



**Projekt realizowany w ramach Wspólnego Przedsięwzięcia RID,
finansowany ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju
oraz Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad**

**Wynik z osiągniętego etapu/etapów prac nad Projektem będącym
przedmiotem umowy pn:**

Ochrona przed hałasem drogowym

Zadanie 1. Metodyka pomiaru hałasu drogowego wraz z badaniami porównawczymi

Akronim Projektu: OT1-1D/PK-PW-PWR-IBDiM-PL

Numer umowy: DZP/RID-I-76/15/NCBR/2016

Lider i Współwykonawcy: PK, PW, PWR, IBDiM, PL

Kierownik Projektu: prof. dr hab. inż. Marian Tracz

Lider i Współwykonawcy Zad. 1: Instytut Badawczy Dróg i Mostów,
Politechnika Wrocławska, Politechnika
Lubelska

Kierownik Zad. 1: dr hab. inż. Adam Zofka, prof. nzw. IBDiM

Data rozpoczęcia Zad. 1: 01.01.2016

Data zakończenia Zad. 1: 31.10.2017



Spis treści:

1.	Cel i zakres Zadania 1.....	3
2.	Podsumowanie Etapu I (2016).....	3
2.1.	Przegląd literatury	3
2.2.	Wybór i badania na odcinkach wstępnych oraz wybór docelowych odcinków porównawczych do Etapu II	4
2.3.	Testy sprawności CPX	6
2.4.	Zakup tuby impedancji akustycznej oraz projekt stanowiska do badań w warunkach laboratoryjnych.....	8
3.	Etap II (2017-2018)	9
3.1.	Pomiary na docelowych odcinkach porównawczych.....	9
3.1.1.	Metodyka i pomiary CPX.....	11
3.1.2.	Metodyka i pomiary OBSI.....	13
3.1.3.	Metodyka i pomiary SPBI	15
3.1.4.	Pomiary cech powierzchniowych.....	22
3.1.5.	Metodyka i pomiary AIT (tuba impedancji akustycznej) i pomiary skanerem 3D w warunkach laboratoryjnych.....	24
3.2.	Porównanie terenowych metod pomiaru hałaśliwości nawierzchni	26
4.	Podsumowanie oraz wnioski naukowe i praktyczne z Zadania 1.....	30
5.	Załączniki.....	33

Spis rysunków:

Rysunek 1.	Lokalizacja wybranych odcinków porównawczych w Etapie I.....	6
Rysunek 2.	Zestaw pomiarowy do pomiaru hałaśliwości nawierzchni metodą CPX.....	6
Rysunek 3.	Widok wnętrza komory przyczepy Tiresonic Mk.4.....	7
Rysunek 4.	Widok zamontowanych mikrofonów	7
Rysunek 5.	Schemat rozmieszczenia mikrofonów.....	7
Rysunek 6.	Tuba ROSSA.....	9
Rysunek 7.	Projekt stanowiska do badań laboratoryjnych tubą ROSSA.....	9
Rysunek 8.	Lokalizacja wszystkich odcinków porównawczych w Zadaniu 1	11
Rysunek 9.	Schemat zamocowania urządzenia OBSI na kole testowym	14
Rysunek 10.	Miernik SVAN 958	16
Rysunek 11.	Wymagania dotyczące uniezależnienia się od odbijających lub ekranujących barier zabezpieczających i barier dźwiękochłonnych	17
Rysunek 12.	Wymagania uwzględniające minimalne pokrycie odpowiednią akustycznie powierzchnią pomiędzy badanym pasem jezdni i mikrofonem.....	18
Rysunek 13.	Wymagany odstęp sygnału od szumu dla pojedynczego przejazdu pojazdu.....	19
Rysunek 14.	Typowe usytuowanie mikrofonu dla drogi o przekroju 2x2.....	20
Rysunek 15.	Typowe usytuowanie mikrofonu dla drogi o przekroju 1x2.....	20
Rysunek 16.	Zestaw pomiarowy SRT-3	22
Rysunek 17.	Profilograf laserowy SPDE (IBDiM).....	23
Rysunek 18.	Profilograf laserowy wykorzystany w pomiarach (PWr).....	23
Rysunek 19.	Przykłady zeskanowanych powierzchni próbek mm-a za pomocą skanera 3D (1-4), oraz obraz 3D indywidualnych ziaren kruszywa (5-6) (wymiar w mm).....	26
Rysunek 20.	Wyniki CPX dla odcinków porównawczych w Zadaniu 1 (50 km/h)	27
Rysunek 21.	Wyniki CPX dla odcinków porównawczych w Zadaniu 1 (80 km/h)	28
Rysunek 22.	Wyniki OBSI dla odcinków porównawczych w Zadaniu 1 (48 km/h).....	28

Rysunek 23. Wyniki OBSI dla odcinków porównawczych w Zadaniu 1 (72 km/h).....	29
Rysunek 24. Wyniki OBSI dla odcinków porównawczych w Zadaniu 1 (97 km/h).....	29
Rysunek 25. Wyniki SPBI dla odcinków porównawczych w Zadaniu 1.....	30

Spis tablic:

Tablica 1. Odcinki wstępne i wybrane odcinki porównawcze wraz z zakresem badań.....	4
Tablica 2. Wszystkie odcinki porównawcze w Zadaniu 1	10
Tablica 3. Wyniki pomiarów CPX na odcinkach porównawczych w Zadaniu 1	13
Tablica 4. Wyniki pomiarów OBSI na odcinkach porównawczych w Zadaniu 1; wartości średnie	14
Tablica 5. Prędkości odniesienia i współczynniki ważenia (W_x) dla różnych kategorii prędkości na drodze [5].....	21
Tablica 6. Wyniki pomiarów SPBI na odcinkach porównawczych w Zadaniu 1.....	21
Tablica 7. Wyniki pomiarów cech powierzchniowych na wybranych odcinkach porównawczych w Zadaniu 1.....	23

1. CEL I ZAKRES ZADANIA 1

Niniejsze opracowanie stanowi sprawozdanie z prac wykonanych w ramach programu badawczego Rozwój Innowacji Drogowych (RID) nr DZP/RID-I-76/NCBR/2016 pt. „Ochrona przed hałasem drogowym”, Zadanie 1: „Metodyka pomiaru hałasu drogowego wraz z badaniami porównawczymi” na zlecenie Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w Warszawie.

Celem Zadania 1 było 1) porównanie pomiarów hałasu drogowego przy wykorzystaniu różnych metod pomiarowych, 2) opracowanie metodyki pomiaru hałasu drogowego dla wybranych metod pomiarowych, oraz 3) propozycja metody do oceny hałaśliwości warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych w warunkach laboratoryjnych. Wszystkie cele zostały osiągnięte i są przedstawione albo w niniejszym opracowaniu albo w odpowiednich załącznikach.

Zgodnie z planem zawartym we Wniosku, Zadanie 1 zostało podzielone na cztery etapy:

1. Usystematyzowanie i pogłębienie wiedzy nt. metod pomiarów hałaśliwości nawierzchni drogowych (przegląd literatury).
2. Wybór odcinków porównawczych.
3. Pomiary hałaśliwości i wybranych cech powierzchniowych na odcinkach porównawczych.
4. Pomiary tubą impedancji akustycznej.

Wszystkie etapy wykonano zgodnie z planem i kolejne części niniejszego opracowania przedstawiają szczegółowe wyniki z poszczególnych etapów.

Pomiary metodą CPX, OBSI, ROSSA i część badań cech powierzchniowych zostały wykonane przez IBDiM. Politechnika Wrocławska wykonała pozostałą część badań cech powierzchniowych. Pomiary SPB zostały wykonane przez Politechnikę Lubelską.

2. PODSUMOWANIE ETAPU I (2016)

2.1. Przegląd literatury

Przegląd literatury obejmował ponad 300 dokumentów i był skupiony na metodyce pomiarów hałaśliwości CPX, OBSI, SPB/CPB oraz tuby impedancji akustycznej. W przeglądzie zawarte zostały artykuły z czasopism i konferencji naukowych, raporty z prac badawczych oraz kilka pozycji książkowych. W celu kompilacji tak znacznej liczby dokumentów, przeszukano dostępne bazy publikacji o zasięgu światowym, takie jak *sciencedirect* czy *tandfonline*. Podstawowym językiem pozycji uwzględnionych w przeglądzie literatury był język angielski oraz język polski. Na podstawie przeglądu można zidentyfikować szereg aspektów metodyki badań hałaśliwości, które mają znaczący wpływ na wysokość i charakterystykę mierzonego dźwięku. Znaczenie tych aspektów jest różne w zależności od konkretnej metodyki badań a do głównych czynników można zaliczyć następujące aspekty:

- parametry urządzenia, np. prędkość akwizycji danych, zapis danych, rodzaj i parametry czujników, kalibracja czujników,
- parametry opon, np. wiek, bieżnik, ciśnienie, twardość opony, rozmiar opony, temperatura,
- parametry fizyczne pojazdu/przyczepy, np. typ pojazdu, przyczepa otwarta/zamknięta (CPX), ciężar na osi,
- parametry otoczenia, np. drzewa, rowy, bariery, ekrany, budynki, temperatura, wiatr, ciśnienie,
- parametry drogi, np. długość odcinka, nachylenie, łuki,
- parametry nawierzchni, np. porowatość, tekstura, sztywność, temperatura,
- prędkość przejazdu, tolerancja prędkości.

Przegląd literatury został zawarty w samodzielnym opracowaniu (Załącznik 1.2).

2.2. Wybór i badania na odcinkach wstępnych oraz wybór docelowych odcinków porównawczych do Etapu II

W ramach Zadania 1 wytypowano odcinki wstępne do badań porównawczych różnymi metodami służącymi do oceny hałaśliwości nawierzchni drogowych. Badania te były wykonywane urządzeniami, będącymi w posiadaniu członków zespołu lub zostały zakupione ze środków projektu. Przy typowaniu odcinków drogowych kierowano się następującymi kryteriami:

- możliwość wykonania pomiarów przynajmniej dwoma metodami,
- uzyskanie szerokiego spektrum poziomu hałasu drogowego,
- uwzględnienie aspektów technologicznych nawierzchni.

Założono zgodnie ze wnioskiem, że badania porównawcze zostaną przeprowadzone na przynajmniej 20 odcinkach drogowych. W pierwszej kolejności wykonano serię pomiarów rozpoznawczych na sieci dróg krajowych województwa mazowieckiego, przy użyciu profilografu laserowego SPDE: równość podłużna i poprzeczna, makrotekstura (MPD), zdjęcia pasa drogowego. Badania prowadzono na 40 odcinkach o łącznej długości ok. 250 km. Na podstawie uzyskanych zdjęć z urządzenia SPDE, kierując się kryteriami przedstawionymi powyżej, wytypowano następnie 26 odcinków wstępnych do dalszych pomiarów. Przyjęto długość każdego odcinka 2 km. Lista odcinków i zakres badań znajduje się w Tablica 1.

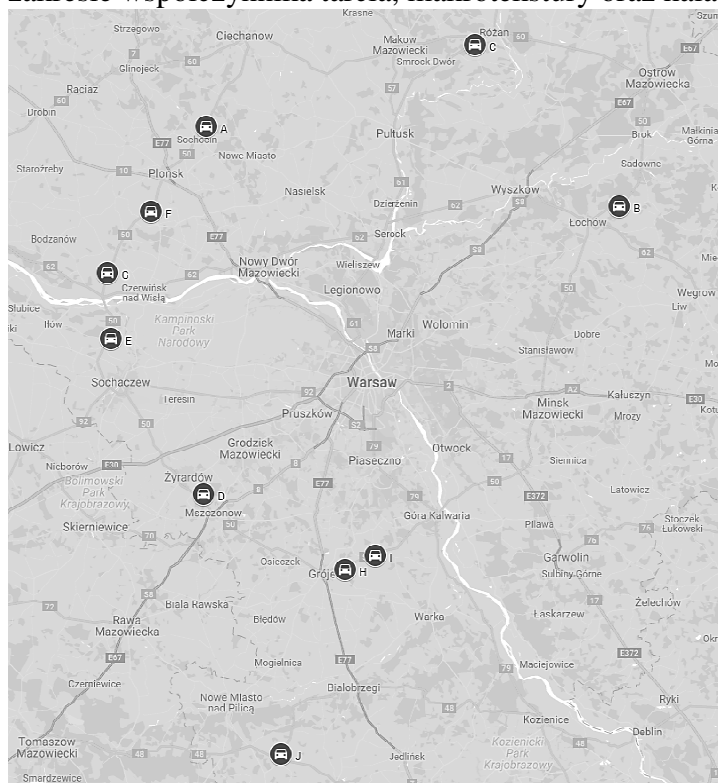
Tablica 1. Odcinki wstępne i wybrane odcinki porównawcze wraz z zakresem badań

lp.	**	Nr drogi	Typ.	km początk.	Współ. tarcia	MPD	IRI	OBSI
1		DK-9	BA	26,200	+	+	+	+
2		DK-9	PU	32,000	+	+	+	+
3		DK-48	BA	50,000	+	+	+	+
4	A	DK-50	BA	22,000	+	+	+	+
5		DK-50	BA	31,000	+	+	+	+
6	B	DK-50	SMA	262,400	+	+	+	+
7		DK-61	BA	55,000	+	+	+	+

8		DK-61	BA	82,000	+	+	+	+
9		DK-61	SS	85,300	+	+	+	+
10	C	DK-61	SS	87,300	+	+	+	+
11		DK-61	BA	96,000	+	+	+	+
12		DK-61	BA	107,300	+	+	+	+
13		DK-62	SMA	157,400	+	+	+	+
14		DK-62	SMA	202,500	+	+	+	+
15		DK-79	BA	116,800	+	+	+	+
16	D	Korytów	PU	0,000	+	+	+	-
17	E	DK-50	BC	72,800	+	+	+	+
18	F	DK-50	SMA	41,500	+	+	+	+
19		DK-50	SMA	51,300	+	+	+	+
20	G	DK-50	SMA	58,000	+	+	+	+
21	H	DK-50C	SMA	2,000	+	+	+	+
22	I	DK-50D	SMA	2,500	+	+	+	+
23		DK-79	SMA	58,200	+	+	+	+
24		DK-79	SS	101,000	+	+	+	+
25		DK-12	SMA	520,200	+	+	+	+
26	J	DK-48	SS	55,000	+	-	-	-

** ID wybranych odcinków porównawczych

Wyniki z pomiarów przedstawiono w raporcie z Zadania 4. Na podstawie tych wyników badań wybrano ostatecznie 10 odcinków o technologii wykonania „typowej” dla nawierzchni dróg krajowych (beton asfaltowy, mastyks grysowy, beton cementowy, powierzchniowe utwardzenie, mieszanka mineralno-emulsyjna). Te odcinki reprezentują szerokie spektrum w zakresie współczynnika tarcia, makrotekstury oraz hałaśliwości nawierzchni.



