



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

Przedmiot umowy pn:

Ochrona przed hałasem drogowym

Tytuł przedmiotu umowy*:

**Wyniki oraz analiza badań tubą impedancji akustycznej w terenie
i w laboratorium**

*zgodny z opisem, stanowiącym załącznik nr 1 do umowy nr DZP/RID-I-76/15/NCBR/2016
wytyczne/instrukcja/analiza/metodologia/wzór/rekomendacje

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

Data rozpoczęcia: 01.01.2016

Data zakończenia: 30.05.2018

Załącznik 1.4.

Wyniki oraz analiza badań tubą impedancji akustycznej w terenie i w laboratorium

Przygotowany przez:

Adam Zofka, IBDiM

Spis treści:

1.	Przegląd literatury	10
2.	Metodyka prowadzenia badań metodą z wykorzystaniem rury impedancyjnej	53
3.	Odcinki dróg, na których wykonano badania	72
4.	Badania – zakres i podstawowe wyniki	81
5.	Wnioski z badań.....	102
6.	Wytyczne wykonywania badań współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchni drogowych przy wykorzystaniu rury impedancyjnej	104
6.1.	Zakres	104
6.2.	Powiązane dokumenty.....	104
6.3.	Podstawowe oznaczenia i definicje, słowa kluczowe	105
6.4.	Wymagania dotyczące przyrządów pomiarowych.....	105
6.5.	Procedura wykonywania pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku za pomocą rury impedancyjnej.....	107
6.6.	Raportowane wyniki	111
7.	Bibliografia	113

Spis rysunków:

- Rys. 1.1. Schemat oddziaływania fali akustycznej na nawierzchnię drogową
- Rys. 1.2. Schemat konstrukcji nawierzchni porowatej oraz sposobu jej odwodnienia
- Rys. 1.3. Schematyczny przekrój poprzeczny przez nawierzchnię porowatą jedno i dwu warstwową
- Rys. 1.4. Współczynnik pochłaniania dźwięku dla materiałów o różnej zawartości wolnych przestrzeni [61]
- Rys. 1.5. Współczynnik pochłaniania dźwięku dla różnych typów nawierzchni drogowych [62]
- Rys. 1.6. Szkic prezentujący różnicę pomiędzy porami zamkniętymi i otwartymi w strukturze materiału
- Rys. 1.7. Wizualne przedstawienie efektu krętości (tortuosity) w materiałach porowatych na podstawie różnicy długości drogi przebytej przez falę dźwiękową w materiale do długości odcinka, na którym droga ta jest mierzona
- Rys. 1.8. Schemat przedstawiający rurę impedancyjną z dwoma mikrofonami, lokalizację źródła dźwięku i badanej próbki oraz podstawowe odległości [76]
- Rys. 1.9. Schemat rozmieszczenia mikrofonów pomiarowych w metodzie trójmikrofonowej [76]
- Rys. 1.10. Schemat układu pomiarowego wykorzystywanego do pomiarów wykonywanych techniką dwu-mikrofonową [89]
- Rys. 1.11. Schemat układu pomiarowego używanego do pomiarów sprawdzających wykonywanych za pomocą metody opisanej w [89]
- Rys. 1.12. Porównanie wyników pomiarów impedancji akustycznej próbki umieszczonej w odległości L_0 od końca rury impedancyjnej równej 0.1 m do wyników teoretycznych [89]
- Rys. 1.13. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych za pomocą mikrofonów o średnicy $\frac{1}{2}$ oraz $\frac{1}{4}$ przy użyciu próbki wykonanej z pianki o grubości 1” w ramach artykułu [89]
- Rys. 1.14. Przykładowe wyniki pomiarów Współczynnik pochłaniania dźwięku otrzymany z pomiarów wykonanych za pomocą rury impedancyjnej [92]
- Rys. 1.15. Krzywe uziarnienia badanych próbek nawierzchni [74]
- Rys. 1.16. Wpływ zawartości wolnych przestrzeni w strukturze nawierzchni na współczynnik pochłaniania dźwięku przy zachowaniu takiej samej ilości porów otwartych [74]
- Rys. 1.17. Wpływ udziału procentowego otwartych porów (połączonych wewnątrz struktury) na pochłanianie dźwięku przez nawierzchnie drogowe przy takiej samej wielkości maksymalnej kruszywa [74]
- Rys. 1.18. Wpływ wielkości maksymalnej kruszywa na pochłanianie dźwięku przez nawierzchnie drogowe [74]
- Rys. 1.19. Wpływ różnego typu nawierzchni o maksymalnej średnicy kruszywa równej 12.5 mm na współczynnik pochłaniania dźwięku [74]
- Rys. 1.20. Wpływ różnego typu nawierzchni o maksymalnej średnicy kruszywa równej 9.5 mm na współczynnik pochłaniania dźwięku [74]
- Rys. 1.21. Wpływ grubości nawierzchni na pochłanianie dźwięku [74]
- Rys. 1.22. Schemat układu pomiarowego wykorzystywanego do pomiarów przez Utsuno [103]
- Rys. 1.23. Wyniki pomiarów impedancji charakterystycznej i stałej propagacji dźwięku przy użyciu próbki z wełny szklanej oraz pozostawieniu przestrzeni powietrznych

- o długościach odpowiednio: (20 mm, 40 mm), (20 mm, 70 mm), (20 mm, 100 mm), (40 mm, 70 mm), (40 mm, 100 mm) i (70 mm, 100 mm) [103].
- Rys. 1.24. Wyniki pomiarów impedancji charakterystycznej przy użyciu próbki z wełny szklanej oraz pozostawieniu przestrzeni powietrznych o długościach odpowiednio: (20 mm, 150 mm), (20 mm, 170 mm), (40 mm, 150 mm), (40 mm, 170 mm) i (70 mm, 170 mm) [103].
- Rys. 1.25. Schemat przedstawiający parametry mierzone za pomocą metody dwóch źródeł [109]
- Rys. 1.26. Konfiguracje układu głośników w metodzie dwóch źródeł [109]
- Rys. 1.27. Wyniki pomiarów złożonej liczby falowej wykonanych za pomocą metody dwóch źródeł i dwóch przestrzeni dla materiału wysoko pochłaniającego dźwięk (poliester) [109]
- Rys. 1.28. Wyniki pomiarów złożonej impedancji akustycznej wykonanych za pomocą metody dwóch źródeł i dwóch przestrzeni dla materiału wysoko pochłaniającego dźwięk (poliester) [109]
- Rys. 1.29. Graficzne przedstawienie zależności ciśnienia akustycznego fali padającej i odbitej od próbki (a), tylko fali padającej na badaną próbkę (b) oraz tylko fali odbitej od badanej próbki (c) [111].
- Rys. 1.30. Schemat układu pomiarowego wykorzystywanego do pomiarów parametrów akustycznych materiałów za pomocą metody PP-system [111]
- Rys. 1.31. Wyniki pomiarów wykonanych za pomocą metody opisanej przez Lobato i Carneiro [111] przy użyciu algorytmów Q-term i PWA w porównaniu do wyników otrzymanych z pomiarów wykonanych rurą impedancyjną oraz otrzymanych za pomocą metody Delany-Bazleya [118]
- Rys. 1.32. Przykładowe wyniki tomografii komputerowej badanych próbek przedstawiające zawartość kruszywa, lepiszcza i wolnych przestrzeni w funkcji głębokości [61].
- Rys. 1.33. Współczynnik pochłaniania dźwięku badanych próbek [61]
- Rys. 2.1. Przykład typowego montażu mikrofonu pomiarowego w rurze impedancyjnej o przekroju kołowym (ISO 10534-2, 1998)
- Rys. 2.2. Schematyczne rozmieszczenie mikrofonów pomiarowych w rurze impedancyjnej (ISO 10534-2, 1998)
- Rys. 2.3. Schemat układu pomiarowego wykorzystywanego do pomiarów wykonywanych za pomocą metody opisanej w (ISO 10534-2, 1998).
- Rys. 2.4. Schemat układu pomiarowego wykorzystywanego w metodzie opisanej w normie (ISO 13472-2, 2010)
- Rys. 2.5. Szkic przyrządu uszczelniającego rurę impedancyjną z badaną powierzchnią drogową (ISO 13472-2, 2010).
- Rys. 4.1. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchni AC 11 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie – pomiar „in situ”
- Rys. 4.2. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchni OGFC 11 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie – pomiar „in situ”
- Rys. 4.3. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchni PA 11 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie – pomiar „in situ”
- Rys. 4.4. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchni OGFC 8 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie – pomiar „in situ”
- Rys. 4.5. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchni SMA 8 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie – pomiar „in situ”

- Rys. 4.6. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchni PA 8 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie – pomiar „in situ”
- Rys. 4.7. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchni SMA 5 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie – pomiar „in situ”
- Rys. 4.8. Zbiorcze zestawienie wyników pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku w warunkach „in situ” dla nawierzchni zastosowanych na odcinku badawczym w Bolimowie
- Rys. 4.9. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych na próbkach nawierzchni AC 11 pobranych z odcinka badawczego w Bolimowie
- Rys. 4.10. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych na próbkach nawierzchni OGFC 11 pobranych z odcinka badawczego w Bolimowie
- Rys. 4.11. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych na próbkach nawierzchni PA 11 pobranych z odcinka badawczego w Bolimowie
- Rys. 4.12. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych na próbkach nawierzchni OGFC 8 pobranych z odcinka badawczego w Bolimowie
- Rys. 4.13. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych na próbkach nawierzchni SMA 8 pobranych z odcinka badawczego w Bolimowie
- Rys. 4.14. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych na próbkach nawierzchni PA 8 pobranych z odcinka badawczego w Bolimowie
- Rys. 4.15. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych na próbkach nawierzchni SMA 5 pobranych z odcinka badawczego w Bolimowie
- Rys. 4.16. Zbiorcze zestawienie wyników pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku w warunkach laboratoryjnych wykonanych na próbkach pobranych z odcinka badawczego w Bolimowie
- Rys. 4.17. Porównanie wyników badań współczynnika pochłaniania dźwięku „in situ” i w laboratorium dla nawierzchni AC 11 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie
- Rys. 4.18. Porównanie wyników badań współczynnika pochłaniania dźwięku „in situ” i w laboratorium dla nawierzchni OGFC 11 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie
- Rys. 4.19. Porównanie wyników badań współczynnika pochłaniania dźwięku „in situ” i w laboratorium dla nawierzchni PA 11 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie
- Rys. 4.20. Porównanie wyników badań współczynnika pochłaniania dźwięku „in situ” i w laboratorium dla nawierzchni OGFC 8 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie
- Rys. 4.21. Porównanie wyników badań współczynnika pochłaniania dźwięku „in situ” i w laboratorium dla nawierzchni SMA 8 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie
- Rys. 4.22. Porównanie wyników badań współczynnika pochłaniania dźwięku „in situ” i w laboratorium dla nawierzchni PA 8 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie
- Rys. 4.23. Porównanie wyników badań współczynnika pochłaniania dźwięku „in situ” i w laboratorium dla nawierzchni SMA 5 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie
- Rys. 4.24. Wyniki pomiarów hałasu wykonanych metodą CPX przy prędkości 40 km/h na odcinku testowym w Bolimowie [132]

- Rys. 4.25. Wyniki pomiarów hałasu wykonanych metodą CPX przy prędkości 50 km/h na odcinku testowym w Bolimowie [132]
- Rys. 4.26. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonane na próbce nawierzchni SMA 8 S z asfaltem 45/80-65 CR zagęszczonej w laboratorium w prasie żyratorowej – pomiar wykonany w warunkach laboratoryjnych
- Rys. 4.27. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonane na próbce nawierzchni SMA 8 S z asfaltem 45/80-65 CR pobranej z warstwy ścieralnej nawierzchni ul. Przyczółkowej w Warszawie – pomiar wykonany w warunkach laboratoryjnych
- Rys. 4.28. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych na odcinku o nawierzchni SMA 5 w ciągu drogi wojewódzkiej nr 780 w Liskach
- Rys. 4.29. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych na odcinku o nawierzchni BBTM 8 w ciągu drogi wojewódzkiej nr 774 w Kryspinowie
- Rys. 4.30. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych na odcinku o nawierzchni BBTM 8 w ciągu drogi wojewódzkiej nr 964 w Wieliczce
- Rys. 4.31. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych na nawierzchni toru testowego Ułęż pod Dęblinem
- Rys. 6.1. Szkic stanowiska do pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku w warunkach laboratoryjnych

Spis tablic:

Tablica 1.1. Charakterystyka badanych mieszanek [74]

Tablica 1.2. Wyniki testu wytrzymałości na rozciąganie przeprowadzonych przez Knabbena dla wszystkich badanych próbek [74]

Tablica 1.3. Wyniki testu Cantabro dla próbek nawierzchni porowatej modyfikowanej gumą oraz nawierzchni asfaltowej z otwartym kruszywem modyfikowanej gumą przeprowadzonych przez Knabbena [74]

Tablica 1.4. Zawartość wolnych przestrzeni i stopień ich połączenia w badanych próbkach [61]

Tablica 1.5. Zestawienie wartości szczytowych współczynnika pochłaniania dźwięku badanych próbek oraz częstotliwości, w których one występują [61]

Spis fotografii:

- Fot. 1.1. Widok prototypu układu przyrządów PP-system do pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku za pomocą metody opisanej przez Lobato i Carneiro [111]
- Fot. 1.2. Układ pomiarowy wykorzystany do pomiarów powierzchniowej impedancji akustycznej metodą P-U wraz z badaną próbką nawierzchni [61]
- Fot. 2.1. Widok rury impedancyjnej użytej do wykonania pomiarów współczynnika pochłaniania nawierzchni
- Fot. 2.2. Sposób montażu mikrofonów pomiarowych w rurze impedancyjnej – widok wnętrza urządzenia.
- Fot. 2.3. Widok i sposób montażu głośnika w rurze impedancyjnej
- Fot. 2.4. Widok rury impedancyjnej wykorzystywanej do pomiarów współczynnika pochłaniania nawierzchni drogowych wraz z dodatkowym wyposażeniem
- Fot. 2.5. Widok otworu wentylacyjnego w mikrofonie pomiarowym zapobiegającego powstawaniu statycznego ciśnienia we wnętrzu rury impedancyjnej [127]
- Fot. 2.6. Widok portów mikrofonowych wykonanych w ściśle określonych odległościach od badanej nawierzchni drogowej w urządzeniu wykorzystanym do wykonywania pomiarów w ramach niniejszego opracowania.
- Fot. 2.7. Stalowa płytką referencyjna o grubości ok. 10 mm używana do pomiarów kalibracyjnych
- Fot. 2.8. Widok połączenia rury impedancyjnej, łącznika „in situ” i referencyjnej płytki stalowej w trakcie wykonywania pomiarów kalibracyjnych
- Fot. 2.9. Widok połączenia rury impedancyjnej, łącznika „in situ” i referencyjnej płytki stalowej w trakcie wykonywania pomiarów kalibracyjnych
- Fot. 2.10. Widok analizatora dźwięku używanego do wykonania pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku w ramach opracowania.
- Fot. 2.11. Widok przykładowego uszczelnacza (kit sanitarny), który może zostać używany do uszczelnienia układu pomiarowego
- Fot. 2.12. Sposób naniesienia kitu sanitarnego na łącznik „in situ” w celu uszczelnienia układu pomiarowego
- Fot. 2.13. Widok łącznika „in situ” szczelnie zamontowanego na badanej nawierzchni drogowej za pomocą kitu sanitarnego
- Fot. 2.14. Widok pozostałości uszczelnacza po wykonaniu pomiarów i zdemontowaniu łącznika „in situ”
- Fot. 3.1. Widok doświadczalnego odcinka w Bolimowie pod Warszawą
- Fot. 3.2. Widok badanej nawierzchni drogowej wykonanej z mieszanki mineralno -asfaltowej typu AC 11
- Fot. 3.3. Widok badanej nawierzchni drogowej wykonanej z mieszanki o otwartej strukturze OGFC 11
- Fot. 3.4. Widok badanej nawierzchni drogowej wykonanej z asfaltu porowatego PA 11
- Fot. 3.5. Widok badanej nawierzchni drogowej wykonanej z mieszanki o otwartej strukturze OGFC 8
- Fot. 3.6. Widok badanej nawierzchni drogowej wykonanej z mieszanki mastyksowo – grysowej SMA 8
- Fot. 3.7. Widok badanej nawierzchni drogowej wykonanej z asfaltu porowatego PA 8
- Fot. 3.8. Widok badanej nawierzchni drogowej wykonanej z mieszanki mastyksowo – grysowej SMA 5

- Fot. 3.9. Widok pobranych próbek w miejscu prowadzenia pomiarów na odcinku badawczym w Bolimowie
- Fot. 3.10. Widok lokalizacji rury impedancyjnej w trakcie wykonywania badań w stosunku do miejsca, w którym pobrano próbki nawierzchni.
- Fot. 3.11. Sprzęt pomiarowy użyty do wykonania pomiarów na odcinku testowym (tor Ułęż pod Dęblinem) – metody OBSI, CPX i rury impedancyjnej.
- Fot. 4.1. Przykładowa lokalizacja punktów, w których został wykonany pomiar współczynnika pochłaniania dźwięku na wybranej nawierzchni zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie koło Warszawy.
- Fot. 4.2. Widok próbek nawierzchni pobranych z odcinka badawczego w Bolimowie, na których wykonano pomiary w warunkach laboratoryjnych.
- Fot. 4.3. Widok stanowiska pomiarowego wykorzystanego do badania współczynnika pochłaniania dźwięku przez nawierzchnie drogowe w warunkach laboratoryjnych
- Fot. 6.1. Widok przykładowego zestawu pomiarowego wykorzystywanego do pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku w warunkach „in situ”
- Fot. 6.2. Przykładowe ustawienie sprzętu pomiarowego z użyciem materiału silnie pochłaniającego dźwięk w celu wykonania kalibracji mającej na celu zminimalizowanie różnic w charakterystykach amplitud i faz mikrofonów pomiarowych [127]
- Fot. 6.3. Prawidłowe połączenie łącznika „in situ” i stalowej płytki w celu wykonania kalibracji urządzenia pomiarowego [127]
- Fot. 6.4. Montaż łącznika „in situ” na badanej nawierzchni lub próbce (w przypadku badań wykonywanych w laboratorium) [127]

1. PRZEGLĄD LITERATURY

Hałas drogowy jest najbardziej uciążliwym źródłem dźwięku w przestrzeniach miejskich. Może on być zredukowany na różnych poziomach: w strefie emisji dźwięku (nawierzchnie), w strefie propagacji (ekrany akustyczne) oraz u odbiorcy (izolacja akustyczna okien). Ograniczanie hałasu generowanego na styku kół samochodów i nawierzchni drogi jest często najtańszym rozwiązaniem powodującym zmniejszenie oddziaływania akustycznego [1], [2]. Ponadto należy pamiętać o stanowisku Europejskiego Komitetu Regionów (European Committee of the Regions) w sprawie Dyrektywy dotyczącej hałasu środowiskowego [3], która także potwierdza, że najlepszym i pożądanym sposobem redukcji hałasu jest działanie u źródła.

