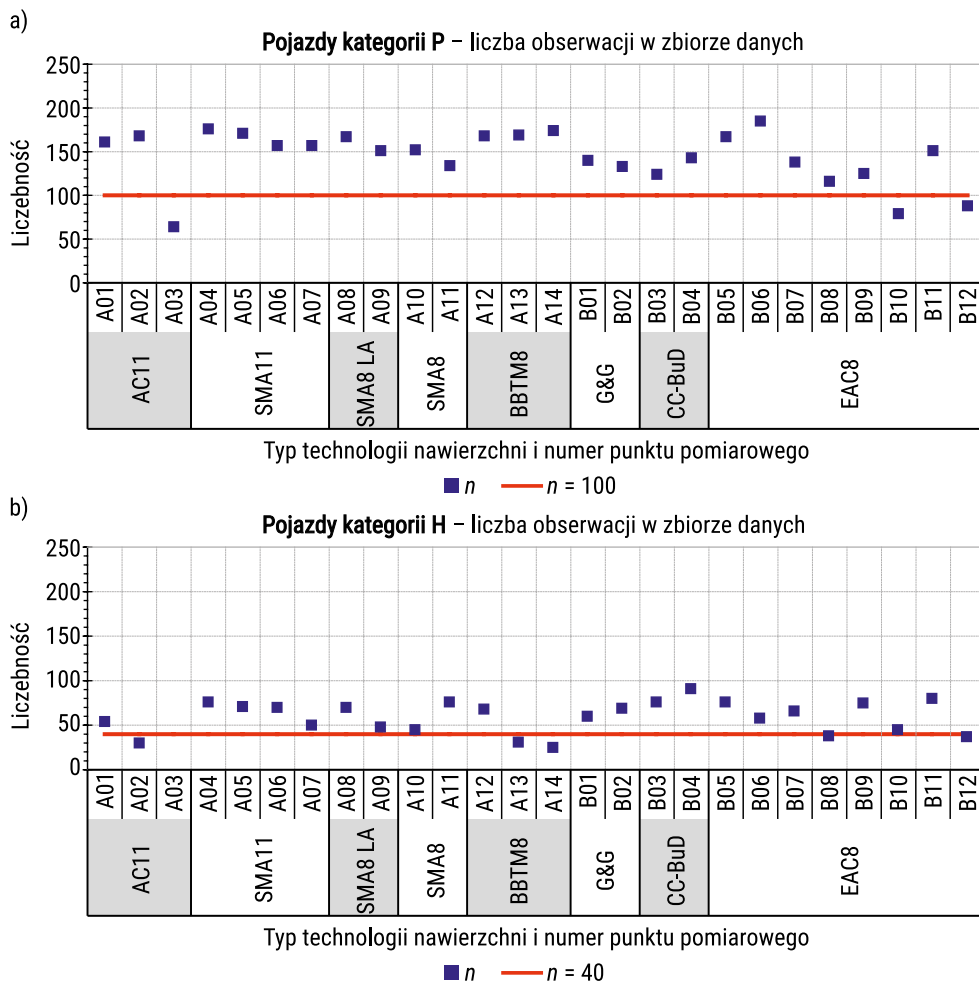
5.2.1. Opis statystyczny danych pomiarowych

Analizie poddano łącznie 51 zbiorów wyników (L_{Amax} , V) uzyskanych metodą SPB (ang. *Statistical Pass-By method*) w ramach przeprowadzonych pomiarów w różnej lokalizacji na sieci dróg publicznych, w tym 26 zbiorów dla pojazdów osobowych (P) i 25 zbiorów dla pojazdów ciężarowych. Wykorzystano do tego pakiet programów statystycznych STATISTICA oraz opracowany arkusz kalkulacyjny EXCEL wraz z formularzem obliczeniowym do kontroli i przetwarzania zbiorów danych pomiarowych z badań poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych [47].

Ze względu na to, że w metodzie SPB do pomiaru poziomu efektów akustycznych są losowo wybierane z rzeczywistego potoku ruchu pojazdy samochodowe o różnym stanie techniczno-eksploatacyjnym, na etapie przygotowania do analizy wszystkich zbiorów danych pomiarowych przeprowadzono ich wizualizację, tak jak pokazano na rysunku 5.1, w celu rozpoznania i eliminacji obserwacji odstających za pomocą formularza obliczeniowego, który opracowano zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 11819-1:2023.

Badania maksymalnego poziomu hałasu toczenia pojazdów przeprowadzono metodą SPB na odcinkach dróg o nawierzchni asfaltowej wykonanej w pięciu technologiach (A – 14 przekrojów) i nawierzchni betonowej w trzech technologiach

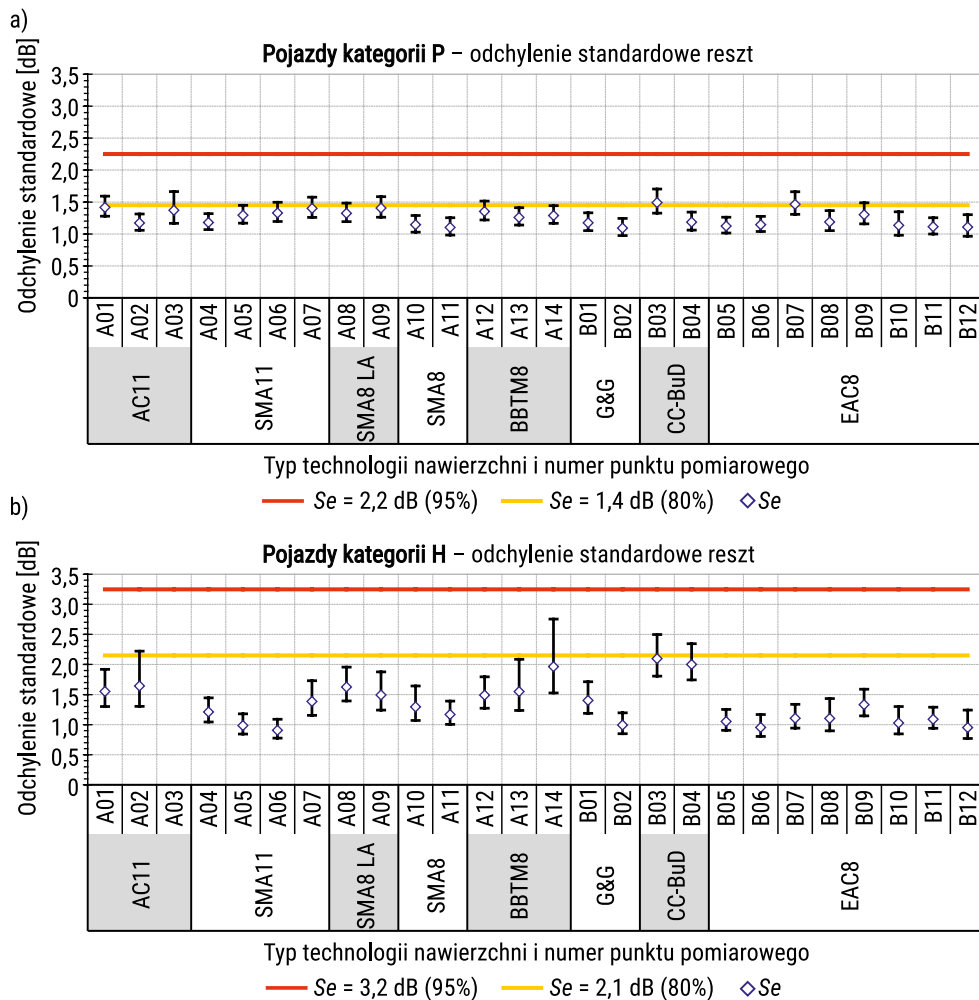
(B – 12 przekrojów). Sumaryczna liczba zebranych danych, jako par dwóch wartości (L_{Amax} , V), wynosi 5243, w tym dla pojazdów osobowych (P): 3758 (71,7%), a pojazdów ciężarowych (H): 1485 (28,3%). Liczebności zbiorów danych w punktach pomiarowych różnią się między sobą: dla pojazdów osobowych w zakresie od 64 do 185, wobec wymaganej liczby minimalnej 100, i dla pojazdów ciężarowych od 25 do 91, wobec wymaganej liczby 40 (rysunek 5.6). W poniższych analizach przyjęto, aby wyniki dla wieloczołonowych pojazdów ciężarowych (kategoria H3+) oznaczać jako wyniki dla pojazdów ciężarowych (kategoria H).



RYSUNEK 5.6. Liczebność zbiorów dla dwóch kategorii pojazdów w 26 przekrojach badawczych (nawierzchnia asfaltowa: A01–A14; nawierzchnia betonowa: B01–B12)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Miarą precyzji metody SPB, jaką przyjmuje się do oszacowania szerokości przedziałów niepewności maksymalnego poziomu dźwięku od swobodnie jadącego pojazdu, jest odchylenie standardowe reszt (Se), których wartości zestawiono oddzielnie dla obu kategorii pojazdów i 26 przekrojów pomiarowych na rysunku 5.7. Na wykresach tych liniami poziomymi zaznaczono ustalone w normie PN-EN ISO 11819-1:2023 górne granice dwóch obszarów dla założonego prawdopodobieństwa pokrycia 80% i 95%.

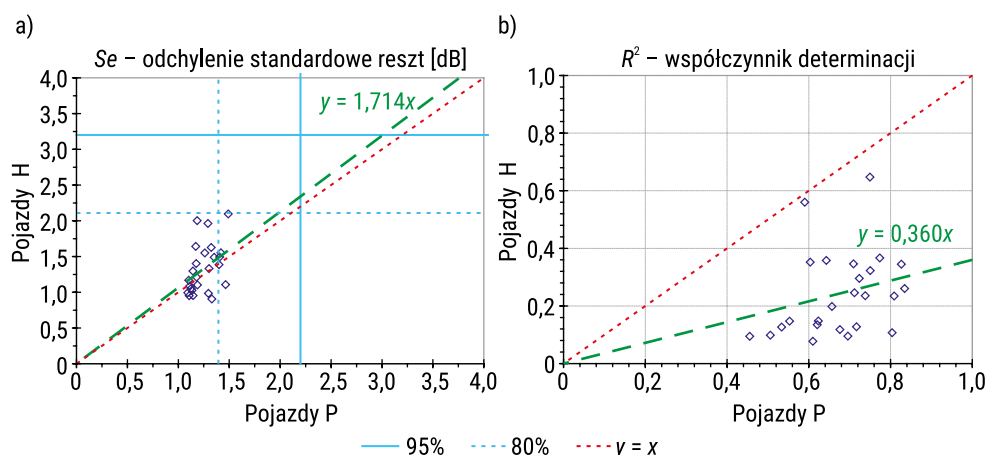


RYSUNEK 5.7. Wartości odchyłeń standardowych reszt (Se) i 95% przedziałów ufności, jakie otrzymano w 26 punktach dla: a) pojazdów osobowych; b) pojazdów ciężarowych

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Jak wynika z przedstawionych danych, wszystkie odchylenia standardowe reszt nie przekraczają niższej z dwóch ustalonych dla tego parametru wartości dopuszczalnych. Otrzymane wartości Se dla pojazdów P zawierają się w przedziale od 1,1 dB

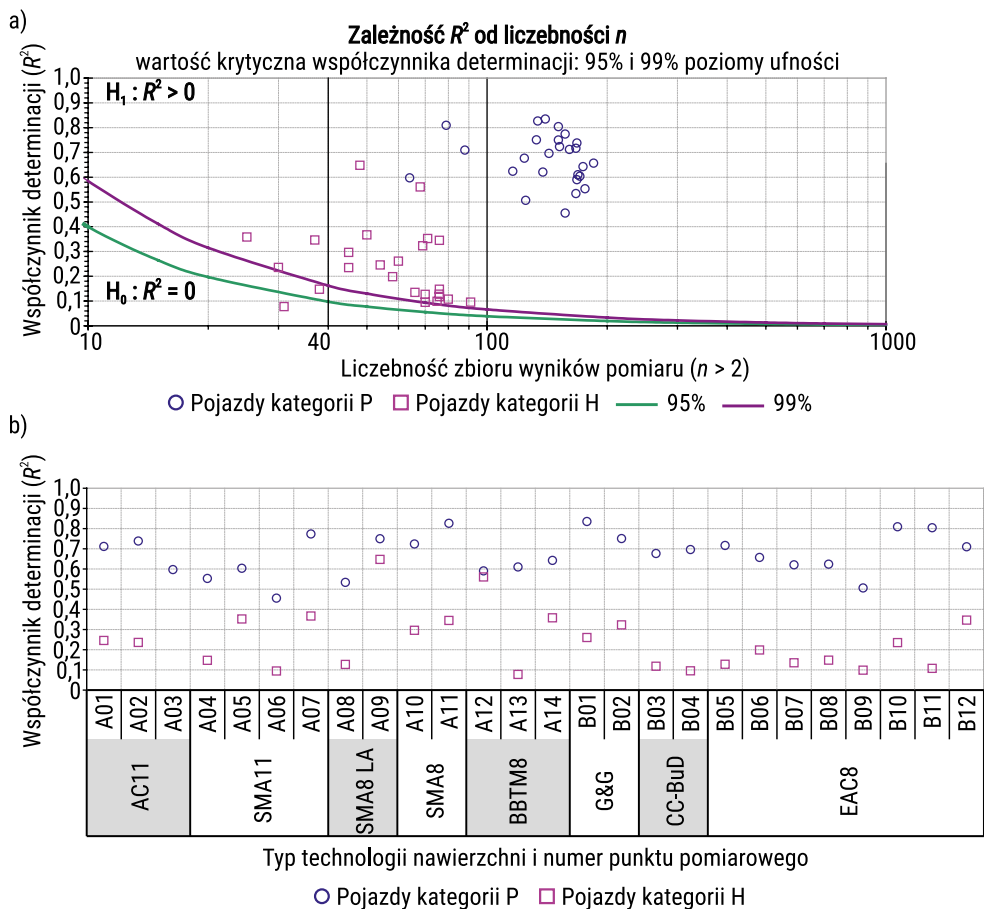
do 1,5 dB, średnio 1,3 dB, a dla pojazdów H w przedziale od 0,9 dB do 2,1 dB, średnio 1,4 dB. W przypadku pojazdów ciężarowych otrzymywano przeważnie różne wartości Se między wyróżnionymi grupami technologii nawierzchni, natomiast w większości tych grup pozostają one równe wewnątrz, tak jak na przykład dla nawierzchni betonowej typu CCBuD na odcinkach nr B03 i nr B04. Wartości Se , jakie otrzymano dla pojazdów ciężarowych, są nieco większe od odpowiadających im wartości dla pojazdów osobowych (rysunek 5.8a) – inaczej niż wartości współczynników R^2 , które dla pojazdów ciężarowych są dużo mniejsze niż odpowiadające im wartości dla pojazdów osobowych (rysunek 5.8b).



RYSUNEK 5.8. Porównanie otrzymanych dla pojazdów P i H wartości: a) odchyleń standardowych reszt (Se); b) współczynników determinacji (R^2)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

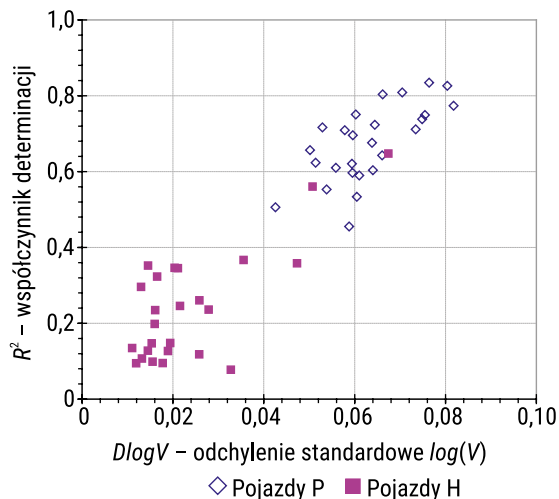
Na rysunku 5.9 zestawiono na dwóch wykresach wartości współczynników determinacji dla 26 przekrojów pomiarowych. Ich znacznie wyższe wartości otrzymano dla pojazdów osobowych (od 0,46 do 0,84) niż dla pojazdów ciężarowych (od 0,10 do 0,65). Oznacza to, że przy zbliżonej wartości parametru Se przedział odnotowanych prędkości przejazdu pojazdów ciężarowych, którego miarą jest odchylenie standardowe logarytmu prędkości ($DlogV$), jest znacznie mniejszy niż w przypadku pojazdów osobowych (rysunek 5.10). Zgodnie z normą PN-EN ISO 11819-1:2023 świadczy to o istotnie mniejszej użyteczności takich zbiorów danych pomiarowych w prognozowaniu poziomu hałasu toczenia pojazdów ciężarowych.



RYSUNEK 5.9. Współczynniki determinacji (R^2) dla pojazdów kategorii P i H w zależności od:
a) liczebności zbiorów wyników; b) typu technologii nawierzchni

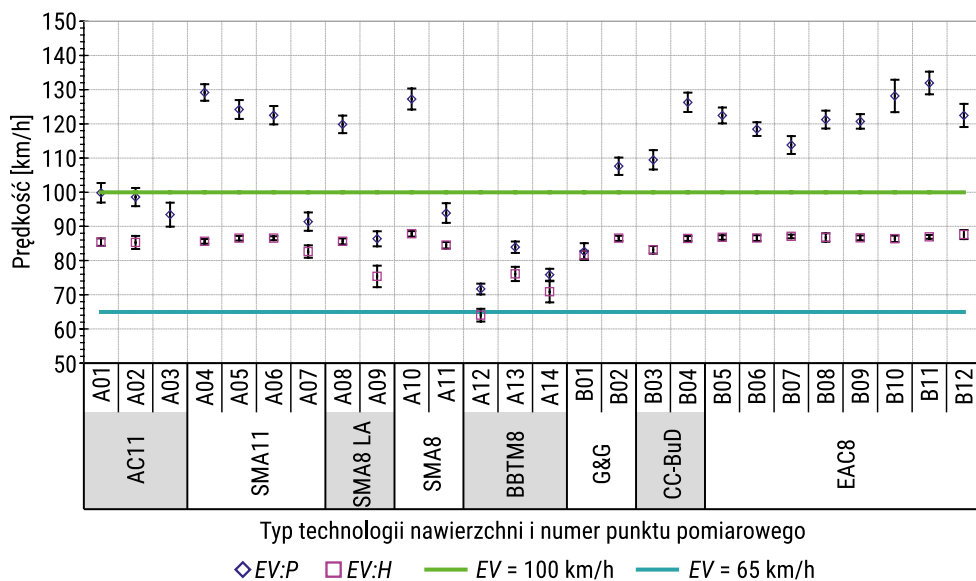
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Średnie prędkości badanych pojazdów *EV* [km/h] (rysunek 5.11) zawierają się w przedziale od 64 km/h do 132 km/h (średnia 96 km/h), w tym dla pojazdów osobowych od 72 km/h do 132 km/h (średnio 109 km/h), a dla pojazdów ciężarowych od 64 km/h do 88 km/h (średnio 84 km/h). Zgodnie z normą PN-EN ISO 11819-1:2023 oznacza to, że badania poziomu hałasu toczenia pojazdów metodą SPB zostały przeprowadzone na drogach o dwóch kategoriach: wysokich i średnich prędkości – łącznie z odcinkiem o numerze A12, w przypadku którego otrzymano najniższe średnie wartości prędkości: $EV:H = 64 \pm 2$ km/h i $EV:P = 72 \pm 2$ km/h.



RYSUNEK 5.10. Współczynnik determinacji R^2 w zależności od wartości odchylenia standardowego logarytmów prędkości $DlogV$

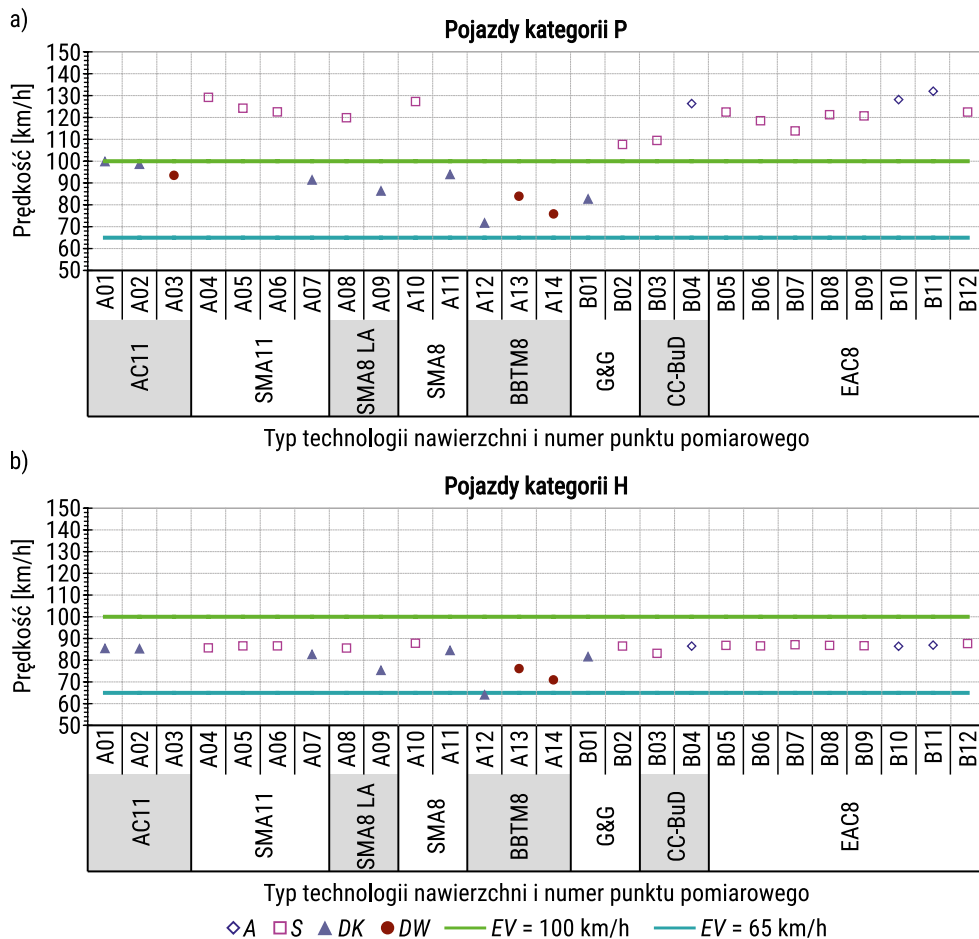
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYSUNEK 5.11. Wartości średnich prędkości pojazdów (EV) i 95% przedziałów ufności dla dwóch kategorii pojazdów

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Przekroje badawcze do pomiaru maksymalnego poziomu hałasu toczenia podczas przejazdu pojedynczego pojazdu były zlokalizowane na autostradach (A – 3 przekroje), drogach ekspresowych (S – 13 przekrojów) oraz na ogólnodostępnych drogach zamiejskich (krajowych – 7 przekrojów, wojewódzkich – 3 przekroje) (rysunek 5.12). Po uwzględnieniu zakresów średniej prędkości przejazdu pojazdów (EV) należy stwierdzić, że drogi klas A i S zaliczają się do kategorii dróg o wysokiej prędkości, a ogólnodostępne drogi zamiejskie (DK i DW) do dróg o średniej prędkości. Nie prowadzono natomiast pomiarów dla kategorii dróg o niskiej prędkości.