Rysunek 1. Lokalizacja wybranych odcinków porównawczych w Etapie I

Kolejne odcinki porównawcze zostały wybrane na początku Etapu II (rok 2017) i zawierały inne technologie wykonania warstwy ścieralnej nawierzchni drogowych, np. BBTM, PA, nawierzchnia z kostki kamiennej.

2.3. Testy sprawności CPX

Badania metodą CPX (Close ProXimity) wykonywano przy zastosowaniu przyczepy Tiresonic Mk.4 opracowanej i wykonanej w Politechnice Gdańskiej (Wydział Mechaniczny, Zakład Pojazdów) zgodnie z wymaganiami normy ISO/CD 11819-2. Urządzenie zostało zakupione przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów w ramach projektu SPID (System for Pavement Infrastructure Diagnosis) i jest obecnie na wyposażeniu Zakładu Diagnostyki Nawierzchni. Zestaw pomiarowy składa się z samochodu ciągnącego i przyczepy pomiarowej (Rysunek 2). Tiresonic Mk.4 porusza się na dwóch przednich kołach podporowych oraz kole pomiarowym, które jest zamontowane wewnątrz komory bezdechowej. Przyczepa jest dodatkowo wyposażona w dwa boczne awaryjne kółka podporowe, służące do zabezpieczenia komory i przyczepy w przypadku uszkodzenia koła pomiarowego lub nadmiernego przechylenia przyczepy podczas gwałtownego manewru.



Rysunek 2. Zestaw pomiarowy do pomiaru hałaśliwości nawierzchni metodą CPX

Przyczepa pomiarowa jest wyposażona w osłony akustyczne, które pozwalają minimalizować udział innych źródeł hałasu niż opona poruszająca się po nawierzchni drogi, bez odbić dźwięku od innych powierzchni niż nawierzchnia drogi. Widok osłony akustycznej, zastosowanej w przyczepie Tiresonic Mk.4 przedstawia Rysunek 3.

Na ramie przyczepy pomiarowej są zainstalowane czujniki temperatury powietrza i nawierzchni, które pozwalają na rejestrację temperatury w sposób ciągły. Dane te są zapisywane w plikach pomiarowych razem z wynikami pomiarów akustycznych. Ponadto system jest wyposażony w GPS i czujnik prędkości, zamontowany na kole podporowym. Dane z obu nadajników również są zapisywane w plikach pomiarowych.

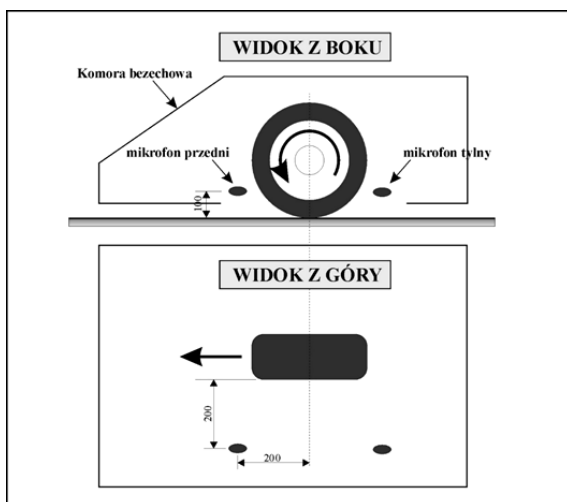


Rysunek 3. Widok wnętrza komory przyczepy Tiresonic Mk.4

W pobliżu koła pomiarowego montuje się dwa mikrofony, przedni i tylny. Widok zamontowanych mikrofonów pokazano na Rysunek 4 natomiast schemat ich rozmieszczenia przedstawiono na Rysunek 5.



Rysunek 4. Widok zamontowanych mikrofonów



Rysunek 5. Schemat rozmieszczenia mikrofonów

W badaniach stosowano dwie opony referencyjne P1 i H1 określone w normie ISO/TS 11819-3 — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise — Part 3: Reference tyres. Opona P1 jest przedstawicielem opon stosowanych do samochodów osobowych. Jest oponą radialną dla stosunkowo dużych samochodów osobowych lub dostawczych, która została szczegółowo opisana w normie ASTM F2493: 2014 i jest określana jako standardowa referencyjna opona testowa (SRTT). Opona H1 jest oponą charakterystyczną dla pojazdów ciężkich. Jest to opona radialna wzmocniona, do lekkich pojazdów ciężarowych i samochodów dostawczych, wyprodukowana przez Cooper Tire & Rubber Co. w Wielkiej Brytanii pod nazwą "Supervan AV4".

Do badań zaprogramowanych w projekcie RID-I/76 zakupiono komplet nowych opon P1 i H1. Opony przed rozpoczęciem wykonywania pomiarów zostały „dotarte” przez swobodny przejazd na tych oponach przez ponad 400 km drogi. Dostosowano również wielkość ciśnienia w kołach pomiarowych oraz podporowych, zgodnie z wymaganiami normy oraz producenta.

W badaniach przyczepą Tiresonic Mk.4 stosuje się miernik poziomu dźwięku firmy B&K PULSE, spełniający wymagania normy EC 61672-1, Electroacoustics — Sound level meters — Part 1: Specifications , dla typu 1. Kalibrację przeprowadza się korzystając z wzorcowego źródła dźwięku (kalibratora) spełniającego wymagania normy IEC 60942, Electroacoustics — Sound calibrators dla klasy 1.

Przed rozpoczęciem właściwych badań przeprowadzono serię próbnych pomiarów testowych, które potwierdziły sprawność zestawu pomiarowego i poprawność prowadzonych zapisów w plikach pomiarowych.

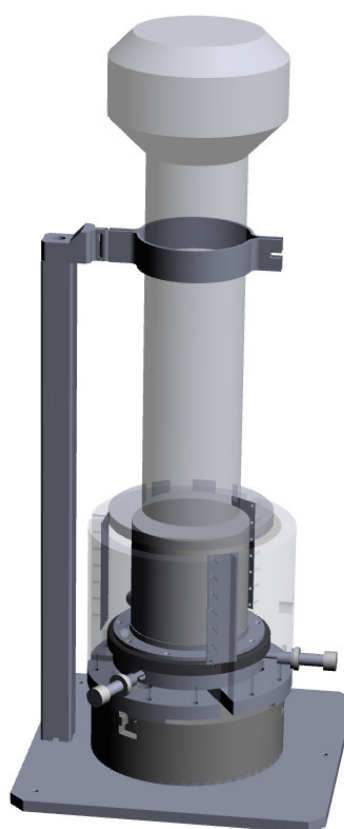
2.4. Zakup tuby impedancji akustycznej oraz projekt stanowiska do badań w warunkach laboratoryjnych

W tej części projektu została zakupiona tuba impedancji akustycznej (ang. acoustic impedance tube, AIT) pod nazwą handlową ROSSA (ang. Road Surface Sound Absorption). Tuba jest przedstawiona na Rysunek 6. Zweryfikowano funkcjonalność i poprawność działania urządzenia ROSSA oraz przeprowadzono badania kalibrujące. W celu pomiarów tubą ROSSA w warunkach laboratoryjnych, zaprojektowano i zlecono wykonanie odpowiedniego stanowiska pomiarowego (

Rysunek 7).



Rysunek 6. Tuba ROSSA



Rysunek 7. Projekt stanowiska do badań laboratoryjnych tubą ROSSA

Tuba ROSSA służy do pomiaru współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchni drogowych w warunkach laboratoryjnych. Metodyka pomiaru opiera się na wymaganiach opisanych w dwóch powiązanych ze sobą normach: (ISO 13472-2 Acoustics. Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ. Part 2: Spot method for reflective surfaces, 2010), (ISO 10534-2 Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: Transfer-function method, 1998).

3. ETAP II (2017-2018)

3.1. Pomiary na docelowych odcinkach porównawczych

W tej części Zadania 1 ustalono ostateczną listę docelowych odcinków porównawczych. Ponadto przeprowadzono pomiary według metody CPX, OBSI, SPBI oraz ROSSA (czyli AIT, tuba impedancji akustycznej) oraz wybranych cech powierzchniowych. Przeprowadzono podstawowe zestawienie i porównanie wyników z różnych metod terenowej oceny hałaśliwości. Rozszerzona analiza została wykonana i jest przedstawiona w opisie Zadania 4.

Rysunek 8 oraz Tablica 2 przedstawiają szczegóły odcinków rozpatrywanych w Zadaniu 1. Należy wspomnieć, że ze względu na warunki lokalne, natężenie ruchu, warunki pogodowe jak i względy ekonomiczno-praktyczne nie można było zbadać wszystkich odcinków przy

wykorzystaniu wszystkich rozpatrywanych metod. Nie było to również planowane w harmonogramie prac we Wniosku.

Tablica 2. Wszystkie odcinki porównawcze w Zadaniu 1

ID	Miasto	Droga	Typ	OBSI	CPX	SPBI	ROSSA
A	Sochocin	DK 50	BA	+	+		
B	Majdan	DK 50	SMA	+	+		
C	Chrzanowo	DK 61	SS	+	+		
D	Korytów	ul. Główna	PU	+	+	+	
E	Młodzieszyn	DK 50	PCC	+	+	+	
F	Troski	DK 50	SMA	+	+	+	
G	Grodkowo	DK 50	SMA	+	+	+	
H	Grójec	DK 50C	SMA	+	+		
I	Drwalew	DK 50D	SMA	+	+		
J	Potworów	DK 48	SS	+	+	+	
001	Zambrów	S8	SMA, BA (new)	+			
003	Ostrów Mazowiecka	S8	PCC (new)	+			
+01	Malbork	DK 22	kostka kam.	+			
+02	Wolsztyn	ul. Drzymały	Viaphone	+			
+03	Poznań	ul. Termalna	Viaphone	+			
+04	Kościan	DK 5	Viaphone	+	+		
+05	Okuniew	DW 637	BBTM 8A + CR	+	+		
+08	Gruszczyn	DK 79	PU (2017)	+			
+09	Warszawa	ul. Przyczółkowa	SMA CR	+			
+10	Kock	DK 19	SMA8	+	+	+	
+11	Markuszów	DK12	SMA 8			+	
+12	Mszczonów	DK 50	PA (2010)	+	+	+	
+13	Łącko	DW969	BBTM			+	
+14	Wieliczka	DW964	BBTM			+	
+15	Liszki	DW780	BBTM			+	
+16	Młynne	DW965	BBTM			+	
+17	Rdzawka	DK47	b.d.			+	
+18	Szaflary	DK47	b.d.			+	
CiDRO	Bolimów	A2	różne				+



Rysunek 8. Lokalizacja wszystkich odcinków porównawczych w Zadaniu 1

Należy podkreślić, że dla metody OBSI przeprowadzono kontrolowany eksperyment na dwóch odcinkach badawczych (001 i 003), który jest szczegółowo opisany w Załączniku 1.3 pt. „Pomiary i analiza do opracowania metodyki badania hałaśliwości urządzeniem OBSI”. Z kolei odcinek 002 posłużył do ostatecznego zweryfikowania opracowanych wytycznych pomiarów co jest przedstawione w Zadaniu 4.