Wiele pozycji literaturowych opisuje mechanizmy generowania hałasu drogowego oraz związanych z nim parametrów [4], [5]. Najistotniejszymi z nich są tekstura nawierzchni drogi [6] oraz współczynnik pochłaniania dźwięku [7], [8]. Parametry te są natomiast ściśle powiązane z takimi właściwościami materiałów, jak skład granulometryczny kruszywa, zawartość lepiszcza i porowatość. Wiele badań przeprowadzonych w ostatnich latach pokazuje związek pomiędzy charakterystyką powierzchni drogi i poziomem hałasu [9]–[11]. Opracowano także modele akustyczne, które pozwalają pokazać związek pomiędzy powierzchnią drogi oraz hałasem toczenia [12]–[14].

Źródłem generującym hałas drogowy jest przejeżdżający samochód lub potok samochodów. Można je podzielić na dwie grupy elementarnych źródeł składowych, do których należą [15]–[17]:

- źródła główne: hałas pracującego silnika i zespołu napędowego, hałas toczących się kół po nawierzchni drogi,
- źródła poboczne: hałas aerodynamiczny powstający w skutek zawirowań powietrza w czasie ruchu pojazdu, hałas luźno zamocowanych elementów pojazdu (dotyczy w szczególności pojazdów ciężarowych).

Dodatkowo do źródeł pobocznych można zaliczyć (choć występują one incydentalnie) hałas docierający z wnętrza pojazdu pasażerskiego (np. głośno ustawione radio) lub hałas docierający z wnętrza przestrzeni ładunkowej (nieprawidłowo zamocowany towar). Występowanie tego rodzaju hałasu może być związane z przeznaczeniem lub lokalizacją drogi [15].

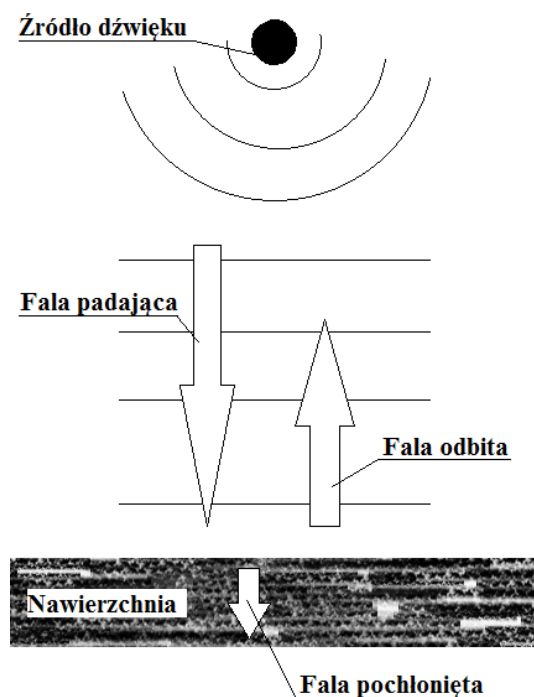
Liczna literatura [16]–[21] wskazuje, że te źródła dźwięku, które są zaliczone do grupy głównej są czynnikami znaczącymi z punktu widzenia emisji hałasu drogowego. Zależne są one od rodzaju uczestników ruchu, rodzaju jazdy (przyspieszanie, jazda z utrzymaniem stałej prędkości czy zwalnianie). Hałas generowany przez tą grupę źródeł rośnie wraz z prędkością pojazdów, przy czym przy prędkościach niższych od 50 km/h dominującym jest hałas pochodzący od silnika pojazdu, natomiast przy prędkościach wyższych dominuje hałas toczenia kół po nawierzchni drogi [16], [22]–[24].

Hałas toczenia jest generowany w najbliższym otoczeniu opon pojazdów i nawierzchni drogi i może on być, poprzez różne działania, ograniczany nie tylko przez producentów opon, ale także przez zarządzających drogami. Ten rodzaj hałasu jest generowany przez dwie grupy zjawisk [5], [25]:

- zjawiska mechaniczne, które są związane z drganiami opony i jej elementów (m.in.: drgania promieniowe i styczne elementów bieżnika opony, oddziaływania adhezyjne, zjawisko stick – slip, drgania ścian bocznych opony, drgania opasania),
- zjawiska aerodynamiczne, które są związane z dynamiką ośrodka gazowego w rejonie styku opony z nawierzchnią (m.in.: zasysanie i wypompowywanie powietrza przez bieżnik opony, powstawanie rezonansu powietrza w zespole kanałków tworzonych przez rowki opony i nierówności w nawierzchniach, efekt rogu, rezonans Helmholtza, turbulencje powietrza powstające na skutek ruchu opony).

Jednym ze skutecznych działań w obszarze emisji dźwięku, które jednocześnie powinno być stosowane jako jedno z pierwszych zadań w zakresie ochrony przeciwdźwiękowej, jest zastosowanie tzw. cichych nawierzchni, które bezpośrednio wpływa na obniżenie hałasu toczenia. Są to działania alternatywne dla wciąż popularnych w Polsce ekranów akustycznych oraz są one powszechnie stosowane w wielu krajach europejskich [26]. Zastosowanie tych technologii (szerzej opisanych w dalszej części rozdziału) przy wykonywaniu nawierzchni drogowych umożliwia obniżenie emisji hałasu komunikacyjnego, a szczególnie, dominującego przy wyższych prędkościach, hałasu toczenia [16], [22]–[24]. Stosowanie cichych nawierzchni na drogach o wyższych prędkościach ruchu powoduje zatem większą redukcję oddziaływania akustycznego niż w przypadku, kiedy prędkość pojazdów jest mniejsza niż 50 km/h. Niemniej przy prędkościach mniejszych należy się również spodziewać efektu łagodzenia wpływu hałasu komunikacyjnego na środowisko. Będzie on jednak mniejszy niż przy wyższych prędkościach i w niektórych przypadkach może polegać bardziej na zmianie charakterystyki częstotliwościowej (w kierunku dźwięku o niższej częstotliwości) niż obniżeniu poziomu dźwięku mierzonego w całym analizowanym zakresie. Skalę możliwej redukcji poziomu hałasu po zastosowaniu cichych nawierzchni szerzej opisano m.in. w [27], [28].

Aby zbadać mechanizmy tłumienia dźwięku przez nawierzchnie drogowe należy przyjąć założenie, że fala akustyczna oddziałująca na nawierzchnie drogową w związku z ruchem pojazdów jest falą kulistą oraz źródłem tej fali jest punkt drgający o bliżej nie określonej lokalizacji. Można także przyjąć założenie, że propagacja fali kulistej w pewnej odległości od źródła dźwięku może być traktowana jak fala płaska [21]. Dodatkowo nawierzchnię drogową można traktować jak przegrodę akustyczną od której fala dźwiękowa w części odbija się oraz w części zostaje pochłonięta przez nawierzchnię [15]. W sposób schematyczny przedstawiono to na rys. 1.1 poniżej [15], [29].



Rys. 1.1. Schemat oddziaływania fali akustycznej na nawierzchnię drogową

Struktura i rodzaj ośrodka wewnętrznego, którym w tym przypadku jest nawierzchnia drogowa, mają wpływ na pochłanianie fali dźwiękowej propagowanej na powierzchnię drogi, co prowadzi do bezpośredniego obniżenia poziomu hałasu. Skuteczność pochłaniania określa się za pomocą bezwymiarowego współczynnika pochłaniania dźwięku α . Przyjmuje on wartości z przedziału od 0 do 1, przy czym 0 oznacza całkowite odbicie fali dźwiękowej, a 1 całkowite jej pochłonięcie, co w warunkach rzeczywistych nie występuje [29], [30].

W przypadku próbek wykonanych z nawierzchni zamkniętych, padająca fala dźwiękowa jest praktycznie w całości odbijana. Tylko niewielka część energii akustycznej jest pochłaniana, w przeciwieństwie do próbek wykonanych z nawierzchni porowatej. W tym przypadku część energii akustycznej jest zamieniana w ciepło w strukturze nawierzchni. Nawierzchnie porowate są w stanie pochłoniąć w pewnym stopniu zarówno dźwięk generowany przez silnik samochodowy, jak i ograniczają hałas powstający na styku kół pojazdów i nawierzchni drogi. Należy natomiast dodać, że pochłanianie dźwięku jest zapewniane przez tzw. pory otwarte (o czym szerzej napisano w dalszej części rozdziału). Te przestrzenie powietrzne, które nie są ze sobą wewnątrznie połączone, nie biorą udziału w tym zjawisku [1], [31].

Nawierzchnie drogowe muszą być konstruowane w taki sposób, aby spełnić wymagania bezpieczeństwa i komfortu użytkowników oraz aby ruch drogowy nie był zbyt uciążliwy dla otoczenia. W związku z tym powinny one charakteryzować się odpowiednim współczynnikiem tarcia, równością oraz powinny zapewniać skuteczne odprowadzanie wody z powierzchni jezdni [29]. Jak wspomniano wcześniej, uciążliwości związane z funkcjonowaniem tras komunikacyjnych dotyczą przede wszystkim oddziaływania hałasu, którego jednym z głównych źródeł jest hałas toczenia generowany na styku kół pojazdów i nawierzchni drogi.

Jednym z głównych czynników wpływających na hałas drogowy jest także stan techniczny nawierzchni drogowych [32]. Hałas generowany wskutek przejazdów

samochodów po zniszczonej, skoleinowanej i popękanej nawierzchni jest większy niż w przypadku, gdy nawierzchnia drogi jest w dobrym stanie technicznym. Jest to jeden z parametrów, który powinien być brany pod uwagę przy doborze działań mających na celu zmniejszenie oddziaływania akustycznego. Przy wymianie starej nawierzchni powinno się rozważyć zastosowanie cichej nawierzchni, o ile jest to konieczne z punktu widzenia ochrony terenów lub budynków sąsiadujących z drogą. Typowe nawierzchnie drogowe (m.in. z betonu asfaltowego, betonu cementowego, mastyksu grysowego SMA czy asfaltu lanego) nie są doskonałe pod względem ograniczania tego typu hałasu [15], [29]. Z tego względu stosuje się nawierzchnie posiadające szczególne cechy, które wpływają na redukcję oddziaływania akustycznego.

Ciche nawierzchnie można podzielić na dwie grupy biorąc pod uwagę ich strukturę. Są to:

- nawierzchnie otwarte (porowate),
- nawierzchnie szczelne (o zamkniętej strukturze).

Powszechnie używana jest także poniższa klasyfikacja nawierzchni (nieco bardziej szczegółowa) pod względem zawartości wolnych przestrzeni [33]:

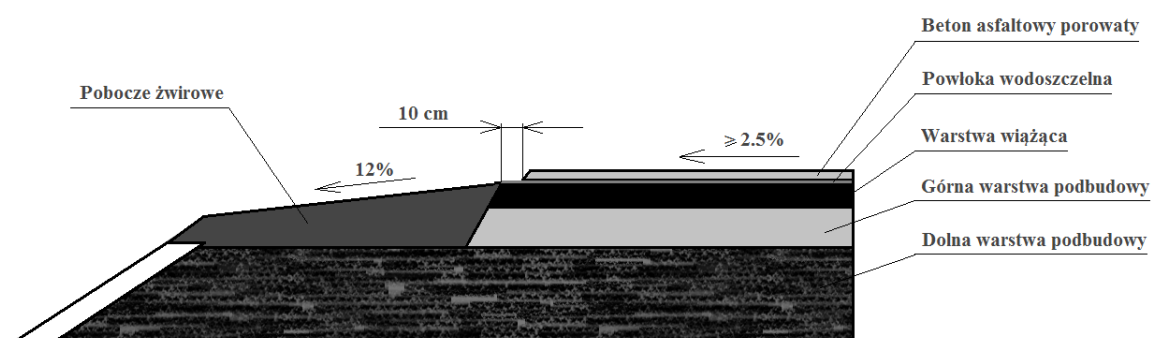
- Szczelne (dense) – zawartość wolnych przestrzeni mniejsza od 9%,
- Pół-szczelne (semi-dense) – zawartość wolnych przestrzeni pomiędzy 9% i 14%,
- Pół-otwarte (semi-open) – zawartość wolnych przestrzeni pomiędzy 14 i 19%,
- Porowate (porous) – zawartość wolnych przestrzeni większa od 19%.

Wielu naukowców prowadziło badania nad różnymi typami nawierzchni w celu oceny ich zachowania pod względem pochłaniania dźwięku [34]–[37]. Liczne publikacje wskazują, że nawierzchnie porowate są uważane za wiodące pod względem redukcji hałasu z uwagi na ich cechy, które powodują ograniczenie hałasu generowanego w związku z zjawiskami aerodynamicznymi występującymi na styku kół pojazdów [5], [38]. Główne cechy nawierzchni porowatych są reprezentowane w ich nazewnictwie, które stosuje się w celu ich odróżnienia od nawierzchni „klasycznych” [29]. W języku angielskim są one nazywane „porous asphalt” (PA) [39] i „porous pavements” [40] co podkreśla fakt dużej zawartości wolnych przestrzeni w ich strukturze. W języku francuskim nawierzchnie te są nazywane „asphalt drenau” [41], a w języku niemieckim „Dränasphalt” lub „Drainasphalt” (DA) [42], [43], co z kolei podkreśla efekt wodoprzepuszczalności uzyskiwanej dzięki nim. W języku niemieckim są także używane nazwy „offenporige Deckschichten” (nawierzchnie o otwartych porach) [44], [45] lub „pflisterne Deckschichten” (szepczące nawierzchnie) [46], co z kolei podkreśla ich właściwości akustyczne związane z pochłanianiem dźwięku. W języku polskim używane są natomiast nazwy takie jak: „betony asfaltowe porowate” [47]–[50], „mieszanki asfaltowe porowate” [51], „nawierzchnie drenujące” [52] czy „nawierzchnie drenażowe” i „nawierzchnie porowate” [53].

W warunkach polskich za nawierzchnie porowate uważa się takie nawierzchnie, w których zawartość wolnych przestrzeni (tzw. porów) jest większa od 15% - są to nawierzchnie półotwarte i porowate wg klasyfikacji [33]. Dzięki tej własności, powietrze na styku opony i jezdni zostaje „wciskane” wewnątrz warstwy ścieralnej, co powoduje redukcję hałasu

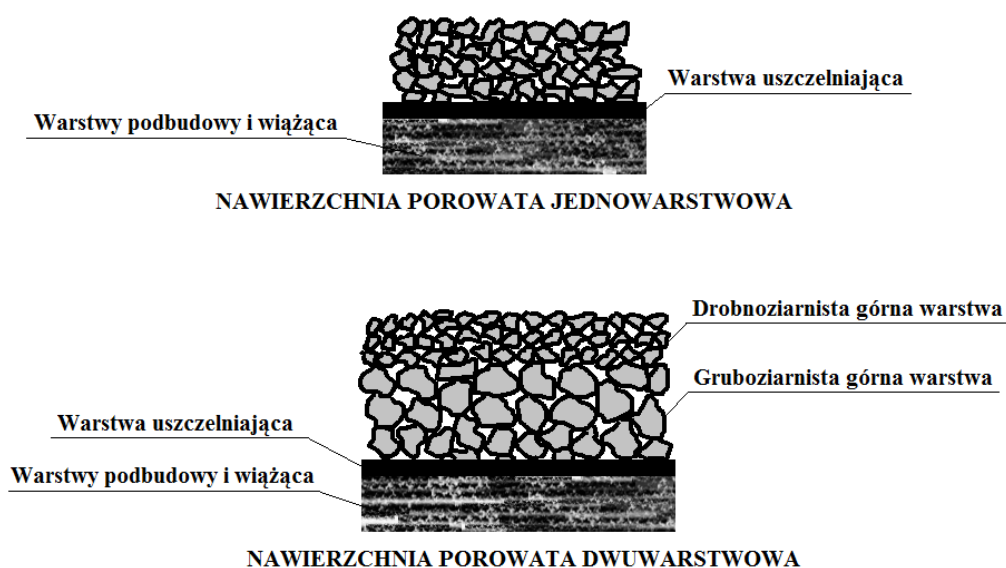
toczenia wg niektórych źródeł nawet o 6.5 dB w przypadku samochodów osobowych oraz o około 4.5 dB w przypadku samochodów ciężarowych [54]. Inne źródła podają, że nowopolożone nawierzchnie porowate potrafią zredukować hałas o 3 – 5 dB (poziom dźwięku A) w porównaniu do nawierzchni nieporowatych [55]. Mechanizm redukcji hałasu przez te nawierzchnie polega także na pochłanianiu części hałasu pochodzącego od korpusu przejeżdżającego samochodu [5], co jest związane z zawartością wolnych przestrzeni w ich strukturze wewnętrznej [56], [57]. Dzięki swojej charakterystycznej konstrukcji umożliwiają one także skuteczne odprowadzanie wody do wnętrza nawierzchni, a następnie pod nią, na pobocze drogi [15], [29]. Do negatywnych cech możemy natomiast zaliczyć zapychanie wolnych przestrzeni przez zanieczyszczenia, co powoduje spadek ich właściwości akustycznych. [58].

Rozwiązania konstrukcyjne nawierzchni porowatych polegają na zastosowaniu wierzchniej warstwy (lub warstw) ściernistej z betonu asfaltowego porowatego, która jest oddzielona od pozostałych warstw (wiążącej i podbudowy) warstwą wodoszczelną. Taka konstrukcja powoduje, że woda jest odprowadzana (dzięki spadkowi poprzecznemu) po powierzchni warstwy wodoszczelnej wewnątrz struktury nawierzchni [29]. Przedstawiono to w sposób schematyczny na rys. 1.2 poniżej [29], [59], [60].