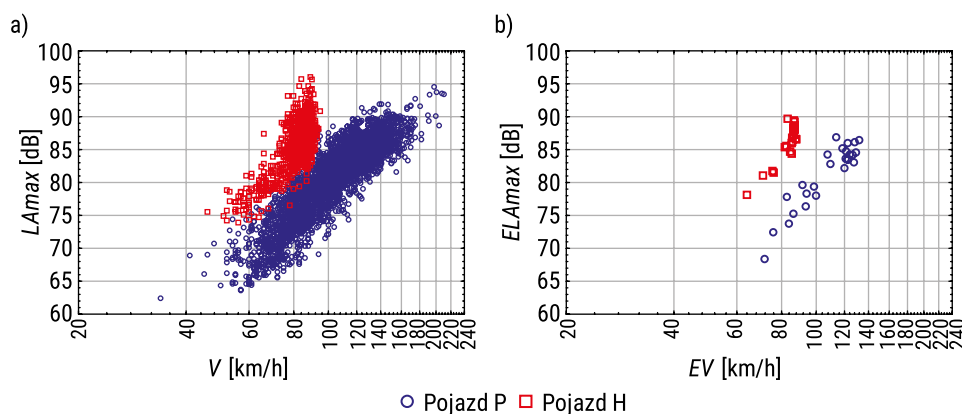


RYSUNEK 5.12. Wartości średniej prędkości przejazdu pojazdów (EV) na autostradach (A), drogach ekspresowych (S) i ogólnodostępnych drogach zamiejskich (DK i DW)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

5.2.2. Analiza zależności poziomu hałasu toczenia pojazdów od prędkości

Wyniki pojedynczych pomiarów maksymalnego poziomu hałasu toczenia dla dwóch kategorii pojazdów, jakie łącznie otrzymano z 26 przekrojów pomiarowych, oraz wyznaczone lokalizacje odpowiadających im punktów centralnych, jako wartości średnich dla zbiorów danych zgodnie z zapisami w podrozdziale 5.1, pokazano na rysunku 5.13. Z przedstawionych zależności wynika, że otrzymane wartości układają się w dwie oddzielne chmury punktów i skupiają się wzdłuż różnych linii trendu o dodatniej korelacji między poziomem hałasu toczenia i logarytmem prędkości przejazdu pojazdów.

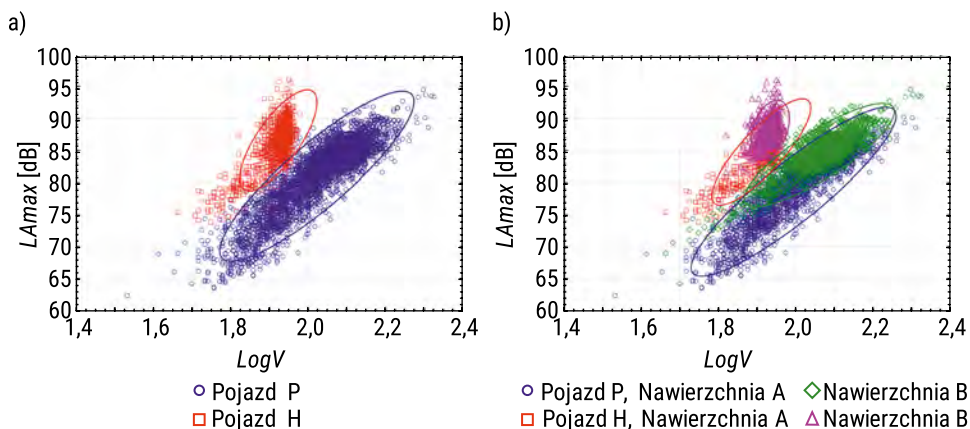


RYSUNEK 5.13. Zestawienia: a) wyników pomiarów parametrów V i LA_{max} dla dwóch kategorii pojazdów; b) obliczonych dla nich zbiorów wartości średnich EV i ELA_{max} (punkty centralne)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Jak wynika z przedstawionych danych, przejazdy pojazdów ciężarowych generują znacznie wyższy poziom maksymalnego poziomu hałasu toczenia niż jadące po tej samej nawierzchni pojazdy osobowe. Zbiór prędkości dla pojazdów kategorii H jest wyraźnie ucięty z prawej strony, co wynika z obowiązujących ograniczeń prędkości jazdy tych pojazdów po drogach szybkiego ruchu. Zakresy prędkości przejazdu pojazdów ciężarowych na drogach o wysokiej prędkości są węższe niż na ogólnodostępnych drogach krajowych i wojewódzkich o średniej prędkości. W przypadku pojazdów osobowych takiej sytuacji nie stwierdzono.

Na rysunku 5.14 pokazano 95% obwiednie pojedynczych wyników pomiarów w podziale na dwie kategorie pojazdów (P i H) i dwa typy nawierzchni (A – asfaltowe i B – betonowe).

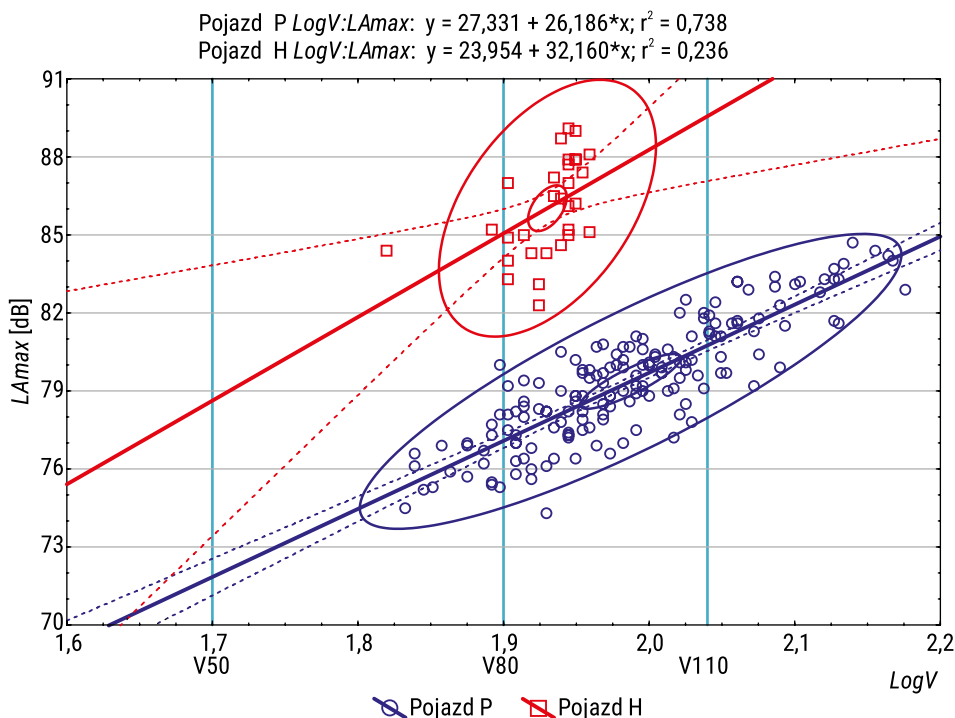


RYSUNEK 5.14. Wyniki pojedynczych pomiarów ($\log V$ i LA_{max}) wraz z ich 95% obwiedniami dla: a) pojazdów kategorii P i H; b) pojazdów kategorii P i H po rozdzieleniu na dwa typy nawierzchni

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Ważnym zadaniem w procedurze normalizacji zarejestrowanego w przekroju dróg zbioru wyników badań maksymalnego poziomu hałasu toczenia i reprezentującej je funkcji regresji liniowej wraz z 95% przedziałem ufności jest ustalenie relacji między punktem centralnym (PC) a punktem prognozy (PP) dla wybranej prędkości referencyjnej (V_r).

Na rysunku 5.15 pokazano na wykresie regresji dwa przykładowe zbiory wyników pomiaru poziomu hałasu toczenia pochodzące z przekroju pomiarowego A02 dla dwóch kategorii pojazdów oraz wyznaczone dla nich lokalizacje PC i PP. Wielkość elips jest oszacowaniem 95% obszarów zmienności danych, przy czym większe elipsy odpowiadają rozproszeniom pojedynczych wyników pomiaru, a mniejsze – niepewności rozszerzonej wartości średnich $E\log V$ i ELA_{max} jako współrzędnych PC. Ich kształt jest niejako wizualną miarą dopasowania każdego ze zbiorów danych empirycznych do liniowego modelu regresji. Im elipsa jest bardziej wydłużona, tak jak w przypadku pojazdów kategorii P, tym w zbiorze danych jest odnotowany większy zakres ich prędkości, a więc także lepsza będzie precyzja oszacowania wartości współczynnika kierunkowego linii trendu (B). Mniej płaska elipsa, tak jak w przypadku pojazdów kategorii H, obejmuje natomiast węższy zakres prędkości i wzbudza większą niepewność co do poprawności oszacowania wartości współczynnika B i jego przydatności do normalizacji poziomu hałasu toczenia pojazdów dla prędkości V_r , co widać po przebiegu kropkowanych linii wyznaczających 95% przedziały ufności dla liniowego modelu regresji. Punkt prognozy (PP) znajduje się na skrzyżowaniu linii trendu z pionową linią przecinającą oś odciętych w miejscu odpowiadającym prędkości referencyjnej (V_r ; oznaczone tutaj: V50, V80 i V110). Dwie odchylające się od linii trendu linie kropkowane pokazują, jak wraz z odległością od PC może zwiększać się szerokość 95% przedziału niepewności rozszerzonej prognozowanego poziomu hałasu toczenia dla wybranej na osi odciętych lokalizacji PP.

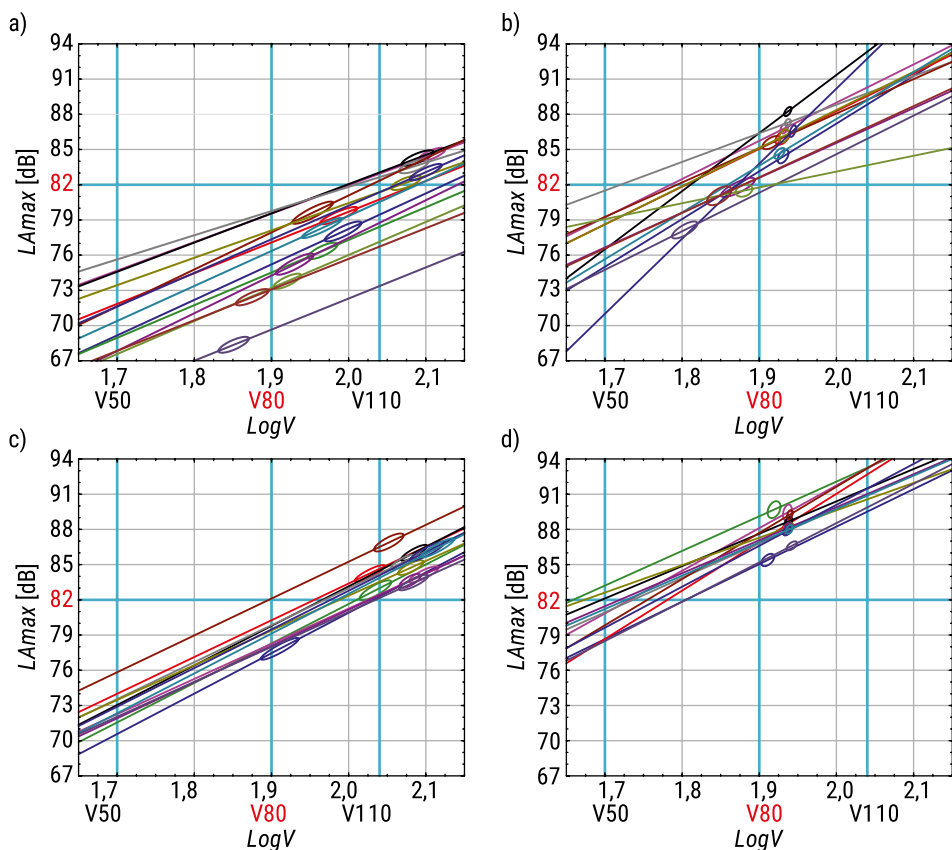


RYСУNEK 5.15. Przykład graficznego zestawienia dwóch linii trendu przechodzących przez położone wewnątrz elips punkty centralne (PC) dla pojazdów kategorii P i H

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Na potrzeby wstępnej selekcji 51 zbiorów danych z 26 przekrojów pomiarowych pod kątem ich przydatności do obliczeń regresji i normalizacji do prędkości odniesienia sporządzono cztery poglądowe wykresy z rozdzieleniem zbiorów danych na nawierzchnie i pojazdy (rysunek 5.16). Na wykresach tych pokazano, oddzielnie dla każdego zbioru danych, przebieg linii trendu przechodzącej przez punkt centralny, otoczony elipsą, jako 95% obszarem niepewności rozszerzonej jego współrzędnych (E_{LogV} i $E_{L_{\text{Amax}}}$). Punkt centralny stanowi potencjalny punkt obrotu dla linii prostej w przypadku korekty kierunku jej przebiegu, co stosowane jest w metodzie zależności alternatywnej. Bardziej owalny kształt elipsy, tak jak w przypadku pojazdów kategorii H, świadczy o dużej niepewności wyznaczonego poziomu hałasu toczenia, który jest skutkiem węższego zakresu prędkości przejazdów i mniejszej liczby zbiorów danych.

Punkty prognozy (PP) znajdują się na przecięciu linii trendu z pionowymi liniami przecinającymi oś odciętych w miejscach odpowiadających trzem prędkościom referencyjnym (V_r : V50, V80 i V110). Wyróżniony na tych wykresach punkt o współrzędnych V80 i $L_{\text{Amax}} = 82$ dB, zgodnie z propozycją klasyfikacji nawierzchni drogowych pod względem hałaśliwości (np. tabela 7.2), wyznacza granicę między ocenami nawierzchni o podwyższonej i nadmiernej hałaśliwości.

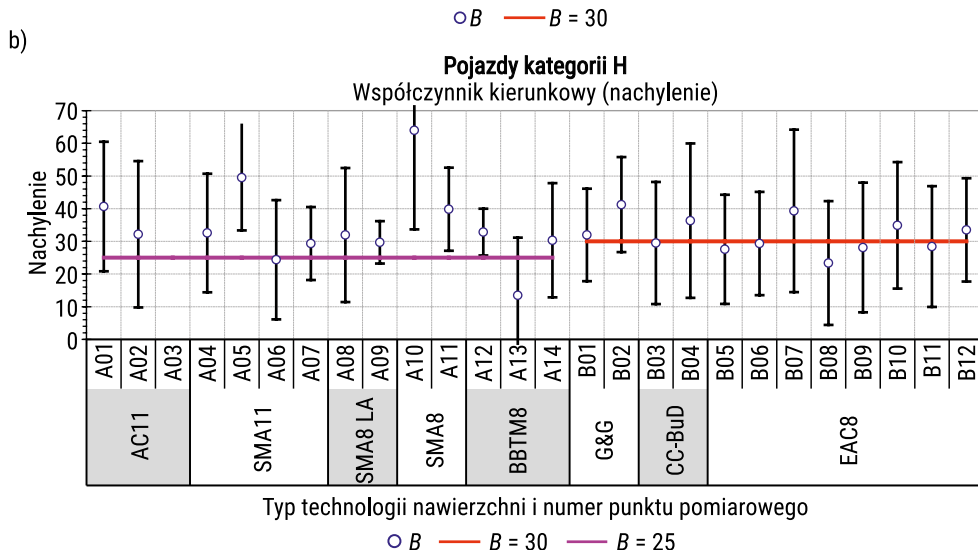
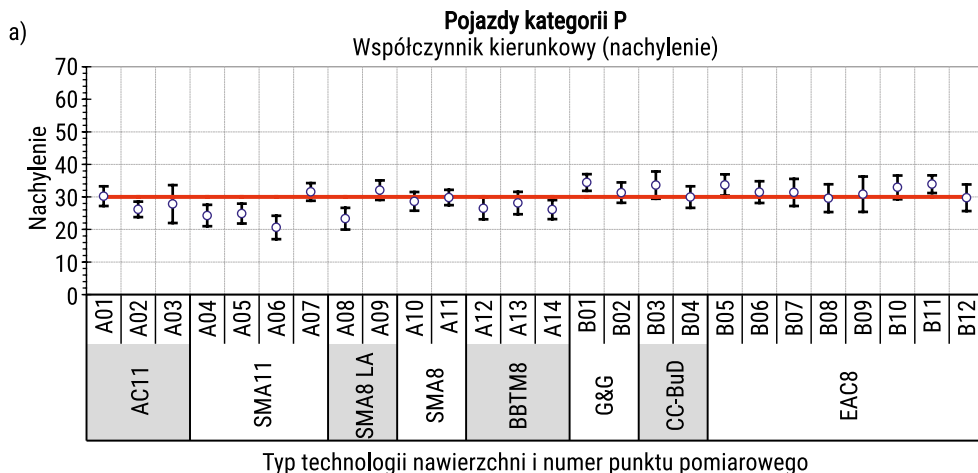


RYSUNEK 5.16. Linie trendu przechodzące przez punkty centralne (PC) otoczone elipsą wyznaczającą obszar niepewności ich współrzędnych

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Ewentualne skutki przyjęcia do prognozowania poziomu hałasu toczenia pojazdów błędnie ustalonej wartości współczynnika B będą tym większe, im na osi odciętych jest większa odległość między punktem centralnym i punktem prognozy.

W przypadku dużej części zbiorów danych dla pojazdów kategorii P i kategorii H, w ramach tej samej technologii, występuje zgodność co do kąta nachylenia linii trendu (rysunek 5.17). W przypadku pojazdów H długość przedziałów ufności jest jednak o wiele większa niż dla pojazdów P, co oznacza, że należy odnośnie do nich zachować szczególną ostrożność przy interpretacji przebiegu liniowej funkcji prognozy. Najbardziej skrajne wartości współczynnika B otrzymano dla pojazdów kategorii H na nawierzchni typu A (rysunek 5.16b) w trzech przekrojach: A05, A10 i A13 (rysunek 5.17b).



RYSUNEK 5.17. Wartości współczynnika kierunkowego (nachylenia) linii regresji (B) i 95% przedziały ufności (UB) dla pojazdów: a) osobowych; b) ciężarowych

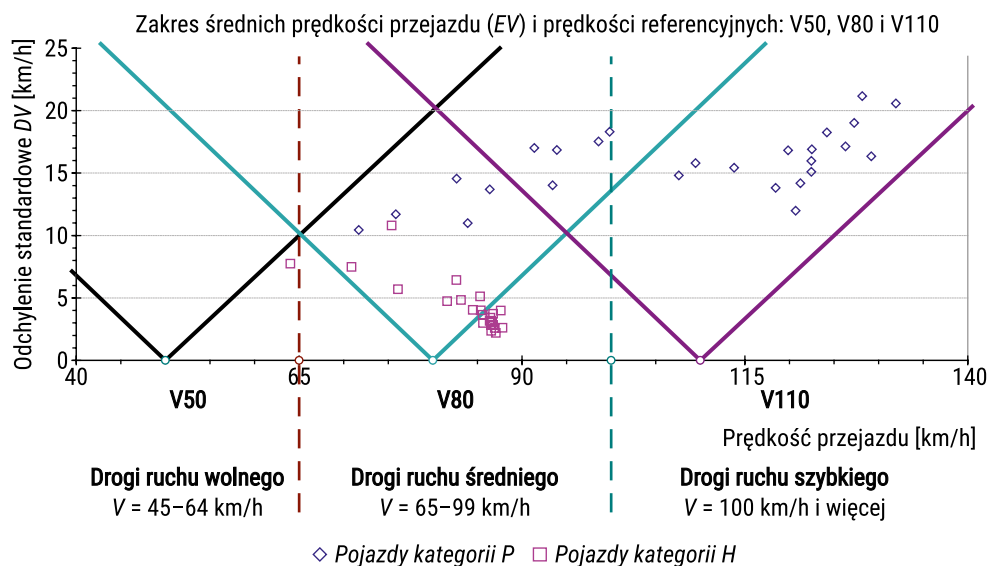
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

5.2.3. Użyteczny zakres prędkości

Użyteczny zakres prędkości zgodnie z zapisami normy PN-EN ISO 11819-1:2023 określa dopuszczalną odległość między punktem prognozy PP a punktem centralnym PC jako równą modułowi różnicy dwóch prędkości: referencyjnej (V_r) i wartości

średniej arytmetycznej (EV), która nie powinna być większa od $1,5 \times$ odchylenie standardowe (DV). Zbiory danych pomiarowych spełniające ten warunek mogą być przyjęte do obliczeń regresji i normalizacji do prędkości referencyjnej.

Na rysunku 5.18, prezentującym zależności DV od EV , przedstawiono wyniki sprawdzenia tego warunku dla wszystkich 51 zbiorów danych otrzymanych dla dwóch kategorii pojazdów w 26 przekrojach pomiarowych. Krzyżujące się z osią odciętych w punkcie odpowiadającym prędkości referencyjnej (V_r) dwie ukośne linie o równaniu $DV = 2 |V_r - EV| / 3$ wyznaczają dolne granice użytecznych zakresów prędkości dla ustalonych w normie PN-EN ISO 11819-1:2023 trzech kategorii prędkości referencyjnych.

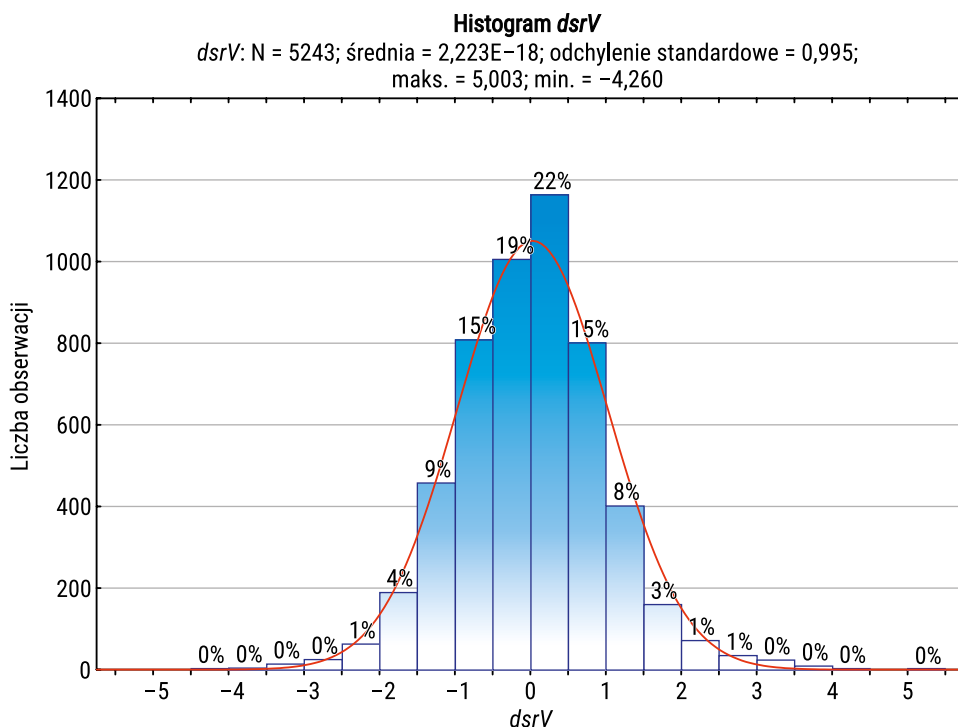


RYSUNEK 5.18. Zależność odchylenia standardowego (DV) od wartości średniej prędkości przejazdu statystycznego pojazdu (EV) dla zbiorów danych z 26 przekrojów pomiarowych

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Z przedstawionych na tym wykresie wartości wynika, że dla pojazdów P, gdzie $DV > 10$ km/h, jest spełniony warunek kwalifikacyjny dla 26 zbiorów wyników, w tym odnośnie do kategorii prędkości średniej dla 10, do kategorii prędkości wysokiej dla 21, a dla obu kategorii dla 5. W przypadku pojazdów kategorii H tylko 9 z 25 zbiorów wyników spełnia warunek kwalifikacyjny. Jeśli chodzi o zbiory danych, które nie spełniają tego warunku ze względu na zbyt wąski zakres zmierzonych prędkości, jaki zwykle obserwuje się dla pojazdów kategorii H na autostradach i drogach ekspresowych (np. gdzie $EV > 80$ km/h i $DV < 5$ km/h), można rozważyć zastosowanie metody zależności alternatywnej do prognozy poziomu hałasu toczenia pojazdów.