3.1.1. Metodyka i pomiary CPX

Badania CPX wykonano przyczepą Tiresonic Mk.4. Zalecane prędkości pomiarowe wg normy PN-EN ISO 11819-2:2017-06 - Akustyka - Pomiary wpływu nawierzchni dróg na hałas drogowy - Część 2: Metoda pomiaru w polu bliskim, wynoszą 50 km/h, 80 km/h i 110 km/h. Z powodu dużego ruchu na ocenianych drogach oraz konieczności zachowania przepisów o ruchu drogowym oraz odpowiednich warunków bezpieczeństwa, badania na większości odcinków wykonywano z prędkościami 50 km/h i 80 km/h. Na odcinku D, zlokalizowanym w Korytowie pomiary prowadzono tylko z prędkością 50 km/h ze względu na krętość drogi i jej lokalizację w gęstej zabudowie. Największą liczbę badań przeprowadzono na lotnisku w Ułężu. Badania wykonywano z prędkościami: 30 km/h, 50 km/h, 60 km/h, 80 km/h i 100 km/h.

Na obu stosowanych oponach (P1 i H1) wykonywano w każdej prędkości pomiarowej minimum dwa przejazdy przez odcinek badawczy. Oponę referencyjną prowadzono w prawym torze kół pojazdów.

Długość odcinka pomiarowego wynosiła 1000 m. Wszystkie wyniki: poziomy dźwięku, prędkość, temperaturę powietrza i nawierzchni rejestrowano dla segmentów 10-cio metrowych. Po wykonaniu pomiaru dane były zapisywane w plikach „CPXM template-segments”.

Dla każdego zarejestrowanego pasma tercjowego uśredniano poziomy dla przednich i tylnych mikrofonów. Nie stosowano korekty uwzględniającej odbicia dźwięku $C_{d, f}$ ponieważ urządzenie Tiresonic Mk.4 jej nie wymaga.

Następnie obliczono całkowite poziomy dźwięku bazując na poziomach tercjowych dla pasm od 315 Hz do 5 000 Hz oraz zastosowano korektę poziomu dźwięku ze względu na zarejestrowaną prędkość gdy występowały odchylenia od prędkości referencyjnej B, która wynosiła:

- B = 30 dla nawierzchni o strukturze zamkniętej (np. z betonu asfaltowego),
- B = 35 dla (nieporowatej) nawierzchni z betonu cementowego.

Następnie w obliczeniach zastosowano współczynniki temperaturowe γ_t dla odchyżeń od temperatury odniesienia. Współczynniki dla opony P1 i opony H1 określono w normie ISO/TS 13471-1 z 2017 roku. Korektę temperaturową wyznaczono ze wzoru:

$$C_{T, t} = -\gamma_t (T - T_{ref})$$

gdzie:

- $C_{T, t}$ korekta temperaturowa, dBa,
- γ_t współczynnik korekty temperaturowej, dB/°C,
- T temperatura powietrza podczas pomiaru, °C,
- T_{ref} temperatura referencyjna, wynosząca 20°C.

Współczynnik temperaturowy γ_t przyjęto w zależności od rodzaju nawierzchni, na której wykonywano badania:

- $\gamma_{P1} = \gamma_{H1} = -0,14 + 0,0006v$ dla nawierzchni zamkniętych, np. beton asfaltowy, SMA,
- $\gamma_{P1} = \gamma_{H1} = -0,10 + 0,0004v$ dla nawierzchni z betonu cementowego,

Zastosowano również korektę ze względu na twardość gumy opon referencyjnych na podstawie współczynnika twardości β_t . Każdy zmierzony poziom CPX (L_{CPX}) zgodnie z normą ISO 11819-2 należy skorygować za pomocą współczynnika $C_{HA, t}$ (w dB), stosując wzór:

$$C_{HA, t} = \beta_t (H_A - H_{ref}) \tag{1}$$

gdzie:

- β_t - jest współczynnikiem twardości gumy dla opony referencyjnej, w dB/Shore A; w przypadku opon P1 i H1 wynosi on $\beta_{P1} = \beta_{H1} = 0,20$ dB/Shore A,
- H_A - oznacza zmierzoną twardość gumy, w Shore A,
- H_{ref} - jest referencyjną twardością gumy = 66 Shore A,
- $C_{HA, t}$ - to korekta poziomu CPX dla twardości gumy (H_A) dla opony t, w dB.

Twardości gumy zarejestrowane w trakcie serii badań na ocenianych odcinkach testowych wynosiły:

- opona H1: $H_A = 68,9$ Shore A,
- opona P1: $H_A = 66,2$ Shore A,

Odrzucono segmenty ocenianych odcinków dróg, na których poziom hałasu był w oczywisty sposób zakłócony przez podmuchy wiatru lub hałas z innych źródeł, takich jak przejeżdżające pojazdy. Lokalizację takich segmentów ustalano na podstawie notatek

prorowadzonych podczas pomiarów oraz porównania wyników badań z kolejnych przejazdów w tej samej prędkości referencyjnej.

Obliczano średnią arytmetyczną dla pozytywnie zweryfikowanych segmentów drogi a następnie wyznaczono poziomy $L_{CPX:P,vref}$ oraz $L_{CPX:H,vref}$ dla prędkości referencyjnych jako średnią arytmetyczną poziomów uzyskanych we wszystkich przejazdach w tym samym torze pomiarowym, na tym samym odcinku.

Aby uzyskać łączny (ogólny) poziom wpływu nawierzchni drogi na hałas drogowy obliczono indeks CPX ($L_{CPX:i}$) dla prędkości v_{ref} według wzoru:

$$L_{CPX:i,vref} = 0,50L_{CPX:P,vref} + 0,50L_{CPX:H,vref}$$

Uśrednione wyniki pomiarów na ocenianych odcinkach zestawiono w Tablica 3.

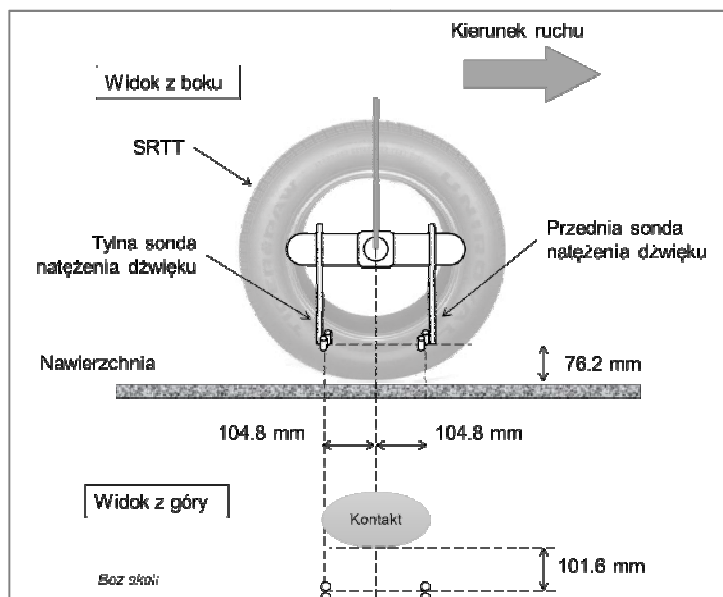
Tablica 3. Wyniki pomiarów CPX na odcinkach porównawczych w Zadaniu 1

Lp.	ID odcinka	Wyniki pomiarów CPX					
		$L_{CPX:H1,50}$	$L_{CPX:P1,50}$	$L_{CPX:H1,80}$	$L_{CPX:P1,80}$	$L_{CPX:i,50}$	$L_{CPX:i,80}$
1	+04	91,5	91,6	98,4	98,7	91,6	98,6
2	+05	89,6	89,1	97,1	95,7	89,3	96,4
3	+10	91,6	91,4	98,5	98,3	91,5	98,4
4	+12	92,5	92,7	99,2	99,1	92,6	99,2
5	002	90,5	90,7	97,8	97,9	90,6	97,8
6	A	91,8	90,5	98,3	97,7	91,1	98,0
7	B	90,8	89,9	98,3	96,6	90,3	97,5
8	C	90,5	90,3	97,6	97,2	90,4	97,4
9	D	90,3	90,6	-	-	-	-
10	E	93,0	91,3	100,1	98,8	92,2	99,4
11	F	93,0	92,7	99,4	99,6	92,8	99,5
12	G	92,3	91,9	98,9	98,9	92,1	98,9
13	H	91,2	90,8	97,8	97,4	91,0	97,6
14	I	91,7	91,7	98,0	98,1	91,7	98,1
15	J	90,1	90,6	98,4	98,2	90,3	98,3
16	PCC03	91,2	91,1	97,9	97,4	91,2	97,6
17	PCC03	90,9	90,5	97,8	97,1	90,7	97,5

3.1.2. Metodyka i pomiary OBSI

Urządzenie OBSI wykonuje pomiary natężenia dźwięku (z ang. sound intensity) przy użyciu pary fazowo dopasowanych mikrofonów natężeniowych ½” G.R.A.S. 40AI (zakres 20 Hz do 10 kHz). Są to mikrofony pola swobodnego, zoptymalizowane do wykorzystania w konfiguracji face-to-face w sondzie natężeniowej, ponadto posiadają one wysoką czułość co umożliwia pomiary niskich poziomów ciśnienia akustycznego. Są one umieszczone po obu stronach i w niewielkiej odległości od styku koła z nawierzchnią (strona najazdowa i zjazdowa). Jako koło pomiarowe, wybiera się zazwyczaj tylne koło nienapędowe wyposażone w oponę pomiarową SRTT, a jako pojazd testowy można wykorzystać samochód osobowy lub inny. Czujniki pomiarowe są zabezpieczone kulistymi osłonami przeciwwietrznymi co

wraz z odpowiednią analizą rejestrowanych sygnałów pozwala na wyeliminowanie niepożądanych źródeł sygnału. Na początku każdego dnia pomiarowego wykonuje się kalibrację całego systemu a pozyskane wyniki z pomiarów analizuje się za pomocą odpowiednich algorytmów. System zainstalowany na samochodzie testowym prezentuje Rysunek 9.



Rysunek 9. Schemat zamocowania urządzenia OBSI na kole testowym

Wstępną metodykę pomiarów metodą OBSI opracowano według wytycznych opisanych w normie AASHTO i ISO [1][2]. W celu sprawdzenia wstępnej metodyki przyjętej w tym projekcie, przeprowadzono kontrolowane pomiary (eksperyment) na dwóch odcinkach 001 i 003. Cel i zakres eksperymentu jak również wstępna metodyka pomiarów OBSI są szczegółowo omówione w Załączniku 1.3. Średnie pomiary na innych odcinkach zostały przedstawione w Tablica 4.

Tablica 4. Wyniki pomiarów OBSI na odcinkach porównawczych w Zadaniu 1; wartości średnie

ID odcinka	IL przy 48 km/h	IL przy 72 km/h	IL przy 97 km/h
+01	100.4	107.0	-
+02	93.3	99.1	-
+03	93.9	99.7	-
+04	94.2	99.7	103.2
+05	91.3	97.0	100.8
+08	92.4	99.3	104.0
+09	92.1	98.2	-
+10	-	99.8	103.5
+12	-	101.8	105.4
002	92.9	99.1	103.5
A	92.7	98.8	102.7
B	92.6	98.0	102.1

C	92.9	98.8	102.2
E	92.6	99.1	104.2
F	-	100.5	104.0
G	94.8	100.3	103.5
H	94.6	99.8	103.1
I	-	100.7	103.7
J	-	99.9	104.3
PCC03	-	99.7	103.4

3.1.3. Metodyka i pomiary SPBI

Definicja według normy PN-EN ISO 11819-1 [5]:

Statystyczna metoda pomiaru hałasu (SPB – statistical pass-by method) podczas przejazdu - procedura pomiarowa przeznaczona do oceny hałasu pojazdu i ruchu generowanego na różnych odcinkach nawierzchni drogi w określonych warunkach ruchu. Pomiary są wykonywane dla dużej liczby pojazdów normalnie poruszających się po drodze. Wyniki uzyskane z zastosowaniem tej procedury są normalizowane do standardowych prędkości według kategorii lub rodzaju rozpatrywanej drogi.

Kategorie prędkości na drodze - w odniesieniu do zakresów określa się trzy kategorie dróg, na których odbywa się ruch drogowy i które zwykle przypisuje się pewnym rejonom:

- Drogi o małej prędkości - warunki odnoszące się do potoku ruchu o średniej prędkości od 45 km/h do 64 km/h. Warunki te odpowiadają ruchowi miejskiemu.
- Drogi o średniej prędkości - warunki odnoszące się do potoku ruchu o średniej prędkości od 65 km/h do 99 km/h. Warunki te zwykle spotyka się w rejonach podmiejskich i na drogach szybkiego ruchu w rejonach zamiejskich.
- Drogi o dużej prędkości - warunki odnoszące się do samochodów poruszających się ze średnią prędkością 100 km/h lub większą. Ze względu na ograniczenia prędkości, ciężkie pojazdy mogą poruszać się z mniejszą średnią prędkością. Warunki te zwykle odpowiadają ruchowi na autostradzie w rejonach zamiejskich lub podmiejskich.