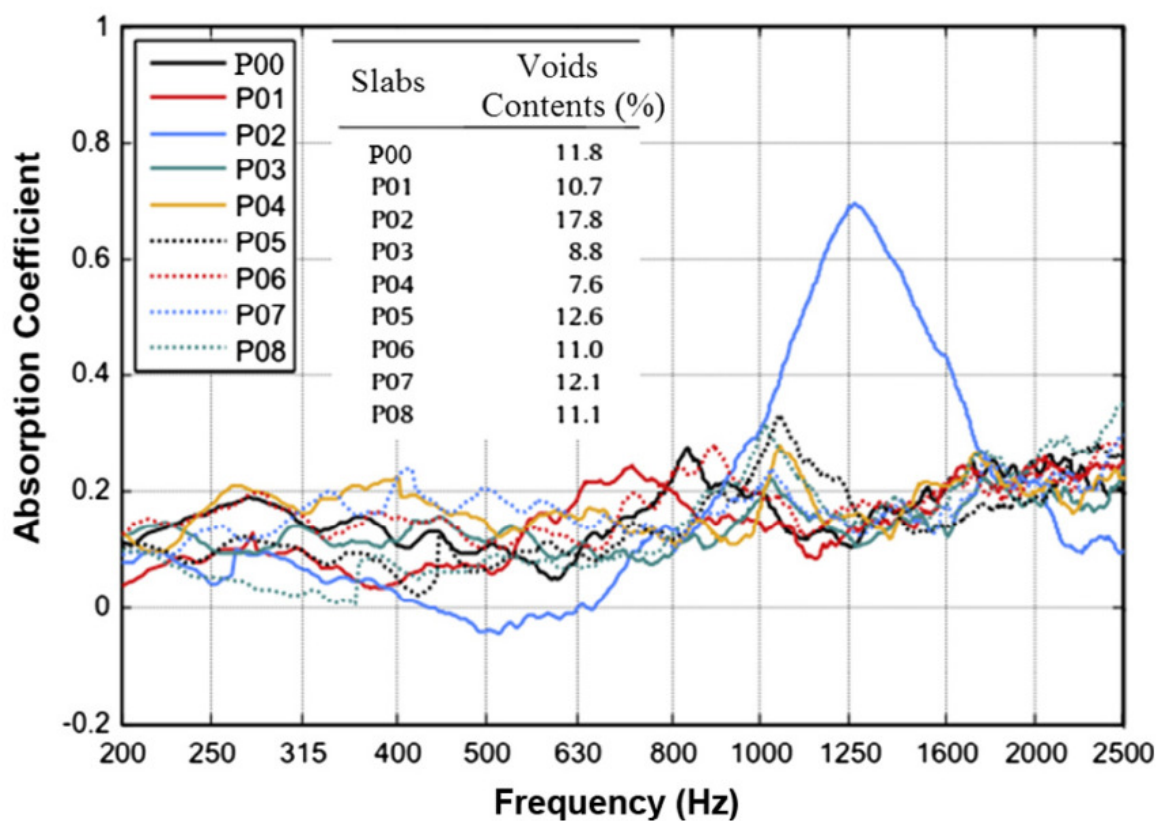
Rys. 1.2. Schemat konstrukcji nawierzchni porowatej oraz sposobu jej odwodnienia

W zależności od oczekiwanego efektu (dobre odprowadzanie wody, dobre właściwości akustyczne lub maksymalne właściwości drenażowe z wymaganym zakresem tłumienia hałasu) stosuje się nawierzchnie o jednej lub dwóch warstwach porowatych, co przedstawiono na rys. 1.3 [29].

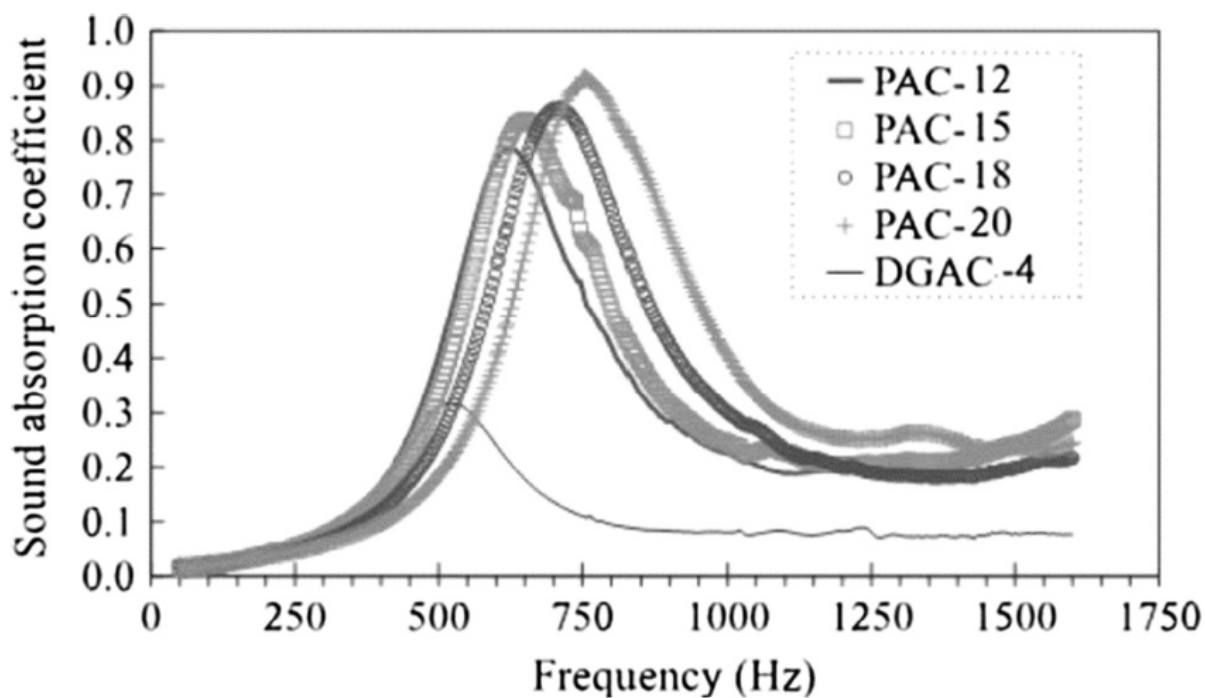


Rys. 1.3. Schematyczny przekrój poprzeczny przez nawierzchnię porowatą jedno i dwu warstwową

Poniżej na rys. 1.4 i rys. 1.5 przedstawiono wykresy przedstawiające zależności wolnych przestrzeni od właściwości pochłaniania dźwięku [61], [62] przy czym np. oznaczenie PAC-12 oznacza porowaty beton asfaltowy (porous asphalt concrete) z udziałem wolnych przestrzeni na poziomie 12%, a DGAC ścisły beton asfaltowy (dense-graded asphalt concrete).



Rys. 1.4. Współczynnik pochłaniania dźwięku dla materiałów o różnej zawartości wolnych przestrzeni [61]



Rys. 1.5. Współczynnik pochłaniania dźwięku dla różnych typów nawierzchni drogowych [62]

Liczne pozycje literaturowe [5], [63], [64] wskazują, że w celu ochrony przeciwhałasowej ważne jest, aby największe wartości współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchni drogowych znajdowały się jak najbliżej częstotliwości 1000 Hz. Wynika to z faktu, że dominujące wartości poziomu dźwięku pochodzącego od interakcji kół pojazdów i nawierzchni znajdują się w zakresie od 800 Hz do 1000 Hz, natomiast aż 70% poziomu dźwięku ważonego przez korekcję A jest generowane w częstotliwości środkowej pasma 1/3 oktawowego równego właśnie 1000 Hz [65].

Mechanizm działania materiałów porowatych polega na utracie energii fali akustycznej poprzez zwiększone odbicia dźwięku wewnątrz struktury porowatej oraz poprzez tarcie cząsteczek powietrza o ścianki porów, co powoduje zamianę energii akustycznej na energię cieplną [66]. W przypadku nawierzchni drogowych porowatych uważa się, że za pochłanianie dźwięku odpowiadają dwa mechanizmy [1], [31]. Pierwszy z nich polega na zwiększeniu ssania i zmniejszeniu pompowania powietrza na powierzchni drogi i kół pojazdów – zjawisko aerodynamiczne zachodzące przy ruchu koła po drodze jest w tym przypadku ułatwione. Powoduje to również wzrost powierzchni kontaktu opony z nawierzchnią. Drugi mechanizm polega na odbijaniu i rozpraszaniu fali dźwiękowej wewnątrz struktury nawierzchni powodując zwiększenie pochłaniania dźwięku, co jest spowodowane tarcie wewnętrzne.

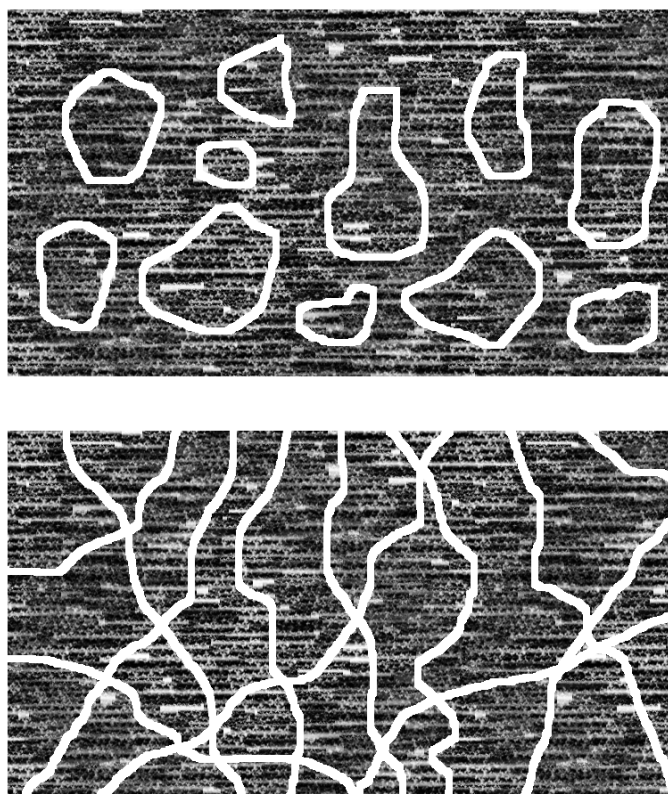
Wiele modeli akustycznych zostało opracowanych w celu opisanie propagacji fali akustycznej w ośrodkach porowatych [66]–[68]. Modele te można podzielić na dwa typy: opisujące własności mikrostrukturalne oraz opisujące zjawiska fizyczne [1], [2]. Stosowanie modeli pierwszego typu wymaga głębokiej analizy rozpraszania energii akustycznej w strukturze materiału [8]. Są one natomiast bardziej złożone i zawierają parametry, które często wymagają szczegółowej wiedzy na temat mikrostruktury materiałów [69]. Natomiast modele fenomenologiczne wykorzystywane przy badaniu nawierzchni porowatych [55] traktują nawierzchnie porowate, jak płyny ściśliwe w których rozchodzą się fale. Wyrażenia matematyczne są w tym przypadku dużo prostsze i polegają na analizie parametru impedancji akustycznej (Z_c) [70]–[72].

Analizując modele fenomenologiczne należy stwierdzić, że do scharakteryzowania materiałów porowatych niezbędne są trzy parametry: porowatość (Ω), krętość (q_2) i oporność przepływu powietrza (R) [1]. Model prognostyczny wykorzystany do badań [55] pozwala wyznaczyć współczynnik pochłaniania dźwięku na podstawie parametrów związanych z parametrami charakteryzującymi strukturę wewnętrzną materiału. Porowatość jest w nim powiązana z zawartością wolnych przestrzeni. Oporność przepływu powietrza charakteryzuje natomiast częściowo efekty lepkości wewnętrznej materiałów w niskich częstotliwościach i jest także powiązana z porowatością i krętością [31]. W modelu tym można w pełni określić akustyczne zachowanie materiałów poprzez impedancję akustyczną (Z_c) i liczbę falową (k) tych materiałów.

Skuteczność pochłaniania energii akustycznej przez nawierzchnie porowate jest określona za pomocą współczynnika pochłaniania dźwięku. Zależy on z jednej strony od zdolności materiału do umożliwienia wejścia w jego wnętrze, poprzez połączone pory, padającej fali dźwiękowej. Z drugiej strony wartość współczynnika pochłaniania zależy od właściwości rozpraszania energii akustycznej w strukturze wewnętrznej materiału powodowanej przez tarcie cząsteczek powietrza o powierzchnię wewnętrzną porów [1], [73].

W przypadku nawierzchni drogowych, współczynnik pochłaniania zależy m.in. od wielkości ziarna, czy zawartość porów otwartych i połączonych wewnętrznie w strukturze warstwy nawierzchni [74]. Liczne pozycje literaturowe m.in. [5], [63] pokazują, że własności nawierzchni określane za pomocą współczynnika pochłaniania dźwięku powodują zmniejszenie hałasu drogowego w zakresie częstotliwości od 800 do 1600 Hz.

Porowatość materiału definiuje się jako objętość wolnych przestrzeni w strukturze materiału do całkowitej jego objętości. Czasami jest ona nazywana także porowatością otwartą z uwagi na fakt iż w niektórych materiałach także występują wolne przestrzenie – pory, ale są one zamknięte i uniemożliwiają przepływ powietrza przez strukturę materiału. Materiał uważa się za pochłaniający dźwięk, jeżeli pory są otwarte, wewnętrznie połączone i umożliwiają przepływ powietrza w jego wnętrzu. Różnice pomiędzy porami zamkniętymi oraz otwartymi w strukturze materiału przedstawiono poniżej na rys. 1.6 [75], [76].



Rys. 1.6. Szkic prezentujący różnicę pomiędzy porami zamkniętymi i otwartymi w strukturze materiału

Porowatość (Ω) dla próbki o ustalonej objętości jest określona jako stosunek objętości powietrza (V_{fluid}) w wolnych przestrzeniach do objętości całkowitej (V_{total}). Jest ona opisana poniższą zależnością [1]:

$$\Omega = \frac{V_{\text{fluid}}}{V_{\text{total}}}, 0 < \Omega < 1 \quad (1.1)$$

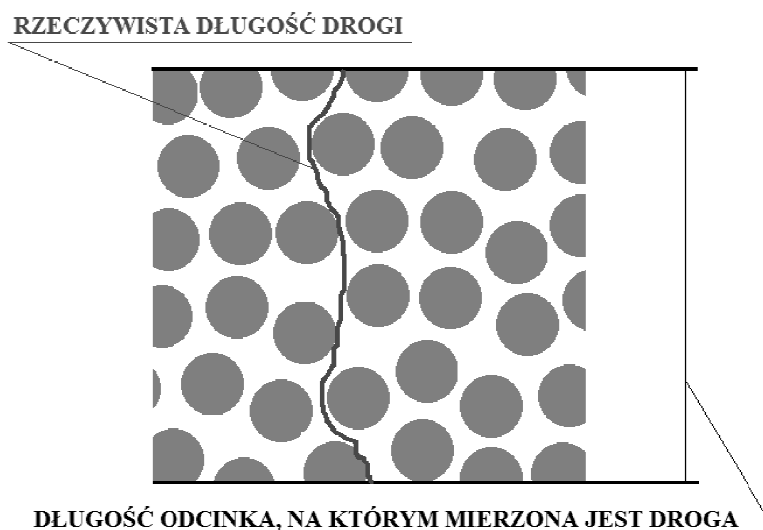
Porowatość jest kluczowym parametrem odgrywającym ważną rolę w pochłanianiu fali akustycznej w szerokim zakresie częstotliwości. Wielkość ta może być powiązana

z zawartością powietrza w próbce (air void content – AVC), określona następującym równaniem [77]:

$$\Omega = \frac{AVC}{1+AVC}, 0 < \Omega < 1 \quad (1.2)$$

Cechą materiału związaną z porowatością oraz wpływającą na wielkość pochłanianej energii akustycznej jest także krętość. Jest to parametr, który opisuje zależność pomiędzy rzeczywistą długością drogi przebytej przez powietrze w ośrodku porowatym do długości odcinka, na którym mierzona jest ta droga [78]. Inaczej można ją zdefiniować, jako falistość rzeczywistej ścieżki kanału w materiale porowatym. Jest ona wprost zależna od kształtu porów i odchylenia ich przekrojów wzdłuż długości [79].

Czasami zjawisko to jest nazywane również „współczynnikiem kształtu” [76]. Poniżej na rys. 1.7 przedstawiono je w sposób schematyczny.



Rys. 1.7. Wizualne przedstawienie efektu krętości (tortuosity) w materiałach porowatych na podstawie różnicy długości drogi przebytej przez falę dźwiękową w materiale do długości odcinka, na którym droga ta jest mierzona

W większości przypadków, dla porów niecyldrycznych, krętość wyraża się wg następującej zależności, w której r_c i r_f są odpowiednio opornością materiału nasyconego substancją przewodzącą i opornością substancji [80]:

$$q^2 = \Omega \frac{r_c}{r_f} \quad (1.3)$$

Krętość może przyjmować małe wartości ($q^2=1$) dla porów wyprostowanych oraz wartości duże ($q^2=4$) dla materiałów porowatych o duże oporności. Ten parametr może być oceniany przez użycie ultradźwięków i określenia współczynnika odbicia dźwięku dla wysokich częstotliwości [79].

W przypadku określania skuteczności akustycznej w zależności od krętości materiałów anizotropowych należy pamiętać, że wyniki będą bardzo zależne od orientacji porów w strukturze materiału w stosunku do kierunku padania fali dźwiękowej [76]. Ten parametr jest kluczowy dla materiałów wysoko pochłaniających, ponieważ różna struktura

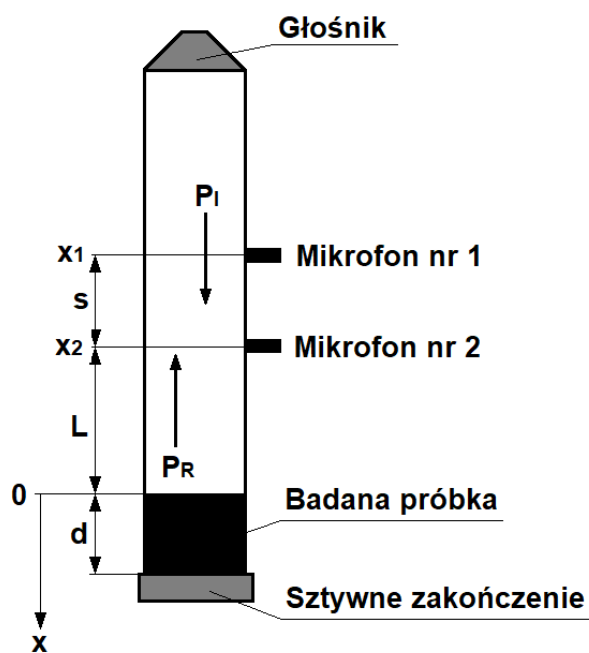
geometryczna tych materiałów lub różne kształty porów mogą powodować, że dźwięk będzie pochłaniany bardziej lub mniej. Jeżeli przepływ powietrza przez materiał jest złożony oraz charakteryzuje się on niską opornością przepływu (np. pory nie są prostymi, cylindrycznymi rurkami) będzie on pochłaniał dźwięk bardziej efektywnie [75].

Styczna oporność przepływu powietrza (R) wskazuje pośrednio na pewne cechy strukturalne materiałów porowatych. Może być ona używana do ustalenia korelacji pomiędzy strukturą materiału, a jego właściwościami pochłaniania dźwięku. Wielkość ta może być ustalana na podstawie poniższej zależności w przypadku dostarczania przez wykalibrowaną sprężarkę ciągłego strumienia powietrza (q_v) na próbkę o powierzchni A i grubości d [1]:

$$R = \frac{\Delta P A}{q_v d} \quad (1.4)$$

Wyznaczanie statycznej oporności powietrza powinno być wyznaczane przy ciągłym pomiarze przepływu i zwiększaniu ciśnienia (P), przy użyciu kalibrowanych urządzeń. Aby pochłanianie dźwięku było maksymalne, statyczna oporność przepływu powietrza powinna znajdować się w określonym zakresie. Jeżeli jest ona zbyt wysoka, fala akustyczna nie może łatwo wejść w strukturę materiału. Jeżeli jest natomiast zbyt niska, nie ma wystarczającego tarcia do rozproszenia w znaczący sposób energii akustycznej. Materiały akustyczne charakteryzują się zakresem statycznej oporności akustycznej w zakresie od ok. 10^3 do ok. 10^6 (N s m^{-4}) [1].