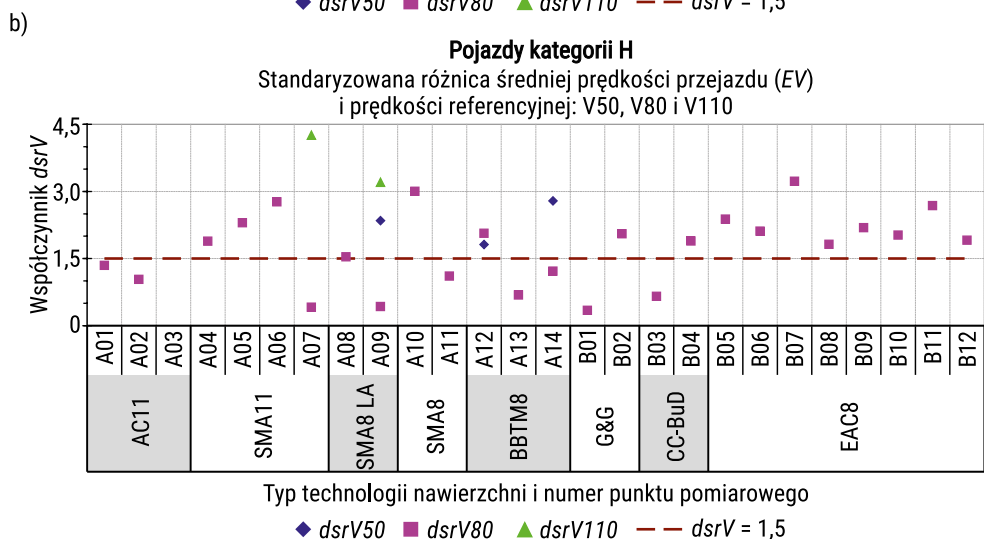
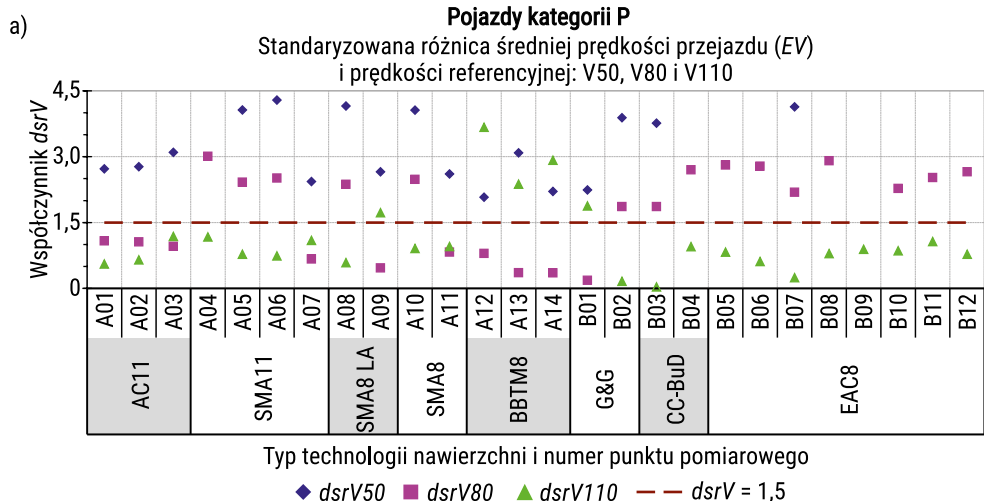
W badaniach przydatności zbiorów pomiarowych do obliczeń regresji metodą SPB lepiej jest posłużyć się standaryzowaną różnicą odległości (d_{srV}), którą oblicza się według wzoru 5.3. Z badań całej populacji zebranych danych pomiarowych wynika, że nie można wykluczyć hipotezy, iż d_{srV} podlega rozkładowi normalnemu (rysunek 5.19). W związku z tym w zbiorze spełniającym kryterium kwalifikacyjne, gdzie $|d_{srV}| \leq 1,5$, ponad 87% wyników pomiaru należy do użytecznego zakresu prędkości.



RYSUNEK 5.19. Empiryczny rozkład współczynnika d_{srV} jako standaryzowana różnica prędkości według wzoru 5.3

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

W celu identyfikacji przekrojów pomiarowych, w których zbiory danych pomiarowych spełniają wymagany warunek kwalifikacyjny do obliczeń regresji i normalizacji do prędkości referencyjnej, zostały wykonane obliczenia standaryzowanej różnicy prędkości (d_{srV}) dla wszystkich zbiorów pomiarowych i trzech prędkości referencyjnych, a wyniki, które oznaczono jako d_{srV50} , d_{srV80} i d_{srV110} , przedstawiono na dwóch wykresach, oddzielnie dla dwóch kategorii pojazdów, gdzie na osi rzędnych odłożono wartości d_{srV} z przedziału od 0 do 4,5 (rysunek 5.20).



RYSUNEK 5.20. Wyniki sprawdzenia warunku przydatności zbiorów pomiarowych z 26 punktów pomiarowych do obliczeń regresji i normalizacji dla trzech kategorii prędkości i dwóch kategorii pojazdów

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Z danych pokazanych na rysunku 5.20 można odczytać, że wyznaczone oceny przydatności zbiorów danych do obliczeń regresji liniowej spełniają wymagane w normie kryterium kwalifikacyjne, gdy odpowiadające im punkty nie przekraczają rzędnej $dsrV = 1,5$ (oznaczonej na wykresie linią przerywaną). Na przykład żaden ze sprawdzonych zbiorów danych nie spełnia kryterium kwalifikacyjnego dla kategorii dróg o niskiej prędkości (V50), natomiast pięć zbiorów danych pomiarowych dla pojazdów osobowych na nawierzchniach asfaltowych (rysunek 5.20a) może być wykorzystanych do prognozy poziomu hałasu toczenia dla dwóch prędkości referencyjnych: V80 i V110.

5.2.4. Ocena niepewności prognozowanego poziomu hałasu toczenia pojazdów według metody SPB

W metodzie statystycznego przejazdu (SPB) zostały ustalone prędkości odniesienia (V_r) w zależności od kategorii dróg i kategorii pojazdów. W przekrojach badawczych mierzony jest maksymalny poziom hałasu toczenia emitowanego przez jadący pojazd na badanej nawierzchni (L_{Amax}) i jego prędkość (V). Następnie dla takiego zbioru danych oblicza się zależność regresyjną pomiędzy L_{Amax} i logarytmem prędkości V . W niektórych przypadkach wyznaczone zależności mogą w ocenie eksperckiej, bez określonego kryterium, różnić się w sposób istotny od zależności otrzymanych dla dużej liczby danych eksperymentalnych albo prezentowanych w literaturze dla nawierzchni o określonej charakterystyce. W normie PN-EN ISO 11819-1:2023 dopuszcza się możliwość zastosowania w sytuacjach niepewnych metody zależności alternatywnej, bez logarytmowania prędkości. Dwie procedury normalizacji poziomu hałasu toczenia dla określonego V_r zestawiono w tabeli 5.1, gdzie podano ogólne założenia, opis oznaczeń i wzory obliczeniowe. Zgodnie z ww. normą to wyznaczone dla dwóch kategorii pojazdów P i H według przyjętej procedury wartości $L_{SPB:PV_r}$ i $L_{SPB:HV_r}$ i ich niepewności rozszerzone ($UL_{SPB:PV_r}$ i $UL_{SPB:HV_r}$) są końcowym wynikiem badań poziomu hałasu toczenia pojazdów według metody SPB.

TABELA 5.1. Procedury normalizacji poziomu hałasu toczenia pojazdów (L_{SPB}) według normy PN-EN ISO 11819-1:2023

a) metoda SPB

Założenia:	
G	ogólnie pojazd; gdy P – samochód osobowy; gdy H – samochód ciężarowy
V_r	prędkość referencyjna: $V_r(P)$: 50, 80 lub 110 km/h; $V_r(H)$: 50 lub 80 km/h
n	wymagana liczebność zbioru danych: $n(P) = 100$; $n(H) = 40$
k	współczynnik rozszerzenia dla 95% przedziału ufności, gdy $n > 30$, to $k = 2$
Zbiory wyników pomiaru:	
V i $\log V$	prędkość przejazdu pojazdu [km/h] i jej logarytm: $\log V = \log_{10}(V)$
L_{Amax}	maksymalny poziom dźwięku od jadącego pojazdu [dB]
Parametry liniowego modelu prognozy:	
B	współczynnik nachylenia linii prostej na płaszczyźnie: $x = \log V$ i $y = L_{Amax}$
Se	odchylenie standardowe reszt jako miara odchyłeń wyników pomiaru od linii prostej
$E\log V$ i $D\log V$	wartość średnia arytmetyczna i odchylenie standardowe dla zbioru $\log V$
EL_{Amax}	wartość średnia arytmetyczna dla zbioru L_{Amax}

Prognozowana wartość poziomu hałasu toczenia i przedziały niepewności:	
Współrzędne punktu centralnego (PC) na płaszczyźnie:	$x = 10E\log V$ i $y = ELA_{max}$
Współrzędne punktu prognozy (PP) na płaszczyźnie:	$x = V_r$ i $y = L_{SPB:GVr}$
Wartość prognozowana w PP:	$L_{SPB:GVr} = ELA_{max} + B \cdot (\log_{10}(V_r) - E\log V)$
Niepewność standardowa, gdzie dsV jest standaryzowaną różnicą logarytmów prędkości:	$uL_{SPB:GVr} = Se \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{dsV^2}{n-1}} ; dsV = \frac{\log_{10}(V_r) - E\log V}{D\log V}$
Niepewność rozszerzona:	$UL_{SPB:GVr} = k \cdot uL_{SPB:GVr}$

b) metoda zależności alternatywnej

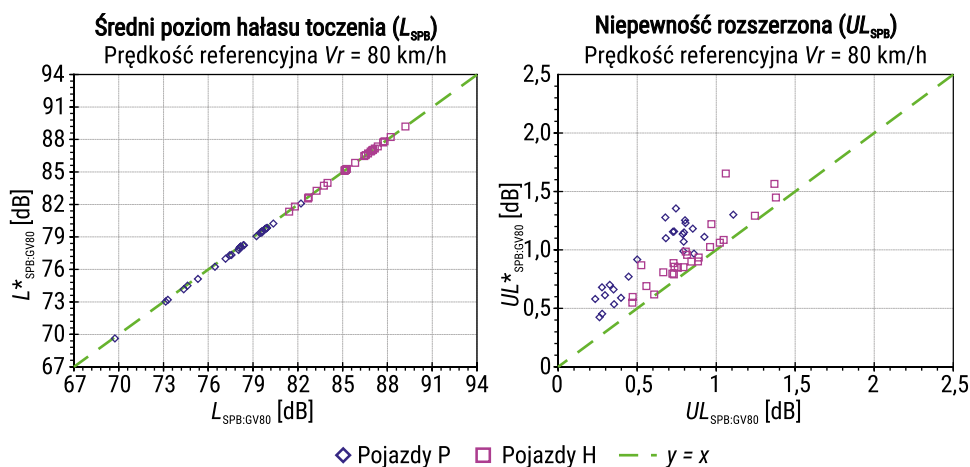
Założenia i zbiory wyników pomiaru jak w metodzie SPB	
Parametry liniowego modelu prognozy:	
B	współczynnik nachylenia linii prostej według normy PN-EN ISO 11819-1:2023
EV i DV	średnia arytmetyczna i odchylenie standardowe dla zbioru V [km/h]
ELA_{max} i DLA_{max}	średnia arytmetyczna i odchylenie standardowe dla zbioru L_{Amax} [dB]
Prognozowana wartość poziomu hałasu toczenia pojazdów i przedziały niepewności:	
Współrzędne punktu centralnego (PC) na płaszczyźnie:	$x = EV$ i $y = ELA_{max}$
Współrzędne punktu prognozy (PP) na płaszczyźnie:	$x = V_r$ i $y = L^*_{SPB:GVr}$
Wartość prognozowana w PP:	$L^*_{SPB:GVr} = ELA_{max} + B \cdot \log_{10}\left(\frac{V_r}{EV}\right)$
Niepewność standardowa, gdzie $dsrV$ jest standaryzowaną różnicą prędkości:	$uL^*_{SPB:GVr} = DLA_{max} \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{dsrV^2}{n-1}} ; dsrV = \frac{V_r - EV}{DV}$
Niepewność rozszerzona:	$UL^*_{SPB:GVr} = k \cdot uL^*_{SPB:GVr}$

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Z zapisów normy PN-EN ISO 11819-1:2023 wynika, że do obliczeń prognozowanego poziomu hałasu toczenia i jego niepewności oprócz metody SPB (a) może być stosowana metoda zależności alternatywnej (b), która jest uproszczoną metodą obliczeń,

gdzie w miejsce wyznaczonego empirycznie współczynnika kierunkowego linii regresji przyjmuje się ustaloną w normie wartość parametru B . Zakłada się, że takie postępowanie dotyczyć będzie przede wszystkim pojazdów kategorii H, gdzie zakres odnotowanych prędkości w zbiorze danych pomiarowych jest niekiedy zbyt wąski i może wprowadzać niepewność co do wyznaczonej wartości współczynnika B względem innych pomiarów obejmujących dużą liczbę pojazdów poruszających się w szerszym zakresie prędkości.

W celu porównania precyzji obu normowych metod przetwarzania danych przeprowadzono szczegółowe badania zgodności otrzymanych wyników i ich niepewności dla trzech prędkości referencyjnych i tych samych zbiorów danych z 26 przekrojów pomiarowych dla pojazdów kategorii P i H. Przykładowe wyniki badań zgodności wybranych parametrów ($L_{SPB:GV80}$ i $UL_{SPB:GV80}$, dB) przedstawiono na wykresach porównawczych na rysunku 5.21. Na osi odciętych odłożono wyniki otrzymane za pomocą metody SPB, a na osi rzędnych za pomocą metody zależności alternatywnej.



RYSUNEK 5.21. Wyniki badań zgodności dwóch procedur normalizacji poziomu hałasu toczenia L_{SPB} dla prędkości referencyjnej $V_r = 80$ km/h

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

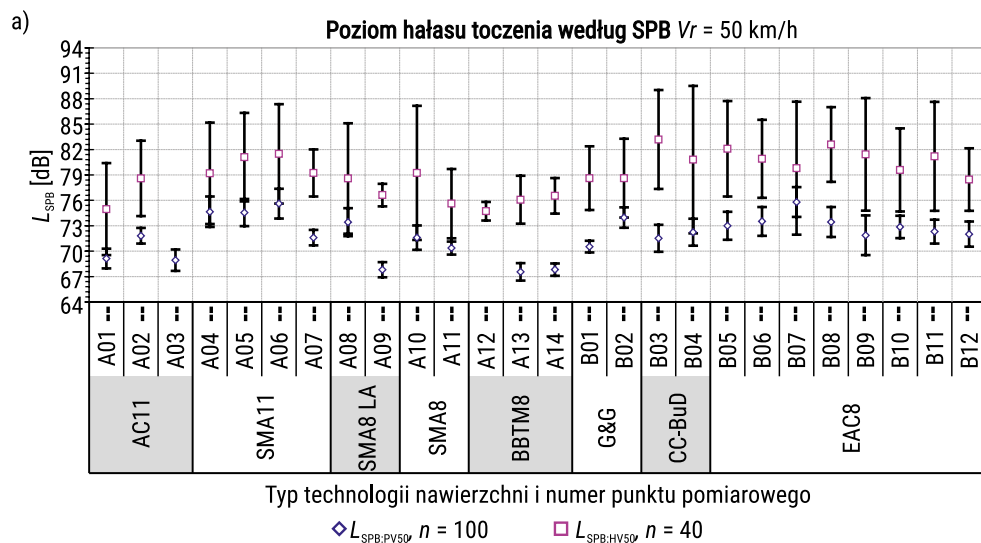
Z przeprowadzonej analizy wynika, że odstępianie od logarytmu prędkości nie wpływa istotnie na szacowane wartości poziomów hałasu toczenia pojazdów $L_{SPB:GVr}$, które są niższe o nie więcej niż 0,3%, lecz znacząco poszerza ich przedziały niepewności rozszerzonej $UL_{SPB:GVr}$, w niektórych przypadkach nawet więcej niż dwa razy. Oznacza to, że metoda zależności alternatywnej wskutek wprowadzonych uproszczeń jest mniej precyzyjna niż metoda SPB.

Obliczenia prognozowanych poziomów hałasu toczenia pojazdów według metody SPB i ich 95% przedziałów ufności wykonano dla zbiorów danych z 26 przekrojów pomiarowych dla pojazdów kategorii P i H. W obliczeniach L_{SPB} posłużono się metodą SPB – również dla tych zbiorów, które kryterium kwalifikacyjnego nie spełniają, ale

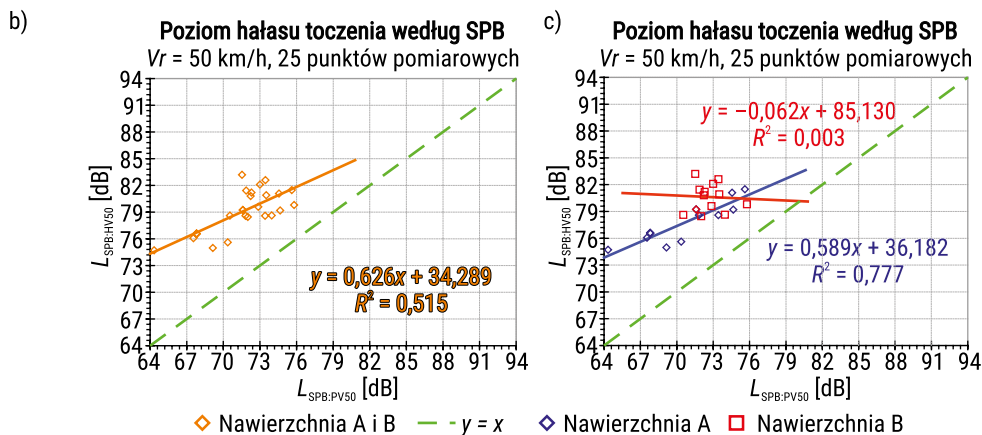
w ocenie eksperckiej wartość współczynnika kierunkowego liniowej funkcji regresji nie budzi wątpliwości (podrozdział 5.2.2). Jedynie w przypadku trzech zbiorów danych dla pojazdów H w przekrojach A05, A10 i A13, gdzie otrzymano skrajnie różne wartości współczynnika kierunkowego (B), zastosowano metodę alternatywnej zależności, przyjmując $B = 30$. Wszystkie otrzymane wyniki obliczeń L_{SPB} pokazano na trzech rysunkach: 5.22, 5.23 i 5.24, które opracowano oddzielnie dla trzech prędkości referencyjnych (V_r).

Na każdym z rysunków zestawiono po trzy wykresy, a na wykresie a) przedstawiono dla każdego z przekrojów oszacowane dla pojazdów P i H wartości L_{SPB} wraz z 95% przedziałami ufności. Jeżeli były one wyznaczone dla zbioru danych spełniającego kryterium kwalifikacyjne, to w opisie osi odciętych umieszczono nad numerem odcinka litery P lub H. Na wykresach b) i c) zestawiono ze sobą obliczone dla obu kategorii pojazdów w każdym z 25 przekrojów pomiarowych wartości $L_{SPB;PVr}$ na osi odciętych i $L_{SPB;HVr}$ na osi rzędnych, przy czym na wykresie c) dodatkowo wyróżniono kolorem typ nawierzchni (A i B).

Wyniki obliczeń L_{SPB} dla prędkości referencyjnej $V_r = 50$ km/h, jakie przedstawiono na rysunku 5.22, stanowią jedynie ilustrację otrzymanych wielkości przedziałów niepewności dla oszacowanych poziomów hałasu toczenia pojazdów, gdyż żaden ze zbiorów pomiarowych nie spełnia kryterium kwalifikacyjnego dla kategorii prędkości ruchu wolnego.

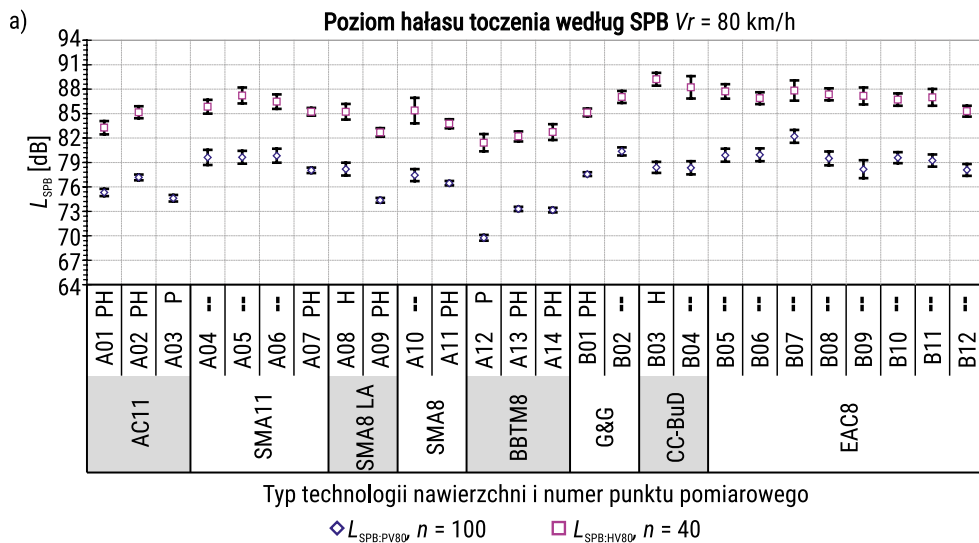


RYSUNEK 5.22. Wyniki obliczeń poziomów hałasu toczenia pojazdów i 95% przedziałów ufności dla pojazdów kategorii P i H według ustalonych w normie PN-EN ISO 11819-1:2023 wymagań dla kategorii prędkości ruchu wolnego

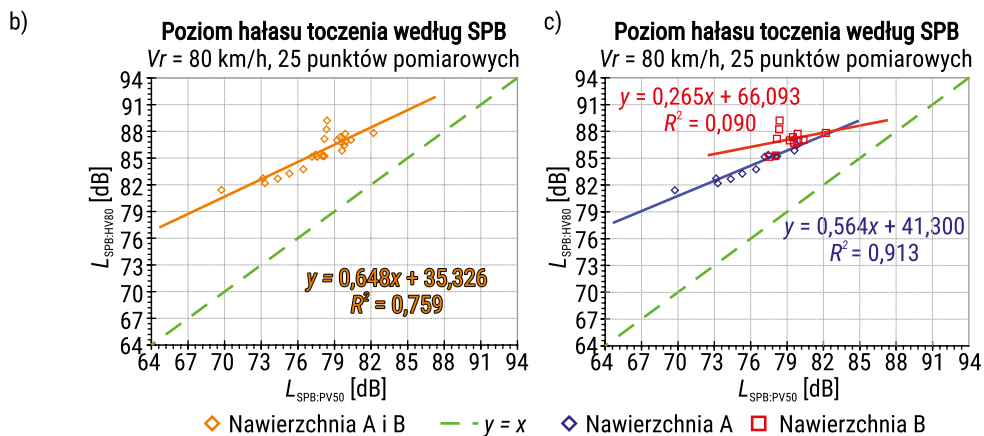


RYSUNEK 5.22. (cd.) Wyniki obliczeń poziomów hałasu toczenia pojazdów i 95% przedziałów ufności dla pojazdów kategorii P i H według ustalonych w normie PN-EN ISO 11819-1:2023 wymagań dla kategorii prędkości ruchu wolnego