Kategoria pojazdów obejmuje pojazdy, które mają pewne wspólne cechy łatwe do zidentyfikowania w strumieniu ruchu takie jak liczba osi i rozmiary. Przyjmuje się, że te wspólne cechy odpowiadają podobieństwom w emisji dźwięków w trakcie ich jazdy w tych samych warunkach ruchowych. Za wystarczające dla opisu charakterystyk hałasu nawierzchni dróg w normie ISO 11819 uważa się następujące kategorie pojazdów:

- kategoria 1 - samochody osobowe - samochody osobowe z wyłączeniem innych lekkich pojazdów;
- kategoria 2 - pojazdy ciężkie - wszystkie pojazdy ciężarowe, autobusy i autokary dwuosiowe, mające więcej niż cztery koła. Kategoria składa się z kategorii 2a i 2b;
- kategoria 2a - pojazdy ciężkie dwuosiowe – pojazdy ciężarowe, autobusy i autokary z dwiema osiami i więcej niż czterema kołami;
- kategoria 2b - pojazdy ciężkie wieloosiowe – pojazdy ciężarowe, autobusy i autokary z więcej niż dwiema osiami.

Zasada pomiaru

W ramach pomiarów mierzone są maksymalne poziomy dźwięku pochodzące od statystycznie istotnej liczby poszczególnych przejazdów pojazdów. Mierzone są również prędkości pojazdów. Pojazdy kwalifikuje się do jednej z trzech kategorii. Podział ten jest wystarczający, ponieważ bardziej szczegółowe rozróżnianie pojazdów nie ma znaczenia dla hałaśliwości nawierzchni w tej metodzie. W przypadku prędkości i trzech kategorii dróg występują trzy różne poziomy odniesienia.

W celu określenia wskaźnika SPBI dodaje się poziomy dźwięku pomierzone dla samochodów osobowych, ciężkich pojazdów dwuosioowych oraz ciężkich wieloosioowych w odpowiednich proporcjach. W opisany powyżej sposób uzyskuje się wskaźnik SPBI, który służy do porównania nawierzchni drogowych ze względu na mieszany skład potoku ruchu.

Aparatura pomiarowa

W trakcie pomiarów używano zestawu pomiarowe:

- miernik hałasu z możliwością nałożenia filtrów A i FAST oraz analizy częstotliwościowej – Rysunek 10 ,
- aparatura pomiaru do prędkości,
- aparatura do pomiaru temperatury.



Rysunek 10. Miernik SVAN 958

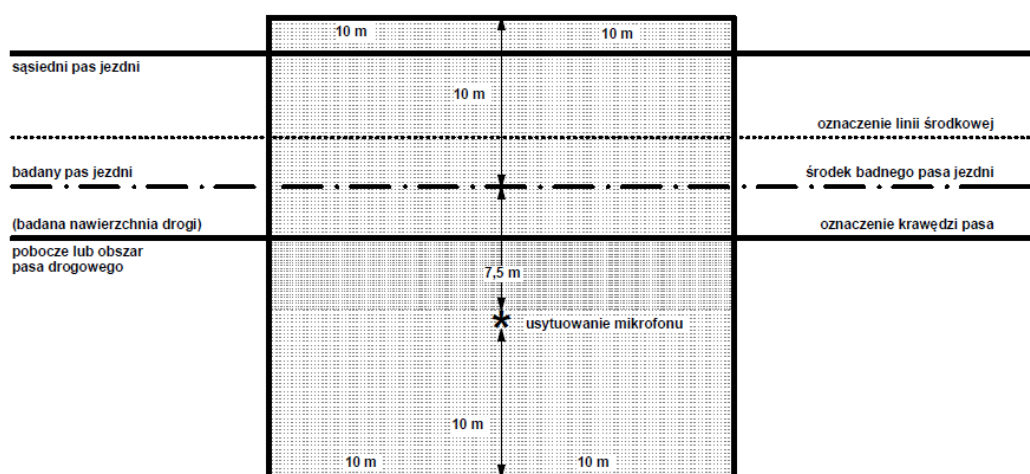
Lokalizacja pomiarów

Podstawowe zasady wykonywania pomiarów:

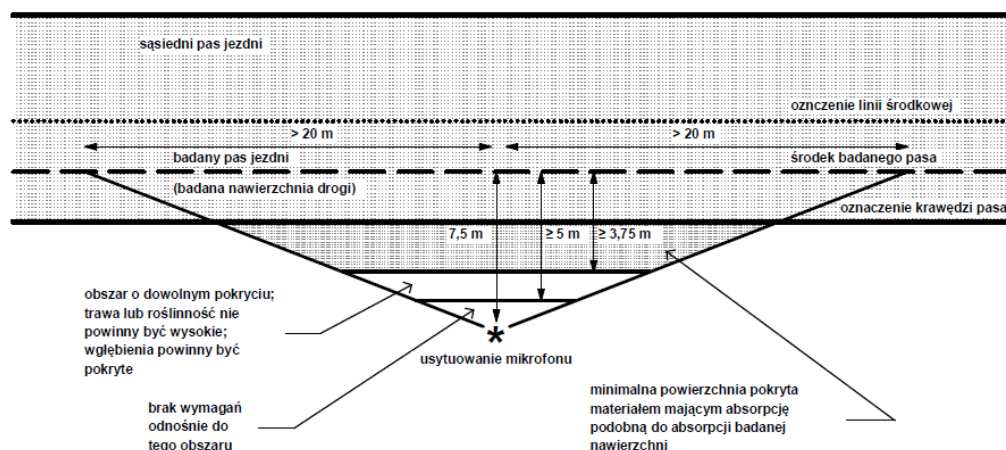
- odcinek pomiarowy powinien mieć minimum 30 m długości po obu stronach miejsca pomiaru i 50 m w przypadku dróg szybkich,

- droga nie powinna posiadać łuków poziomych i pionowych (drogi z łagodnymi łukami poziomymi i pochyleniami podłużnymi mniejszymi niż 1% mogą być uznane za dopuszczalne),
- liczba pojazdów powinna być wystarczająca dla zapewnienia racjonalnej długości czasu pomiaru,
- tło akustyczne powinno być przynajmniej o 10 dB niższe od pomierzonych wartości,
- nawierzchnia powinna być w dobrym stanie (nie dotyczy w przypadku porównywania),
- nawierzchnia na całym odcinku powinna być jednorodna,
- na analizowanym obszarze powinna być zapewniona możliwość pomiarów wszystkich kategorii pojazdów,
- w odległości 10 m od mikrofonu nie mogą znajdować się konstrukcje ekranów akustycznych lub nasypów,
- w odległości mniejszej niż 3,75 m od mikrofonu może znajdować się trawa, a roślinność powinna być jak najniższa - Rysunek 11.

W celu dokładnego porównania dwóch nawierzchni na tej samej drodze przy tych samych pojazdach można wykonać analizę za pomocą pomiarów sparowanych (sprzężonych). Odległość pomiędzy miernikami nie powinna wynosić więcej niż 60 m lub 100 m w przypadku kategorii dróg szybkich.



Rysunek 11. Lokalizacja punktu pomiarowego względem ekranów akustycznych i innych elementów odbijających lub pochłaniających

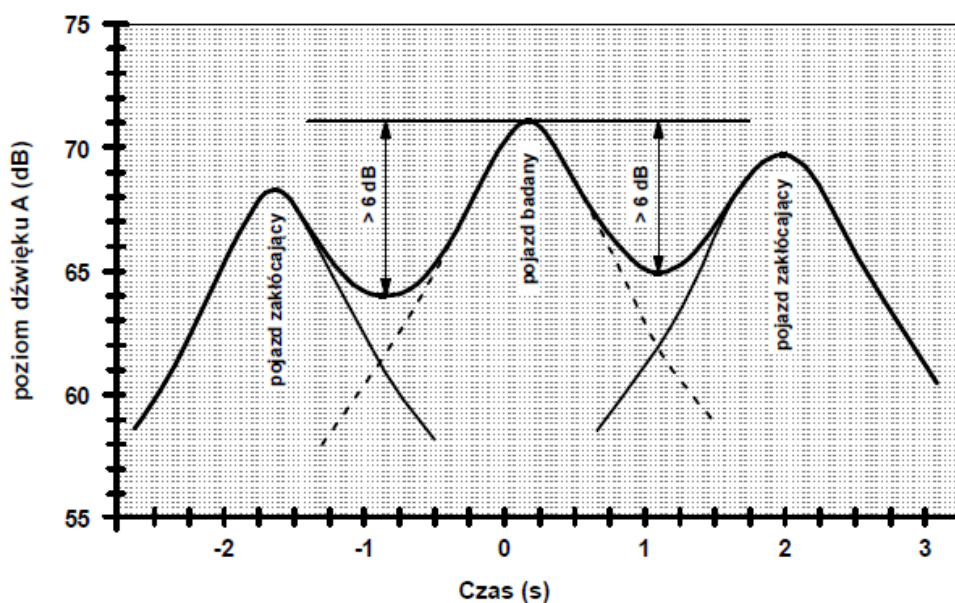


Rysunek 12. Wymagania uwzględniające minimalne pokrycie odpowiednią akustycznie powierzchnią pomiędzy badanym pasem jezdni i mikrofonem

Warunki ruchu drogowego

Pomiar powinien być wykonywany jedynie dla pojedynczego przejazdu pojazdu. Analizowany przejazd powinien spełniać następujące kryteria:

- pomiędzy przejazdami badanych pojazdów poziom dźwięku powinien być przynajmniej o 6 dB niższy od maksymalnego poziomu dźwięku zmierzonego przy przejeździe pojazdu,
- przy doborze przejazdów należy zwrócić uwagę, aby pojazdy wyprzedzające lub mijając nie nakładały się z analizowanym pojazdem,
- pojazdy o nietypowej charakterystyce akustycznej tj. uszkodzone lub pojazdy służb ratunkowych są pomijane w analizach,
- pomiar poziomu dźwięku powinien dotyczyć jedynie pojazdów poruszających się ze stałą prędkością,
- należy wykluczyć pojazdy poruszające się z dala od osi pasa ruchu.



Rysunek 13. Wymagany odstęp sygnału od szumu dla pojedynczego przejazdu pojazdu

Minimalna liczba pojazdów:

- kategoria pojazdy osobowe – min. 100,
- kategoria pojazdy ciężkie dwuosiove – min. 30,
- kategoria pojazdy ciężkie wieloosiowe – min. 30.

Pojazdy ciężkie łącznie – min. 80.

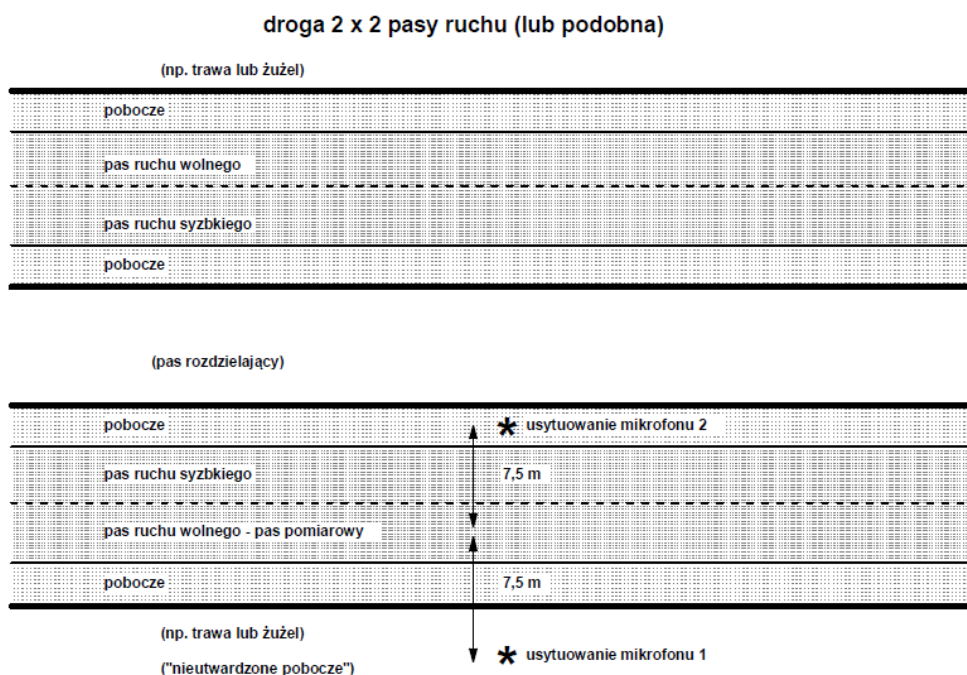
Procedura pomiarowa

a) Lokalizacja miernika:

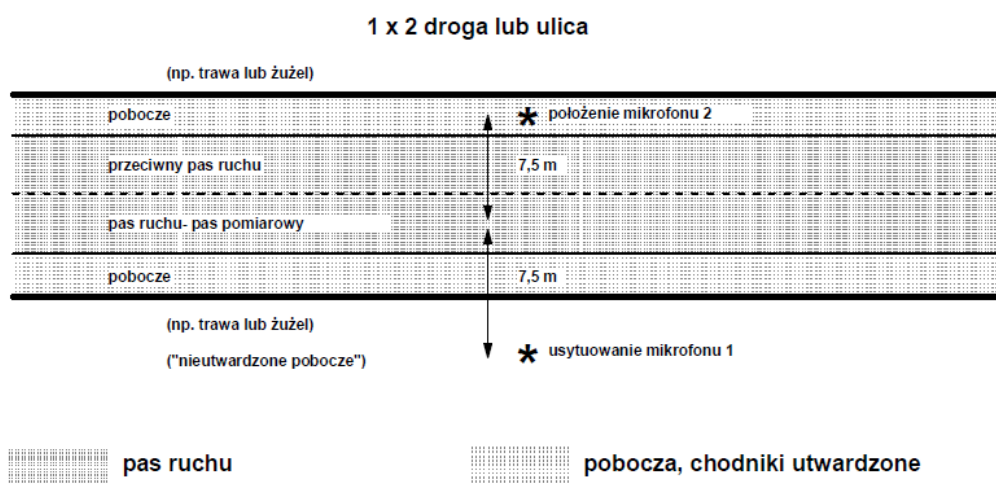
- odległość pozioma od mikrofonu do środka pasa, na którym przemieszczają się mierzone pojazdy powinna wynosić $7,5 \pm 0,1$ m,
- mikrofon powinien być umieszczony na wysokości $1,2 \text{ m} \pm 0,1\text{m}$ nad powierzchnią pasa drogi.

b) Pomiar prędkości powinien odbywać się według wskazań urządzenia skierowanego w kierunku pojazdu.

c) Pomiar temperatury.