Jak wspomniano we wcześniejszej części opracowania 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. 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 [76]. Na rys. 1.8 poniżej przedstawiono schemat rury impedancyjnej wraz z lokalizacją źródła dźwięku, badanej próbki i lokalizacją mikrofonów oraz opisem podstawowych odległości pomiędzy nimi.



Rys. 1.8. Schemat przedstawiający rurę impedancyjną z dwoma mikrofonami, lokalizację źródła dźwięku i badanej próbki oraz podstawowe odległości [76]

Poniżej przedstawiono szczegółowe wzory, za pomocą których można obliczyć ciśnienie akustyczne fali padającej na badaną próbkę (p_I) oraz fali odbitej od badanej próbki (p_R) w odległości x ustalonej wewnątrz rury impedancyjnej [76]:

$$p_I = \widehat{p}_I e^{(-jk_0 x + \varphi_I)} e^{j\omega t} \quad (1.5)$$

$$p_R = \widehat{p}_R e^{(jk_0 x + \varphi_R)} e^{j\omega t} \quad (1.6)$$

gdzie:

- \widehat{p}_I – wartość ciśnienia akustycznego fali padającej na badaną próbkę,
- \widehat{p}_R – wartość ciśnienia akustycznego fali odbitej od badanej próbki,
- φ_I – przesunięcie fazowe fali padającej na badaną próbkę,
- φ_R – przesunięcie fazowe fali odbitej od badanej próbki,
- k_0 – liczba falowa powietrza,
- x – odległość w rurze od powierzchni badanej próbki.

Poziomy ciśnienia akustycznego w obydwu pozycjach mikrofonów pomiarowych są natomiast określone według następujących zależności [76]:

$$p_1 = p_I(x_1) + p_R(x_1) = \widehat{p}_I e^{-jk_0 x_1} + \widehat{p}_R e^{jk_0 x_1} \quad (1.7)$$

$$p_2 = p_I(x_2) + p_R(x_2) = \widehat{p}_I e^{jk_0 x_2} + \widehat{p}_R e^{-jk_0 x_2} \quad (1.8)$$

W celu określenia współczynnika pochłaniania dźwięku badanej próbki koniecznej jest obliczenie tzw. funkcji przejścia pomiędzy dwoma pozycjami mikrofonów pomiarowych. Funkcja ta jest określona poniższym równaniem [76].

$$H_{ij} = \frac{p_j}{p_i} = \frac{p_j p_i^*}{p_i p_i^*} \quad (1.9)$$

Funkcję przejścia pomiędzy dwoma pozycjami mikrofonu w rurze impedancyjnej określa się natomiast za pomocą następujących zależności [76]:

$$H_I = \frac{p_I(x_2)}{p_I(x_1)} = \frac{\widehat{p}_I e^{-jk_0 x_2}}{\widehat{p}_I e^{-jk_0 x_1}} = e^{jk_0 s} \quad (1.10)$$

$$H_R = \frac{p_R(x_2)}{p_R(x_1)} = \frac{\widehat{p}_R e^{jk_0 x_2}}{\widehat{p}_R e^{jk_0 x_1}} = e^{-jk_0 s} \quad (1.11)$$

Na tej podstawie funkcja przejścia funkcja przejścia H_{12} jest określona za pomocą poniższego równania, w którym R oznacza współczynnik odbicia dźwięku [76]:

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{\widehat{p}_I e^{jk_0 x_2} + \widehat{p}_R e^{-jk_0 x_2}}{\widehat{p}_I e^{jk_0 x_1} + \widehat{p}_R e^{-jk_0 x_1}} = \frac{e^{-j(k_0 x_2 + \varphi)} + R e^{j(k_0 x_2 + \varphi)}}{e^{-j(k_0 x_1 + \varphi)} + R e^{j(k_0 x_1 + \varphi)}} \quad (1.12)$$

Współczynnik odbicia dźwięku jest określony jako stosunek ciśnienia akustycznego fali padającej na badaną powierzchnię do ciśnienia akustycznego fali odbitej od badanej powierzchni. W przypadku ciśnienia akustycznego zmierzonego w odległości $x=x_1$ (w

pozycji mikrofonu 1 w rurze impedancyjnej) współczynnik ten może być wyrażony za pomocą poniższego równania [76]:

$$R_{x=x_1} = \frac{H_{12}-H_I}{H_R-H_{12}} = \frac{H_{12}-e^{jk_0s}}{e^{-jk_0s}-H_{12}} \quad (1.13)$$

Współczynnik odbicia jest wartością charakteryzującą badany materiał i powinien być określany na jego powierzchni, czyli przy odległości $x=0$. W związku z tym można sformułować następującą zależność, aby uzyskać dodatkowy czynnik do określenia współczynnika odbicia dźwięku w pewnej odległości od badanej próbki [76]:

$$\frac{R_{x=0}}{R_{x=x_1}} = \frac{e^{jk_0x_1}}{e^{-jk_0x_1}} \quad (1.14)$$

$$R_{x=0} = R_{x=x_1} e^{jk_02x_1} \quad (1.15)$$

Na tej podstawie współczynnik odbicia dźwięku dla badanej próbki może być określony następującą zależnością [76]:

$$R = \frac{H_{12}-H_I}{H_R-H_{12}} e^{jk_02x_1} \quad (1.16)$$

Natomiast współczynnik pochłaniania dźwięku α , który określa stosunek energii akustycznej pochłoniętej przez materiał do energii akustycznej padającej na badaną próbkę. Jest on określony następującą zależnością (przy założeniu, że rura impedancyjna jest zamknięta) [76]:

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (1.17)$$

Na podstawie współczynnika odbicia dźwięku można natomiast obliczyć impedancję akustyczną badanego materiału. Jest ona często prezentowana za pomocą wartości rzeczywistej (określającej straty energii pochłoniętej przez materiał) i urojonej (opisującej przesunięcie fazowe spowodowane przez materiał). Impedancja akustyczna na powierzchni badanego materiału Z_S jest określona następującą zależnością [76]:

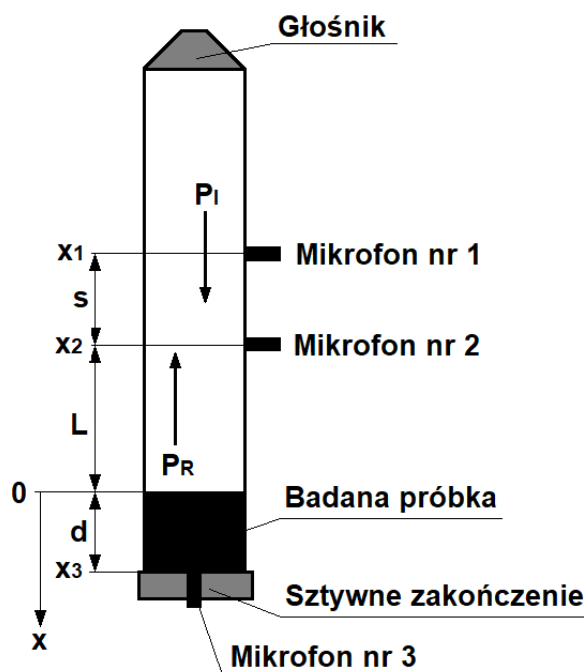
$$Z_S = Z_0 \frac{1+R}{1-R} \quad (1.18)$$

gdzie:

$Z_0 = \rho_0 c_0$ - impedancja charakterystyczna powietrza.

Metodę dwumikrofonową można zmodyfikować poprzez zastosowanie dodatkowego, trzeciego mikrofonu. W tym przypadku możliwe jest wykonanie, za pomocą rury impedancyjnej, badania dodatkowego parametru jakim jest impedancja charakterystyczna badanej próbki (za pomocą metody dwumikrofonowej można określić impedancję powierzchniową). Trzeci mikrofon pomiarowy umieszczany jest w sztywnej ścianie kończącej rurę impedancyjną za badaną próbką [76]. Przy takim jego umiejscowieniu można obliczyć funkcję przejścia pomiędzy mikrofonami znajdującymi się po obydwu stronach badanej próbki. W ten sposób możliwe jest zmierzenie dodatkowo impedancji właściwej (charakterystycznej) materiału oraz jego liczby falowej. Należy jednak zaznaczyć, że metoda ta może być stosowana tylko do jednorodnych i izotropowych materiałów.

Metoda trójmikrofonowa została wcześniej opisana w [81] natomiast wersja opisana poniżej została rozwinięta i opisana w [82]. Poniżej na rys. 1.9 przedstawiono umiejscowienie mikrofonów pomiarowych w rurze impedancyjnej przy użyciu metody trójmikrofonowej [76].



Rys. 1.9. Schemat rozmieszczenia mikrofonów pomiarowych w metodzie trójmikrofonowej [76]

Wykonując pomiary za pomocą metody trójmikrofonowej, w pierwszej kolejności oblicza się funkcję przejścia pomiędzy mikrofonem 2 i 3 (H_{32}) oraz mikrofonem 1 i 3 (H_{31}). Funkcję przejścia H_{12} można otrzymać z następującej zależności [76]:

$$H_{12} = \frac{H_{32}}{H_{31}} \quad (1.19)$$

Funkcja przejścia pomiędzy pozycją mikrofonu nr 3 ($x = x_3$) oraz powierzchnią badanej próbki ($x=0$), nie może być bezpośrednio uzyskana z pomiaru, ale można ją obliczyć na podstawie następujących zależności [76]:

$$H_{30} = \frac{p_0}{p_3} = \frac{p_0 p_2}{p_2 p_3} = \frac{p_0}{p_2} H_{32} = \frac{\hat{p}_I + \hat{p}_R}{\hat{p}_I e^{-jk_0 x_2} + \hat{p}_R e^{jk_0 x_2}} H_{32} = \frac{1+R}{e^{-jk_0 x_2} + R e^{jk_0 x_2}} H_{32} \quad (1.20)$$

Funkcję przejścia H_{32} można natomiast określić za pomocą poniższego równania, przy czym należy uwzględnić kompensację z uwagi na odległość pomiędzy powierzchnią materiału oraz mikrofonem nr 2 (która jest równa L) oraz grubością badanej próbki d [76]:

$$H_{32} = \frac{H_{32,x_2} e^{-jk_0(L+d)}}{e^{-jk_0(L+x_3)} - H_{32,x_2}} \quad (1.21)$$

Współczynnik odbicia, pochłaniania oraz impedancja powierzchniowa może być obliczona na podstawie funkcji przejścia H_{12} . Konieczne jest w tym celu uzyskanie funkcji przejścia H_{31} , którą można określić na podstawie analogicznej zależności, przy czym trzeba wziąć jeszcze pod uwagę odległość pomiędzy mikrofonami pomiarowymi s [76]:

$$H_{31} = \frac{H_{31,x_1} - e^{-jk_0(s+L+d)}}{e^{-jk_0(s+L+x_3)} - H_{31,x_1}} \quad (1.22)$$

Macierzową funkcję przejścia, która łączy ciśnienie akustyczne oraz prędkość cząsteczek po obydwu stronach badanego materiału opisano natomiast w [66]. Zależność tę przedstawiono poniżej, przy czym elementy macierzy T oznaczają współczynniki propagacji:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{x_3} \\ v_{x_3} \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

Song i Bolton określili z kolei zależności dla materiałów symetrycznych w kierunku osi x , które zostały przedstawione poniżej [83]. Na ich podstawie można stwierdzić, że pierwszy element macierzy T_{11} może zostać zastąpiony przez funkcję przejścia H_{30} , ponieważ prędkość cząsteczek powietrza na sztywnych końcach próbki jest określona, jako $v_{x_3} = 0$.

$$T_{11} = T_{22} \quad (1.24)$$

$$T_{11}T_{22} - T_{21}T_{12} = 1 \quad (1.25)$$

$$T_{11} = \frac{p_{x_3}v_{x_3} + p_0v_0}{p_0v_{x_3} + p_{x_3}v_0} = \frac{p_0v_0}{p_{x_3}v_0} = H_{30} \quad (1.26)$$

Stosując następnie podejście Allarda opisane w [66] oraz przy założeniu, że rozważamy skończoną głębokość jednorodnego i jednolitego materiału porowatego, możemy obliczyć złożoną liczbę falową oraz impedancję charakterystyczną używając modelu dla materiałów sztywnych i wiotkich, gdzie k_m jest złożoną liczbą falową powietrza wewnątrz materiału:

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_m d) & j \sin(k_m d) Z_0 \\ j \sin(k_m d) / Z_0 & \cos(k_m d) \end{bmatrix} \quad (1.27)$$

Ostatecznie można zapisać na podstawie [82] następującą zależność:

$$k_m = \frac{1}{d} \cos^{-1}(H_{30}) = \frac{1}{d} \cos^{-1}\left(\frac{1+R}{e^{-jk_0x_2} + Re^{jk_0x_2}} H_{32}\right) \quad (1.28)$$

Używając powyższych modeli możliwe jest otrzymanie zależności na impedancję powierzchniową Z_S oraz impedancję charakterystyczną Z_C [76]:

$$Z_S = Z_C \coth(jk_m d) \quad (1.29)$$

$$Z_C = \frac{Z_S}{\coth(jk_m d)} = Z_S \tanh(jk_m d) = -jZ_S \tan(k_m d) \quad (1.30)$$

Doutres i in. przedstawiają natomiast wzór, na podstawie którego może być wyznaczony współczynnik propagacji z wspomnianych powyżej zależności [84]:

$$\tau_{\infty} = 2j \frac{Z_C}{Z_0 - 2jZ_C \cot(k_m d) + Z_C^2/Z_0} \frac{1}{\sin(k_m d)} e^{jk_0 d} \quad (1.31)$$

Na tej podstawie można także otrzymać zależności pomiędzy impedancją charakterystyczną oraz złożoną liczbą falową oraz efektywną gęstością ρ_{eff} i efektywnym modułem objętości K_{eff} [76]:

$$Z_C = \sqrt{K_{eff} \rho_{eff}} \quad (1.32)$$

$$k_m = \omega \sqrt{\frac{\rho_{eff}}{K_{eff}}} \quad (1.33)$$

Właściwości te są otrzymane zatem doświadczalnie na podstawie propagacji fali dźwiękowej, a nie z bezpośrednich pomiarów [66]. Obydwie wielkości są użyteczne jako wartości wejściowe do wielu modeli, za pomocą których prognozuje się charakterystyki pochłaniania dźwięku przez materiały oraz często są przedstawiane w specyfikacjach materiałów. Ponadto w [84] opisano zależności, za pomocą których te relacje można opisać w sposób niebezpośredni, gdzie \emptyset jest porowatością materiału.

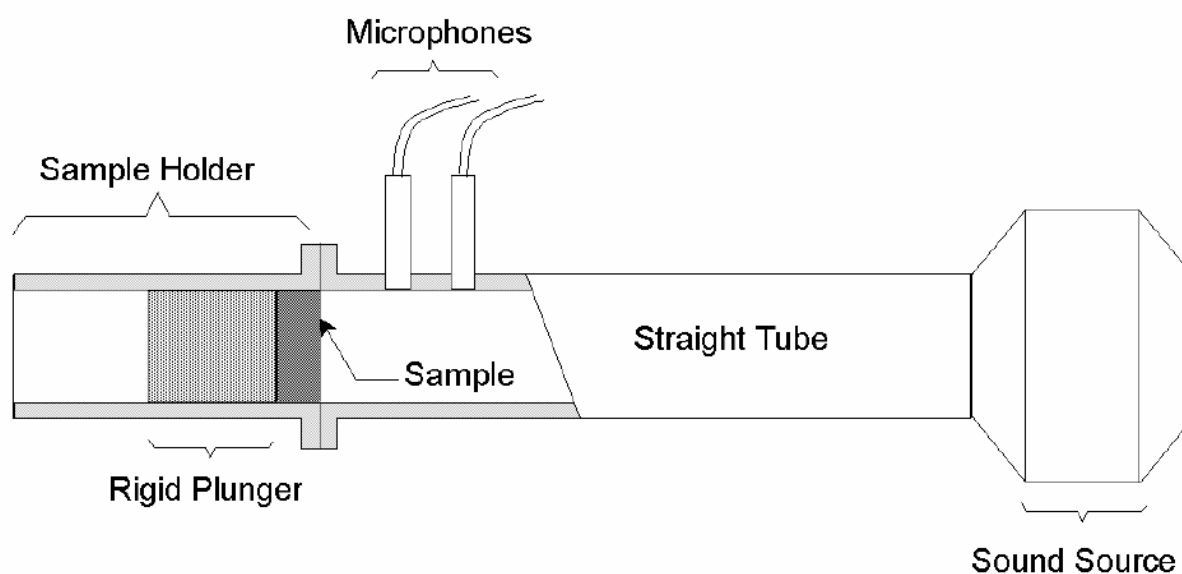
$$\rho_{eff} = \frac{\emptyset Z_C k_m}{\omega} \quad (1.34)$$

$$K_{eff} = \frac{\emptyset Z_C \omega}{k_m} \quad (1.35)$$

W dalszej części rozdziału opisano także kilka alternatywnych metod z wykorzystaniem rury impedancyjnej, za pomocą których można zmierzyć różne właściwości akustyczne nawierzchni drogowych. Szczegółowy opis metodyki wykonywania pomiarów współczynnika pochłaniania oraz wymagań dotyczących sprzętu pomiarowego przedstawiono w rozdziałach 2 i 6. W dalszej części rozdziału przedstawiono jedynie ogólne i praktyczne uwagi dotyczące wykonywania pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku oraz wymagania dotyczące sprzętu pomiarowego.

Do pomiarów właściwości akustycznych nawierzchni drogowych stosuje się dwie odpowiadające sobie metody opisane odpowiednio w (ASTM E1050, 1998) i (ISO 10534-2, 1998). Obydwa dokumenty przedstawiają wymagania, jakie powinny być spełnione przy stosowaniu tzw. metody dwumikrofonowej oraz metody funkcji przejścia [87], [88]. Dobra praktyka laboratoryjna sugeruje natomiast potrzebę stosowania nieco więcej wymagań dotyczących zarówno wyposażenia, jak i warunków, w których wykonywane są pomiary [89].

Metoda dwu-mikrofonowa polega na zastosowaniu rury impedancyjnej w której umieszczana jest na jednym z końców badana próbka (za którą umieszcza się krążek stanowiący sztywną i odbijającą powierzchnię). Na drugim końcu rury jest natomiast zamontowane źródło dźwięku. Do pomiarów używa się dwóch mikrofonów zamontowanych w rurze w określonych odległościach od badanej próbki. Schemat układu pomiarowego wykorzystywanego do pomiarów metodą dwu-mikrofonową przedstawiony jest na rys. 1.10 poniżej [89].



Rys. 1.10. Schemat układu pomiarowego wykorzystywanego do pomiarów wykonywanych techniką dwu-mikrofonową [89]

Do uzyskania funkcji przejścia pomiędzy dwoma mikrofonami używany jest wielokanałowy analizator widma dźwięku, przy czym mikrofon, który jest zamontowany bliżej badanej próbki, jest traktowany jako mikrofon referencyjny. Z funkcji przejścia H_{12} oblicza się współczynnik odbicia dźwięku R według następującego równania [89]:

$$R = \frac{H_{12} - e^{-jks}}{e^{jks} - H_{12}} e^{j2k(L+s)} \quad (1.36)$$

gdzie:

- R – współczynnik odbicia dźwięku,
- L – odległość pomiędzy powierzchnią próbki i pierwszym mikrofonem,
- S – odległość pomiędzy dwoma mikrofonami,
- k – stała falowa równa $2\pi f/c$, f – częstotliwość dźwięku, c – prędkość dźwięku.