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

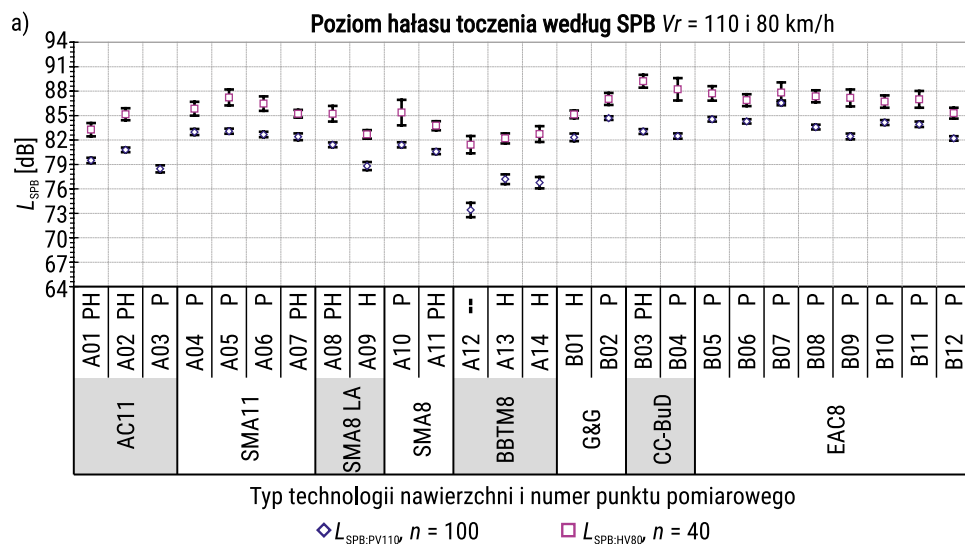


RYSUNEK 5.23. Wyniki obliczeń poziomów hałasu toczenia pojazdów i 95% przedziałów ufności dla pojazdów kategorii P i H według ustalonych w normie PN-EN ISO 11819-1:2023 wymagań dla kategorii prędkości ruchu średniego



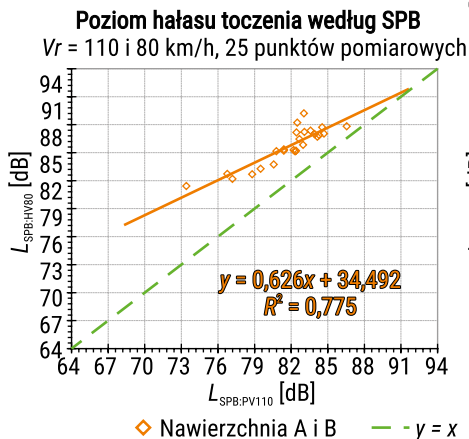
RYSUNEK 5.23. (cd.) Wyniki obliczeń poziomów hałasu toczenia pojazdów i 95% przedziałów ufności dla pojazdów kategorii P i H według ustalonych w normie PN-EN ISO 11819-1:2023 wymagań dla kategorii prędkości ruchu średniego

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

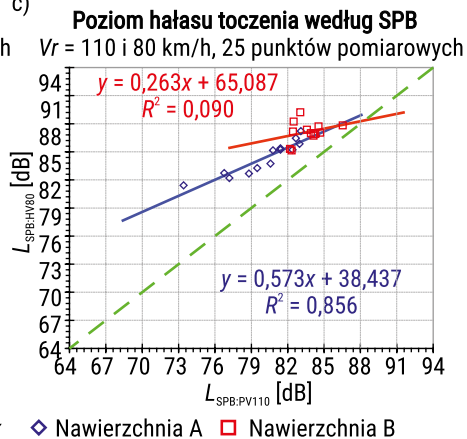


RYSUNEK 5.24. Wyniki obliczeń poziomów hałasu toczenia pojazdów i 95% przedziałów ufności dla pojazdów kategorii P i H według ustalonych w normie PN-EN ISO 11819-1:2023 wymagań dla kategorii prędkości ruchu szybkiego

b)



c)



RYSUNEK 5.24. (cd.) Wyniki obliczeń poziomów hałasu toczenia pojazdów i 95% przedziałów ufności dla pojazdów kategorii P i H według ustalonych w normie PN-EN ISO 11819-1:2023 wymagań dla kategorii prędkości ruchu szybkiego

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

5.3. Podsumowanie

W ramach przeprowadzonej analizy statystycznej zostały wykonane, zgodnie z algorytmem określonym w normie PN-EN ISO 11819-1:2023, obliczenia parametrów liniowej funkcji regresji i przedziałów niepewności dla 51 zbiorów wyników pomiaru poziomu hałasu toczenia pojazdów osobowych i ciężarowych w 26 przekrojach dróg metodą SPB. Celem była ich normalizacja do prędkości referencyjnych (odniesienia) dla trzech kategorii prędkości: niskiej, średniej i wysokiej, w aspekcie technologii wykonania górnej warstwy nawierzchni i prognozowanej oceny hałaśliwości w zakresie pięciostopniowej skali: od kategorii cichej do nadmiernie głośnej.

Nowością normy PN-EN ISO 11819-1:2023 jest wprowadzenie terminu „użyteczny zakres prędkości” jako kryterium kwalifikującego zbiory danych pomiarowych do obliczeń regresji i normalizacji do prędkości referencyjnej. Istota tego kryterium polega na tym, że prędkość referencyjna, jaką przyjmuje się do prognozy poziomu hałasu toczenia i jego niepewności, musi zawierać się wewnątrz zakresu prędkości zapisanych w danym zbiorze pomiarowym. W ten sposób został określony dopuszczalny horyzont prognozy. W przypadku braku takiej kwalifikacji można rozważyć możliwość zastosowania metody przybliżonej, tzw. zależności alternatywnej, która generuje szersze przedziały niepewności.

W wyniku sprawdzenia warunku kwalifikacyjnego w obliczeniach regresji metodą SPB stwierdzono, że jest on spełniony dla wszystkich 26 zbiorów danych dla pojazdów kategorii P, przy czym w przypadku kategorii dróg o średnich prędkościach dla 10, kategorii dróg o wysokich prędkościach dla 21, a w przypadku obydwu kategorii dróg dla 5. Jeśli chodzi o pojazdy kategorii H, tylko 9 z 25 zbiorów danych spełnia łącznie warunek kwalifikacyjny dla kategorii dróg o średnich i wysokich prędkościach. W wyniku oceny eksperckiej z 16 niezakwalifikowanych zbiorów danych do przetwarzania metodą SPB wybrano 13, natomiast pozostałe 3 do przetwarzania metodą zależności alternatywnej. Żaden ze sprawdzonych 51 zbiorów danych nie spełnia natomiast kryterium kwalifikacyjnego dla kategorii dróg o niskich prędkościach.

Na podstawie porównania prognozowanych poziomów hałasu toczenia dla pojazdów osobowych i ciężarowych zestawionych na wykresach w różnych wariantach stwierdzono, że we wszystkich tych przypadkach, gdzie obliczenia wykonano dla zbiorów danych niespełniających kryterium kwalifikacyjnego, otrzymano szersze przedziały ufności, a więc potencjalnie mniej precyzyjne oceny hałaśliwości nawierzchni drogowych.

Niepewność prognozowanego poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych zależy przede wszystkim od precyzji metody pomiarowej, której miarą jest odchylenie standardowe reszt (Se), a także od liczebności zbioru pomiarowego (n) i standaryzowanej odległości (z), którą oblicza się według wzoru 5.4 na podstawie odległości między punktem prognozy (PP) a punktem centralnym (PC), oraz od zakresu zarejestrowanych prędkości, którego miarą jest odchylenie standardowe zbioru logarytmów prędkości ($DlogV$). Precyzja metody SPB wynosi średnio 1,3 dB dla pojazdów osobowych (kategoria P) oraz 1,4 dB dla pojazdów ciężarowych (kategoria H).

Metoda SPB bazuje na losowym doborze obiektów badań i poza ich liczebnością nie ma innej możliwości oddziaływania na zmniejszenie przedziału niepewności prognozowanego poziomu hałasu toczenia pojazdów. Jej korzyść zawiera się w tym, że na badanej nawierzchni w ramach jednej sesji pomiarowej są mierzone efekty akustyczne wywoływane przejazdem pojedynczych pojazdów osobowych i pojazdów ciężarowych. Tak ustalone wartości stanowią bezpośrednio podstawę oceny i prognozowania klimatu akustycznego w otoczeniu tras drogowych.

6. Statystyczna weryfikacja wyników pomiaru poziomu hałasu toczenia pojazdów według metody CPB

6.1. Wybór odcinków testowych i przekrojów badawczych oraz charakterystyka ich nawierzchni

W ramach projektu „Innowacyjne metody redukcji hałasu drogowego i zasady ich stosowania (INREH)” realizowanego w ramach konkursu RID-II w latach 2024–2025 wykonano metodą kontrolowanego przejazdu (CPB) pomiary L_{Amax} w dziewięciu przekrojach badawczych o nawierzchniach asfaltowej i betonowej. Wykonanie pomiarów maksymalnego poziomu dźwięku od pojedynczo jadących pojazdów według metody kontrolowanego przejazdu wymaga ustalenia odcinków testowych i przekrojów badawczych. Pomimo zbliżonych do metody SPB zasad prowadzenia pomiarów zawsze trudnością jest ustalenie lokalizacji odcinków testowych i przekrojów badawczych. Praktycznie niemożliwością jest wykonanie takich pomiarów na użytkowanych drogach szybkiego ruchu oraz ogólnodostępnych drogach krajowych. W związku z tym po uzyskaniu zgody inwestora i wykonawcy do badań wytypowano odcinki testowe na drogach szybkiego ruchu bezpośrednio przed przekazaniem ich do eksploatacji oraz na użytkowanych drogach wojewódzkich przy okresowym wstrzymywaniu ruchu samochodowego.

Odcinki testowe o nawierzchni asfaltowej zlokalizowano na drogach S61 (obwodnica Łomży) i S19 (w okolicy Dobrzyniewa: S19-D i Kuźnicy Białostockiej: S19-K) oraz na drodze wojewódzkiej DW673, a odcinki testowe o nawierzchni betonowej – na autostradzie A2 (w pobliżu Siedlec), na drodze S19 (w okolicy Kuźnicy Białostockiej: S19-K) i na drodze wojewódzkiej DW604. Charakterystykę nawierzchni podano w tabeli 6.1, a lokalizację przekrojów badawczych pokazano na rysunku 6.1. W załączniku Z2 przedstawiono widok nawierzchni w dziewięciu przekrojach badawczych.

TABELA 6.1. Charakterystyka nawierzchni drogowych na odcinkach testowych

Lp.	Typ nawierzchni	Droga	Technologia	Kod technologii	Rok lub wiek nawierzchni	MPD [mm]	Nr przekroju	Pojazd	
								osobowy	kod
1.	A	DW673	AC11	T1	>10 lat	0,64	C01	P	CA01
2.	A	S19-D	SMA11	T2	2025	1,11	C02	P	CA02
3.	A	S19-K	SMA11	T2	2025	0,69	C03	P	CA03
4.	A	S61	SMA8	T4	2024	0,69	C04	P	CA04
5.	B	S19-K	G&G	T6	2025	1,25	C05	P	CB05
6.	B	DW604	CC-BrD*	T7	2021	0,85	C06	P	CB06
7.	B	DW604	CC-BrD*	T7	2021	0,25	C07	P	CB07
8.	B	A2	EAC8	T8	2024	1,07	C08	P	CB08
9.	B	S19-K	EAC8	T8	2025	1,19	C09	P	CB09

* CC-BrD – beton cementowy teksturowany metodą poprzecznego szcztotkowania

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYSUNEK 6.1. Lokalizacja przekrojów badawczych w pomiarach metodą CPB

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie Google Maps.

6.2. Pojazdy testowe i ich charakterystyka

W metodzie CPB maksymalne poziomy emitowanych dźwięków są mierzone od jadących pojazdów testowych o znanej charakterystyce technicznej. W badaniach metodą CPB, prowadzonych przez zespół z Politechniki Białostockiej, dotychczas wykorzystywano trzy, cztery lub pięć pojazdów testowych o znanej, lecz zróżnicowanej charakterystyce. W badaniach prowadzonych w innych krajach wykorzystuje się różną liczbę pojazdów testowych. Na przykład w pomiarach poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych metodą CPB w Holandii w niektórych badaniach uczestniczyło nawet 15 pojazdów różnych typów.

W ramach projektu INREH przyjęto, że zespół pojazdów testowych będzie złożony z sześciu następujących samochodów osobowych:

- cztery pojazdy z silnikiem benzynowym: Citroen DS4 (opony: 215/55 R17), Hyundai Tucson (opony: 245/45 R19), Opel Astra (opony: 205/60 R16), Toyota RAV4 (opony: 225/60 R18);
- dwa pojazdy z napędem elektrycznym: Kia Niro (opony: 215/55 R17), Kia EV6 (opony: 255/45 R20).

Na rysunku 6.2 pokazano powyższy zestaw pojazdów testowych.

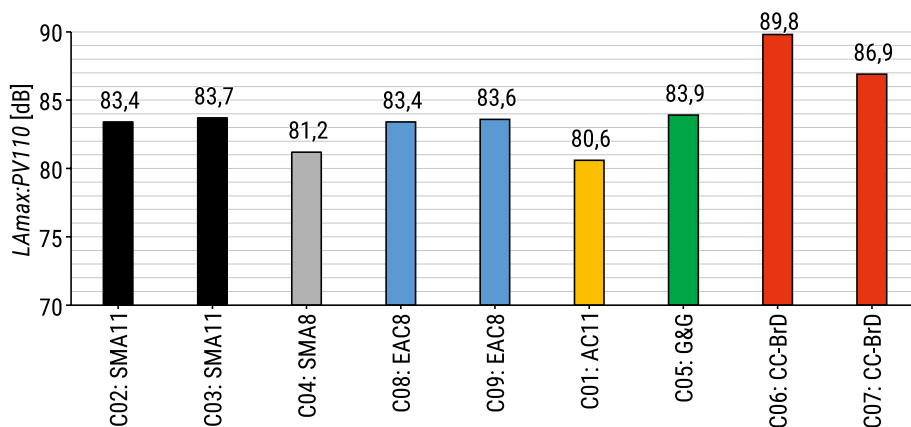


RYSUNEK 6.2. Zestaw pojazdów testowych wykorzystanych w badaniach metodą CPB

ŹRÓDŁO: fot. M. Motylewicz.

6.3. Wyniki pomiaru poziomów hałasu toczenia pojazdów samochodowych metodą CPB

Na rysunku 6.3 przedstawiono wartości maksymalnego poziomu dźwięku od przejazdu statystycznego pojazdu osobowego (ustalonego na podstawie całego zestawu pojazdów testowych) na badanych nawierzchniach według metody CPB.

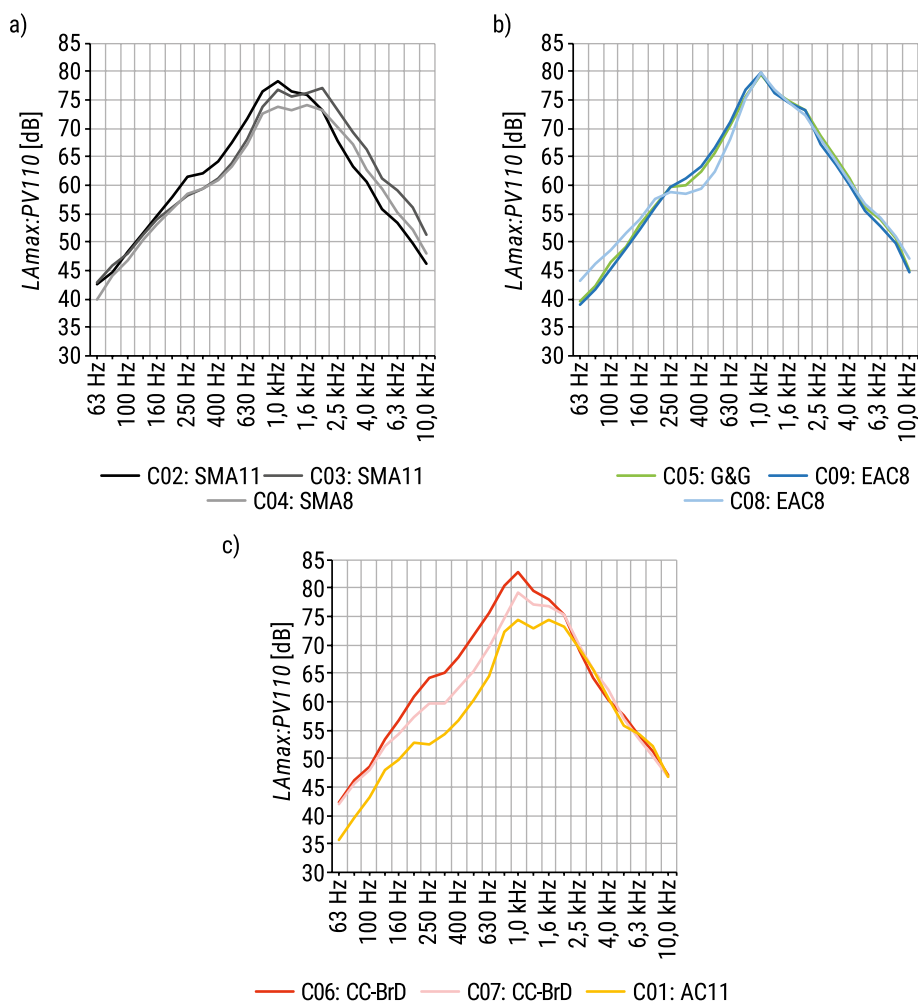


RYSUNEK 6.3. Wartości L_{Amax} na badanych nawierzchniach według metody CPB

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Ustalone wartości poziomu hałasu toczenia pojazdu osobowego z prędkością 110 km/h pokazują, że nawierzchnie asfaltowe wykonane w technologiach SMA11 i EAC8, a także nawierzchnia betonowa teksturowana metodą *grooving/grinding* praktycznie nie różnią się pod względem hałaśliwości. Korzystniejszym rozwiązaniem okazały się natomiast nawierzchnie SMA8 i AC11. Przeprowadzone pomiary potwierdziły także, że szczotkowanie poprzeczne nawierzchni betonowych przyczynia się do generowania dźwięków o wyższej wartości, a ich poziom wzrasta dodatkowo przy głębszej teksturze powierzchni jezdni.

Powyższe spostrzeżenia potwierdza analiza widmowa emitowanych dźwięków (rysunek 6.4b). Widma pokazane na rysunku 6.4c jednoznacznie wskazują na wpływ mechanizmów mechanicznych na poziom hałasu toczenia pojazdów. Bardziej szczegółowego wyjaśnienia wymagają dane prezentowane na rysunku 6.4a. Nawierzchnia SMA8 na drodze S61 (C04) wpływa na generowanie niższych poziomów dźwięku w zakresie częstotliwości poniżej 1600 Hz w stosunku do nawierzchni SMA11 w przekroju S19-D (C02) (wpływ mechanizmów mechanicznych), a sytuacja powyżej częstotliwości wygląda odwrotnie (wpływ mechanizmów aerodynamicznych). Zupełnie nietypowo przedstawia się widmo dźwięku na nawierzchni SMA11 w przekroju S19-K (C03). Pomimo mniejszej wartości MPD (0,69 mm) w porównaniu z przekrojem S19-D (C02) (MPD = 1,11 mm) wartość L_{Amax} jest nawet nieznacznie wyższa (rysunek 6.3).

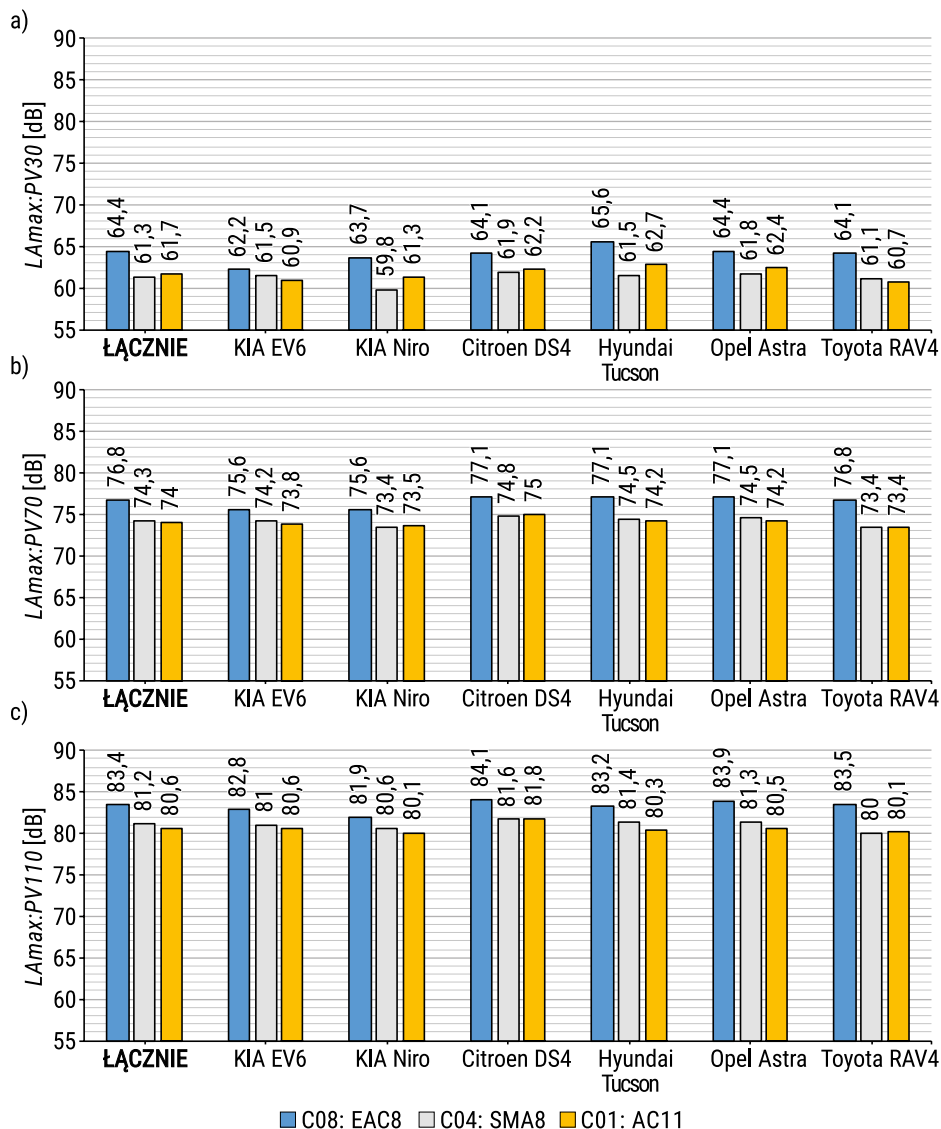


RYSUNEK 6.4. Widma emitowanych dźwięków na nawierzchniach o różnej charakterystyce według metody CPB

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Z uwagi na udział w badaniach pojazdów o napędzie elektrycznym przeprowadzono analizę wpływu rodzaju pojazdu i prędkości na poziom hałasu toczenia na trzech nawierzchniach (C01: AC11, C04: SMA8, C08: EAC8). Na rysunku 6.5 pokazano wartości maksymalnego poziomu dźwięku od przejazdu sześciu pojazdów osobowych z prędkościami 30 km/h, 70 km/h i 110 km/h. Przy prędkości 30 km/h pojazdy o napędzie elektrycznym emitowały niższe poziomy dźwięku w stosunku do pozostałych pojazdów. Na przykład pojazd Kia EV6 na nawierzchni EAC8 charakteryzował się niższym o 3,4 dB poziomem dźwięku w stosunku do pojazdu Hyundai, a pojazd Kia Niro na nawierzchni SMA8 był cichszy od pojazdu Hyundai o 2,1 dB. Wartości różnicy ulegały zmniejszeniu wraz ze wzrostem prędkości i przy prędkości

110 km/h wpływ napędu był już nieistotny. Zgodnie z zapisami w literaturze dotyczącymi poziomu hałasu toczenia pojazdów przy wyższych prędkościach w zdecydowanym stopniu decydująca jest charakterystyka nawierzchni drogowej. Z pewnością bardziej szczegółowych analiz wymaga wpływ opon samochodowych.