Rysunek 14. Typowe usytuowanie mikrofonu dla drogi o przekroju 2x2



Rysunek 15. Typowe usytuowanie mikrofonu dla drogi o przekroju 1x2

Pomiar temperatury jest obowiązkowy. Pomiar powinien trwać min 15 s. W przypadku, gdy pomiar ciągły jest niedostępny należy mierzyć temperaturę co 15 minut.

- Temperatura powietrza – czujnik temperatury powinien być umieszczony w miejscu pozbawionym przeszkód tak blisko centrum badanej powierzchni jak to jest praktycznie możliwe i bezpieczne oraz tak aby był on wystawiony na przepływ powietrza i zabezpieczony przed bezpośrednim wpływem słońca.

Czujnik powinien być umieszczony od 1 m do 1,5 m powyżej nawierzchni drogi tak aby zminimalizować wpływ promieniowania cieplnego nawierzchni drogi przy małych przepływach powietrza.

- Temperatura nawierzchni - Czujnik temperatury powinien być umieszczony w miejscu, gdzie temperatura jest reprezentatywna dla temperatury w śladach kół i tak aby nie zakłócać pomiaru akustycznego.

Obliczenie wartości współczynnika spbi

Zgodnie z [6] wartość współczynnika SPBI należy obliczyć zgodnie ze wzorem:

$$SPBI = 10 \times \log \left[W_1 \times 10^{\frac{L_1}{10}} + W_{2a} \times \left(\frac{v_1}{v_{2a}} \right) \times 10^{\frac{L_{2a}}{10}} + W_{2b} \times \left(\frac{v_1}{v_{2b}} \right) \times 10^{\frac{L_{2b}}{10}} \right] \quad [dB]$$

gdzie:

W_1, W_{2a}, W_{2b} – współczynniki ważenia dla poszczególnych kategorii pojazdów wg tabl.

1,

L_1, L_{2a}, L_{2b} – poziom dźwięku samochodów dla poszczególnych kategorii pojazdów,

v_1, v_{2a}, v_{2b} – prędkości odniesienia dla poszczególnych kategorii pojazdów.

Tablica 5. Prędkości odniesienia i współczynniki ważenia (W_x) dla różnych kategorii prędkości na drodze [5]

Kategoria pojazdu		Kategorie prędkości na drodze					
		Mała		Średnia		Duża	
Nazwa	Nr	Prędkość odniesienia [km/h]	W_x	Prędkość odniesienia [km/h]	W_x	Prędkość odniesienia [km/h]	W_x
Samochody osobowe	1	50	0,900	80	0,800	110	0,700
Pojazdy dwuosiove ciężkie	2a	50	0,075	70	0,100	85	0,075
Pojazdy wieloosiove ciężkie	2b	50	0,025	70	0,100	85	0,225

Tablica 6. Wyniki pomiarów SPBI na odcinkach porównawczych w Zadaniu 1

Miejscowość	ID odcinka	Nr drogi	L1	L2a	L2b	V1	V2a	V2b	W1	W2a	W2b	K1	K2	SPBI	Typ
Łącko	+13	DW969	71.6	73.4	73	50	50	50	0.9	0.075	0.025	100	81	71.8	BBTM
Młynne	+16	DW965	68	71	79.2	50	50	50	0.9	0.075	0.025	101	80	69.4	BBTM
Wieliczka	+14	DW964	71.6	72.8	75.4	50	50	50	0.9	0.075	0.025	106	81	71.8	BBTM
Liszki	+15	DW780	72.3	74.2	78.8	50	50	50	0.9	0.075	0.025	108	81	72.8	BBTM
Kock	+10	DK19	76.9	75.6	77.9	80	70	70	0.8	0.1	0.1	100	75	76.9	SMA 8
Markuszów	+11	DK12	79.3	77.5	84.3	80	70	70	0.8	0.1	0.1	116	85	80.1	SMA 8
Korytów	D	-	70.2	72.5	72.5	50	50	50	0.9	0.075	0.025	117	30	70.5	PU
Rdzawka	+17	DK47	74	75.6	80.8	80	70	70	0.8	0.1	0.1	105	89	75.6	b.d.
Szaflary	+18	DK47	75.5	76.8	81.6	50	50	50	0.9	0.075	0.025	114	96	75.9	b.d.
Mszczonów	+12	DK50-A	83	83.2	83.2	80	70	70	0.8	0.1	0.1	98	82	83.1	BA

Leontynów	E	DK50-E	78.2	82.6	83	80	70	70	0.8	0.1	0.1	80	78	79.7	BC
Wróblewo	F	DK50-F	80.3	81	81.4	80	70	70	0.8	0.1	0.1	60	59	80.6	SMA
Rębowo	G	DK50-G	79.8	79.2	79.4	80	70	70	0.8	0.1	0.1	84	83	79.8	SMA
Potworów	J	DK50-J	76.8	74	76.4	80	70	70	0.8	0.1	0.1	94	72	76.6	SS

3.1.4. Pomiary cech powierzchniowych

Zestaw pomiarowy SRT-3 wykorzystany w tym Zadaniu reprezentuje trzecią generację urządzeń do pomiaru współczynnika tarcia. Przyczepa dynamometryczna wchodząca w skład zestawu pomiarowego posiada oryginalny schemat kinematyczny i szereg korzystnych własności, które wyróżniają ją spośród podobnych urządzeń pomiarowych. Są to m.in.:

- pomiar współczynnika tarcia przy pełnej blokadzie koła pomiarowego dwoma metodami: momentu hamującego i przez bezpośredni pomiar siły tarcia,
- badanie siły oporów toczenia,
- możliwość pomiaru współczynnika tarcia na łukach poziomych,
- pomiar siły w zawieszeniu przyczepy dynamometrycznej, pozwalający na korektę wartości współczynnika tarcia ze względu na wielkość docisku koła testowego do nawierzchni,
- możliwość określenia wartości współczynnika tarcia w funkcji poślizgu względnego, szczególnie przydatna właściwość w przypadku prowadzenia badań naukowych.

Urządzenie od wielu lat jest podstawowym urządzeniem służącym w Polsce w badaniach współczynnika tarcia nawierzchni. Pomiary odbywały się przy pełnej blokadzie koła pomiarowego, na nawierzchni zwilżonej wodą w ilości 0,5 l/m², z prędkością 60 km/h. Można wykonywać badania również w innych prędkościach. Obecnie stosowaną oponą testową jest rowkowana opona PIARC, opisana w dokumencie „Specification for a standard test tyre for friction coefficient measurement of a pavement surface: Ribbed test tyre, PIARC Technical Committee 1 Surfaces characteristics (2004)”.



Rysunek 16. Zestaw pomiarowy SRT-3

Urządzenie SPDE (ang. System for Pavement Distress Evaluation) wykorzystane w tym Zadaniu (w ramach badań IBDiM) to urządzenie zawierające w sobie kilka podsystemów pomiarowych i oprogramowanych wspólnym softwarem. Integracja różnych urządzeń w

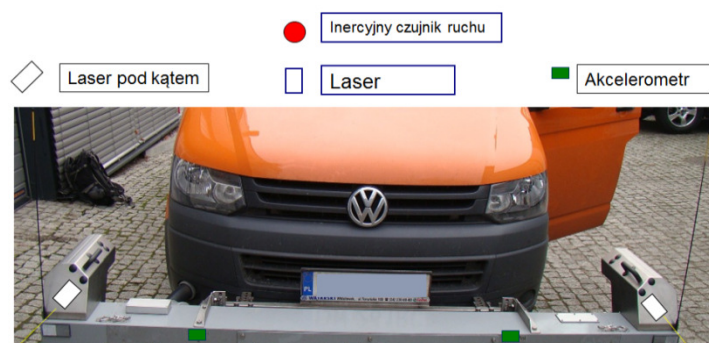
ramach jednego systemu pomiarowego oraz możliwość prowadzenia pomiaru w czasie rzeczywistym w normalnych warunkach ruchowych pozwala uzyskać pełną zgodność danych o parametrach nawierzchni i znacznie zwiększa efektywność prowadzonej oceny cech powierzchniowych nawierzchni.

System pomiarowy może być wykorzystany do badania takich cech nawierzchni jak profil podłużny i poprzeczny, teoretyczna głębokość filmu wodnego w koleinie, spadki podłużne i poprzeczne drogi, promienie łuków poziomych drogi, tekstura nawierzchni. Do tego celu służy belka zamontowana z przodu pojazdu z zainstalowanymi czujnikami laserowymi o różnej charakterystyce. Czujniki rozmieszczone są co 12,5 cm, a dzięki specjalnym czujnikom kątowym efektywna szerokość pomiarowa została zwiększona do 3,5m. Całość oprzyrządowana jest dodatkowymi elementami takimi jak żyroskop, akcelerometr, 4 czujniki do pomiaru równości podłużnej (umocowane w osi prawych kół, pod samochodem) oraz dodatkowy czujnik laserowy o nieco innej charakterystyce, przeznaczony do pomiaru tekstury.

W tym Zadaniu dane pomierzone za pomocą systemu SPDE zostały wykorzystane do pomiaru makrotekstury metodą MPD (opisaną w normie PN-EN 13473-1) oraz równości podłużnej określonej wskaźnikiem IRI (z ang. International Roughness Index).



Rysunek 17. Profilograf laserowy SPDE (IBDiM)



Rysunek 18. Profilograf laserowy wykorzystany w pomiarach (PWr)

Tablica 7. Wyniki pomiarów cech powierzchniowych na wybranych odcinkach porównawczych w Zadaniu 1

	Nr drogi	Technol.	km początk.	Współ. tarcia	MPD, mm	IRI, mm/m
--	----------	----------	-------------	---------------	---------	-----------

A	DK-50	BA	22,000	0,522	0,61	1,7
B	DK-50	SMA	262,400	0,464	0,51	1,1
C	DK-61	SS	87,300	0,460	0,85	1,7
D	Korytów	PU	0,000	0,582	2,17	2,2
E	DK-50	BC	72,800	0,470	0,29	2,0
F	DK-50	SMA	41,500	0,441	1,09	1,2
G	DK-50	SMA	58,000	0,451	0,88	1,6
H	DK-50C	SMA	2,000	0,372	0,81	1,1
I	DK-50D	SMA	2,500	0,409	1,01	1,2
J	DK-48	SS	55,000	0,637	-	-