Pomiędzy współczynnikiem odbicia, współczynnikiem pochłaniania α i impedancją akustyczną $Z/\rho_0 c$ występują następujące zależności [89]:

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (1.37)$$

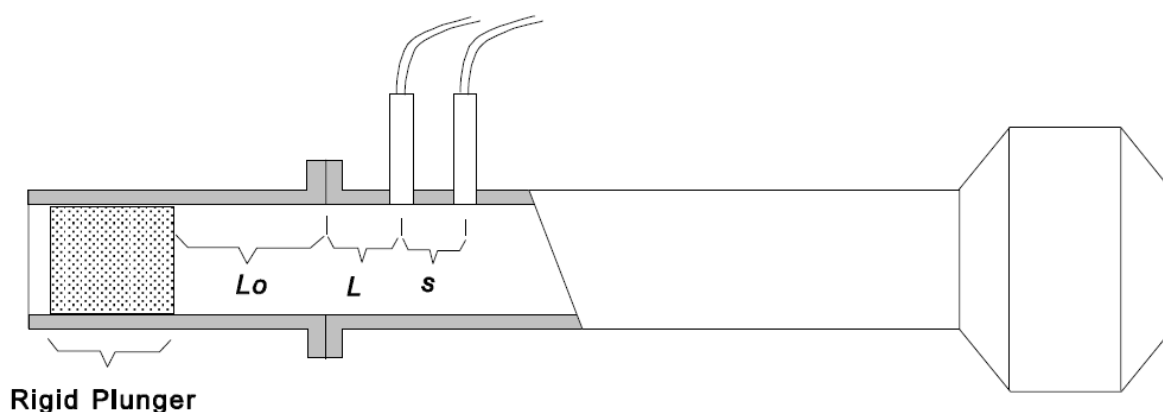
$$Z/\rho_0 c = \frac{1+R}{1-R} \quad (1.38)$$

Dokładność i powtarzalność metody dwu-mikrofonowej została oszacowana na podstawie testu round-robin wykonanego przez ASTM [90]. W jego ramach przebadana została próbka wykonana z identycznego materiału przez kilkanaście niezależnych laboratoriów. Otrzymane wyniki były porównywane ze sobą oraz z innymi wynikami otrzymanymi za pomocą metody fali stojącej [91]. Otrzymane wyniki charakteryzowały się bardzo dużą zgodnością [89].

Pomimo otrzymania bardzo dobrej zgodności wyników pomiarów za pomocą testu round-robin oraz określenia wskazówek dotyczących kalibracji mikrofonów pomiarowych,

a także przeprowadzania pomiarów, standard (ASTM E1050, 1998) nie zawiera testu, który mógłby być przeprowadzany przez laboratoria w celu oceny poprawności działania przyrządów, oprogramowania oraz procedury pomiarowej [89]. Jest to związane z brakiem możliwości jednoznacznego określenia charakterystyki standardowego materiału odniesienia, którego właściwości będą jednoznacznie identyfikowalne. Dokument zaleca natomiast, aby każde laboratorium utrzymywało i cyklicznie badało swoją własną próbkę referencyjną. Powinna ona być wykonana w taki sposób, aby gwarantowała stabilność swoich właściwości w czasie.

Seybert opisuje także możliwy do wykonania test, za pomocą którego można sprawdzić poprawność działania przyrządów, oprogramowania oraz procedury pomiarowej. Polega on na wykonaniu pomiarów części urojonej impedancji akustycznej za pomocą rury impedancyjnej zamkniętej z jednej strony za pomocą sztywnego tłoka, którego płaszczyzna znajduje się w odległości L_0 od końca rury. Odległość ta nie jest istotna, ale musi być ona określona w dokładny sposób. Schemat pomiarowy przedstawiono poniżej na rys. 1.11 [89].



Rys. 1.11. Schemat układu pomiarowego używanego do pomiarów sprawdzających wykonywanych za pomocą metody opisanej w [89]

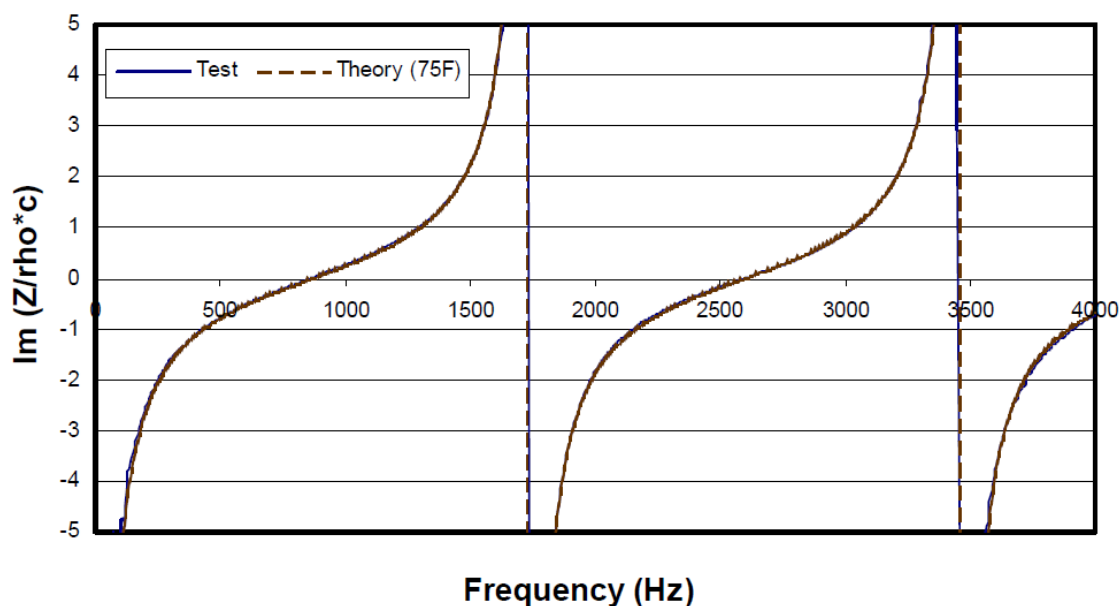
Część urojona impedancji akustycznej dla rury zamkniętej w odległości L_0 od jej końca jest równa zgodnie z teorią:

$$\text{Im}(Z/\rho_0 c) = -1 / \tan kL_0 \quad (1.39)$$

gdzie:

k – stała falowa równa $2\pi f/c$, f – częstotliwość dźwięku, c – prędkość dźwięku.

Poniżej na rys. 1.12 przedstawiono przykładowe zestawienie wyniku pomiaru referencyjnego z wynikami teoretycznymi wykonanymi w ramach artykułu [89] przy zastosowaniu odległości płaszczyzny próbki od końca rury impedancyjnej L_0 równej 0.1 m.



Rys. 1.12. Porównanie wyników pomiarów impedancji akustycznej próbki umieszczonej w odległości L0 od końca rury impedancyjnej równej 0.1 m do wyników teoretycznych [89]

Seybert zwraca także uwagę na zapewnienie odpowiednich odstępów sygnału dźwiękowego od tła akustycznego wewnątrz rury impedancyjnej. Minimalny stosunek sygnału do szumu występuje w miejscu minimów stojącej fali dźwiękowej. Poziom dźwięku w tych minimach może być mniejszy nawet o około 25 dB od poziomu maksymalnego. Norma (ISO 10534-2, 1998) rekomenduje, aby poziom dźwięku wewnątrz rury był co najmniej o 10 dB większy od poziomu tła akustycznego. Preferuje się natomiast wartości dużo większe – o ok. 20 do 30 dB. Zastosowanie takich przyrządów, które generują poziom ciśnienia akustycznego równy ok. 120 dB wewnątrz tuby impedancyjnej, powinno zapewnić spełnienie tego warunku w zasadzie w każdej sytuacji „in situ”. Może to jednak stanowić problem w przypadku konieczności wykonania pomiarów materiałów, które w rzeczywistości są zastosowane w warunkach mniejszego poziomu dźwięku – np. ok. 65 dB (np. w warunkach drogowych). Aby osiągnąć takie warunki wewnątrz przyrządu pomiarowego należy zapewnić jego odpowiednią konstrukcję. Należy zarówno szczelnie zabezpieczyć wszystkie możliwe miejsca, w których dźwięk z zewnątrz może przedostawać się do wnętrza przyrządu (np. gniazda mikrofonów, uchwyty na próbki pomiarowe lub łączenia z nawierzchnią drogową w przypadku wykonywania pomiarów „in situ”, źródło dźwięku). Izolacyjność akustyczna przyrządu pomiarowego powinna być zapewniona na poziomie ok. 45 dB [89].

Ponieważ nawierzchnie drogowe są z reguły wysoko odbijające dźwięk, odstęp od tła akustycznego może być problemem w częstotliwościach, w których odległości pomiędzy mikrofonami odpowiadają nieparzystej wielokrotności ok. 1/4 długości fali, co występuje w wielu częstotliwościach poniżej 2000 Hz. Można go wyeliminować stosując źródła dźwięku o wysokiej, wyjściowej mocy akustycznej lub poprzez zastosowanie zmiennych odległości mikrofonów (np. poprzez użycie dodatkowego, trzeciego mikrofonu). Otrzymuje się w ten sposób trzy zestawy wyników pochłaniania dźwięku, z których wylicza się jeden właściwy [92].

Norma (ISO 10534-2, 1998) wymaga, aby grubość ściany rury impedancyjnej była nie mniejsza niż 5% średnicy tuby. Seybert zaleca natomiast, aby była ona większa od 10%.

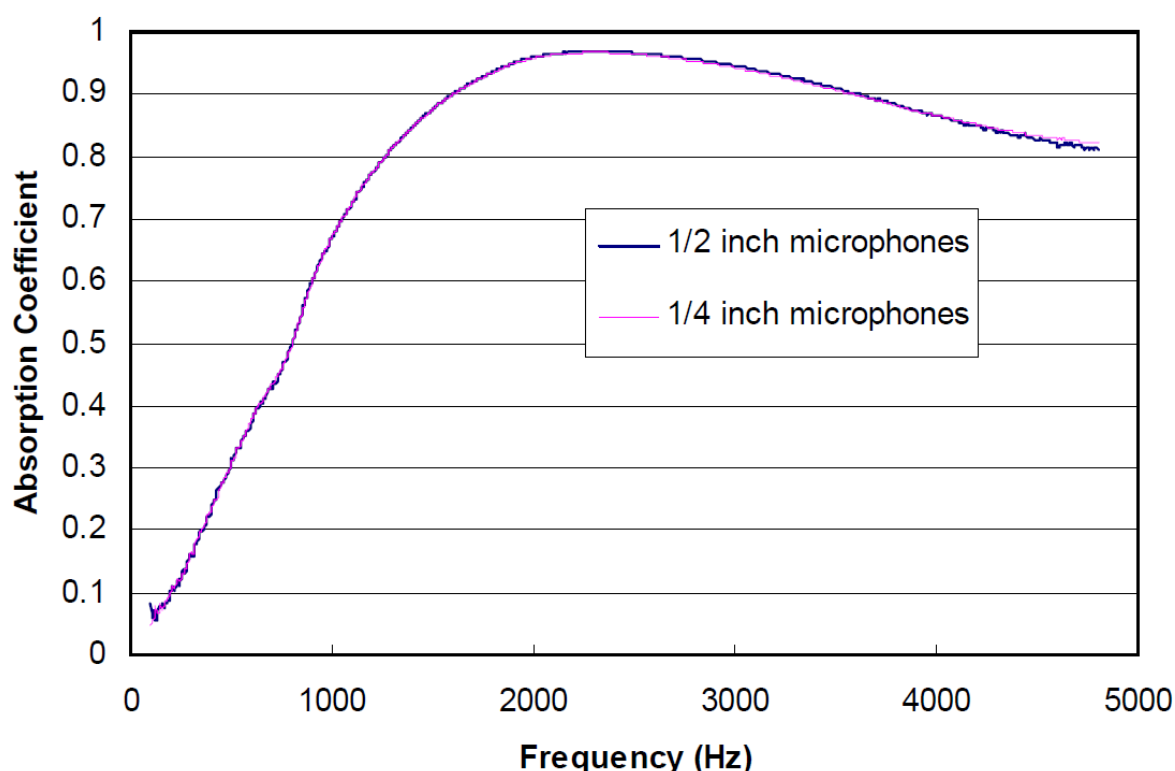
Pozwoli to zapewnić po pierwsze właściwą izolacyjność akustyczną urządzenia, a po drugie zapewni tłumienie drgań, które mogły by być wzbudzone np. poprzez źródło dźwięku lub inne warunki zewnętrzne (np. zamykanie drzwi, czy w warunkach „in situ” przejazd samochodów). Zaleca się także aby rura impedancyjna była wykonana z mosiądzu, który jest cięższy np. od aluminium i powoduje lepsze właściwości izolujące dźwięk oraz tłumiące drgania [89].

Należy także zwracać uwagę na wymiary rury impedancyjnej. Zgodnie z zaleceniami normy (ISO 10534-2, 1998) powinna mieć ona długość co najmniej trzech średnic – jest to natomiast wartość minimalna. Zaleca się, aby długość rury była nie mniejsza niż wielokrotność 10 – 15 średnic [89]. Długość rury impedancyjnej musi zapewnić w jej wnętrzu warunki do powstania fali płaskiej padającej na badaną próbkę, która musi zostać przekształcona z fali sferycznej generowanej przez wszystkie źródła dźwięku [89].

W przypadku wykonywania pomiarów „in situ” montaż rury impedancyjnej następuje za pomocą dodatkowej przystawki łączącej przyrząd z nawierzchnią drogi. Połączenie to musi być szczelne. Osiąga się to poprzez zastosowanie specjalnego uszczelniacza w rowku przystawki łączącej. Należy natomiast zwrócić uwagę na odpowiednią wielkość tej substancji. Po wywarciu nacisku, zbyt duża ilość uszczelniacza może zostać wyciśnięta do wnętrza przystawki lub do nawierzchni i wpłynąć na wyniki pomiarów. Zastosowanie właściwej ilości uszczelniacza często wymaga kilkukrotnych prób i obserwacji [92].

Zarówno rura impedancyjna, jak i uchwyt na badane próbki lub łącznik wykorzystywany do pomiarów „in situ” powinny spełniać pewne wymagania konstrukcyjne. Powinny być one sztywne oraz masywne. Seybert wspomina, że powierzchnia którą łączy się uchwyt lub przystawkę „in situ” z rurą powinna być gładka i dobrze dopasowana. Jest to konieczne do zapewnienia hermetycznego połączenia obydwu części układu pomiarowego. Zgodnie z zaleceniami (ISO 10534-2, 1998) oraz (ASTM E1050, 1998) tylna płyta uchwytu powinna znajdować się w odległości co najmniej 20 mm od badanej próbki. Powinna być ona zatem ruchoma, aby możliwe było wykonywanie badań dla próbek o różnej grubości [89].

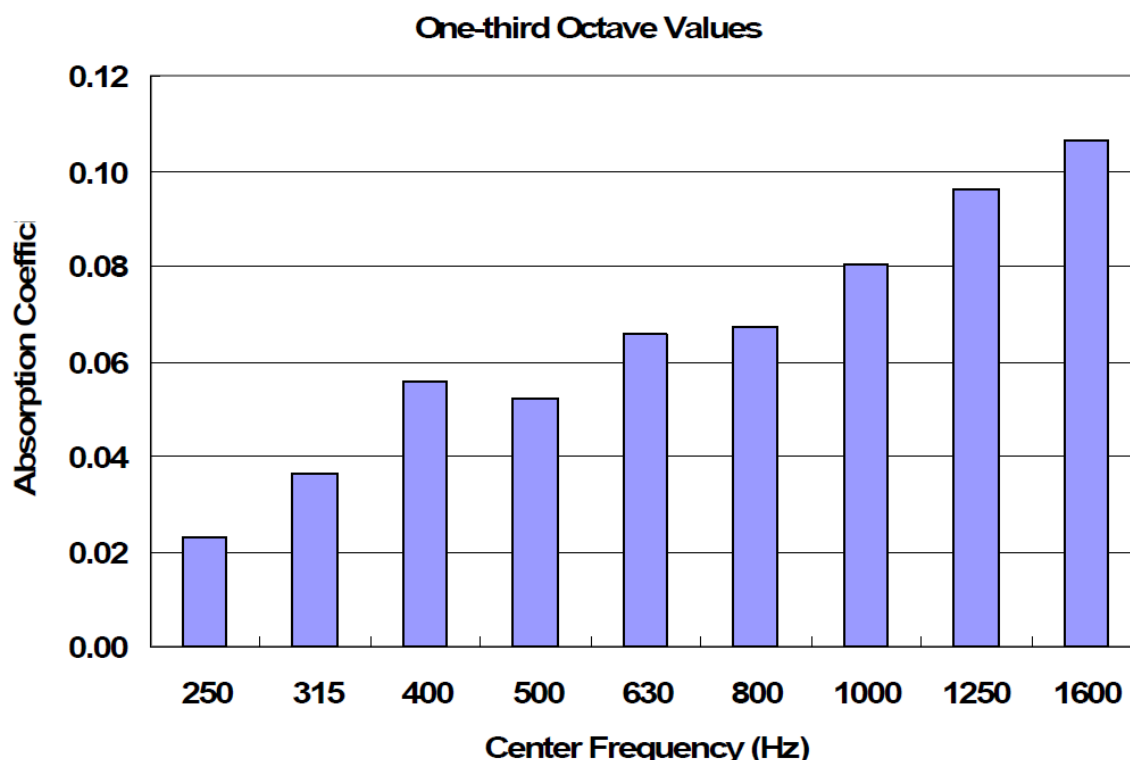
Mikrofony pomiarowe używane do pomiarów wykonywanych zgodnie ze standardami określonymi w (ISO 10534-2, 1998) oraz (ASTM E1050, 1998) muszą być zamontowane w taki sposób, aby ich płaszczyzna była dopasowana do ścianki wewnętrznej rury impedancyjnej. Dodatkowo muszą być one dobrze izolowane. Zapewnienie tzw. podwójnej izolacji, poprzez zastosowanie specjalnych uchwytów zarówno w mikrofonach, jak i w rurze impedancyjnej, wpływa pozytywnie na zapewnienie odpowiedniej izolacyjności od dźwięków zewnętrznych oraz od drgań wzbudzanych przez przyrząd i warunki zewnętrzne. Nie muszą to być mikrofony tak zwane „specjalnie dopasowane” do tego typu pomiarów, ponieważ i tak przed każdym pomiarem muszą być one kalibrowane. Według Seyberta nie ma także znaczenia średnica mikrofonu. Świadczą o tym wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku przeprowadzone za pomocą zarówno mikrofonów 1/2, jak i 1/4 calowych. Do pomiarów została użyta próbka z pianki o grubości 1”. Wyniki porównawcze przedstawiono poniżej na rys. 1.13. Potwierdzają one, że średnica mikrofonu nie ma wpływu na wyniki pomiarów wykonywanych przy użyciu rury impedancyjnej [89].