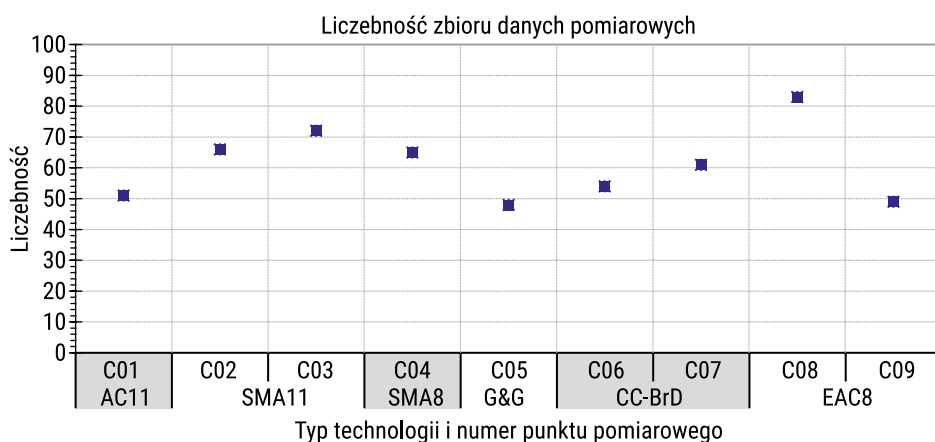
RYSUNEK 6.5. Porównanie maksymalnych poziomów dźwięku przy przejeździe pojazdów testowych z prędkościami 30 km/h, 70 km/h i 110 km/h na trzech badanych nawierzchniach

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

6.4. Analiza statystyczna wyników badań poziomu hałasu toczenia pojazdów testowych (opracowano na podstawie raportu [48])

6.4.1. Opis statystyczny danych pomiarowych

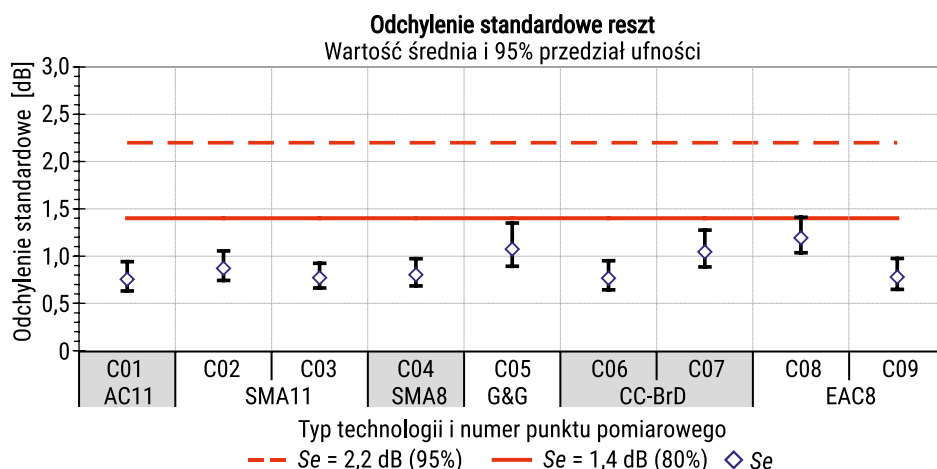
Analizę wyników pomiaru poziomu hałasu toczenia pojazdów uzyskanych metodą kontrolowanego przejazdu CPB przeprowadzono według określonych dla metody SPB zapisów normy PN-EN ISO 11819-1:2023. Do analizy przyjęto dziewięć zbiorów danych pochodzących z pomiarów przeprowadzonych na wytypowanych nawierzchniach o różnej charakterystyce maksymalnego poziomu hałasu toczenia pojedynczo jadących pojazdów osobowych. W wybranych przekrojach dróg były realizowane wielokrotne przejazdy każdego z pojazdów testowych (od 7 do 10) z zadaną prędkością z przedziału od 20 km/h do 150 km/h, ze skokiem co 10 km/h. Uwzględniając zapisy normy PN-EN ISO 11819-1:2023, stwierdzono, że w sześciu przekrojach otrzymane wyniki obejmują trzy kategorie prędkości pojazdów: niską, średnią i wysoką, a w trzech pozostałych lokalizacjach dwie z nich: wolna i średnia. W czterech przekrojach przeprowadzono pomiary na nawierzchniach asfaltowych (A) wykonanych w trzech technologiach, a w pięciu na nawierzchniach betonowych (B) również wykonanych w trzech technologiach, z taką różnicą, że w przypadku pomiarów z wykorzystaniem metody CPB badano nawierzchnie teksturowane metodą szczotkowania poprzecznego, a nie metodą tkaniny jutowej, tak jak to było w pomiarach metodą SPB. W sumie pomiarami objęto sześć różnych typów technologii. Łączna liczba zebranych danych, czyli pojedynczych wyników pomiarów, jako par liczb: V i LA_{max} , wynosi 549. Liczebności poszczególnych zbiorów danych wynoszą natomiast od 48 do 83 wyników (rysunek 6.6).



RYSUNEK 6.6. Zestawienie liczebności zbiorów danych w dziewięciu przekrojach pomiarowych

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Miarą precyzji metody CPB jest odchylenie standardowe reszt (Se), którego wartości wyznaczono dla zbiorów danych z dziewięciu przekrojów pomiarowych i zestawiono na rysunku 6.7. Jest to podstawowy parametr, jaki przyjmuje się w szacowaniu szerokości przedziałów niepewności poziomu toczenia pojazdów. Z tego zestawienia wynika, że ich wartości układają się na ogół na stałym poziomie, od 0,8 dB do 1,2 dB (średnio 0,9 dB). Duża zgodność, co do wielkości rozproszenia pojedynczych wyników pomiaru L_{Amax} wobec liniowego modelu regresji dla różnie zlokalizowanych dziewięciu przekrojów pomiarowych, świadczy o jednorodności analizowanych zbiorów danych.

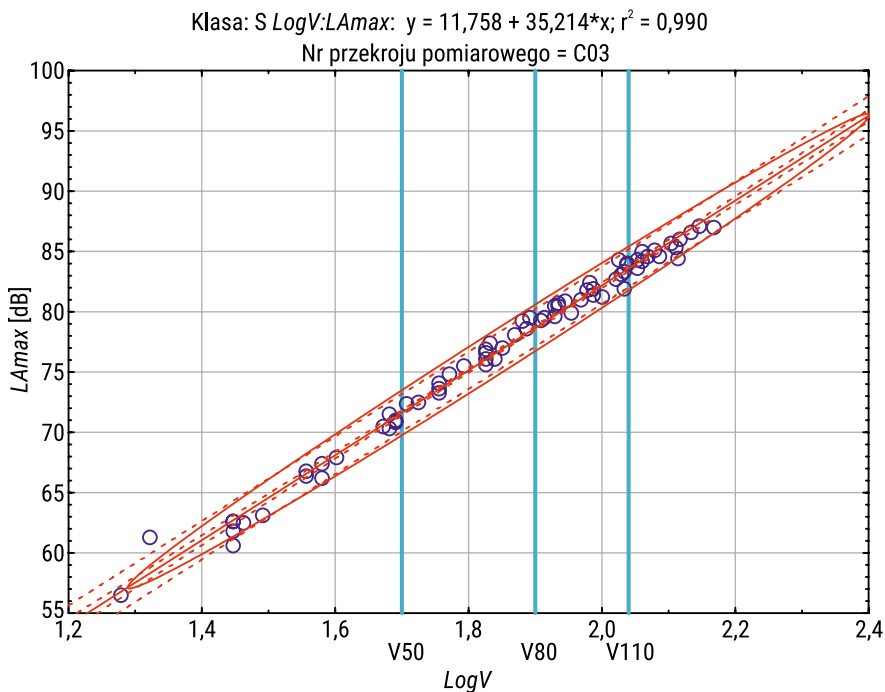


RYSUNEK 6.7. Zestawienie wartości odchyłeń standardowych reszt (Se) w dziewięciu przekrojach

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

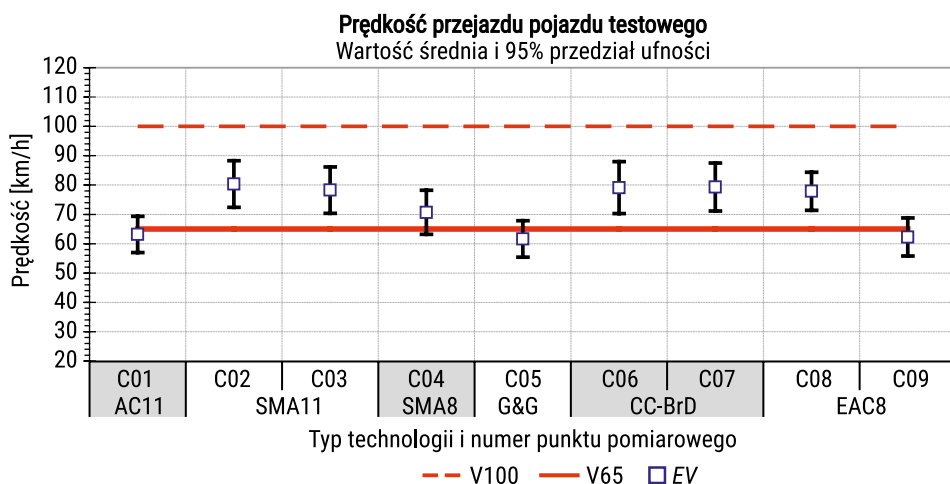
W wyniku obliczeń ustalono bardzo wysokie wartości współczynników determinacji (R^2) – od 0,966 do 0,992 (średnia: 0,982) – jako skutek stosowania w metodzie CPB jednorodnej grupy pojazdów oraz szerokiego zakresu prędkości przejazdowych. Przy ustalonej wartości Se sprzyja to lepszemu dopasowaniu wyników pomiaru L_{Amax} do linii trendu (rysunek 6.8).

W pomiarach metodą CPB średnia wartość prędkości dla pojazdów testowych na badanej nawierzchni na ogół równa się połowie ustalonego zakresu prędkości przejazdów kontrolowanych, który może obejmować więcej niż jedną kategorię prędkości (rysunek 6.9).



RYSUNEK 6.8. Przykład wyników pomiarów poziomu hałasu toczenia pojazdów testowych metodą CPB (przekrój C03)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

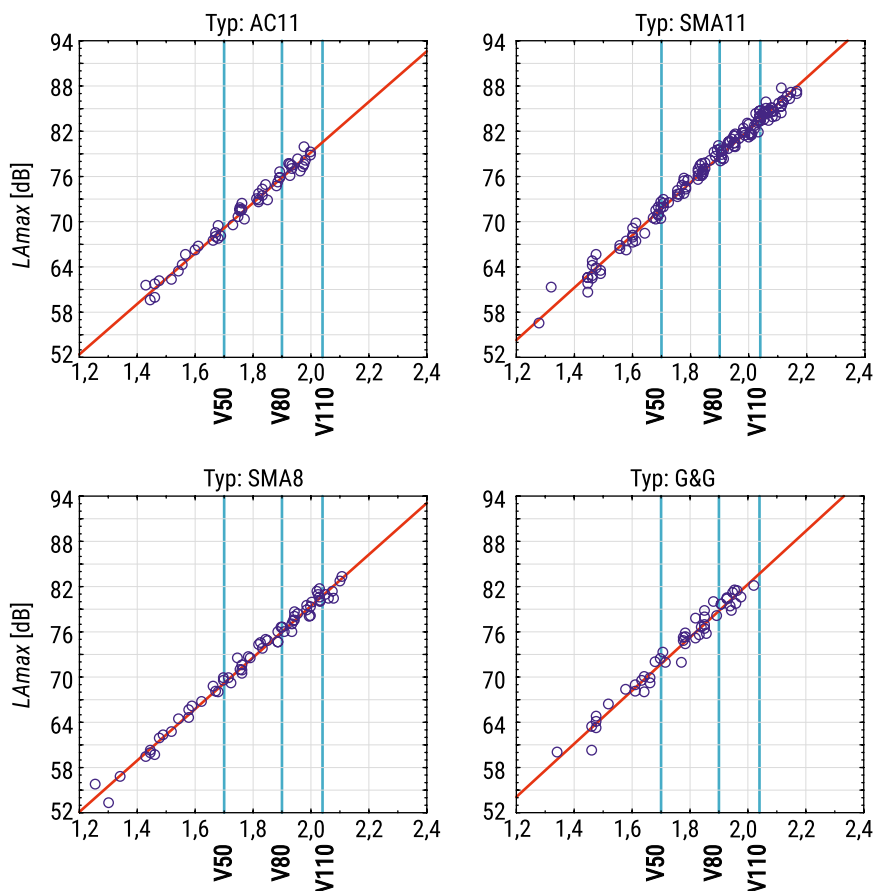


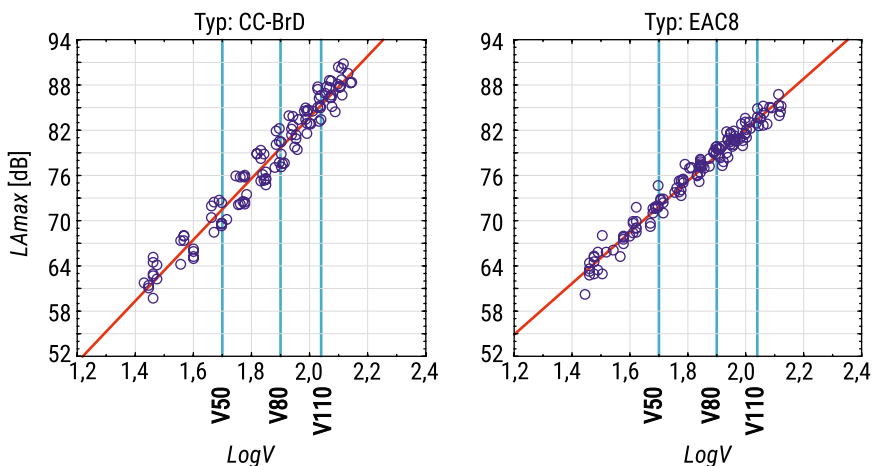
RYSUNEK 6.9. Wartości średnich prędkości przejazdu kontrolowanego (EV) i 95% przedziały ufności

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

6.4.2. Analiza zależności maksymalnego poziomu dźwięku od prędkości pojazdów

Pojedyncze wyniki pomiarów ze wszystkich zbiorów danych pogrupowanych według typu technologii nawierzchni przedstawiono oddzielnie na sześciu wykresach zależności L_{Amax} od $\log V$ (rysunek 6.10). Z pokazanego zestawienia danych wynika, że otrzymane wyniki badań poziomu hałasu toczenia pojazdów i prędkości przejazdu układają się równomiernie wzdłuż całej długości linii trendu o korelacji dodatniej.





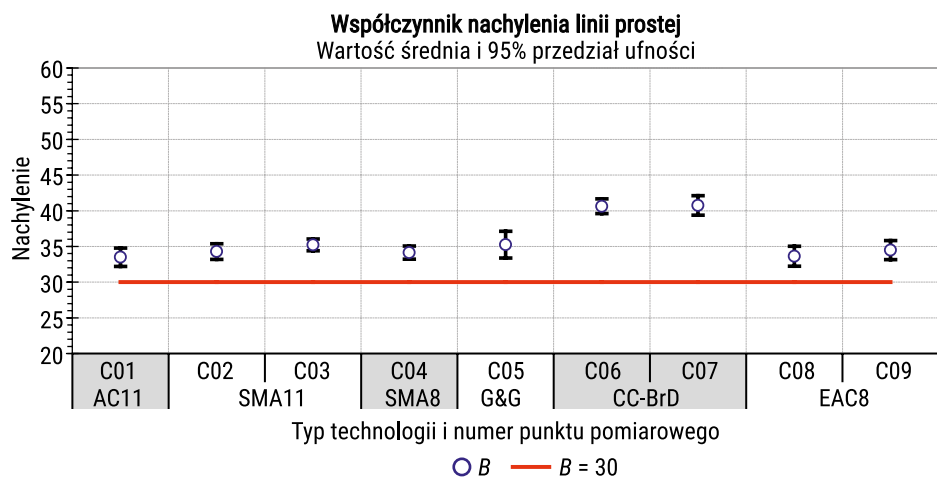
RYSUNEK 6.10. Wyniki pomiaru maksymalnego poziomu hałasu toczenia pojazdów dla sześciu typów technologii

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wyznaczone w wyniku regresji współczynniki nachylenia linii prostej pokazano na rysunku 6.11. Jedynie w przypadku dwóch przekrojów, gdzie nawierzchnia jest wykonana według technologii CC-BrD, układają się one na wyższym poziomie ($B = 41$) niż w pozostałych siedmiu punktach dla pięciu typów technologii ($B = 34 \pm 1$).

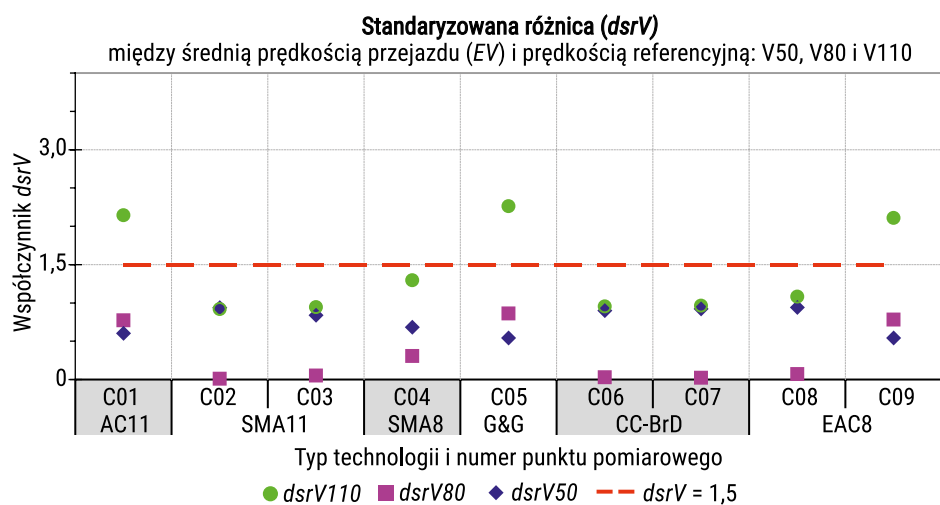
W celu sprawdzenia uzyskanych metodą CPB zbiorów danych pod względem przydatności do obliczeń regresji i normalizacji do prędkości V_r , zgodnie z określonym w normie PN-EN ISO 11819-1:2023 warunkiem kwalifikacyjnym, wykonano obliczenia standaryzowanej różnicy prędkości ($d_{sr}V$) według wzoru (5.3) dla trzech prędkości referencyjnych, a wyniki pokazano na rysunku 6.12. Określony dla każdego zbioru danych pomiarowych użyteczny zakres prędkości, gdzie $|d_{sr}V| \leq 1,5$, obejmuje w przypadku sześciu przekrojów trzy prędkości referencyjne, a pozostałych trzech przekrojów – dwie prędkości referencyjne: V50 i V80.

W metodzie kontrolowanego przejazdu (CPB) zostały przyjęte takie same prędkości odniesienia (V_r), jakie są zapisane w normie PN-EN ISO 11819-1:2023. Ponieważ przejazdy pojazdów testowych były realizowane dla ustalonego zakresu prędkości, nie zachodzi konieczność stosowania alternatywnej zależności poziomu hałasu toczenia od prędkości. Oznacza to, że wyznaczone według takiej samej procedury jak w metodzie SPB wartości $L_{CPB:PV_r}$ i ich niepewności rozszerzone ($UL_{CPB:PV_r}$) są końcowym etapem analizy wyników.



RYSUNEK 6.11. Wartości współczynnika kierunkowego (nachylenia) linii regresji (B) i 95% przedziały ufności (UB)

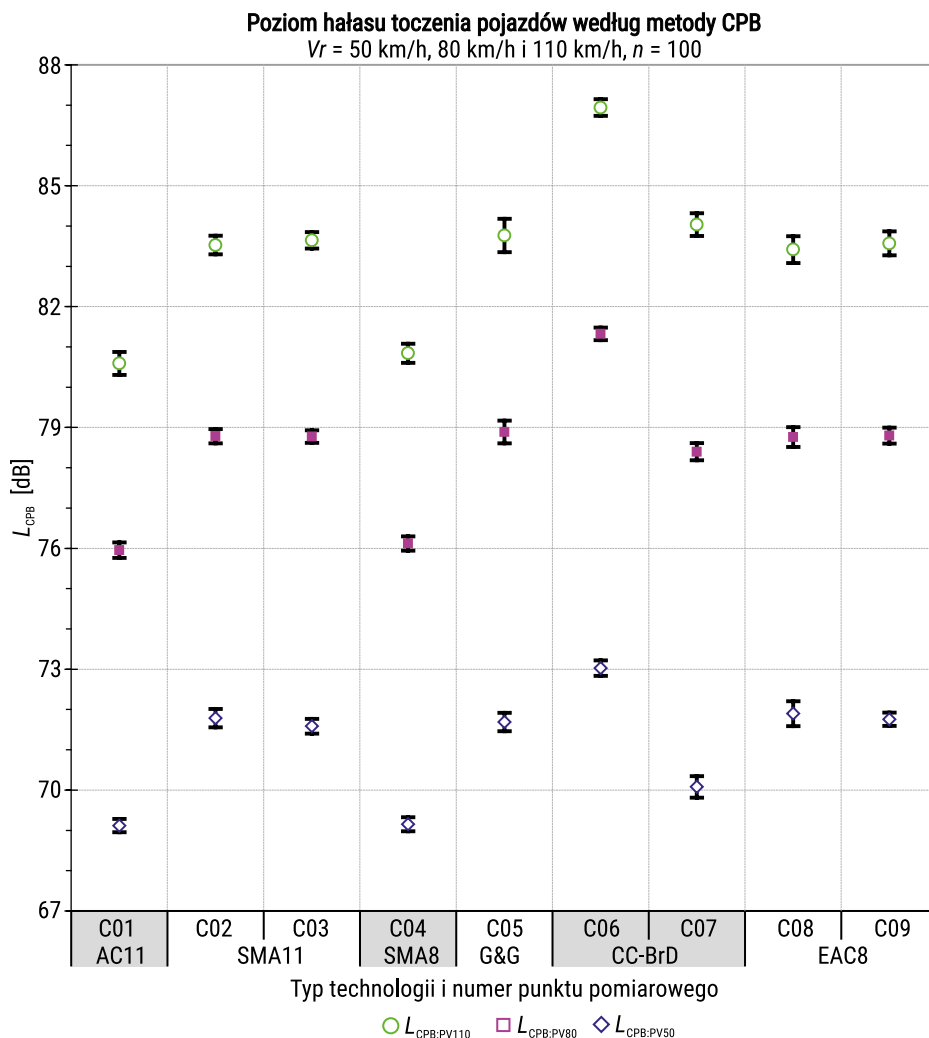
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYSUNEK 6.12. Sprawdzenie warunku przydatności zbiorów pomiarowych w dziewięciu przekrojach pomiarowych do obliczeń regresji i normalizacji dla trzech kategorii prędkości

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Obliczenia końcowych wartości $L_{CPB:PVr}$ i ich 95% przedziałów ufności wykonano dla wszystkich zbiorów danych z dziewięciu przekrojów pomiarowych przy zastosowaniu metody analogicznej jak w metodzie SPB (tabela 5.1a), dla założonej liczby $n = 100$ pojazdów osobowych (rysunek 6.13).