3.1.5. Metodyka i pomiary AIT (tuba impedancji akustycznej) i pomiary skanerem 3D w warunkach laboratoryjnych

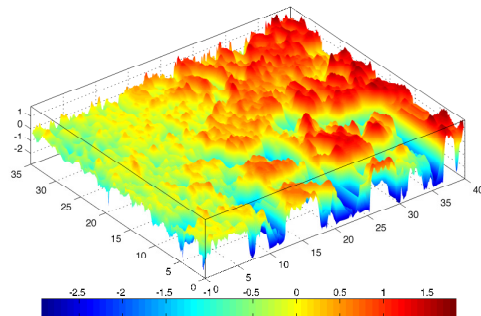
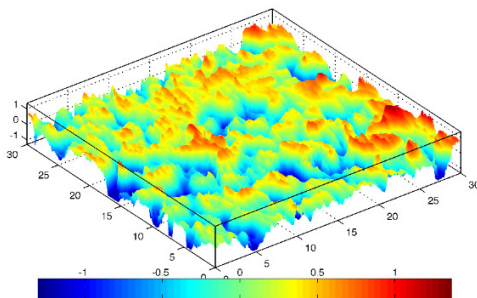
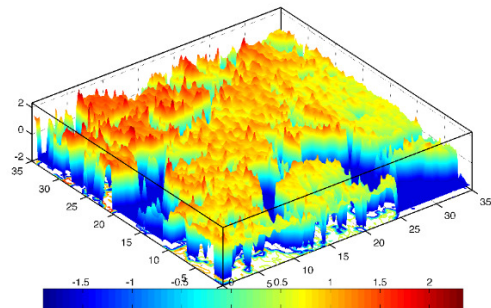
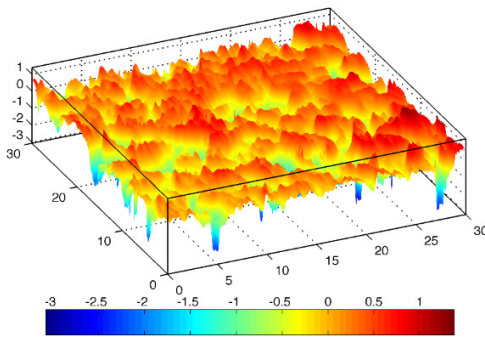
Jednym z podstawowych parametrów określających możliwość redukcji poziomu dźwięku przez nawierzchnie jest współczynnik pochłaniania dźwięku, który dla każdego typu nawierzchni jest inny. Podstawowym przyrządem wykorzystywanym do wykonywania pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchni drogowych jest tzw. rura impedancyjna (acoustic impedance tube, AIT). W jej wnętrzu powstaje fala płaska będąca wynikiem interferencji fali padającej na badaną próbkę o ciśnieniu akustycznym p_I oraz fali odbitej od badanej próbki o ciśnieniu akustycznym p_R . Ciśnienie akustyczne jest mierzone wewnątrz rury impedancyjnej w ściśle określonych lokalizacjach za pomocą odpowiednich mikrofonów. Za pomocą odpowiedniej procedury interpretacyjnej, jest możliwe określenie współczynnika pochłaniania dźwięku badanej próbki. Badania można wykonywać w warunkach terenowych oraz w warunkach laboratoryjnych. W Zadaniu 1 zakupiono odpowiednią tubę AIT (nazwa handlowa ROSSA) oraz zaprojektowano i wykonano odpowiednie stanowisko do oceny współczynnika pochłaniania dźwięku za pomocą tuby ROSSA w warunkach laboratoryjnych. Przegląd literatury, podstawy teoretyczne, wykonane badania przedstawiono w Załączniku 1.4 pt. „Wyniki oraz analiza badań tubą impedancji akustycznej w terenie i w laboratorium”. Drugi powiązany Załącznik 1.5 pt. „Propozycja metody do oceny hałaśliwości warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych w warunkach laboratoryjnych (instrukcja stosowania) zawiera instrukcję wykonywania badań tubą AIT w warunkach laboratoryjnych.

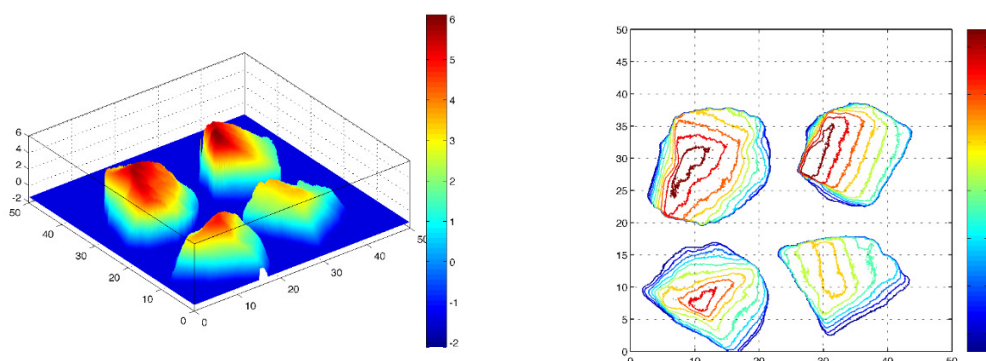
W ramach Zadania 1 przeprowadzono także próbę wykorzystania skanera 3D do oceny tekstury i porowatości górnej warstwy nawierzchni, która w warunkach drogowych ma bezpośredni kontakt z oponą poruszających się pojazdów. Na Rysunek 19 pokazano przykładowe obrazy 3D zeskanowanych powierzchni. Na podstawie wykonanych badań skanerem 3D stwierdzono że:

- skaner 3D może być efektywnym narzędziem do oceny właściwości powierzchniowych próbek mm-a,
- w celu uzyskania wiarygodnych pomiarów i wyników, powierzchnia próbki musi być przygotowana w sposób symulujący proces wbudowywania mm-a w konstrukcję nawierzchni; ten warunek wymaga pomiarów na odwiertach z nawierzchni co z kolei wyklucza wykorzystanie skanera 3D na próbnym mieszkach w warunkach laboratoryjnych,

- prace będą kontynuowane w celu opracowania odpowiedniej metodyki przygotowywania powierzchni próbek do badań w warunkach laboratoryjnych tak, żeby możliwa była ocena właściwości powierzchni (w aspekcie pochłaniania dźwięku jak i właściwości przeciwpoślizgowych czy oporów toczenia) na etapie projektowania mm-a (lub innej warstwy wierzchniej) w laboratorium,
- wraz z opracowaniem metodyki przygotowywania próbek, zostanie opracowana procedura interpretacji pomiarów.

Koncepcja wykorzystania skanera 3D została sprawdzona w tym projekcie i został nakreślony kierunek dalszych prac badawczych nad pełną adaptacją pomiarów 3D na etapie projektowania mm-a.





Rysunek 19. Przykłady zeskanowanych powierzchni próbek mm-a za pomocą skanera 3D (1-4), oraz obraz 3D indywidualnych ziaren kruszywa (5-6) (wymiały w mm)

3.2. Porównanie terenowych metod pomiaru hałaśliwości nawierzchni

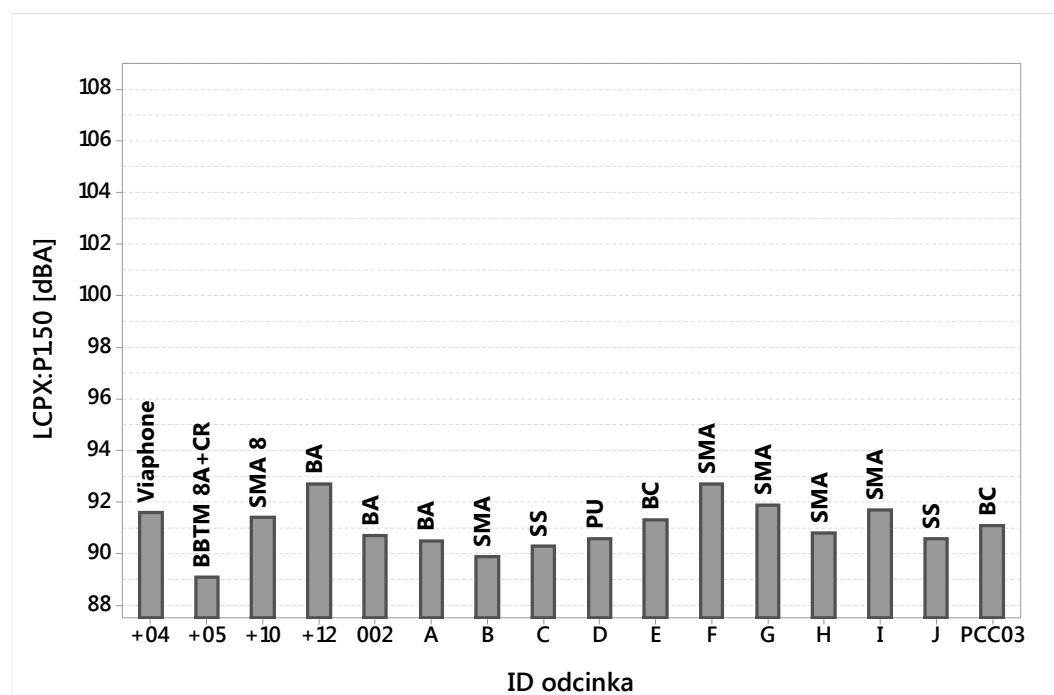
W tym Zadaniu 1 wykonano jedynie proste sprawdzenie wyników otrzymanych z terenowych metod pomiaru hałaśliwości, czyli CPX, OBSI oraz SPB. Wyniki z pomiarów tubą impedancji akustycznej ROSSA zostały przedstawione osobno w Załączniku 1.4.

Należy zwrócić uwagę, że wspomniane trzy metody różnią się pomiędzy sobą nie tylko sposobem wykonywania pomiarów, ale różnice dotyczą także mierzonych wielkości jak i samego źródła dźwięku.

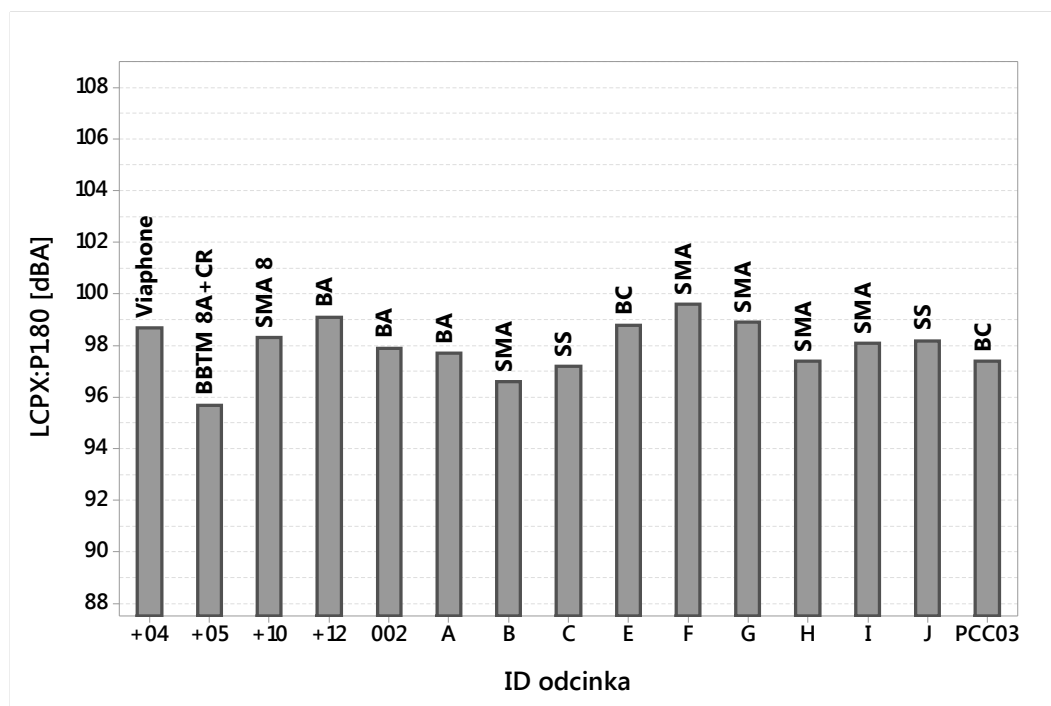
Metoda CPX polega na bezpośrednim pomiarze ciśnienia akustycznego dźwięku powstającego na styku opony z nawierzchnią. Pomierzone ciśnienie jest następnie normalizowane ze względu na niektóre parametry pomiarowe, jak np. twardość opony, temperatura nawierzchni czy prędkość podczas pomiaru. **Metoda OBSI** posługuje się natężeniem dźwięku (ang. sound intensity), które jest wyznaczone na podstawie pomiarów wykonywanych za pomocą sondy natężenia dźwięku typu $p-p$ [7]. Taka sonda składa się z dwóch dopasowanych fazowo mikrofonów - mierników ciśnienia dźwięku. Kierunkowe natężenie dźwięku jest obliczone na podstawie specjalnego algorytmu, który wykorzystuje metodę różnic skończonych do wyznaczenia gradientu ciśnienia, przez co można wyznaczyć prędkość poruszających się cząsteczek. Natężenie dźwięku jest miarą ilości energii akustycznej przepływającej przez jednostkę pola powierzchni. Jeżeli energia zostanie scałkowana przez pole, to można wyznaczyć moc akustyczną (ang. sound power). Moc akustyczna jest to miara (charakterystyka), z którą dźwięk jest promieniowany przez źródło. Ciśnienie akustyczne (ang. sound pressure) z kolei jest zdefiniowane jako zmienne ciśnienie nałożone na ciśnienie statyczne przez obecność dźwięku ze źródła o określonej mocy akustycznej. Można zatem powiedzieć, że moc akustyczna jest przyczyną a ciśnienie akustyczne jest skutkiem. Przez co dochodzimy do **konceptyjnej różnicy pomiędzy metodą CPX i OBSI**: OBSI operuje natężeniem dźwięku (czyli wyznacznikiem mocy akustycznej źródła dźwięku) podczas gdy CPX opiera się na pomierzonym skutku rozchodzenia się fali dźwiękowej w postaci drgań ciśnienia. W obu przypadkach źródłem dźwięku jest styk opony (np. standardowej SRTT) z nawierzchnią, gdzie zachodzi szereg skomplikowanych zjawisk fizycznych [8].