Rys. 1.13. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych za pomocą mikrofonów o średnicy $\frac{1}{2}$ oraz $\frac{1}{4}$ przy użyciu próbki wykonanej z pianki o grubości 1" w ramach artykułu [89]

Należy także zwracać uwagę na dopasowanie badanej próbki do uchwytu. Konieczne jest zapewnienie takich warunków, aby pomiędzy próbką a uchwytem nie było wolnych przestrzeni. Jednocześnie nie może być ona zamontowana w bardzo ciasny sposób, aby nie doszło do wybrzuszenia jej płaszczyzny. Materiały sztywne i trudne do obróbki, powinny być przycięte z największą możliwą precyzją oraz powinny zostać uszczelnione za pomocą wazeliny lub poprzez kilkukrotne owinięcie taśmą w celu wyeliminowania wolnych przestrzeni pomiędzy próbką i uchwytem. Dodatkowo należy dbać o to, aby tylna ścianka próbki przylegała do sztywnego tłoczka, tak jak jest to przedstawione na rys. 1.10. Pozostawienie wolnej przestrzeni będzie miało wpływ na wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania. Jeżeli dany materiał jest używany w rzeczywistości z wykorzystaniem takiej przestrzeni, należy ją również zapewnić w trakcie pomiarów [89].

Przykładowe wyniki pomiarów wykonane przez Sayberta w ramach [92] przedstawiono poniżej na rys. 1.14.

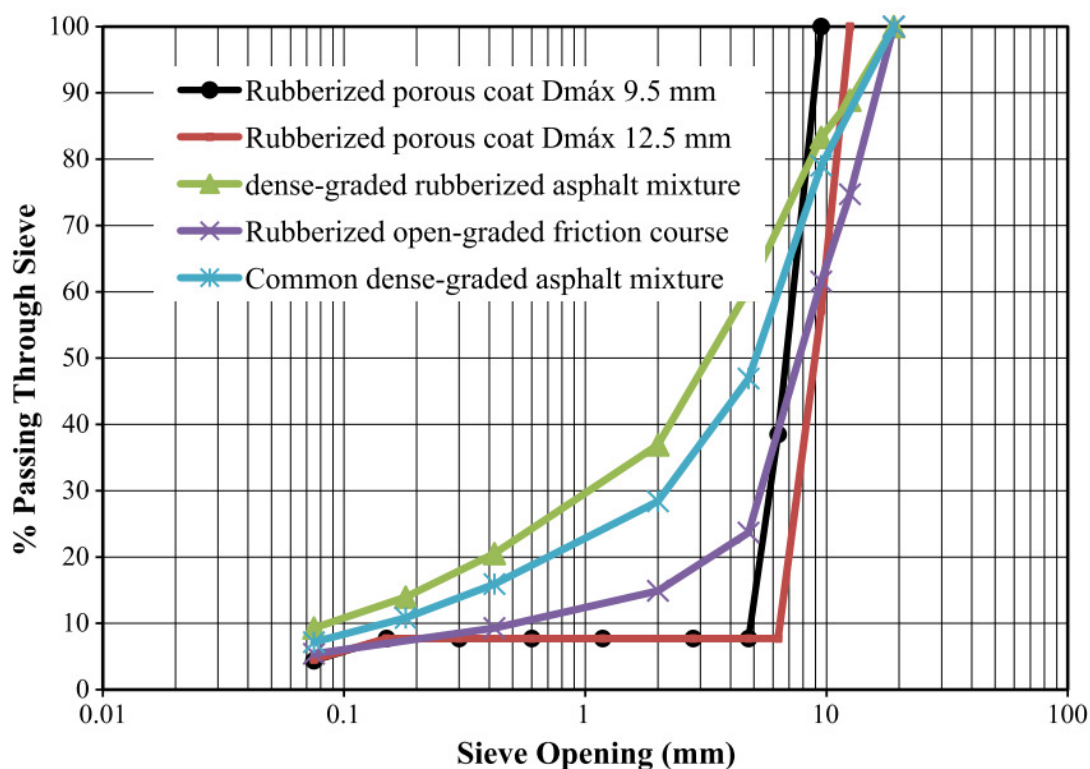


Rys. 1.14. Przykładowe wyniki pomiarów Współczynnik pochłaniania dźwięku otrzymany z pomiarów wykonanych za pomocą rury impedancyjnej [92]

Pomiary współczynnika pochłaniania dźwięku są stosowane w celu oceny właściwości akustycznych nawierzchni drogowych. Przykładowe wyniki dla różnych typów nawierzchni można znaleźć m.in. w [1], [35], [37], [61], [93]–[97].

Pomiary takie zostały także wykonane i opisane w [74]. W artykule tym opisano tematykę związaną z oceną właściwości pochłaniania dźwięku mieszanek asfaltowych uzyskiwanych poprzez zmiany w granulometrii, wolne przestrzenie i wewnętrznie połączone pory w strukturze oraz zmiany grubości warstwy ścieralnej. Badania te realizowane były w 2006 r. na drogach Brazylii, która była uważana za kraj, w którym występują bardzo wysokie poziomy hałasu samochodowego, a miasta, takie jak Sao Paulo i Rio de Janeiro są jednymi z najgłośniejszych na świecie [98].

W celu oceny właściwości akustycznych za pomocą metody opisanej w (ISO 10534-2, 1998) wybrano kilka typów nawierzchni stosowanych w Brazylii. Próbkę, na których następnie zostały przeprowadzone badania, zostały wykonane z typowej mieszanki mineralno-asfaltowej ściślej (dense-graded asphalt), dywanika porowatego modyfikowanego gumą (rubberized porous coat), mieszanki uszorstnionej modyfikowanej gumą o otwartym uziarnieniu (rubberized open-graded friction course) oraz mieszanki mineralno-asfaltowej ściślej modyfikowanej gumą (dense-graded rubberized asphalt). Dla każdej nawierzchni do badań wybrano po trzy próbki [74]. Poniżej na rys. 1.15 przedstawiono krzywe uziarnienia poszczególnych próbek, a w tablicy 3.1 przedstawiono ich charakterystykę.



Rys. 1.15. Krzywe uziarnienia badanych próbek nawierzchni [74]

Tablica 1.1. Charakterystyka badanych mieszanek [74]

Mixture	Binder	Binder content (%)	Max. aggregate size (mm)
Common dense-graded asphalt mixture	Asphalt binder 50/70 pen	4.91	19.1
Rubberized porous coat	Asphalt rubber binder	4.20	9.5
Rubberized porous coat	Asphalt rubber binder	4.40	12.5
Rubberized open-graded friction course	Asphalt rubber binder	4.30	19.1
Dense-graded rubberized asphalt mixture	Asphalt rubber binder	5.60	19.1

Próbki nawierzchni drogowych przygotowanych do badań zostały najpierw zbadane mechanicznie [74]. W tym celu wszystkie próbki poddano badaniom wytrzymałości na rozciąganie za pomocą metody opisanej w [99], a próbki nawierzchni porowatej modyfikowanej gumą oraz nawierzchni z otwartego kruszywa modyfikowanej gumą poddano dodatkowo testowi Cantabro opisanemu w [100]. Wyniki tych badań przedstawiono odpowiednio w tablicy 3.2 i 3.3.

Tablica 1.2. Wyniki testu wytrzymałości na rozciąganie przeprowadzonych przez Knabbena dla wszystkich badanych próbek [74]

Type of mixture	Sample	Diameter (cm)	Thickness (cm)	Voids contents (%)	Tensile strength (MPa)
Common dense-graded asphalt	4	10.16	6.32	5.67	1.15
	5	10.16	6.27	4.60	1.12
Dense-graded rubberized asphalt	1	10.16	6.47	6.14	1.04
	2	10.16	6.37	5.97	1.04
Rubberized open-graded friction course	2	10.16	6.15	18.56	0.74
	3	10.16	6.15	18.72	0.76
Rubberized porous coat (9.5 mm)	4	10.16	6.50	26.44	0.42
	5	10.16	6.45	26.03	0.44
Rubberized porous coat (12.5 mm)	9	10.16	6.15	22.46	0.39
	10	10.16	6.10	22.54	0.40

Tablica 1.3. Wyniki testu Cantabro dla próbek nawierzchni porowatej modyfikowanej gumą oraz nawierzchni asfaltowej z otwartym kruszywem modyfikowanej gumą przeprowadzonych przez Knabbena [74]

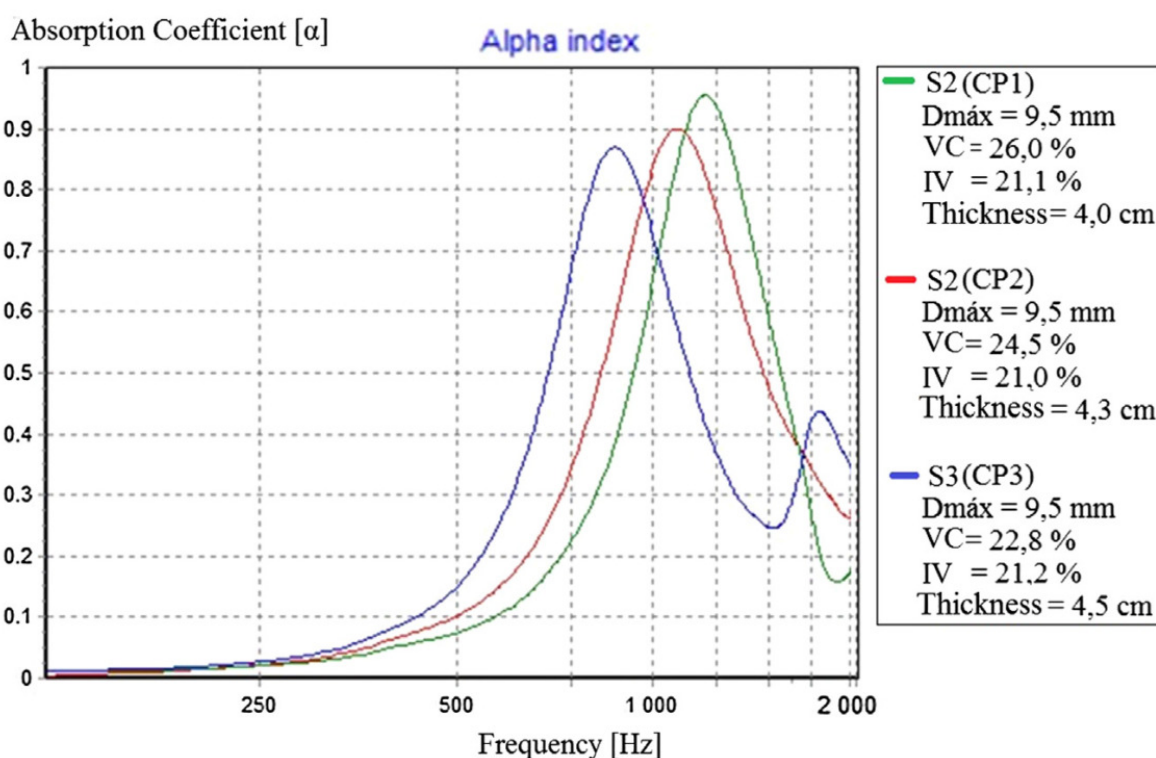
Max. aggregate size (mm)	CP's	Voids contents (%)	Cantabro loss (%)	Average (%)
9.5	RPC (CP 1)	21.70	27.8	28.7
	RPC (CP 2)	20.90	30.2	
	RPC (CP 3)	19.84	28.0	
12.5	RPC (CP 6)	22.33	31.1	31.8
	RPC (CP 7)	21.80	32.0	
	RPC (CP 8)	22.58	32.3	
19.1	OGFC (CP 1)	20.64	20.1	21.3
	OGFC (CP 4)	20.48	22.1	
	OGFC (CP 5)	20.84	21.6	

Analizując wyniki badań przedstawionych powyżej sformułowano wniosek, że różnice wyników obydwu nawierzchni porowatych mogą być spowodowane różnicami w krzywych granulometrycznych. Powoduje to powstawanie różnego udziału procentowego porów

otwartych w strukturze próbek wykonanych z nawierzchni porowatej modyfikowanej gumą oraz nawierzchni mineralno-asfaltowej o otwartym uziarnieniu. Pierwsza z nich posiadała więcej wewnątrz-połączonych porów od drugiej, co wpłynęło na wyniki testu Contabro [74]. Badania mające na celu wyznaczenie objętości wewnątrz-połączonych wolnych przestrzeni w strukturze próbki zostały także wykonane także inną metodą polegającą na uszczelnieniu bocznych i tylnych ścianek próbek wodoszczelną taśmą i parafiną oraz zmierzeniu ilości wody pochłoniętej przez te próbki za pomocą francuskiej metody opisanej w [101]. Wyniki otrzymane za jej pomocą były zbieżne z przedstawionymi powyżej.

Badania właściwości pochłaniania dźwięku przez nawierzchnie drogowe zostały przeprowadzone przez Knabbena [74] za pomocą rury impedancyjnej i metody opisane w (ISO 10534-2, 1998). Zastosowano odstęp pomiędzy mikrofonami pomiarowymi równy 50 mm oraz odległość bliższego mikrofonu od próbki była równa 50 mm. Pozwoliło to na wykonanie pomiarów w zakresie częstotliwości od 343 do 2744 Hz. Próbki użyte do pomiarów bardzo dobrze pasowały do uchwytu w rurze impedancyjnej, co nie wymagało stosowania dodatkowej substancji uszczelniającej.

Jednymi z badań opisanych w [74] były badania, na podstawie których określono wpływ wolnych przestrzeni w strukturze badanych materiałów na charakterystykę współczynnika pochłaniania dźwięku. W tym celu wykonano pomiary za pomocą rury impedancyjnej przy użyciu próbek, które charakteryzowały się takim samym udziałem procentowym porów otwartych (połączonych wewnątrz próbki) przy różnych wartościach wolnych przestrzeni w strukturze materiału. Wyniki tych pomiarów przedstawiono poniżej na rys. 1.16.

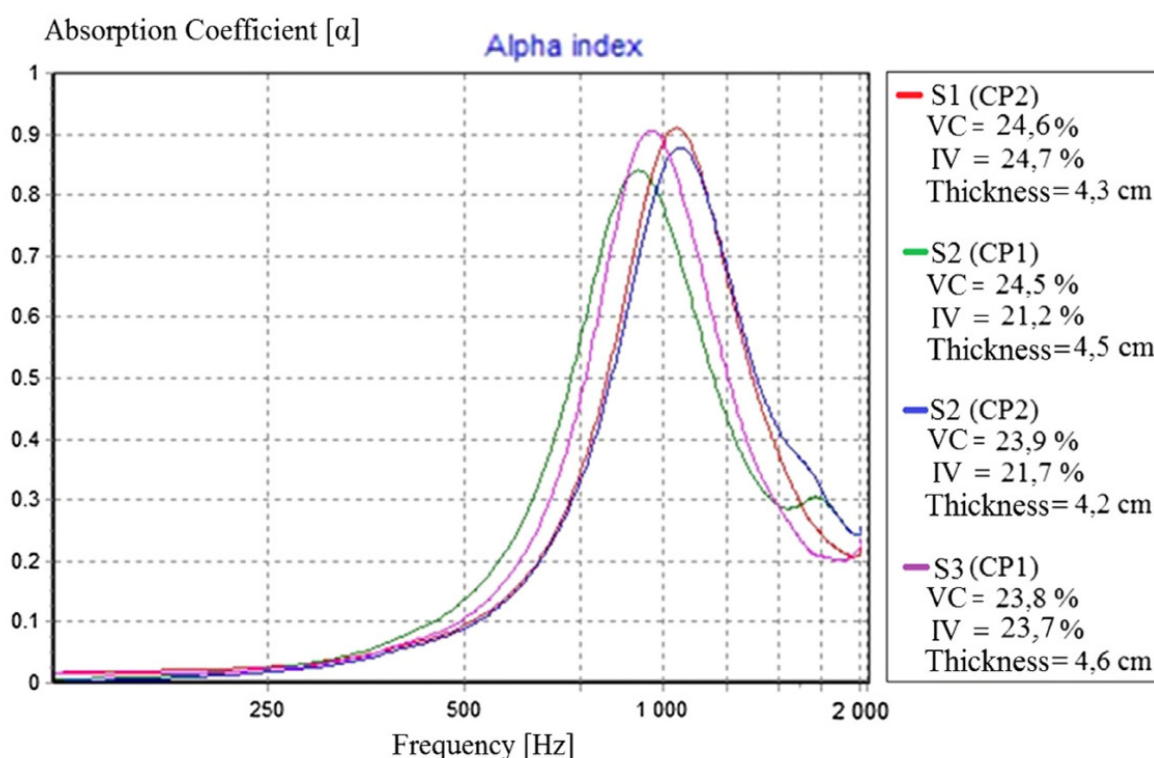


S1 – Slabs 1; S2 – Slabs 2; S3 – Slabs 3, D_{\max} = maximum aggregate size; IV = Interconnected Voids; VC = Voids Contents.

Rys. 1.16. Wpływ zawartości wolnych przestrzeni w strukturze nawierzchni na współczynnik pochłaniania dźwięku przy zachowaniu takiej samej ilości porów otwartych [74]

Analizując powyższe wyniki stwierdzono [74], że przy zachowaniu takiej samej ilości porów otwartych wielkość zawartości wolnych przestrzeni w strukturze materiału wpływa na charakterystykę pochłaniania. Współczynnik pochłaniania dźwięku jest tym większy im większa jest liczba wolnych przestrzeni. Wartości szczytowe są dodatkowo przesunięte w kierunku wyższych częstotliwości, co jednak może mieć związek z grubością badanych próbek, które różniły się między sobą (od 4.0 do 4.5 cm).

W celu oceny wpływu zawartości porów otwartych w strukturze nawierzchni Knabben [74] przeprowadził badania dla próbek o bardzo zbliżonej zawartości wolnych przestrzeni oraz takiej samej wielkości maksymalnej kruszywa (12.5 mm). Wyniki tych badań przedstawiono poniżej na rys. 1.17.