RYSUNEK 6.13. Wyniki obliczeń poziomu hałasu toczenia pojazdów według metody CPB i 95% przedziałów ufności

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Uwzględniając przedstawioną w tabeli 5.2 klasyfikację nawierzchni pod względem hałaśliwości, dla $V_r = 80 \text{ km/h}$, stwierdzono, że uzyskane wyniki zawierają się w trzech klasach. Nawierzchnie asfaltowe typu AC11 i SMA8 zaliczają się do klasy o obniżonej hałaśliwości, a SMA11 i nawierzchnie betonowe (z wyłączeniem odcinka C06) do klasy o normalnej hałaśliwości, natomiast na odcinku C06 do klasy o podwyższonej hałaśliwości. Nawierzchnie SMA11 i EAC8 pomimo różnej lokalizacji należą do tej samej klasy, nawierzchnie CCBrd (odcinki C06 i C07) zdecydowanie różnią się zaś pod względem hałaśliwości.

6.5. Podsumowanie

Ogólny model prognozy poziomu hałasu toczenia pojazdów (L_{Amax} , dB) w zależności od ich prędkości przejazdu po badanej nawierzchni (V , km/h) jest opisywany tak samo jak w metodzie SPB – dwuparametrową funkcją logarytmiczną. Obliczenia parametrów liniowej funkcji regresji i przedziały ich niepewności dla dziewięciu zbiorów pomiarowych zostały wykonane zgodnie z algorytmem określonym w normie PN-EN ISO 11819-1:2023 w celu normalizacji wyznaczonych maksymalnych poziomów hałasu toczenia pojazdów osobowych do prędkości referencyjnych, które pozwalają dokonać kwalifikacji badanych nawierzchni do ustalonych klas pod względem hałaśliwości.

Precyzja metody CPB, której miarą jest odchylenie standardowe reszt (Se), wynosi średnio 0,9 dB dla pojazdów osobowych. Oznacza to, że przejazdy kontrolowane ustalonej grupy pojazdów testowych generują bardziej jednorodny poziom hałasu toczenia niż przejazdy losowo wybieranych pojazdów z rzeczywistego potoku ruchu, jak w metodzie SPB.

Niepewność prognozowanego poziomu hałasu toczenia pojazdu zależy od empirycznie ustalonej precyzji metody pomiarowej (Se), liczebności zbioru pomiarowego (n), standaryzowanej odległości (z) między punktem prognozy (PP) a punktem centralnym (PC) oraz zakresu zarejestrowanych prędkości, którego miarą jest odchylenie standardowe logarytmu prędkości ($DlogV$).

Należy podkreślić, że metoda CPB daje możliwość dowolnego doboru zarówno grupy pojazdów testowych oraz zakresów prędkości przejazdu, jak i liczby powtórzeń pomiarów w celu zminimalizowania wpływu czynników losowych na niepewność prognozowanego poziomu hałasu toczenia pojazdów. Stwarza również możliwość badania hałaśliwości nawierzchni zarówno przed oddaniem drogi do użytkowania, jak i na odcinkach testowych w trakcie budowy, wpływając tym samym na decyzję o wyborze najbardziej korzystnej z akustycznego punktu widzenia technologii wykonania warstwy ścieralnej. Należy jednak mieć na uwadze fakt, że ustalony zestaw pojazdów testowych może nie odpowiadać charakterystyce pojazdów, jakie będą przejeżdżały drogą po oddaniu jej do użytkowania.

7. Wyniki badań poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych w ocenie hałaśliwości nawierzchni drogowych (opracowano na podstawie raportu [48])

7.1. Ocena nawierzchni drogowych pod względem hałaśliwości według metod SPB i CPB

Do analizy przyjęto zbiory danych z 30 punktów pomiarowych, które zostały znormalizowane do prędkości referencyjnej $V_r = 80$ km/h. W tabeli 7.1 pokazano zbiorcze zestawienie badanych technologii, klas dróg, na których były prowadzone pomiary, metod pomiaru oraz numerów przekrojów badawczych.

TABELA 7.1. Zestawienie symboli oznaczeń odcinków pomiarowych

Lp.	Typ nawierzchni	Technologia	Klasa drogi	Metoda pomiaru i nr przekroju	
				SPB	CPB
1.	Asfaltowa	AC11	DK	A01	–
2.			DK	A02	–
3.			DW	A03	–
4.			DW	–	C01
5.		SMA11	S	A04	–
6.			S	A05	–
7.			S	A06	–
8.			DK	A07	–
9.			S	–	C02
10.			S	–	C03
11.		SMA8	S	A10	–
12.			DK	A11	–
13.			S	–	C04

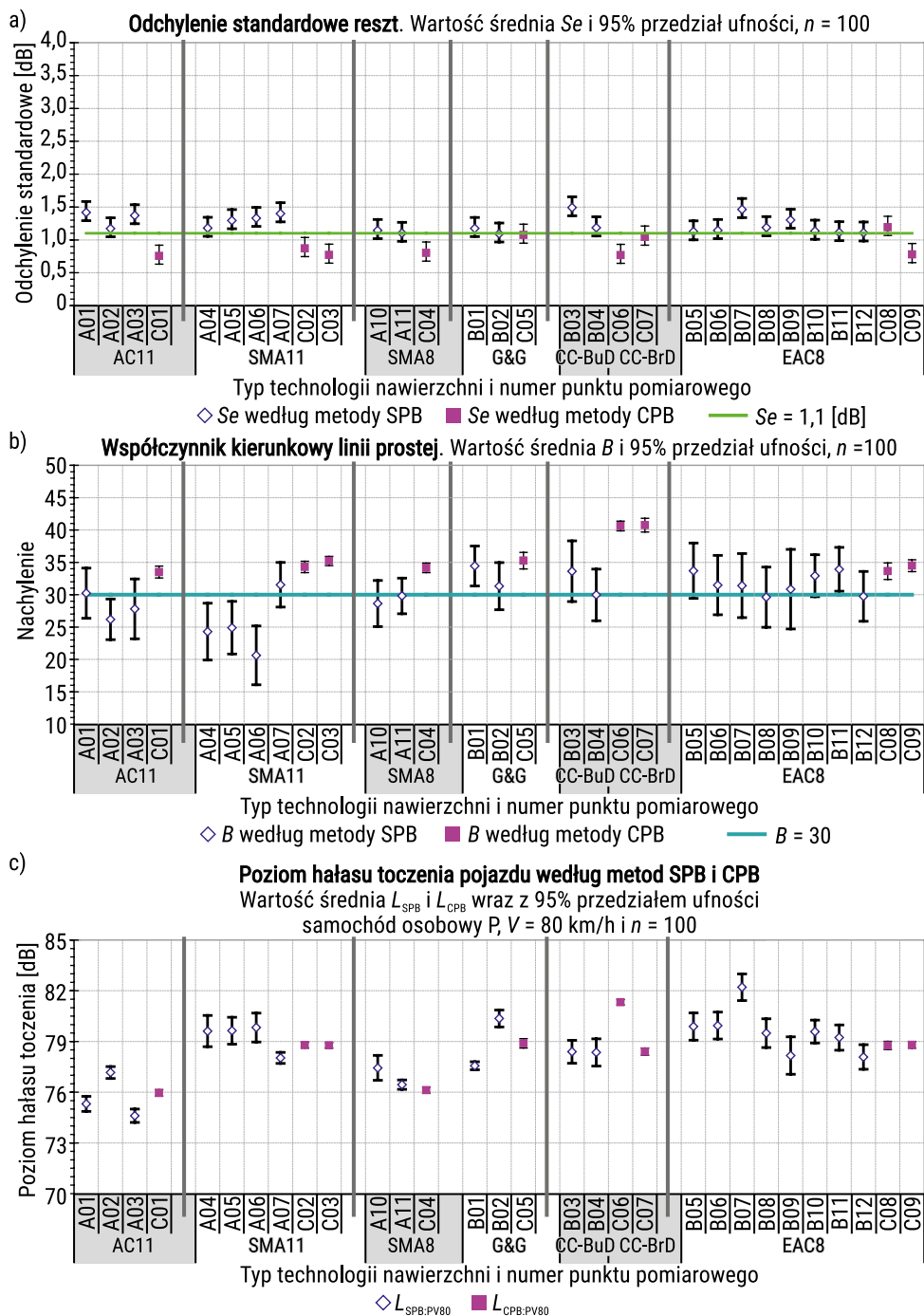
Lp.	Typ nawierzchni	Technologia	Klasa drogi	Metoda pomiaru i nr przekroju	
				SPB	CPB
14.	Betonowa	G&G	DK	B01	–
15.			S	B02	–
16.			S	-	C05
17.		CC-BuD	S	B03	–
18.			A	B04	–
19.		CC-BrD	DW	–	C06
20.			DW	–	C07
21.		EAC8	S	B05	–
22.			S	B06	–
23.			S	B07	–
24.			S	B08	–
25.			S	B09	–
26.			A	B10	–
27.			A	B11	–
28.			S	B12	–
29.			A	–	C08
30.			S	–	C09

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Na rysunku 7.1 przedstawiono wyniki badania poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych w 30 przekrojach badawczych według sześciu technologii budowy nawierzchni, w których wykonywano pomiary zarówno metodą SPB, jak i metodą CPB. Kolejno na trzech wykresach pokazano średnie wartości wybranych parametrów i przedziały ich niepewności w celu porównania zastosowanych metod pod względem:

- precyzji wyników pomiarów (Se) (rysunek 7.1a),
- współczynników kierunkowych funkcji regresji liniowej (B) (rysunek 7.1b),
- poziomu hałasu toczenia pojazdu dla prędkości referencyjnej 80 km/h ($L_{SPB:PV80}$ i $L_{CPB:PV80}$) (rysunek 7.1c).

Na rysunku 7.1a (odchylenie standardowe reszt) dokonano porównania wartości Se jako oceny precyzji pomiarów w przekrojach badawczych pogrupowanych według technologii, z rozróżnieniem metod pomiarowych. Wartość odniesienia $Se = 1,1$ dB równa się przyjętej w normie dla tego parametru niepewności standardowej. Z porównania tych ocen wynika, że przejazdy kontrolowane według metody CPB generują bardziej jednorodny poziom hałasu toczenia niż wyniki uzyskane w ramach pomiarów metodą SPB. Spośród dziewięciu wartości Se_{CPB} w sześciu przypadkach są one istotnie mniejsze, a w trzech pozostałych są tego samego rzędu co Se_{SPB} . Ustalono oceny precyzji dla obu metod pomiarowych zawierają się, zgodnie z normą PN-EN ISO 118191:2023, w przedziałach obu niepewności rozszerzonych jako górnych granic wartości dopuszczalnych.



RYSUNEK 7.1. Zestawienie wyników analizy porównawczej metod SPB i CPB na przykładzie parametrów Se i B oraz poziomu hałasu toczenia statystycznego pojazdu osobowego

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Na rysunku 7.1b (współczynnik kierunkowy linii prostej) zestawiono wyznaczone wartości współczynników B wyrażających wpływ zmiany prędkości przejazdu na zmianę poziomu hałasu toczenia pojazdów i służących do korygowania (harmonizacji) wyników pomiarów do prędkości referencyjnej. Przedziały niepewności oszacowanej wartości średniej współczynnika B na podstawie pomiaru SPB są wielokrotnie szersze niż otrzymane według pomiaru CPB, co wynika ze zdecydowanie węższego zakresu prędkości losowo typowanych pojazdów. Stwierdzono także, że wartości B_{CPB} lokalizują się na ogół w pobliżu górnej granicy przedziałów ufności wartości średnich B_{SPB} , które ze względu na dużo gorsze oceny dopasowania danych pomiarowych do modelu liniowego mogą być niedoszacowane, a to ogranicza ich przydatność do prognozowania.

Na rysunku 7.1c (poziom hałas toczenia pojazdu według metod SPB i CPB) przedstawiono wartości ocen poziomu hałasu toczenia pojazdu. Różnice w ustalonych wartościach pomiędzy metodami w ramach poszczególnych technologii wynikają m.in. z różnej lokalizacji przekrojów badawczych. Poziomy hałas toczenia pojazdów L_{CPB} charakteryzują się bardzo wąskimi przedziałami ufności – w przeciwieństwie do L_{SPB} , gdzie takie przedziały są od nich wielokrotnie szersze. Świadczy to o tym, że metoda SPB generuje mniej precyzyjne oceny poziomu hałasu toczenia pojazdów niż CPB. Pomijając pewne skrajne oceny (np. przekrój badawczy C06) i akceptując niejednorodności ocen, które wynikają z różnej lokalizacji przekrojów badawczych, należy stwierdzić, że według metody SPB uzyskano, w ramach tej samej technologii, w przybliżeniu takie same wyniki jak przy metodzie CPB. Są one jednak obciążone znacznie większą niepewnością, co wynika z faktu, że w tej metodzie pojazdy do badań są losowo typowane z rzeczywistego potoku ruchu samochodowego.

7.2. Maksymalny poziom dźwięku jako kryterium klasyfikacji nawierzchni pod względem hałaśliwości

Ze względu na występującą różnorodność ocen maksymalnego poziomu hałasu toczenia pojazdów na badanych metodą SPB (według normy PN-EN ISO 11819:2023) nawierzchniach drogowych w Polsce oraz brak wdrożenia w tym zakresie wymagań jakościowych w pracy [13] została przedstawiona propozycja klasyfikacji ich oceny pod względem hałaśliwości (tabela 7.2). Założono, że w pięciostopniowej skali ocenie podlega poziom dźwięku $L_{Amax}(80)$ wywołany ruchem pojazdów osobowych jadących po nawierzchni ze stałą prędkością 80 km/h. Nawierzchnie na drogach o kategorii średniej prędkości ruchu klasyfikuje się pod względem hałaśliwości co 3 dB w przedziałach od klasy „nawierzchnia cicha” (poniżej 73 dB) do klasy „nawierzchnia nadmiernie hałaśliwa” (powyżej 82 dB).

Zgodnie z założeniami normy PN-EN ISO 11819-1:2023 końcowym wynikiem badań (oceną) jest średnia wartość arytmetyczna maksymalnego poziomu hałasu toczenia pojazdu $L_{SPB:PV80}$ i jej niepewność rozszerzona $UL_{SPB:PV80}$ jako miara 95%

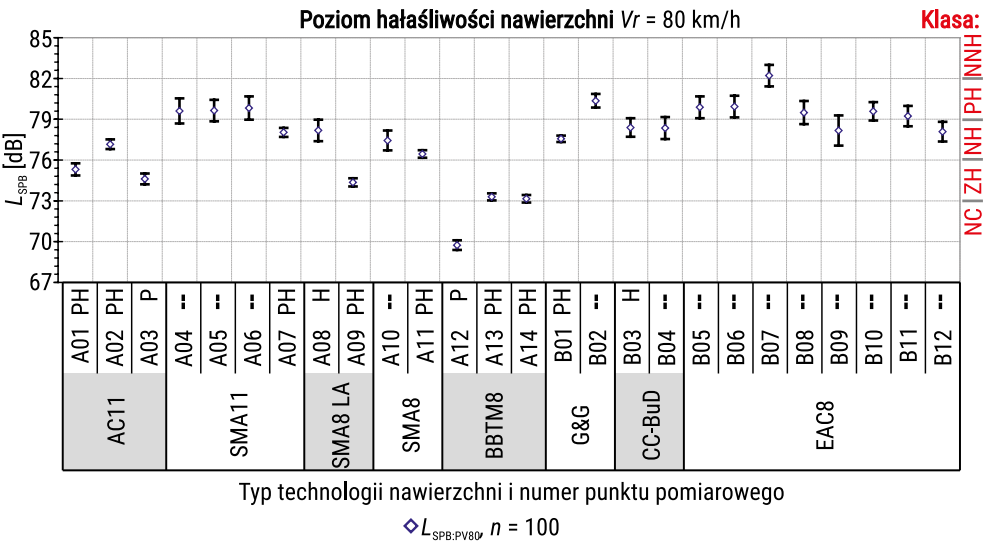
przedziału ufności wartości średniej. Tak więc pełny wynik badania posiada zawsze dwa wymiary, z których jeden jest wartością oczekiwaną lokalizacji na osi liczbowej miejsca skupienia kolejnych takich wyników w przypadku powtórzeń pomiarów, a drugi jest miarą spodziewanego ich rozproszenia wokół tej wartości oczekiwanej. Założony poziom ufności mówi zaś o tym, że tylko pięć wyników pomiarów ze 100 powtórzeń może znaleźć się poza granicami tego przedziału.

TABELA 7.2. Propozycja klasyfikacji nawierzchni drogowych pod względem hałaśliwości

Klasa hałaśliwości nawierzchni	Symbol	Poziom dźwięku $L_{Amax}(80)$ [dB]
Nawierzchnia cicha	NC	$\leq 73,0$
Nawierzchnia o obniżonej hałaśliwości	ZH	73,1–76,0
Nawierzchnia o normalnej hałaśliwości	NH	76,1–79,0
Nawierzchnia o podwyższonej hałaśliwości	PH	79,1–82,0
Nawierzchnia o nadmiernej hałaśliwości	NNH	$>82,0$

ŹRÓDŁO: [13].

Na rysunku 7.2 zestawiono otrzymane oceny poziomu hałasu toczenia pojazdów dla badanych 26 nawierzchni drogowych, przy czym skala na osi rzędnych odpowiada przyjętej propozycji podziału ich na pięć klas pod względem hałaśliwości (tabela 7.2). W opisie osi odciętych oprócz wymienionych typów technologii i numerów przekrojów pomiarowych literą P zaznaczono te z nich, w przypadku których zbiory danych pomiarowych spełniły kryterium kwalifikacyjne z normy ISO. Niespełnienie tego kryterium uwidoczniło się szerszym przedziałem ufności.



RYSUNEK 7.2. Ocena hałaśliwości badanych nawierzchni drogowych

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Na podstawie analizy zbiorów danych z 26 przekrojów pomiarowych stwierdzono, że źródłami niepewności poziomu hałasu toczenia pojazdu są przede wszystkim takie czynniki, jak precyzja zastosowanej metody pomiarowej, liczebność zbioru danych, zakres zarejestrowanych prędkości przejazdu pojazdów oraz horyzont prognozy. Przedział niepewności będzie tym mniejszy, im więcej przejeżdżających pojazdów z różnymi prędkościami względem założonej prędkości odniesienia (referencyjnej) będzie objętych badaniami. W celu zminimalizowania przedziału niepewności w normie PN-EN ISO 11819-1:2023 zapisano odpowiednie wymagania co do precyzji metody pomiarowej, liczebności zbioru danych i długości użytecznego zakresu prędkości. Oznacza to, że nie każdy zbiór danych pomiarowych kwalifikuje się do oceny hałaśliwości nawierzchni. W takich przypadkach dopuszcza się w normie ISO zastosowanie metody alternatywnej.

W wyniku analizy porównawczej 26 ocen poziomu hałasu toczenia pojazdów, jakie wyznaczono dla kategorii prędkości ruchu średniego, ustalono, że niepewności rozszerzone $UL_{SPB:PV80}$ w przypadku spełniających kryterium kwalifikacyjne 10 zbiorów danych zawierały się w przedziale od 0,2 dB do 0,4 dB, natomiast w 16 przypadkach niespełniających tegoż kryterium – od 0,5 dB do 1,1 dB. Z uwagi na możliwość powstania w praktyce różnego rodzaju losowych odstępstw od ustalonych warunków prowadzenia takich badań, których miarą jest 95% przedział ufności, uzasadnione jest, aby w proponowanej klasyfikacji hałaśliwości nawierzchni przyjąć za $L_{Amax}(80)$, jako miarodajną wartość poziomu dźwięku, średnią wartość poziomu hałasu toczenia pojazdów powiększoną o jej niepewność rozszerzoną.

7.3. Statystyczny wskaźnik przejazdu (SPBI)

Statystyczny wskaźnik przejazdu (SPBI) przedstawia w sposób jednolicebowy ogólną ocenę właściwości akustycznych nawierzchni dróg. Łączy on odpowiednio poziomy dźwięku SPB w oparciu o energię, przyjmując określone proporcje kategorii pojazdów P i H. SPBI może być używany do porównywania nawierzchni dróg w celu określenia ich wpływu na poziom hałasu toczenia pojazdów w ruchu mieszanym. Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 11819-1:2023 oblicza się go dla ustalonej struktury ruchu i referencyjnej prędkości dwóch kategorii pojazdów na podstawie końcowych wyników obliczeń L_{SPB} dla określonej kategorii prędkości ruchu według wzoru:

$$SPBI = 10 \cdot \log_{10} \left[W_P \cdot 10^{0,1 \cdot L_{SPB:PVr_P}} + W_H \left(\frac{V_{r_P}}{V_{r_H}} \right) \cdot 10^{0,1 \cdot L_{SPB:HVr_H}} \right], \text{ (dB)}, \quad (7.1)$$

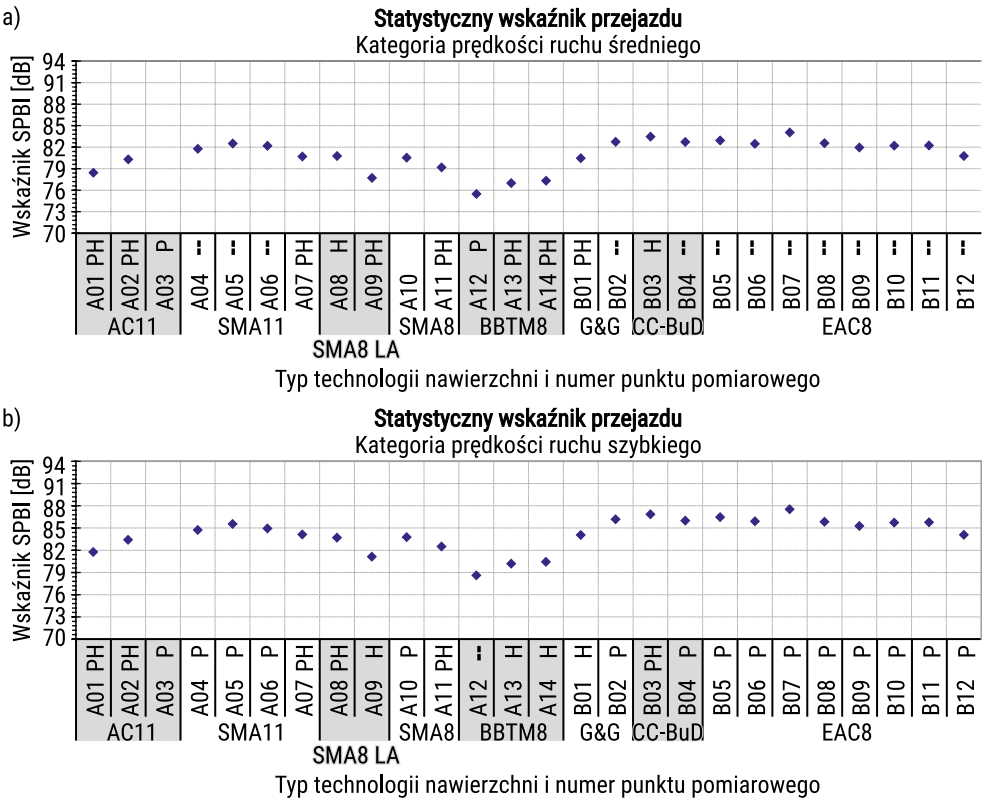
gdzie: SPBI– statystyczny wskaźnik przejazdu dla ustalonej struktury pojazdów osobowych i ciężarowych; $L_{SPB:PVr_P}$, $L_{SPB:HVr_P}$ – poziomy hałasu toczenia pojazdów według metody SPB dla pojazdów kategorii P i H; W_P , W_H – współczynniki ważenia, które

są równoważne ustalonej proporcji udziałów w ruchu drogowym pojazdów kategorii P i H (tabela 7.3); W_P , W_H – prędkości referencyjne (odniesienia) dwóch kategorii pojazdów.