Metoda SPB wykorzystuje również pomiary ciśnienia dźwięku, ale w pewnej odległości od drogi i na pewnej wysokości. Źródłem dźwięku jest potok samochodów osobowych, ciężkich pojazdów dwuosioowych oraz ciężkich wieloosioowych w odpowiednich proporcjach. Przez odpowiednią procedurę normalizacyjną (opisaną wcześniej) wyznacza się wskaźnik SPBI (statystyczny współczynnik hałasu podczas przejazdu w dB(A)), który służy do porównania nawierzchni drogowych ze względu na mieszany skład potoku ruchu.

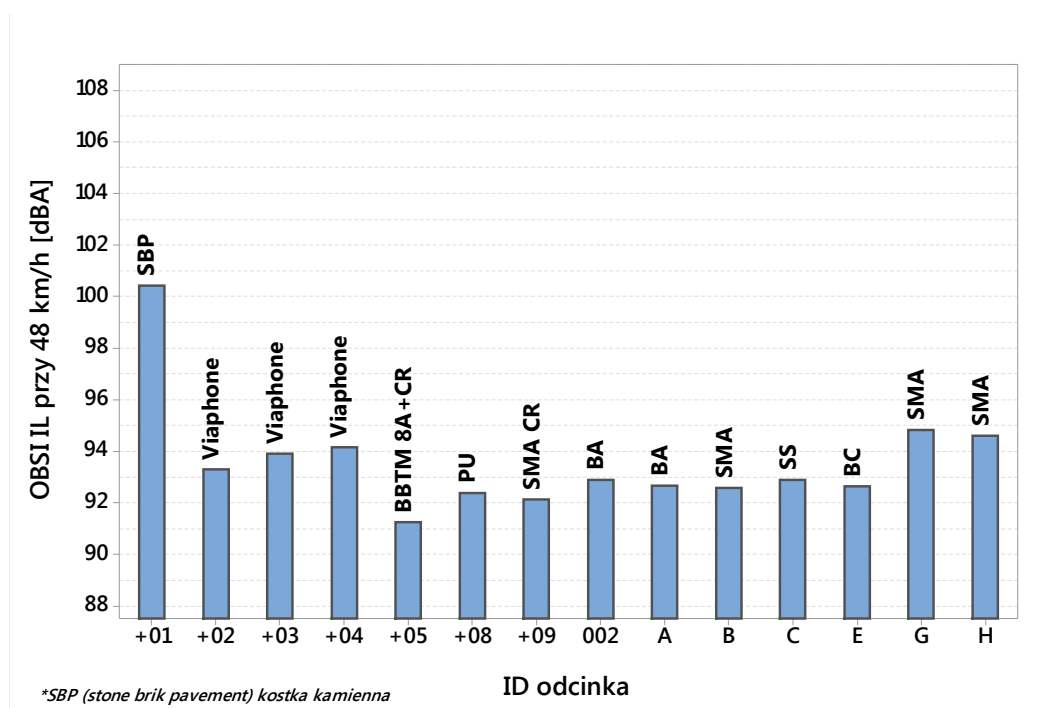
W związku z powyższym wyjaśnieniem nie należy oczekiwać, że wspomniane metody można stosować zamiennie. Należy je raczej rozpatrywać jako komplementarne i w zależności od celu pomiarów należy dobrać właściwą i najbardziej odpowiednią metodę badań. Nie mniej jednak, w literaturze można znaleźć wiele prac, które poszukują powiązań między tymi metodami. W niniejszym projekcie, taka próba powiązania metod terenowych pomiaru hałaśliwości i hałasu jest zaprezentowana w raporcie z Zadania 4. Na Rysunek 20 do Rysunek 25 przedstawiono średnie wyniki badań terenowych z metod CPX, OBSI i SPB. Można zauważyć, że obie metody „przy źródle” (CPX i OBSI) reagują na zmiany prędkości pomiaru i że wszystkie metody są wrażliwe na zmianę rodzaju nawierzchni. Pomiary na tych odcinkach posłużyły jako poligony doświadczalne do sprawdzenia przyjętych procedur badawczych i do opracowania wytycznych pomiaru hałaśliwości, które zostały wykorzystane w pozostałych zadaniach niniejszego projektu. Wytyczne zostały jeszcze raz zweryfikowane w Zadaniu 4 i dopiero wówczas przygotowano ostateczne wersje wytycznych, które są załączone jako osobne opracowania do raportu z Zadania 4.



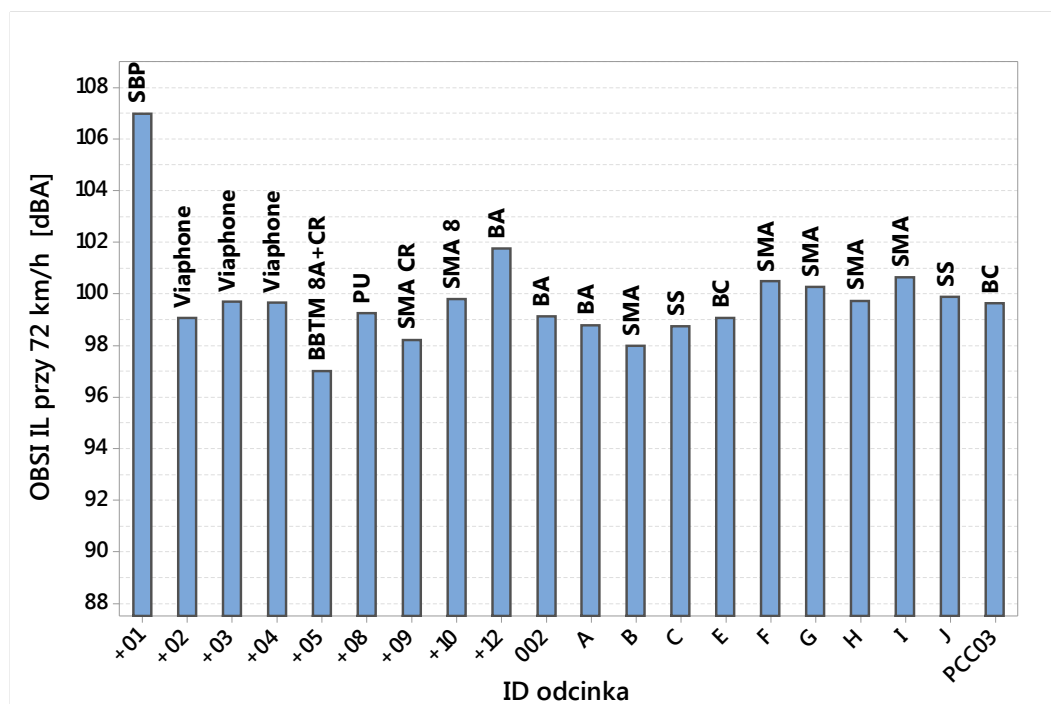
Rysunek 20. Wyniki CPX dla odcinków porównawczych w Zadaniu 1 (50 km/h)



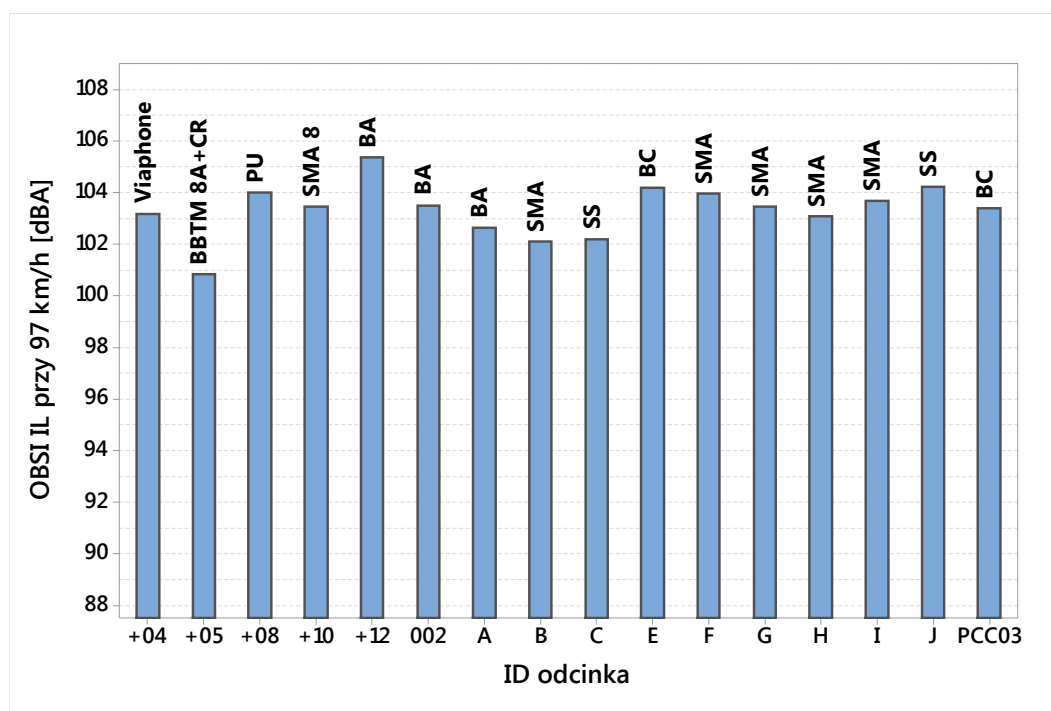
Rysunek 21. Wyniki CPX dla odcinków porównawczych w Zadaniu 1 (80 km/h)



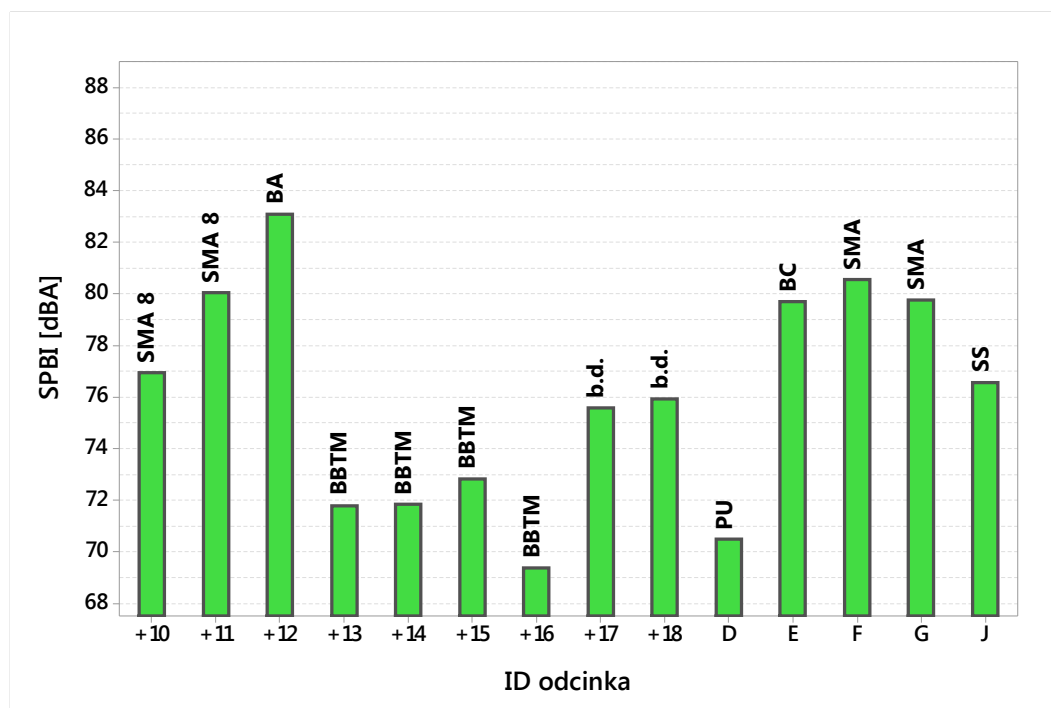
Rysunek 22. Wyniki OBSI dla odcinków porównawczych w Zadaniu 1 (48 km/h)



Rysunek 23. Wyniki OBSI dla odcinków porównawczych w Zadaniu 1 (72 km/h)



Rysunek 24. Wyniki OBSI dla odcinków porównawczych w Zadaniu 1 (97 km/h)



Rysunek 25. Wyniki SPBI dla odcinków porównawczych w Zadaniu 1

4. PODSUMOWANIE ORAZ WNIOSKI NAUKOWE I PRAKTYCZNE Z ZADANIA 1

W podsumowaniu Zadanie zostało wykonane zgodnie z planem, a cele Zadania zostały osiągnięte, tzn.

- 1) Przeprowadzono pomiary hałaśliwości na ponad 20-stu odcinkach doświadczalnych i wstępnie porównano trzy metody pomiarowe (CPX, OBSI, SPB). Wszystkie metody wykazały wrażliwość na warunki pomiarowe i na rodzaj technologii wykonania nawierzchni.
- 2) Opracowano wstępne metodyki pomiaru dla wybranych metod (CPX, OBSI, SPB), które zostały wykorzystane w pozostałych zadaniach niniejszego projektu. Metodyki zostały jeszcze zweryfikowane w Zadaniu 4 i przedstawione jako osobne załączniki.
- 3) Przygotowano propozycję metody do oceny hałaśliwości warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych w warunkach laboratoryjnych. Raport z badań tubą impedancji akustycznej ROSSA oraz instrukcję stosowania przedstawiono odpowiednio w Załączniku 1.4 i 1.5.