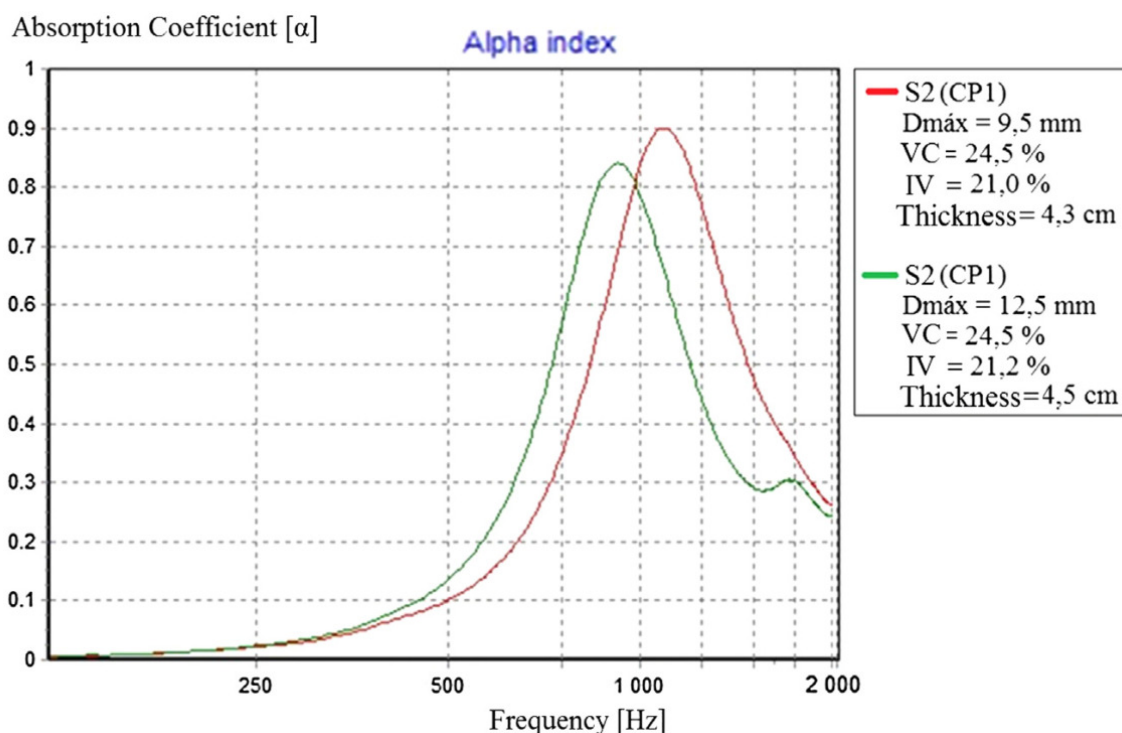


Rys. 1.17. Wpływ udziału procentowego otwartych porów (połączonych wewnątrz struktury) na pochłanianie dźwięku przez nawierzchnie drogowe przy takiej samej wielkości maksymalnej kruszywa [74]

Analizując wyniki krzywej pochłaniania przedstawionej na powyższym rysunku stwierdzono, że wielkość wartości szczytowych współczynnika pochłaniania zależy od zawartości porów otwartych. Im wyższy udział przestrzeni otwartych i połączonych wewnątrz struktury materiału, tym można zaobserwować wyższe wartości współczynnika pochłaniania dźwięku. Asphalt porowaty posiada zwykle nieciągle uziarnienie. Zawiera głównie grube kruszywo i proporcjonalnie mało piasku oraz wypełniacza, które połączone są lepiszczem bitumicznym. Struktura taka tworzy przepuszczalny szkielet z dużą zawartością wolnych przestrzeni oraz przestrzeni połączonych wewnątrz struktury. Energia akustyczna jest pochłaniania bardziej, jeżeli udział połączonych przestrzeni jest większy [74].

W ramach artykułu [74] zbadano także, jaki wpływ na pochłanianie dźwięku przez nawierzchnie drogowe ma wielkość maksymalnej średnicy kruszywa w nawierzchni. W tym celu wykonano pomiary dla dwóch rodzajów nawierzchni, które charakteryzowały się tą samą

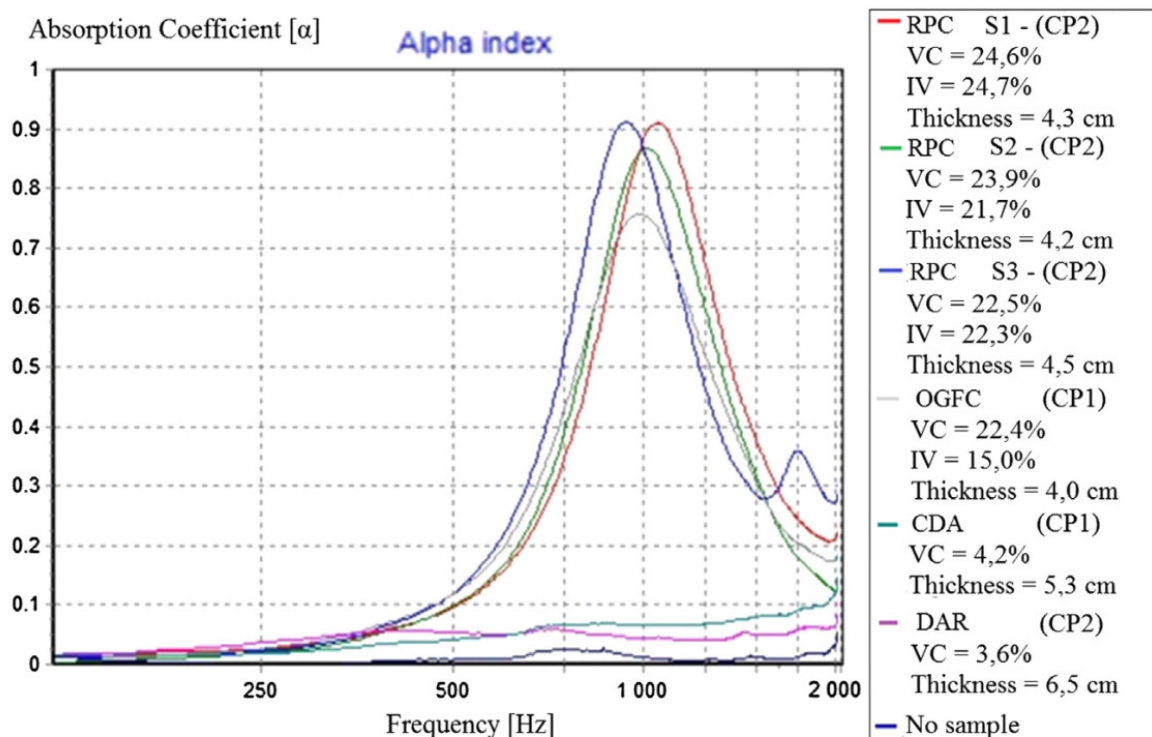
zawartością wolnych przestrzeni oraz porów otwartych oraz posiadały inną wielkość maksymalną kruszywa (9.5 oraz 12.5 mm). Wyniki badań przedstawiono poniżej na rys. 1.18.



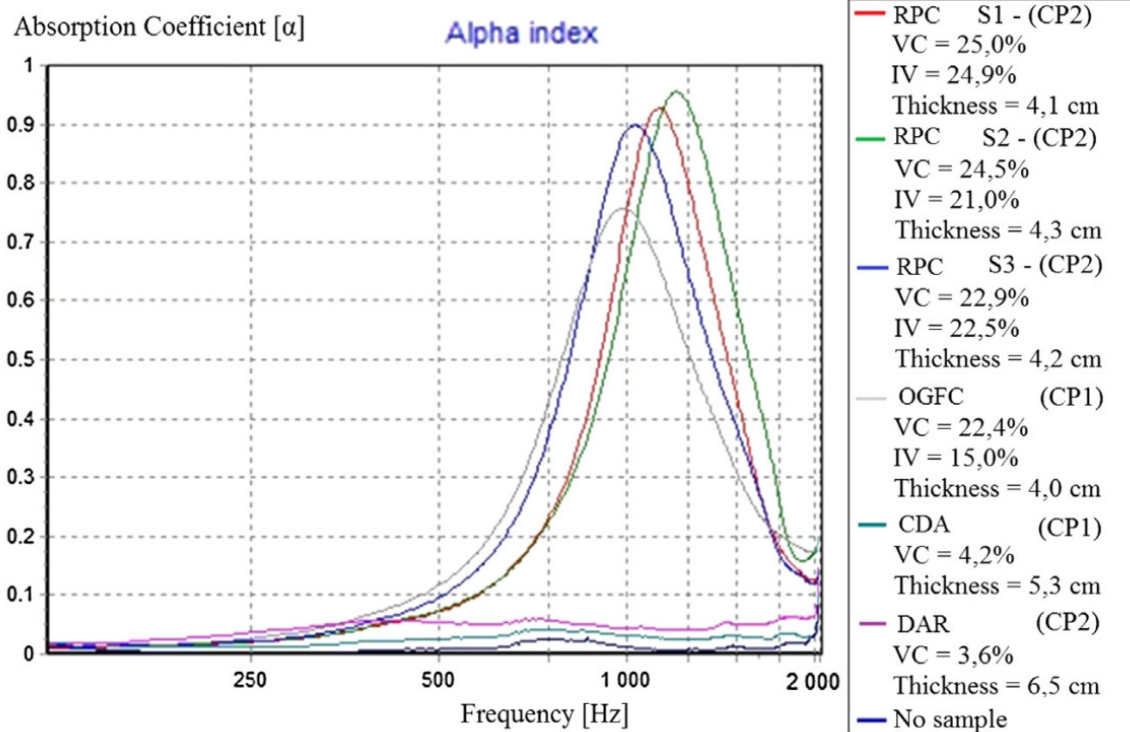
Rys. 1.18. Wpływ wielkości maksymalnej kruszywa na pochłanianie dźwięku przez nawierzchnie drogowe [74]

Analizując wyniki przedstawione na wykresie powyżej stwierdzono, że nawierzchnia o maksymalnej średnicy ziarna równej 9.5 mm ma lepsze właściwości pochłaniania dźwięku od próbki o maksymalnej średnicy kruszywa równej 12.5 mm. Chociaż w badanym przypadku udział wolnych przestrzeni w próbkach nawierzchni był taki sam, stwierdzono, że nawierzchnia o mniejszej maksymalnej średnicy ziarna ma tendencję do posiadania większej liczby porów (kanałów), w których następuje propagacja dźwięku i w rezultacie pochłanianie materiału jest większe. Dodatkowo nawierzchnia o drobniejszym uziarnieniu powoduje także redukcję hałasu powstającego na stuku kół pojazdów i nawierzchni drogowej [74].

Wykonano także badania, których celem było określenie wpływu rodzaju nawierzchni drogowej na pochłanianie dźwięku. Wyniki te przedstawiono poniżej na rys. 1.19 i rys. 1.20 w podziale na różne wartości maksymalnej średnicy kruszywa (odpowiednio 9.5 i 12.5 mm) [74].



Rys. 1.19. Wpływ różnego typu nawierzchni o maksymalnej średnicy kruszywa równej 12.5 mm na współczynnik pochłaniania dźwięku [74]

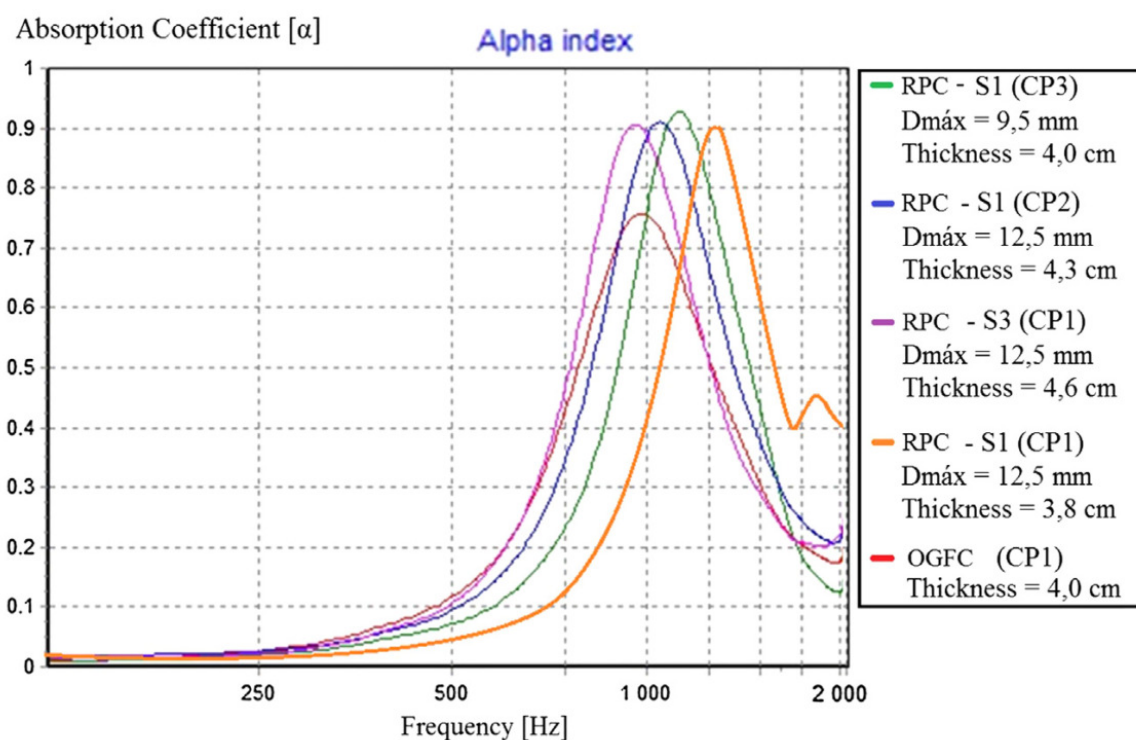


Rys. 1.20. Wpływ różnego typu nawierzchni o maksymalnej średnicy kruszywa równej 9.5 mm na współczynnik pochłaniania dźwięku [74]

Analizując wyniki przedstawione na obydwu powyższych wykresach, stwierdzono, że co oczywiste, nawierzchnie porowate charakteryzowały się większym pochłanianiem dźwięku od nawierzchni szczelnych. Jest to oczywiście zależne od zawartości wolnych przestrzeni w strukturze próbek. Nawierzchnie szczelne charakteryzują się dużo mniejszymi właściwościami pochłaniania dźwięku. Wyniki dla obydwu szczelnych nawierzchni niewiele różnią się między sobą [74].

Pomimo podobnych wielkości wolnych przestrzeni zaobserwowano, że nawierzchnia porowata modyfikowana gumą (RPC) charakteryzuje się lepszymi własnościami pochłaniania dźwięku od drugiej badanej nawierzchni porowatej – nawierzchni o otwartym uziarnieniu modyfikowanej gumą (OGFC). Wynika to z faktu różnej zawartości porów otwartych, o czym wspomniano już we wcześniejszej części artykułu. Należy jednak mieć na uwadze, że nawierzchnia OGFC charakteryzowała się lepszymi właściwościami mechanicznymi (testy wytrzymałości na rozciąganie oraz Cantabro) [74].

Ostatnim parametrem mającym wpływ na pochłanianie dźwięku badanym w ramach artykułu [74] była grubość warstwy nawierzchni. Wyniki te dla obydwu porowatych nawierzchni przedstawiono poniżej na rys. 1.21.



Rys. 1.21. Wpływ grubości nawierzchni na pochłanianie dźwięku [74]

Przeprowadzone badania w ramach [74], których wyniki przedstawiono powyżej, miały na celu określenie grubości, z jaką powinna zostać wykonana warstwa ściernalna, aby wartości szczytowe współczynnika pochłaniania dźwięku występowały przy częstotliwości jak najbardziej zbliżonej do 1000 Hz. Wyniki te wskazują, że dywanik porowaty modyfikowany gumą (RPC) powinien mieć grubość pomiędzy 4.3 i 4.6 mm, aby osiągnąć efekt, o którym pisano powyżej. Nawierzchnia o otwartym kruszywie modyfikowana gumą (OGFC), przy mniejszej grubości, równej 4.0 mm także spełnia to założenie. Jest więc ona bardziej

ekonomiczna do zastosowania oraz posiada lepsze właściwości mechaniczne, o czym wspomniano wcześniej.

Badania wykonywane rurą impedancyjną służą głównie do wykonywania pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku oraz impedancji powierzchniowej badanych materiałów. Po dokonaniu modyfikacji w technice pomiarowej możliwe jest także wykonanie pomiarów innych właściwości badanych materiałów lub źródeł dźwięku. Jednym z dodatkowych zastosowań rury impedancyjnej jest możliwość dokonania za jej pomocą pomiaru impedancji samego źródła dźwięku. Liu i Herrin opisali w 2008 r. tzw. uproszczoną metodę dwóch obciążeń służącą do wyznaczania impedancji akustycznej źródła dźwięku [102]. Polega ona na użyciu rozkładu padającej fali i wykorzystaniu analogii do elektrycznych obwodów równoważnych. Zaletą tej metody jest fakt, że jest ona oparta na właściwościach akustycznych. Poza tym impedancja akustyczna jest określana bezpośrednio przy źródle, a nie w miejscu lokalizacji mikrofonu pomiarowego. Uproszczona metoda dwóch obciążeń została szczegółowo opisana w artykule [102], w związku z czym nie opisywano jej w dalszej części poniższego rozdziału.

Za pomocą rury impedancyjnej można także wykonać pomiary impedancji charakterystycznej i stałej propagacji dźwięku materiałów porowatych. Jest to możliwe m.in. przy użyciu metody opisanej w [103].

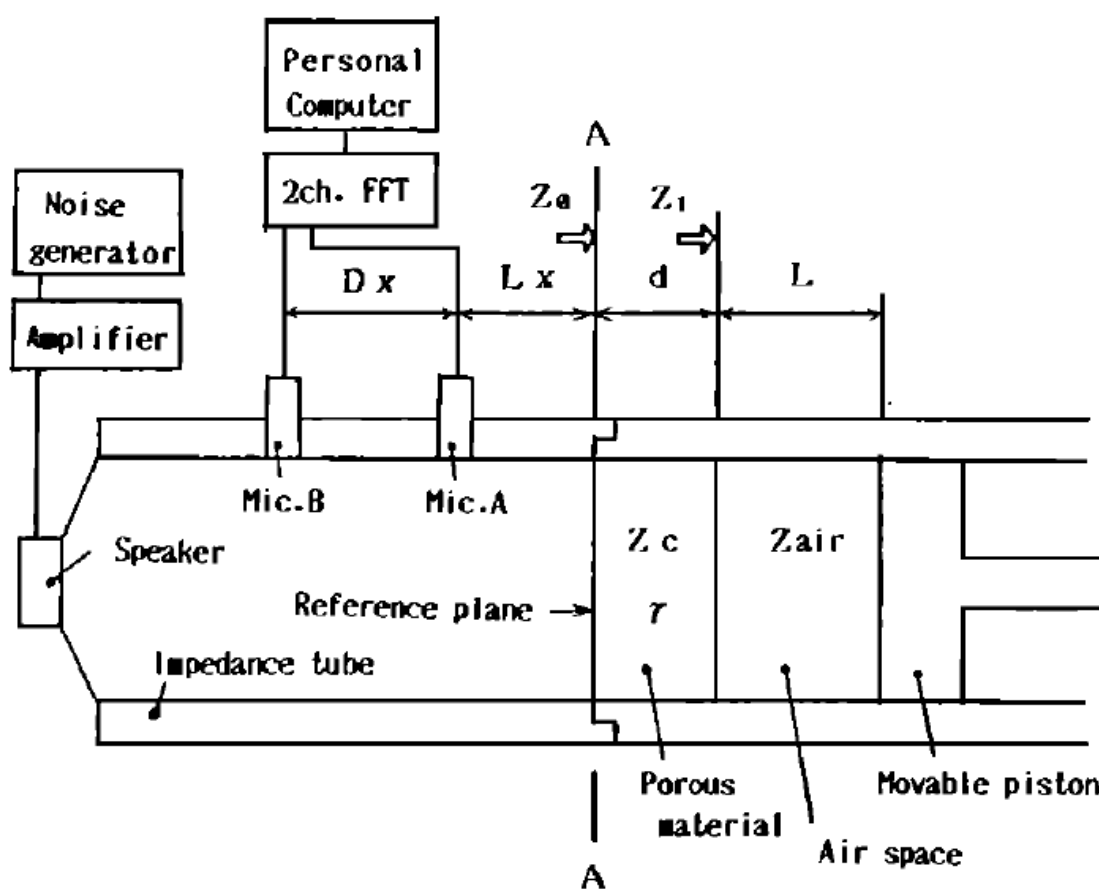
Pomiary wykonywane przy użyciu metody opisane w [103] polegają na pomiarze impedancji powierzchniowej na obydwu powierzchniach próbki (od strony źródła dźwięku oraz od strony zakończenia rury impedancyjnej). Jest to możliwe poprzez pozostawienie przestrzeni powietrznej za badaną próbką. W celu zwalidowania tej metody, przeprowadzono eksperymentalne badania za pomocą takich materiałów, jak wełna szklana i porowate aluminium. Powierzchniową impedancję akustyczną i fizyczny współczynnik pochłaniania dźwięku badanych materiałów z zastosowaniem różnych ich grubości lub przerwy powietrznej obliczono na podstawie otrzymanej z pomiarów impedancji charakterystycznej i stałej propagacji dźwięku.