TABELA 7.3. Współczynniki ważenia w zależności od kategorii prędkości i kategorii pojazdu

Kategoria pojazdu		Kategoria prędkości					
		Niska		Średnia		Wysoka	
		V_R [km/h]	W	V_R [km/h]	W	V_R [km/h]	W
Osobowy	P	50	0,90	80	0,80	110	0,70
Ciężarowy	H	50	0,10	80	0,20	80	0,30

ŹRÓDŁO: [67].



RYSUNEK 7.3. Wyniki obliczeń statystycznego wskaźnika przejazdu SPBI dla dwóch kategorii prędkości: a) średniej; b) wysokiej

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Ustalone statystyczne wskaźniki przejazdu SPBI dla dwóch kategorii prędkości (średniej i wysokiej) przy wagach przyjętych według normy PN-EN ISO 11819-1:2023 potwierdzają zbliżone różnice w łącznych wartościach poziomu hałasu toczenia pojazdów pomiędzy nawierzchniami w dwóch kategoriach prędkości. Wskaźniki SPBI, uwzględniające hałas od przejazdu pojazdu osobowego i pojazdu ciężarowego, w mniejszym stopniu różnicują jednak nawierzchnie pod względem ich hałaśliwości w porównaniu z oceną opartą na poziomie hałasu toczenia od przejazdu jedynie pojazdu osobowego. Wynika to m.in. z faktu, że inny jest wpływ nawierzchni na poziom generowania dźwięków w płaszczyźnie kontaktu opony pojazdu ciężarowego i pojazdu osobowego. Powiązanie poziomów hałasu toczenia dwóch kategorii pojazdów z ich procentowym udziałem w potokach ruchu oraz kategorią prędkości stanowi cenną informację na etapie wyboru konstrukcji nawierzchni z punktu widzenia jej wpływu na klimat akustyczny w otoczeniu tras drogowych.

8. Podsumowanie

Hałaśliwość nawierzchni drogowych może być oceniana na podstawie poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych (metody SPB i CPB) lub poziomu hałasu opona/nawierzchnia (metody CPX i OBSI). Wykorzystywane w tym celu są także badania współczynników pochłaniania dźwięku i wodoprzepuszczalności. W niniejszej monografii szczegółowej analizie poddano wyniki pomiarów metodami SPB i CPB.

Metodą SPB wykonano pomiary poziomu hałasu toczenia losowo wytypowanych przejeżdżających w ruchu swobodnym samochodów osobowych i wieloczlónowych pojazdów ciężarowych w 26 przekrojach badawczych, przy czym 14 z nich zlokalizowano na drogach o nawierzchni asfaltowej (AC11, SMA11, SMA8, SMA8 LA i BBTM8), a 12 o nawierzchni betonowej (teksturowanej techniką odkrytego kruszywa – EAC8, tkaniną jutową – CC-BuD, oraz rowkowania i szlifowania – G&G). Analizie poddano łącznie 51 zbiorów danych, w tym 26 zbiorów dla pojazdów osobowych i 25 dla pojazdów ciężarowych. Sumaryczna liczba zebranych danych, jako par wyników pomiaru V i L_{Amax} , wyniosła 5243, w tym dla pojazdów osobowych 3758 (71,7%) i pojazdów ciężarowych 1485 (28,3%). Przekroje badawcze były zlokalizowane na autostradach (3), drogach ekspresowych (13) oraz na ogólnodostępnych drogach zamiejskich (10).

Metodą CPB wykonano pomiary poziomu hałasu toczenia pojazdów w ruchu kontrolowanym w dziewięciu przekrojach badawczych zlokalizowanych na autostradzie A2 (1), drogach ekspresowych S61 i S19 (5) oraz drogach wojewódzkich DW673 i DW604 (3). Badaniami objęto nawierzchnie asfaltowe typu AC11, SMA8 i SMA11 oraz nawierzchnie betonowe (teksturowane metodą odkrytego kruszywa – EAC8, poprzecznego szczotkowania – CCBrd, i metodą *grooving/grinding* – G&G). Zestaw pojazdów testowych złożony był z sześciu samochodów osobowych (cztery pojazdy z silnikiem benzynowym i dwa z napędem elektrycznym). Łączna liczba zebranych danych, jako par wyników pomiaru V i L_{Amax} , wyniosła 549.

Uwzględnienie w zestawie pojazdów testowych dwóch samochodów o napędzie elektrycznym należy uznać za wstępne rozpoznanie problemu ich głośności. Stwierdzono, że przy prędkości 30 km/h emitują one niższe poziomy dźwięku w stosunku do pozostałych pojazdów. Wartości różnic ulegały jednak zmniejszeniu wraz ze wzrostem prędkości i przy prędkości 110 km/h wpływ napędu był już nieistotny. Problem ten wymaga dalszych, bardziej szczegółowych analiz z uwzględnieniem wpływu dodatkowych czynników, m.in. charakterystyki opon samochodowych.

Analizę statystyczną wyników pomiarów według metod SPB i CPB przeprowadzono przy uwzględnieniu zapisów normy PN-EN ISO 11819-1:2023. Były one podstawą do ustalenia regresyjnej zależności między poziomem hałasu toczenia i logarytmem prędkości pojazdów jako liniowym modelem jego prognozy w odniesieniu do technologii budowy nawierzchni drogowych, normalizacji wyników pomiaru do prędkości referencyjnych oraz oceny niepewności prognozowanego poziomu emitowanego dźwięku od jadących po nawierzchni pojazdów.

Prognozowane poziomy hałasu toczenia pojazdów (L), jakie obliczono na podstawie ustalonych dla obu metod pomiarowych modeli regresji w ramach tej samej technologii są na ogół zgodne, przy czym wyznaczone przedziały ufności dla L_{SPB} są dużo szersze niż dla L_{CPB} . Świadczy to o tym, że metoda SPB generuje mniej precyzyjne oceny poziomu hałasu toczenia pojazdów niż metoda CPB.

Ustaloną miarą precyzji metod SPB i CPB, przyjętą do oszacowania szerokości przedziałów niepewności maksymalnego poziomu dźwięku od jadącego pojazdu, jest odchylenie standardowe reszt (Se) jako ocena różnic między wynikami pomiaru a ich prognozą na podstawie liniowego modelu regresji. W przypadku metody SPB otrzymane dla pojazdów osobowych wartości Se zawierają się w przedziale od 1,1 do 1,5 dB (średnio 1,3 dB), natomiast dla wielocznłonowych pojazdów ciężarowych w przedziale od 0,9 do 2,1 dB (średnio 1,4 dB). Tym samym nie przekraczają one określonych w normie wartości dopuszczalnych. W przypadku pojazdów ciężarowych otrzymano zgodne wartości Se w ramach tej samej grupy technologii i różne pomiędzy grupami. Wartości Se określone dla pojazdów ciężarowych są nieco wyższe od odpowiadających im wartości dla pojazdów osobowych. Oceny dopasowania wyników pomiarów do modelu regresji, którego miarą jest współczynnik determinacji (R^2), są dużo lepsze w przypadku pojazdów osobowych (od 0,46 do 0,84) niż ciężarowych (od 0,10 do 0,65). Dla metody CPB otrzymano niższe wartości Se , które zawierają się w przedziale od 0,8 do 1,2 dB (średnio 0,9 dB), oraz bardzo wysokie wartości R^2 – od 0,966 do 0,992. Z porównania tych parametrów wynika, że przejazdy kontrolowane wybranej grupy pojazdów generują bardziej jednorodny zbiór wyników pomiaru L_{Amax} niż przejazdy losowych pojazdów w ruchu swobodnym, co sprzyja lepszemu dopasowaniu ich do modelu regresji.

W monografii wykazano, jak ważnym zadaniem w procedurze normalizacji zarejestrowanego w przekroju badawczym zbioru wyników maksymalnego poziomu hałasu toczenia i reprezentującej je funkcji regresji liniowej wraz z 95% przedziałem ufności jest ustalenie relacji między punktem centralnym (PC) a punktem prognozy (PP) dla wybranej prędkości referencyjnej (V_r).

Ustalono, że niepewność prognozowanego poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych zależy przede wszystkim od precyzji metody pomiarowej, której miarą jest odchylenie standardowe reszt (Se), a także od liczebności zbioru pomiarowego (n) i standaryzowanej odległości (z), którą oblicza się na podstawie odległości między punktem prognozy (PP) a punktem centralnym (PC), oraz zakresu zarejestrowanych prędkości, którego miarą jest odchylenie standardowe zbioru logarytmów prędkości.

Metoda SPB jest oparta na losowym doborze obiektów badań i poza ich liczebnością nie ma innej możliwości oddziaływania na zmniejszenie przedziału niepewności prognozowanego poziomu hałasu toczenia pojazdów. Jej zaletą jest jednak to, że bazuje na mierzonych efektach akustycznych wywoływanych przejazdem pojazdów osobowych i ciężarowych wytypowanych do badań z rzeczywistego potoku ruchu. Tak ustalone wartości mogą bezpośrednio stanowić podstawę oceny i prognozowania klimatu akustycznego w otoczeniu tras drogowych.

Metoda CPB daje możliwość dowolnego doboru zarówno grupy pojazdów testowych oraz zakresu prędkości przejazdu, jak i liczby powtórzeń pomiarów w celu zminimalizowania wpływu czynników losowych na niepewność prognozowanego poziomu hałasu toczenia. Stwarza ona również możliwość badania hałaśliwości nawierzchni przed oddaniem drogi do użytkowania lub na odcinkach testowych przed podjęciem decyzji o wyborze technologii budowy górnych warstw nawierzchni drogowych.

W monografii przeanalizowano ponadto skutek wprowadzenia do normy PN-EN ISO 118191:2023 użytecznego zakresu prędkości jako kryterium kwalifikującego zbiory danych pomiarowych do obliczeń regresji i normalizacji do prędkości referencyjnej, a także efekt zastosowania zależności alternatywnej jako mniej precyzyjnej metody przybliżonej.

Na podstawie analizy wykorzystania otrzymanych wyników badań poziomu dźwięku mierzonego metodą SPB proponuje się, aby jego miarą w pięciostopniowej klasyfikacji nawierzchni drogowych pod względem hałaśliwości była wartość średnia poziomu hałasu toczenia pojazdu powiększona o jej niepewność rozszerzoną.

Literatura

1. Anfosso Ledee, F., Dutilleux, G., Conter, M. (2016). Compatibility of the ROSANNE noise characterization procedure for road surfaces with CNOSSOS-EU model. W: *Proceedings of Inter-Noise*. Institute of Noise Control Engineering, Hamburg, Germany.
2. Anfosso Ledee, F., Goubert, L. (2019). The determination of road surface corrections for CNOSSOS-EU model for the emission of road traffic noise. *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics, Aachen, Germany*. <https://pub.dega-akustik.de/ICA2019/data/articles/001200.pdf>
3. Arendarski, J. (2003). *Niepewność pomiarów*. Oficyna Wydawnicza PW.
4. Ascari, E., Cerchiai, M., Fredianelli, L., Melluso, D., Licitra, G. (2025). Tuning user-defined pavements in CNOSSOS-EU towards reliable estimates of road noise exposure. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104195>
5. Bendtsen, H., Andersen, B., Kalman, B., Cesbron, J. (2013). The first poroelastic test section in PERSUADE. W: *Proceedings of Inter-Noise, Institute of Noise Control Engineering, Innsbruck, Austria*.
6. Birkner, C., Adesiyun, A., Greene, M., Conter, M., Haider, M., Schmidt, B., Sandberg, U., Scharnigg, K. (2016). *ROSANNE. Final Summary Report*.
7. Borch, F., Colucci, G., Falchi, A., Pulella, P., Luzzi, S., Ciampini, A., Donorà, F. G., Benedittis, A. D. (2023). A new procedure to determine correction coefficients for CNOSSOS-EU database for motorways road surfaces. W: *Proceedings of the 10th Convention of the European Acoustics Association, Turin, Italy*. <https://doi.org/10.61782/fa.2023.1194>
8. Campello-Vicente, H., Peral-Orts, R., Campillo-Davo, N., Velasco-Sanchez, E. (2017). The effect of electric vehicles on urban noise maps. *Applied Acoustics*, 116, 59–64. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.09.018>
9. Conter, M., Aichinger, C., Wehr, R. (2016). Deliverable D2.6. Report of the procedure for characterization of noise properties of road surfaces including updated draft standard. W: *ROSANNE – Rolling resistance, skid resistance, add noise emission measurement standards for road surfaces*.

10. De Leon, G., Fidecaro, F., Cerchiai, M., Reggiani, M., Ascari, E., Licitra, G. (2019). Implementation of CNOSSOS-EU method for road noise in Italy. W: *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics ICA 2019, Aachen, Germany*.
11. Ejsmont, J. A., Ronowski, G., Ydrefors, L., Owczarzak, W., Sommer, S., Świeczko-Żurek, B. (2024). Comparison of tire rolling resistance measuring methods for different surfaces. *International Journal of Automotive Technology*, 25, 965–976. <https://doi.org/10.1007/s12239-024-00092-w>
12. Faulkner, J. P., Murphy, E. (2022). Road traffic noise modelling and population exposure estimation using CNOSSOS-EU: insights from Ireland. *Applied Acoustics*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108692>
13. Gardziejczyk, W. (2018). *Hałaśliwość nawierzchni drogowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej. <https://doi.org/10.24427/978-83-65596-59-8>
14. Gardziejczyk, W. (2005). *Wpływ technologii wykonania i tekstury nawierzchni drogowych na hałas pojazdów samochodowych* (Rozprawy Naukowe nr 121). Politechnika Białostocka.
15. Gardziejczyk, W., Gierasimiuk, P. (2016). Influence of texturing method on tyre/road noise of cement concrete pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(12), 1061–1076. <https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1238699>
16. Gardziejczyk, W., Jaskula, P., Ejsmont, J. A., Motylewicz, M., Stienss, M., Mioduszewski, P., Gierasimiuk, P., Zawadzki, M. (2021). Investigation of Acoustic Properties of Poroelastic Asphalt Mixtures in Laboratory and Field Conditions. *Materials*, 14(10), 1–18. <https://doi.org/10.3390/ma14102649>
17. Gardziejczyk, W., Motylewicz, M., Gierasimiuk, P., Ziółkowski, R., Grzyb, D. (2025). Noisiness of road surfaces in Poland according to the Statistical Pass-By method. *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.104996>
18. Gardziejczyk, W., Motylewicz, M. (2025). Mobilne i stacjonarne metod pomiaru i oceny hałaśliwości nawierzchni drogowych. *Materiały Budowlane*, 636, 81–88. <https://doi.org/10.15199/33.2025.08.10>
19. Gardziejczyk, W., Motylewicz, M., Sakowski, M. (2024). Ocena właściwości akustycznych warstwy ścieralnej z asfaltu porowatego nawierzchni drogowych w warunkach laboratoryjnych. *Materiały Budowlane*, 6, 32–35. <https://doi.org/10.15199/33.2024.06.07>
20. Greń, J. (1984). *Statystyka matematyczna. Modele i zadania* (wyd. VIII). PWN.
21. Heutschi, K., Locher, B., Gerber, M. (2018). sonROAD18: Swiss implementation of the CNOSSOS-EU road traffic noise emission model. *Acta Acustica*, 104(4). <https://doi.org/10.3813/AAA.919209>

22. Jaskuła, P., Ejsmont, J. A., Gardziejczyk, W., Mioduszeński, P., Stienss, M., Motylewicz, M., Szydłowski, C., Gierasimiuk, P., Ryś, D., Wasilewska, M. (2023). Bitumen-Based Poroelastic Pavements: Successful Improvements and Remaining Issues. *Materials*, 16(3), 1–35. <https://doi.org/10.3390/ma16030983>
23. Kalman, B., Biligiri, K. P., Sandberg, U. (2011). Project PERSUADE: Optimization of poroelastic road surfaces in the laboratory. W: *Proceedings of Inter-Noise, Institute of Noise Control Engineering, Osaka, Japan*.
24. Kephelopoulou, S., Paviotti, M., Anfossio-Lédée, F. (2012). *Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU)*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2788/31776>
25. Knabben, R. M., Trichês, G., Gerges, S. N. Y., Vergara, E. F. (2016). Evaluation of sound absorption capacity of asphalt mixtures. *Applied Acoustics*, 114, 266–274. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.08.008>
26. Kowalski, K. J., Dare, T., McDaniel, R., Olek, J., Bernhard, R. (2011). Exploration of Laboratory Technique for Tire-Pavement Noise Assessment of Hot-Mix Asphalts. W: *Proceedings of the 2011 TRB 90th Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington D.C.*
27. Kowalski, K. J. (2018). Ocena rozwiązań materiałowo-technologicznych górnych warstw nawierzchni asfaltowych i zalecenia w zakresie ich hałaśliwości. Raport z zadania nr 2 (praca badawcza w ramach projektu RID-I pt. „Ochrona przed hałasem drogowym”). GDDKiA i NCBiR.
28. Kowalski, K. J., Bańkowski, W., Król, J. B., Gajewski, M., Horodecka, R., Świeżewski, P. (2016). Selection of quiet pavement technology for Polish climate conditions on the example of CiDRO project. *Transportation Research Procedia*, 14, 2724–2733. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.453>
29. Larsson, K. (2021). Swedish input data for road traffic noise in CNOSSOS-EU. W: *Proceedings of the Baltic-Nordic Acoustics Meeting (BNAM 2021), Oslo, Norway*.
30. Licitra, G., Bernardini, M., Moreno, R., Bianco, F., Fredianelli, L. (2023). CNOSSOS-EU coefficients for electric vehicle noise emission. *Applied Acoustics*, 211. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109511>
31. Licitra, G., Cerchiai, M., Teti, L., Bianco, F., Chetoni, F., Ascari, E. (2016). Relationship between Pass By results, CPX ones and roadside long-term measures: some considerations. W: *Proceedings of Inter-Noise, Hamburg, Germany*.
32. Li, M., van Keulen, W., Tijs, E., van de Ven, M., Molenaar, A. (2015). Sound absorption measurement of road surface with *in situ* technology. *Applied Acoustics*, 88, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.07.009>
33. Mioduszeński, P. (2015). Przegląd hałaśliwości różnych typów nawierzchni drogowych na podstawie wyników pomiarów metodą CPX. W: *III Ogólnopolskie Forum specjalistyczne „Nawierzchnie drogowe 2015”*.

34. Mioduszewski, P., Ejsmont, J. A. (2007). Tire/road noise measuring principles according to the Close Proximity Method. *Tire Technology International*, 82–85.
35. Mioduszewski, P., Gardziejczyk, W. (2016). Inhomogeneity of low-noise wearing courses evaluated by tire/road noise measurements using the close-proximity method. *Applied Acoustics*, 111, 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.04.006>
36. Mioduszewski, P., Kowalski, K. J. (2017). Pavement ageing influence on tyre/road noise. W: *Proceedings of Inter-Noise, Institute of Noise Control Engineering, Hong Kong, China*.
37. Morgan, P. (ed.), Sandberg, U., i in. (2006). *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.
38. Oddershede, J., Bendtsen, H., Kragh, J., Sohaney, R., Rasmussen, R. (2013). CPX-OBSI Relation in Tyre/Road Noise Measurement Results. W: *Proceedings of Inter-Noise, Institute of Noise Control Engineering, Innsbruck, Austria*.
39. Pallas, M. A., Bérengier, M., Chatagnon, R., Czuka, M., Conter, M., Muirhead, M. (2016). Towards a model for electric vehicle noise emission in the European prediction method CNOSSOS-EU. *Applied Acoustics*, 113, 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.06.012>
40. Peters, B., van Blokand, G. (2018). Correcting the CNOSSOS-EU road noise emission values. W: *Proceedings of the Euronoise, Crete, Greece*. https://www.euronoise2018.eu/docs/papers/211_Euronoise2018.pdf
41. Praticò, F. G. (2014). On the dependence of acoustic performance on pavement characteristics. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 29, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.04.004>
42. Sandberg, U., Goubert, L. (2011). Poroelastic Road Surface: A review of 30 years of R&D work. W: *Proceedings of Inter-Noise, Institute of Noise Control Engineering, Osaka, Japan*.
43. Sandberg, U. (2006). Concept of Virtual Reference Surface for Noise Prediction and Comparison Purposes. W: *Proceedings of Inter-Noise, Institute of Noise Control Engineering, Honolulu, Hawaii – USA*.
44. Sandberg, U., Ejsmont, J. A. (2002). *Tyre/road noise reference book*. Informex.
45. Shilton, S. J., Anfosso-Lédée, F., van Leeuwen, H. (2015). Conversion of existing road source data to use CNOSSOS-EU. W: *Proceedings of the Euronoise 2015, Maastricht, Netherland*.
46. Skov, R. S. H. (2016). Analysis and comparison of methods, CPX and SPB, for measuring noise properties of road surfaces. W: *Proceedings of Inter-Noise, Hamburg, Germany*.

47. Szpinek, S. (2017). *Opracowanie algorytmu weryfikującego wyniki badań poziomu hałasu uzyskanych przy wykorzystaniu różnych metod* (raport dla Politechniki Białostockiej).
48. Szpinek, S. (2025). *Weryfikacja statystyczna wyników pomiarów poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych według metody SPB i CPB wraz z oceną ich niepewności w kontekście klasyfikacji nawierzchni pod względem ich hałaśliwości w ramach projektu INREH* (raport dla Politechniki Białostockiej).
49. Taylor, J. R. (1999). *Wstęp do analizy błędu pomiarowego*. PWN.
50. Tonin, R., Saurer, T. (2017). Comparison of CPX and OBSI noise measurements for different road surfaces. W: *Proceedings of Inter-Noise, Institute of Noise Control Engineering, Hong Kong, China*.
51. Wang, G., Smith, G., Shores, R. (2012). Pavement noise investigation on North Carolina highways: An on-board sound intensity approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(8), 878–886. <https://doi.org/10.1139/l2012-076>
52. Wrótny, M., Bohatkiewicz, J., Bohatkiewicz-Czaicka, J. (2022). Influence of using low-noise pavements on residents' perception of road noise protection. *Transportation Research Part D*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103531>
53. *Wyrażanie niepewności pomiaru*. Przewodnik (wyd. popr.). (2019). GUM.
54. Zofka, A. (2018). *Wytyczne prowadzenia pomiarów hałaśliwości nawierzchni dla metody OBSI – załącznik nr 5 do zadania: Wytyczne prowadzenia badań i oceny hałaśliwości nawierzchni drogowych* (praca badawcza w ramach projektu RID-I pt. „Ochrona przed hałasem drogowym”). GDDKiA i NCBiR.