Na podstawie badań i analizy wykonanych w Zadaniu 1 można sformułować następujące wnioski **praktyczne**:

1) CPX

- a. niepewność standardowa pomiarów metodą CPX została wyznaczona jako 0,5 dB,
- b. duży wpływ na uzyskiwane wartości w pomiarach ma twardość gumy opon referencyjnych P1 i H1; w dopuszczalnych zakresach twardości korekta uwzględniająca twardość gumy, w stosunku do twardości referencyjnej H_{ref} 66

- Shore A może wynosić nawet 1,4 dB; zalecane jest sprawdzanie twardości gumy opony nie rzadziej niż raz na 3 miesiące i przechowywanie ich w warunkach, które pozwolą na minimalizację efektu twardnienia gumy; zalecenia dotyczące przechowywania opon podano w normie ISO/TS 11819-3, Załącznik B,
- c. zaleca się używać opon referencyjnych tylko do badań ponieważ dopuszczalne zużycie bieżnika wynosi tylko 1 mm,
 - d. w badaniach na odcinkach zamkniętych, w celu np. określenia hałaśliwości nowego rodzaju warstwy ścieralnej, rekomenduje się wykonywanie pomiarów w trzech prędkościach zalecanych przez normę PN-EN ISO 11819-2:2017-06: 50 km/h, 80 km/h i 110 km/h; w ocenie technologii wykonania nawierzchni, wykonywanej „pod ruchem” zaleca się prowadzenie pomiarów z prędkością 50 i 80 km/h, podczas badań „sieciovych” rekomenduje się prędkość pomiarową 50 km/h; prowadzenie pomiarów w tej prędkości pozwala na ocenę hałaśliwości dróg również w terenie zabudowanym; pomiar w jednej prędkości znacznie skraca proces pozyskiwania danych,
 - e. należy rejestrować wszystkie pojazdy i inne źródła dźwięku zakłócające pomiar; dotyczy to w szczególności badań z prędkością 50 km/h, podczas których występuje większa liczba tego typu zakłóceń; w polskich warunkach ruchu drogowego bardzo często samochody, w szczególności ciężarowe wyprzedzają pojazd badawczy realizujący pomiar,
 - f. w przypadku stosowania pojazdu badawczego z jednym kołem pomiarowym zainstalowanym w osi przyczepy występują trudności w prowadzeniu pomiarów w „ślądzie” koła; w przypadku badań na wąskich pasach drogowych samochód holujący zmuszony jest do poruszania się po krawędzi drogi; ponadto, w przypadku wykonania linii krawędziowej w technologii zwiększającej efekty akustyczne (ostrzeganie kierowcy o niebezpieczeństwie zjechania z drogi), może wystąpić konieczność poruszania się obok wyznaczonego toru pomiarowego w celu wyeliminowania dodatkowego, niechcianego źródła dźwięku,
 - g. wysokość usytuowania mikrofonów ponad nawierzchnią ma wpływ na uzyskiwane wartości L_{CPX} ; w szczególności dotyczy to zbyt wysokiej instalacji czujników; zwiększenia wysokości montażu mikrofonów o 1 cm powoduje obniżenie wartości L_{CPX} , średnio o ok. 0,4 dB,
 - h. duży wpływ na uzyskiwane wartości w pomiarach ma temperatura otoczenia; w dopuszczalnych zakresach korekta może wynosić nawet od 0,54 dB (nawierzchnie porowate, prędkość pomiarowa 110 km/h) do 1,65 dB (nawierzchnia o strukturze zamkniętej, prędkość pomiarowa 50 km/h); dlatego zaleca się regularne, najlepiej automatyczne rejestrowanie temperatury podczas badania.
- 2) **OSBI**; szereg wniosków dotyczących wytycznych pomiarów metodą OBSI zostało sformułowanych w Załączniku 1.3; do najważniejszych można zaliczyć:
- a. niepewność standardowa pomiarów metodą OBSI została wyznaczona jako 0.3 dBA,
 - b. wpływ twardości opony SRTT na pomiary OBSI jest znaczny i wynosi 0.2 dBA / 1 ShA (poziom nominalny 65 ShA); zaleca się sprawdzać twardość opony nie rzadziej niż raz na miesiąc i przechowywać je w odpowiednich warunkach określonych w normie ASTM F2493,

- c. rekomendowana prędkość podczas pomiarów OBSI to 72 km/h; dla pomiarów przy tej prędkości zaobserwowano najmniejszą średnią wariancję i najmniejszy wskaźnik P/T,
- d. przy ciśnieniu w oponie wynoszącym 34 psi (234 kPa) zaobserwowano najmniejszą średnią wariancję przez co zaleca się uznać to ciśnienie za nominalne,
- e. pionowa pozycja czujników nad powierzchnią nawierzchni ma znaczący wpływ na wyliczony poziom natężenia dźwięku i zaleca się nominalną wysokość 76 mm; współczynnik korekcyjny wyznaczono jako -0.052 dBA / 1 mm liczony od pozycji nominalnej,
- f. należy wprowadzić nowe wartości graniczne dla wskaźnika PI używanego podczas kontroli jakości danych pozyskanych podczas pomiarów.

3) SPB:

- a. znaczący wpływ na wyniki wartości współczynnika SPB ma liczebność badanej próby pojazdów oraz stan techniczny tych pojazdów,
- b. wykonanie badania metodą SPBI jest skrajnie utrudnione przy dużych wartościach natężenia ruchu bliskich przepustowości badanego odcinka,
- c. warunki terenowe wymagane do wykonania badania powodują trudność w wyznaczeniu poligonów badawczych na drogach w terenach o dużym zróżnicowaniu wysokości,
- d. najniższymi obliczonymi wartościami indeksu SPB charakteryzują się odcinki wykonane z mieszanek BBTM i PU.

4) Rura impedancyjna ROSSA

- a. badania współczynnika pochłaniania dźwięku za pomocą rury impedancyjnej wykonano dla nawierzchni charakteryzujących się zróżnicowanymi właściwościami akustycznymi. Najlepsze właściwości absorpcji dźwięku posiadały nawierzchnie z dużą zawartością porów: PA 11, PA 8 i OGFC 11,
- b. wyniki badań współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych w warunkach laboratoryjnych za pomocą stanowiska zaprojektowanego w IBDiM na pobranych próbkach z nawierzchni, wykazały się dużą zbieżnością z wynikami badań wykonanymi w warunkach „in situ”. Największe różnice wyników wystąpiły w przypadku nawierzchni charakteryzujących się wyższym współczynnikiem pochłaniania dźwięku (0.18 dla nawierzchni PA 8 i PA 11), a w pozostałych przypadkach były nie większe niż 0.1,
- c. obydwie metody (laboratoryjna oraz „in situ”) umożliwiają w zbliżony sposób ocenę nawierzchni drogowych pod kątem absorpcji dźwięku – jednego z najistotniejszych parametrów decydujących o ich hałaśliwości. Mogą być one stosowane zarówno w przypadku nawierzchni projektowanych (przy użyciu próbek wykonanych w laboratorium), jak i eksploatowanych („in situ” lub przy wykorzystaniu próbek). Za ich pomocą można także prowadzić ocenę wpływu zanieczyszczeń nawierzchni porowatych na utratę właściwości akustycznych.

5) Skaner 3D:

- a. koncepcja wykorzystania skanera 3D została sprawdzona w tym projekcie jako potencjalnie przydatne narzędzie do funkcjonalnego projektowania mm-a,
- b. niezbędne jest odpowiednie przygotowanie powierzchni próbki do miarodajnych pomiarów właściwości powierzchniowych.

Na podstawie badań i analizy wykonanych w Zadaniu 1 można sformułować następujące wnioski i zalecenia **naukowe**:

- 1) Ogólny wniosek naukowy - hałaśliwość nawierzchni jest pochodną wielu czynników jak i samego źródła - należy prowadzić prace w celu lepszego poznania zjawisk zachodzących na styku opony z nawierzchnią.
- 2) Należy prowadzić prace naukowo-badawcze w celu opracowania jednej miarodajnej metodyki pomiarów hałaśliwości i hałasu – obecne metody są komplementarne ale pożądana jest jedna uniwersalna metoda.
- 3) W zakresie interpretacji pomiarów z OBSI, zaleca się opracowanie bardziej dokładnej metody interpretacji wyników z sondy typu p-p w celu wyznaczenia natężenia źródła dźwięku.
- 4) W zakresie pomiarów metodą OBSI, zaleca się sprawdzenie możliwości wykorzystania innych sond natężenia dźwięku, jak np. sond typu p-u.
- 5) W zakresie pomiarów metodą CPX konieczne jest zbieranie kolejnych doświadczeń badawczych. Posłużą one do lepszego poznania metody oraz ew. opracowania nowej klasyfikacji hałaśliwości nawierzchni. Norma PN-EN ISO 11819-2:2017-06 wprowadziła wiele zmian, w stosunku do poprzedniej wersji. Zmieniła się liczba opon referencyjnych, z czterech na dwie. Tylko jedna z poprzednich opon (H1) jest zalecana w nowej normie. Wprowadzono korektę ze względu na twardość gumy opony referencyjnej. Stosuje się inne, nieraz znacznie wyższe wartości współczynników korekty dźwięku ze względu na temperaturę otoczenia. Te i inne zmiany powodują, że praktycznie na nowo należy zająć się interpretacją wartości uzyskiwanych na różnych rodzajach nawierzchni drogowych przy zastosowaniu metody CPX.
- 6) W zakresie skanera 3D, zaleca się dalsze prace w celu opracowania odpowiedniej metodyki przygotowywania powierzchni próbek do badań w warunkach laboratoryjnych; umożliwi to miarodajną ocenę właściwości powierzchni (w aspekcie pochłaniania dźwięku jak i właściwości przeciwpoślizgowych czy oporów toczenia) na etapie projektowania materiałów do warstwy wierzchniej nawierzchni drogowych. Wraz z opracowaniem metodyki przygotowywania próbek, prace naukowe muszą być również prowadzone w celu opracowania odpowiednich procedur interpretacji wyników pomiarów.
- 7) Podczas pomiarów hałaśliwości nawierzchni drogowych metodą SPBI należy zapewnić odpowiednią liczebność próby badanych pojazdów. Podczas obróbki danych pomiarowych należy kontrolować uzyskane wyniki i weryfikować je pod kątem stanu technicznego pojazdu.
- 8) Stan techniczny pojazdów wpływa na wyniki badania metodą SPBI.
- 9) Metoda SPBI wymaga ściśle przestrzegania zasad dotyczących określania poligonów pomiarowych w zakresie geometrii drogi i ukształtowania terenu.
- 10) Metoda SPBI może być stosowana na drogach o niskich wartościach natężenia ruchu drogowego (lub w trakcie godzin kiedy natężenia ruchu są niewielkie).

5. ZAŁĄCZNIKI

List załączników powiązanych z Raportem z Zadania 1:

Załącznik 1.2. Przegląd literatury

Załącznik 1.3. Pomiary i analiza do opracowania metodyki badania hałaśliwości urządzeniem OBSI

Załącznik 1.4. Wyniki oraz analiza badań tubą impedancji akustycznej w terenie i w laboratorium

Załącznik 1.5. Instrukcja metody do oceny hałaśliwości mieszanek mineralno-asfaltowych w warunkach laboratoryjnych

Załącznik 1.6. Wyniki pomiarów OBSI i CPX (z podziałem na Zadanie 1 i 4, oraz 2 3 5) - w wersji elektronicznej

Bibliografia:

- [1] Standard Method of Test for Measurement of Tire/Pavement Noise Using the On-Board Sound Intensity (OBSI) Method, AASHTO T 360-16.
- [2] Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: The close-proximity method, ISO 11819-2, 2017.
- [3] Acoustics - Temperature influence on tyre/road noise measurement - Part 1: Correction for temperature when testing with the CPX method, ISO/TS 13471-1:2017.
- [4] Standard Specification for P225/60R16 97S Radial Standard Reference Test Tire, ASTM F2493 – 14.
- [5] PN-EN ISO 11819-1. Akustyka. Pomiary wpływu nawierzchni dróg na hałas drogowy Część 1 Metoda statystyczna pomiaru przejazdu.
- [6] W. Gardziejczyk; P. Gierasimiuk; M. Motylewicz: Nawierzchnie o obniżonej hałaśliwości na polskich drogach - wyniki badań hałasu toczenia pojazdów samochodowych. Drogownictwo 2012, nr 12.
- [7] Jacobsen, F., & de Bree, H-E.: A comparison of two different sound intensity measurement principles. Acoustical Society of America. Journal 118-3 (2005) 1510-1517.
- [8] Sandberg U. and Ejsmont J. A.: Tyre/Road Noise Reference Book (INFORMEX Sweden), 2002.