Normy i akty prawne:

55. AASHTO T 360-16. (2020). *Standard Method of Test for Measurement of Tire/Pavement Noise Using the On-Board Sound Intensity (OBSI) Method*.
56. Directive 2002/49/EC of 25 June 2002. *Relating to the assessment and management of environmental noise – Declaration by the Commission in the Conciliation Committee on the Directive relating to the assessment and management of environmental noise*. <https://data.europa.eu/eli/dir/2002/49/oj>
57. Directive 2015/996/EC of 19 May 2015. *Establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/9/EC of the European Parliament and of the Council*. <https://data.europa.eu/eli/dir/2015/996>
58. Directive 2021/1226/EC of 21 December 2020. *Amending, for the purposes of adapting to scientific and technical progress* (Annex II to Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council as regards common noise assessment methods). <http://data.europa.eu/eli/dir/2021/1226>

59. ILAC-G8:03/2009. (2009 i późn.). *Guidelines on the Reporting of Compliance with Specification* (Wytyczne dotyczące zgłaszania zgodności ze specyfikacją – tłum. Polskie Centrum Akredytacji).
60. ISO 10534-1:1996. *Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 1: Method using standing wave ratio.*
61. ISO 10534-2:1998. *Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer-function method.*
62. ISO 13472-2:2010. *Acoustics – Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ – Part 2: Spot method for reflective surfaces.*
63. ISO/TS 11819-3:2021. *Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 3: Reference tyres.*
64. ISO/TS 13471-2:2022. *Acoustics – Temperature influence on tyre/road noise measurement – Part 2: Correction for temperature when testing with the pass-by methods.*
65. PN-EN 61672-1:2014. *Elektroakustyka – Mierniki poziomu dźwięku – Część 1: Wymagania.*
66. PN-EN ISO 13473-1:2019. *Charakterystyka tekstury nawierzchni przy użyciu profili powierzchniowych – Część 1: Określanie średniej głębokości profilu.*
67. PN-EN ISO 11819-1:2023. *Akustyka – Pomiary wpływu nawierzchni dróg na hałas drogowy – Część 1: Metoda statystyczna pomiaru podczas przejazdu.*
68. PN-EN ISO 11819-2:2017. *Akustyka – Pomiary wpływu nawierzchni dróg na hałas drogowy – Część 2: Metoda pomiaru w polu bliskim.*
69. PN-EN 12697-19:2020. *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań – Część 19: Wodoprzepuszczalność próbek.*
70. PN-EN 12697-40:2020. *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań – Część 40: Wodoprzepuszczalność nawierzchni in situ.*

Załączniki

- Z1-A: Nawierzchnie asfaltowe w badaniach SPB
- Z1-B: Nawierzchnie betonowe w badaniach SPB
- Z2: Nawierzchnie asfaltowe i betonowe w badaniach CPB

Załącznik Z1-A: Nawierzchnie asfaltowe w badaniach SPB



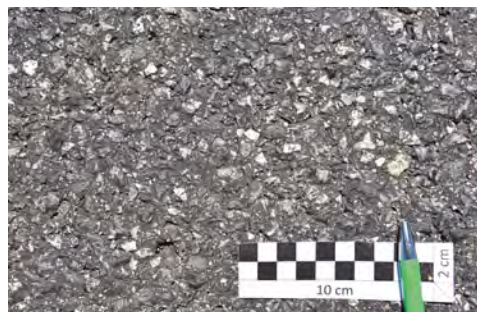
A06: SMA11



A07: SMA11



A04: SMA11



A05: SMA11



A11: SMA8



A10: SMA8



A08: SMA8 LA



A09: SMA8 LA



A12: BBTM8



A13: BBTM8



A14: BBTM8



A03: AC11



A01: AC11



A02: AC11

ŹRÓDŁO: fot. M. Motylewicz.

ZAŁĄCZNIK Z1-B:
Nawierzchnie betonowe w badaniach SPB



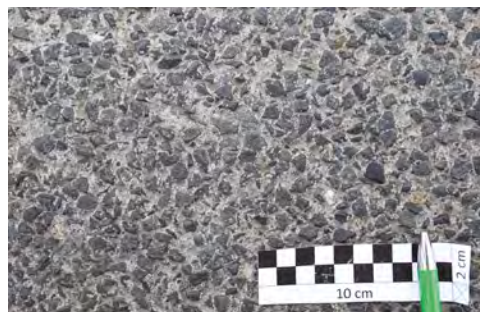
B10: EAC8



B11: EAC8



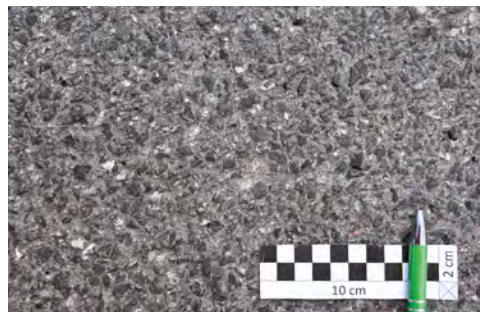
B05: EAC8



B06: EAC8



B08: EAC8



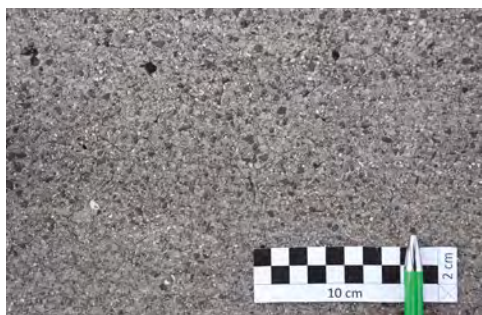
B09: EAC8



B07: EAC8



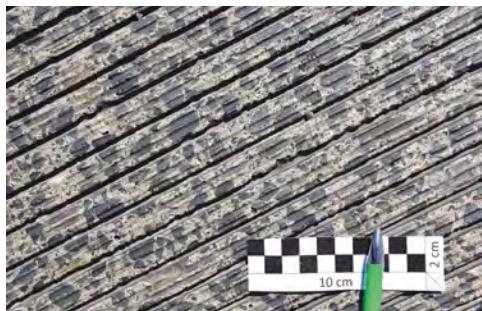
B12: EAC8



B04: CC-BuD



B03: CC-BuD



B02: G&G

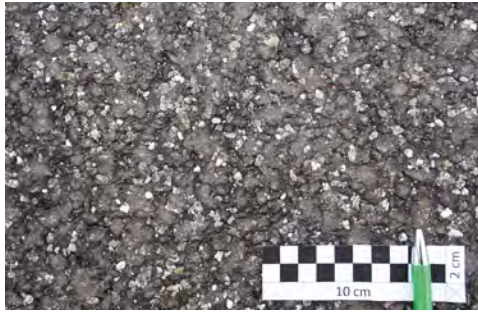


B01: G&G

ŹRÓDŁO: fot. M. Motylewicz.

ZAŁĄCZNIK Z2:

Nawierzchnie asfaltowe i betonowe w badaniach CPB



C04: SMA8



C01: AC11



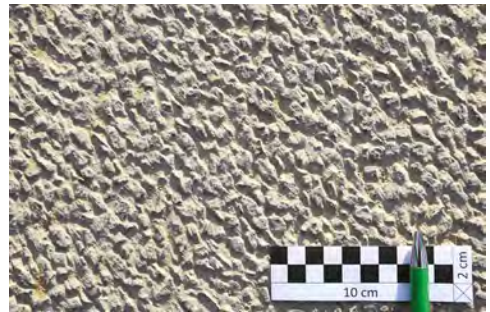
C02: SMA11



C03: SMA11



C08: EAC8



C09: EAC8



C07: CC-BrD



C06: CC-BrD



C05: G&G

ŹRÓDŁO: fot. M. Motylewicz.

Streszczenie

W monografii przedstawiono ogólną charakterystykę metod oceny właściwości akustycznych nawierzchni drogowych wraz z prezentacją przykładowych wyników badań, a także omówiono podstawowe wymagania i zasady wykonywania pomiarów poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych według metody statystycznego przejazdu SPB (ang. *Statistical Pass-By method*), zgodnie z normą PN-EN ISO 11819-1:2023, oraz metody kontrolowanego przejazdu CPB (ang. *Controlled Pass-By method*).

Istotnymi elementami pracy są prezentacja i analiza wyników pomiarów poziomu hałasu toczenia przejeżdżających pojazdów osobowych i wieloczlónowych pojazdów ciężarowych na odcinkach testowych o nawierzchni asfaltowej, wykonanych w pięciu technologiach (AC11, SMA11, SMA8, SMA8 LA, BBTM8), i nawierzchni betonowej teksturowanej techniką odkrytego kruszywa (EAC8), tkaniną jutową (CC-BuD), szczerbienia poprzecznego (CC-BrD) oraz rowkowania i szlifowania (G&G).

Statystyczna analiza wyników maksymalnego poziomu dźwięku według metod SPB i CPB była podstawą ustalenia zależności pomiędzy poziomem hałasu toczenia i prędkością pojazdów w odniesieniu do technologii budowy nawierzchni drogowych oraz oceny niepewności prognozowanych poziomów dźwięku w przypadku jadących pojazdów osobowych i ciężarowych. Potwierdzono dobrą korelację zarówno pomiędzy badaniami współczynnika pochłaniania dźwięku i wodoprzepuszczalności, jak i metodami SPB i CPB, a także pomiędzy metodami pomiaru poziomu hałasu toczenia opon i pojazdów samochodowych a metodami badania pochłaniania dźwięku i wodoprzepuszczalności. Jednocześnie wykazano, że wyniki badania maksymalnego poziomu dźwięku ustalone metodami SPB i CPB są zbliżone w ramach tej samej technologii, jednak wartości poziomu hałasu toczenia pojazdów samochodowych według metody SPB charakteryzują się większą niepewnością jego prognozowania w porównaniu z metodą CPB.

Przeanalizowano również wykorzystanie wyników badań i analiz maksymalnego poziomu emitowanych dźwięków przez jadące pojazdy pod kątem klasyfikacji nawierzchni pod względem hałaśliwości.

Uzyskane wyniki badań i analiz mogą stać się przyczynkiem do opracowania współczynników korygujących wpływ technologii wykonania nawierzchni drogowych w Polsce na poziom hałasu toczenia pojazdów samochodowych w porównaniu z tzw. nawierzchnią wirtualną przyjętą w metodzie prognozowania hałasu w środowisku CNOSSOS-EU.

Summary

This monograph provides an overview of methods for assessing the acoustic properties of road surfaces and presents representative test results. It outlines the key requirements and principles for measuring vehicle tyre/road noise using the Statistical Pass-By (SPB) method in accordance with PN-EN ISO 11819-1:2023, as well as the Controlled Pass-By (CPB) method.

A substantial part of the work is devoted to the presentation and analysis of tyre/road noise measurements of passing passenger cars and multi-axle heavy vehicles on test sections comprising asphalt pavements constructed using five technologies (AC11, SMA11, SMA8, SMA8 LA, BBTM8) and cement concrete pavements textured using exposed aggregate (EAC8), jute fabric (CC-BuD), cross brushing (CC-BrD), and grooving and grinding (G&G).

Statistical analysis of maximum sound pressure level data obtained using the SPB and CPB methods was used to establish relationships between tyre/road noise levels and vehicle speed as a function of pavement construction technology, and to quantify the uncertainty of predicted sound pressure levels for passenger cars and heavy vehicles. Good correlations were confirmed between sound absorption and water permeability test results and the outcomes of the SPB and CPB measurements. Correlations were also observed between tyre/road noise and vehicle noise measurements and the results of tests of sound absorption and water permeability. It was additionally found that, within the same pavement technology, the maximum sound pressure levels determined using both SPB and CPB methods are comparable. However, tyre/road noise levels obtained using the SPB method exhibit higher prediction uncertainty than those when using CPB method.

The applicability of the research results and the analyses of maximum noise levels emitted by passing vehicles is discussed with respect to the classification of road surfaces by noise emission.

The findings are expected to support the development of correction factors describing the influence of pavement technology used in Poland on vehicle tyre/road noise levels, relative to the so-called virtual surface adopted in the European environmental noise prediction method CNOSSOS-EU.

Spis tabel

Tabela 2.1. Porównanie wyników CPXI na nawierzchniach w Polsce i w innych krajach	12
Tabela 4.1. Charakterystyka nawierzchni w przekrojach badawczych	33
Tabela 4.2. Maksymalne różnice pomiędzy poziomami hałasu toczenia w przekrojach badawczych o nawierzchni wykonanej w takiej samej technologii	37
Tabela 5.1. Procedury normalizacji poziomu hałasu toczenia pojazdów (L_{SPB}) według normy PN-EN ISO 11819-1:2023	69
Tabela 6.1. Charakterystyka nawierzchni drogowych na odcinkach testowych	78
Tabela 7.1. Zestawienie symboli oznaczeń odcinków pomiarowych	91
Tabela 7.2. Propozycja klasyfikacji nawierzchni drogowych pod względem hałaśliwości	95
Tabela 7.3. Współczynniki ważenia w zależności od kategorii prędkości i kategorii pojazdu	97

Spis rysunków

Rysunek 2.1.	Przyczepa testowa w metodzie CPX oraz dwie referencyjne opony P1 i H1	12
Rysunek 2.2.	Badania hałaśliwości nawierzchni metodą OBSI	13
Rysunek 2.3.	Zależności funkcyjne pomiędzy wynikami pomiarów poziomu hałasu toczenia według metod CPX i OBSI	13
Rysunek 2.4.	Schemat prowadzenia pomiarów metodami SPB i CPB oraz przykłady stanowisk pomiarowych SPB i CPB	14
Rysunek 2.5.	Zależności funkcyjne pomiędzy wynikami pomiarów poziomu hałasu toczenia według metod CPX i SPB	15
Rysunek 2.6.	Wyniki pomiarów maksymalnego poziomu dźwięku metodą SPB: a) w 2011 roku; b) w 2016 roku	16
Rysunek 2.7.	Poziomy dźwięku w pasmach tercjowych na 10-metrowych segmentach nawierzchni z asfaltu porowatego PAC8 (a, b) i SMA11 (c, d); V = 80 km/h	17
Rysunek 2.8.	Badania współczynnika pochłaniania dźwięku: a) metoda <i>in situ</i> ; b) metoda laboratoryjna.....	18
Rysunek 2.9.	Średnie wartości współczynników pochłaniania dźwięku (wg Spectronics ACUPAVE System) ustalone na próbkach walcowych wyciętych z płyt testowych z siedmiu mieszanek mineralno-asfaltowych	18
Rysunek 2.10.	Średnie wartości współczynników absorpcji na sekcjach testowych w czterech okresach pomiarowych.....	19
Rysunek 2.11.	Badania wodoprzepuszczalności: a) urządzenie laboratoryjne; b) urządzenie terenowe	20
Rysunek 2.12.	Porównanie rozwiązań na krótkich sekcjach testowych z punktu widzenia: a) wodoprzepuszczalności; b) współczynnika pochłaniania dźwięku	21
Rysunek 2.13.	Współczynnik pochłaniania dźwięku w funkcji wodoprzepuszczalności mieszanek mineralno-gumowo-asfaltowych według metody: a) laboratoryjnej; b) terenowej.....	21
Rysunek 2.14.	Zależność pomiędzy indeksem CPXI i współczynnikiem pochłaniania dźwięku	22
Rysunek 3.1.	Możliwe lokalizacje mikrofonu pomiarowego: a) droga dwujezdniowa 2/2; b) droga jednojezdniowa 1/2	26
Rysunek 4.1.	Lokalizacja przekrojów badawczych w pomiarach metodą SPB (nawierzchnie asfaltowe i betonowe)	35
Rysunek 4.2.	Wartości L_{Amax} od przejazdu statystycznego pojazdu osobowego z prędkością 110 km/h – nawierzchnie asfaltowe	36

Rysunek 4.3.	Wartości L_{Amax} od przejazdu statystycznego wieloczołowego pojazdu ciężarowego z prędkością 85 km/h – nawierzchnie asfaltowe.....	36
Rysunek 4.4.	Wartości L_{Amax} od przejazdu statystycznego pojazdu osobowego z prędkością 110 km/h – nawierzchnie betonowe	37
Rysunek 4.5.	Wartości L_{Amax} od przejazdu statystycznego wieloczołowego pojazdu ciężarowego z prędkością 85 km/h – nawierzchnie betonowe.....	37
Rysunek 4.6.	Maksymalne poziomy dźwięku od jadących pojazdów – nawierzchnia AC11	38
Rysunek 4.7.	Maksymalne poziomy dźwięku od jadących pojazdów – nawierzchnia SMA11	39
Rysunek 4.8.	Maksymalne poziomy dźwięku od jadących pojazdów – nawierzchnia SMA8 LA	40
Rysunek 4.9.	Maksymalne poziomy dźwięku od jadących pojazdów – nawierzchnia SMA8	41
Rysunek 4.10.	Maksymalne poziomy dźwięku od jadących pojazdów – nawierzchnia BBTM8.....	42
Rysunek 4.11.	Maksymalne poziomy dźwięku od jadących pojazdów – nawierzchnia G&G	43
Rysunek 4.12.	Maksymalne poziomy dźwięku od jadących pojazdów – nawierzchnia CC-BuD	44
Rysunek 4.13.	Maksymalne poziomy dźwięku od jadących pojazdów – nawierzchnia EAC8	45
Rysunek 5.1.	Przykład prezentacji wyników pomiaru poziomu hałasu toczenia pojazdów osobowych według metody SPB w przykładowym przekroju drogi.....	48
Rysunek 5.2.	Przedziały niepewności standardowej dla oszacowanych poziomów hałasu toczenia w punkcie centralnym (PC) i punkcie prognozy (PP).....	51
Rysunek 5.3.	Zależności ilorazu standardowych niepewności u_z i Se od: a) liczebności zbioru danych empirycznych; b) standaryzowanej odległości między punktem prognozy a punktem centralnym	52
Rysunek 5.4.	Zależności ilorazu standardowych niepewności u_z i u_0 od: a) liczebności zbioru danych pomiarowych; b) standaryzowanej odległości punktu prognozy od punktu centralnego	53
Rysunek 5.5.	Przypadki badań zgodności mierzonej wielkości fizycznej z wartością wymaganą ze specyfikacji (górna granica) przy założonym poziomie ufności 95% dla niepewności rozszerzonej	54
Rysunek 5.6.	Liczebność zbiorów dla dwóch kategorii pojazdów w 26 przekrojach badawczych (nawierzchnia asfaltowa: A01–A14; nawierzchnia betonowa: B01–B12)	55
Rysunek 5.7.	Wartości odchyłeń standardowych reszt (Se) i 95% przedziałów ufności, jakie otrzymano w 26 punktach dla: a) pojazdów osobowych; b) pojazdów ciężarowych	56
Rysunek 5.8.	Porównanie otrzymanych dla pojazdów P i H wartości: a) odchyłeń standardowych reszt (Se); b) współczynników determinacji (R^2)	57

Rysunek 5.9.	Współczynniki determinacji (R^2) dla pojazdów kategorii P i H w zależności od: a) liczebności zbiorów wyników; b) typu technologii nawierzchni.....	58
Rysunek 5.10.	Współczynnik determinacji R^2 w zależności od wartości odchylenia standardowego logarytmów prędkości $DlogV$	59
Rysunek 5.11.	Wartości średnich prędkości pojazdów (EV) i 95% przedziałów ufności dla dwóch kategorii pojazdów	59
Rysunek 5.12.	Wartości średniej prędkości przejazdu pojazdów (EV) na autostradach (A), drogach ekspresowych (S) i ogólnodostępnych drogach zamiejskich (DK i DW).....	60
Rysunek 5.13.	Zestawienia: a) wyników pomiarów parametrów V i L_{Amax} dla dwóch kategorii pojazdów; b) obliczonych dla nich zbiorów wartości średnich EV i EL_{Amax} (punkty centralne)	61
Rysunek 5.14.	Wyniki pojedynczych pomiarów ($logV$ i L_{Amax}) wraz z ich 95% obwiedniami dla: a) pojazdów kategorii P i H; b) pojazdów kategorii P i H po rozdzieleniu na dwa typy nawierzchni	62
Rysunek 5.15.	Przykład graficznego zestawienia dwóch linii trendu przechodzących przez położone wewnątrz elips punkty centralne (PC) dla pojazdów kategorii P i H	63
Rysunek 5.16.	Linie trendu przechodzące przez punkty centralne (PC) otoczone elipsą wyznaczającą obszar niepewności ich współrzędnych.....	64
Rysunek 5.17.	Wartości współczynnika kierunkowego (nachylenia) linii regresji (B) i 95% przedziały ufności (UB) dla pojazdów: a) osobowych; b) ciężarowych.....	65
Rysunek 5.18.	Zależność odchylenia standardowego (DV) od wartości średniej prędkości przejazdu statystycznego pojazdu (EV) dla zbiorów danych z 26 przekrojów pomiarowych	66
Rysunek 5.19.	Empiryczny rozkład współczynnika $dsrV$ jako standaryzowana różnica prędkości według wzoru 5.3.....	67
Rysunek 5.20.	Wyniki sprawdzenia warunku przydatności zbiorów pomiarowych z 26 punktów pomiarowych do obliczeń regresji i normalizacji dla trzech kategorii prędkości i dwóch kategorii pojazdów.....	68
Rysunek 5.21.	Wyniki badań zgodności dwóch procedur normalizacji poziomu hałasu toczenia L_{SPB} dla prędkości referencyjnej $V_r = 80$ km/h.....	71
Rysunek 5.22.	Wyniki obliczeń poziomów hałasu toczenia pojazdów i 95% przedziałów ufności dla pojazdów kategorii P i H według ustalonych w normie PN-EN ISO 11819-1:2023 wymagań dla kategorii prędkości ruchu wolnego.....	72
Rysunek 5.23.	Wyniki obliczeń poziomów hałasu toczenia pojazdów i 95% przedziałów ufności dla pojazdów kategorii P i H według ustalonych w normie PN-EN ISO 11819-1:2023 wymagań dla kategorii prędkości ruchu średniego.....	73
Rysunek 5.24.	Wyniki obliczeń poziomów hałasu toczenia pojazdów i 95% przedziałów ufności dla pojazdów kategorii P i H według ustalonych w normie PN-EN ISO 11819-1:2023 wymagań dla kategorii prędkości ruchu szybkiego.....	74
Rysunek 6.1.	Lokalizacja przekrojów badawczych w pomiarach metodą CPB	78
Rysunek 6.2.	Zestaw pojazdów testowych wykorzystanych w badaniach metodą CPB	79
Rysunek 6.3.	Wartości L_{Amax} na badanych nawierzchniach według metody CPB	80

Rysunek 6.4.	Widma emitowanych dźwięków na nawierzchniach o różnej charakterystyce według metody CPB	81
Rysunek 6.5.	Porównanie maksymalnych poziomów dźwięku przy przejeździe pojazdów testowych z prędkościami 30 km/h, 70 km/h i 110 km/h na trzech badanych nawierzchniach	82
Rysunek 6.6.	Zestawienie liczebności zbiorów danych w dziewięciu przekrojach pomiarowych	83
Rysunek 6.7.	Zestawienie wartości odchyłeń standardowych reszt (Se) w dziewięciu przekrojach	84
Rysunek 6.8.	Przykład wyników pomiarów poziomu hałasu toczenia pojazdów testowych metodą CPB (przekrój C03)	85
Rysunek 6.9.	Wartości średnich prędkości przejazdu kontrolowanego (EV) i 95% przedziały ufności	85
Rysunek 6.10.	Wyniki pomiaru maksymalnego poziomu hałasu toczenia pojazdów dla sześciu typów technologii	87
Rysunek 6.11.	Wartości współczynnika kierunkowego (nachylenia) linii regresji (B) i 95% przedziały ufności (UB)	88
Rysunek 6.12.	Sprawdzenie warunku przydatności zbiorów pomiarowych w dziewięciu przekrojach pomiarowych do obliczeń regresji i normalizacji dla trzech kategorii prędkości	88
Rysunek 6.13.	Wyniki obliczeń poziomu hałasu toczenia pojazdów według metody CPB i 95% przedziałów ufności	89
Rysunek 7.1.	Zestawienie wyników analizy porównawczej metod SPB i CPB na przykładzie parametrów Se i B oraz poziomu hałasu toczenia statystycznego pojazdu osobowego	93
Rysunek 7.2.	Ocena hałaśliwości badanych nawierzchni drogowych	95
Rysunek 7.3.	Wyniki obliczeń statystycznego wskaźnika przejazdu SPBI dla dwóch kategorii prędkości: a) średniej; b) wysokiej	97



 Politechnika
Białostocka