W celu otrzymania impedancji charakterystycznej i stałej propagacji dźwięku badanych materiałów zostały opracowane i rozwinięte dwa podejścia. W pierwszym z nich założono, że właściwą charakterystykę materiałów porowatych można opisać na podstawie podstawowej zasady: propagacji dźwięku w badanym materiale. Podejście to zostało opisane i rozwinięte przede wszystkim przez Zwikkera i Kostena [104].

Drugie podejście opisywane w [103] opiera się na badaniu właściwości akustycznych. W najbardziej prosty sposób opisuje ją Scott w artykule [105]. Technika ta opiera się na pomiarach tłumienia i zmiany fazy dźwięku przy prostopadłym rozchodzeniu się dźwięku wewnątrz materiału porowatego. Materiał ten musiał być wystarczająco gruby, aby zapobiec przenikaniu dźwięku powstającego z odbić w tubie impedancyjnej. Metoda ta została następnie rozwinięta przez Yaniva i opisana w [106]. Impedancja charakterystyczna i stała propagacji były obliczane z różnych impedancji akustycznych mierzonych na powierzchni materiału porowatego. Były one uzyskiwane poprzez zmianę przestrzeni powietrznej za materiałem porowatym – w jednym przypadku był on umieszczony bezpośrednio na sztywnej ścianie kończącej rurę impedancyjną, a w drugim w odległości równej jednej czwartej długości fali dźwiękowej przed sztywną ścianką. Nieco inaczej pomiary te wykonywali Smith i Parrott [107]. Stosowali oni dwie różne grubości tego samego materiału oparte na sztywnej ścianie zamykającej rurę impedancyjną. Nazwali oni swoją technikę „metodą dwóch grubości”, a technikę rozwiniętą przez Yaniva „metodą dwóch wnęk”. Smith i Parrott mierzyli impedancję akustyczną wykorzystując konwencjonalną metodę współczynnika fali

stojącej, natomiast Terao i Sekine opisał i wykorzystywał metodę funkcji przejścia w metodzie dwóch grubości [108].

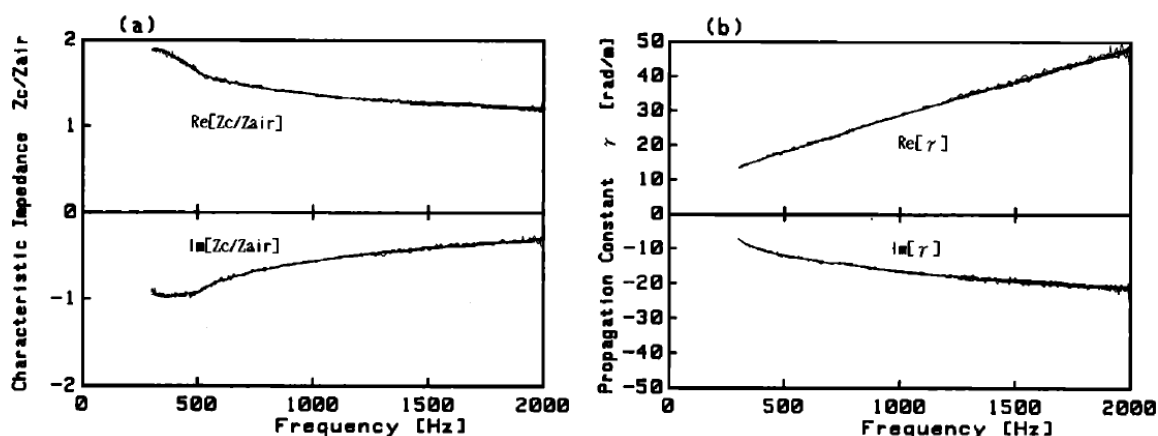
Metodę opisaną w [103] należy uznać za rozwinięcie metody dwóch wnęk. Wymagała ona pierwotnie otrzymania dwóch impedancji akustycznych na powierzchni za badanym materiałem, jednej równej zero, a drugiej równej nieskończoność. Osiągało się to poprzez utworzenie przestrzeni powietrznej pomiędzy tylną powierzchnią badanej próbki a sztywną ścianą, która stanowiła zakończenie rury impedancyjnej. Odległość pomiędzy próbką, a ścianą musiała być zmieniana dla każdej badanej częstotliwości (musiała być ona równa jednej czwartej długości badanej częstotliwości). Było to dosyć kłopotliwe. Rozwinięta przez Utsuno [103] metoda dwóch wnęk nie wymagała natomiast zmiany tej przestrzeni. W tym celu wykorzystano impedancję obliczoną w zamkniętej rurze, którą można uzyskać teoretycznie. Poniżej na rys. 1.22 przedstawiono schemat układu pomiarowego wykorzystywanego przez Utsuno [103].



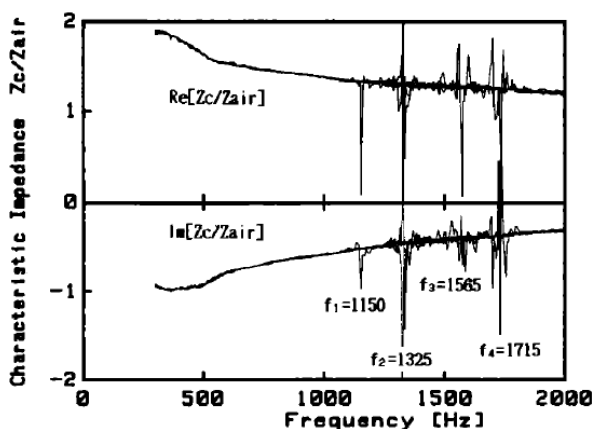
Rys. 1.22. Schemat układu pomiarowego wykorzystywanego do pomiarów przez Utsuno [103]

W artykule [103] przedstawiony został eksperymentalny dowód na potwierdzenie dokładności opisanej metody. Badania polegały na pomiarach impedancji charakterystycznej i współczynnika propagacji dwóch próbek wykonanych z wełny szklanej (o grubości 50 mm) i porowatego aluminium (o grubości 20 mm). W tym celu wykorzystano rurę impedancyjną o długości 1 m i średnicy wewnętrznej 87.5 mm. Uzyskano bardzo dużą zgodność wartości obydwu mierzonych parametrów, przy czym zauważono, że wybór konkretnych wielkości przestrzeni powietrznych może mieć wpływ na dokładność wyników. Przykładowo przy

pomiarach próbki wykonanej z wełny szklanej uzyskano bardzo dokładne wyniki przy wykorzystaniu następujących par odległości L (zgodnie z rys. 1.22): (20 mm, 40 mm), (20 mm, 70 mm), (20 mm, 100 mm), (40 mm, 70 mm), (40 mm, 100 mm) i (70 mm, 100 mm). Natomiast pojawiły się pewne niedokładności po zastosowaniu innych zestawów przestrzeni powietrznych, takich jak: (20 mm, 150 mm), (20 mm, 170 mm), (40 mm, 150 mm), (40 mm, 170 mm) i (70 mm, 170 mm). Można ją zaobserwować w zakresie częstotliwości od 1100 Hz do 1700 Hz. porównując dane przedstawione poniżej na rys. 1.23 i rys. 1.24 [103].



Rys. 1.23. Wyniki pomiarów impedancji charakterystycznej i stałej propagacji dźwięku przy użyciu próbki z wełny szklanej oraz pozostawieniu przestrzeni powietrznych o długościach odpowiednio: (20 mm, 40 mm), (20 mm, 70 mm), (20 mm, 100 mm), (40 mm, 70 mm), (40 mm, 100 mm) i (70 mm, 100 mm) [103].



Rys. 1.24. Wyniki pomiarów impedancji charakterystycznej przy użyciu próbki z wełny szklanej oraz pozostawieniu przestrzeni powietrznych o długościach odpowiednio: (20 mm, 150 mm), (20 mm, 170 mm), (40 mm, 150 mm), (40 mm, 170 mm) i (70 mm, 170 mm) [103].

Wyniki pomiarów porównano je z wartościami zmierzonymi bezpośrednio przy użyciu metody funkcji przejścia opisywaną m.in. w [87], [88]. Uzyskano dobrą zgodność wyników co sugeruje, że opisywana metoda jest wystarczająco wiarygodna i efektywna do

wykorzystywania w pomiarach impedancji charakterystycznej i stałej propagacji całym zakresie częstotliwości.

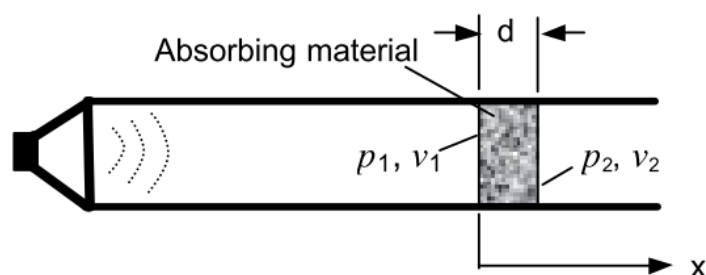
Alternatywą do powyższej metody jest metoda dwóch źródeł opisana w [109], która wykorzystuje metodę matrycy przejścia opisaną w [110]. W skrócie polega ona na zastosowaniu elementu akustycznego, takiego jak tłumik lub fragment materiału pochłaniającego, które mogą być opisane za pomocą tzw. czterobiegunowych parametrów z wykorzystaniem propagacji fali płaskiej. Te parametry mogą być obliczone z pomiarów w odpowiednich pozycjach czterech mikrofonów przy użyciu dwóch źródeł dźwięku. Podobne podejście, ale z użyciem jednego źródła dźwięku zaproponowali wcześniej Song i Bolton [83] wykorzystując cechy materiału izotropowego i jednorodnego.

Metoda dwóch źródeł opisywana w [109] opiera się na macierzy funkcji przejścia. Relacja pomiędzy ciśnieniem akustycznym oraz prędkością dźwięku przed i za materiałem pochłaniającym dźwięk i umieszczonym w rurze impedancyjnej (rys. 1.25). została opisana przy użyciu czterech biegunowych parametrów, w sposób taki, jak poniżej:

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (1.40)$$

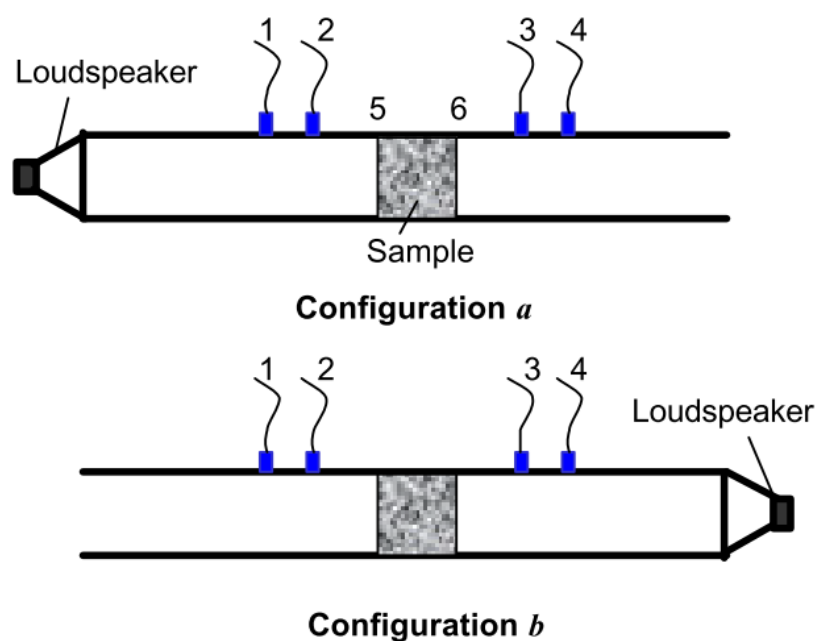
gdzie:

p_1 i p_2 - amplitudy ciśnień akustycznych,
 v_1 i v_2 - amplitudy prędkości dźwięku.



Rys. 1.25. Schemat przedstawiający parametry mierzone za pomocą metody dwóch źródeł [109]

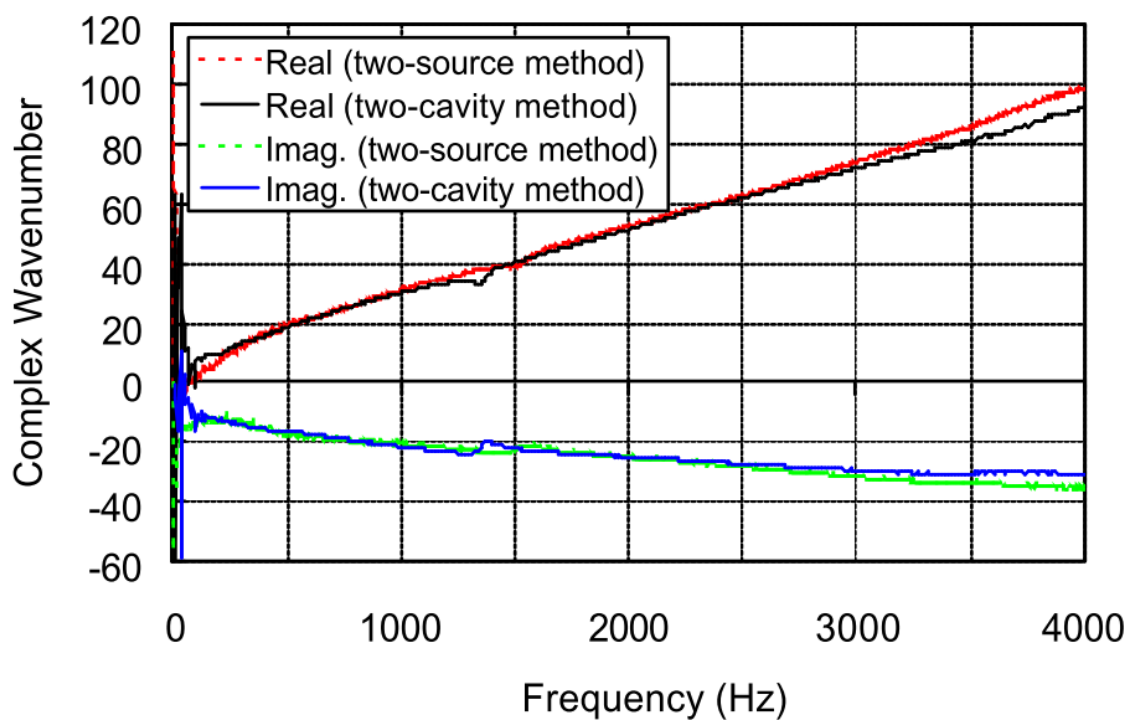
Używając metody dwóch źródeł należy umieścić głośnik po obydwu stronach rury impedancyjnej (układ a i b), tak jak pokazano to na rys. 1.26 [109]. Układ pomiarowy może być traktowany jako trzy oddzielne elementy (strefy) pomiędzy kolejnymi lokalizacjami mikrofonów (1-2, 2-3, 3-4). Element 2-3 może być natomiast podzielony na trzy pod-elementy 2-5, 5-6, 6-3.



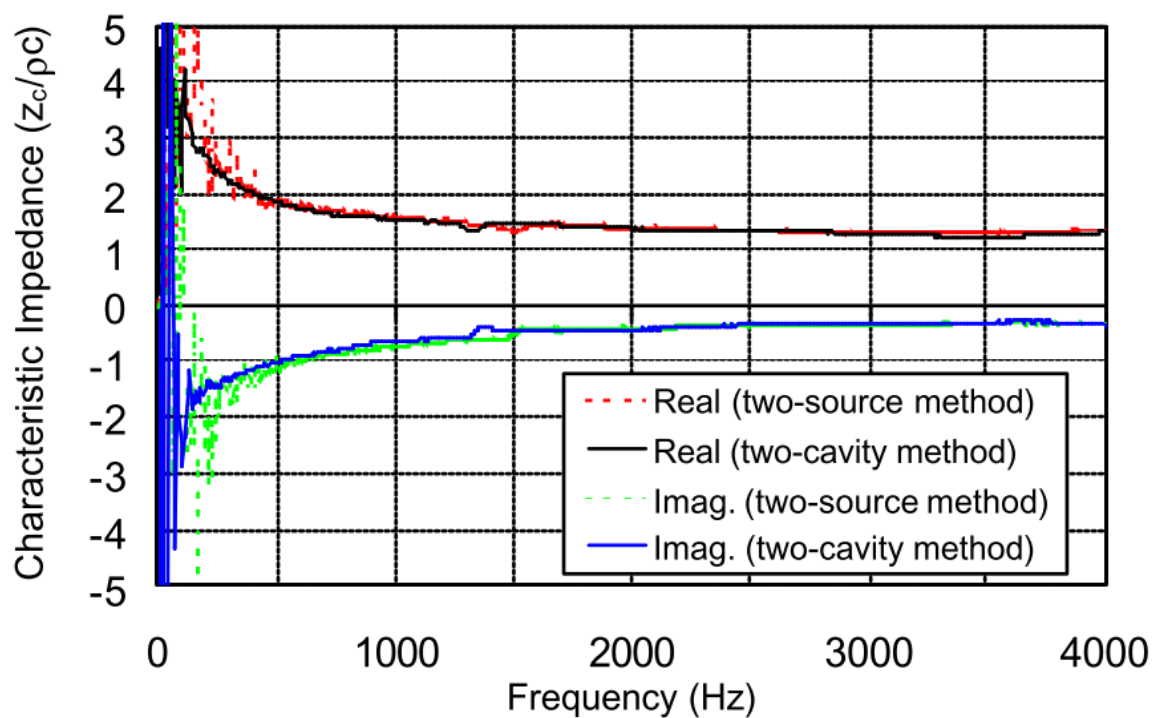
Rys. 1.26. Konfiguracje układu głośników w metodzie dwóch źródeł [109]

Należy dodać, że metoda dwóch źródeł może być realizowana przy użyciu tylko dwóch mikrofonów. Wszystkie wartości funkcji przejścia można uzyskać poprzez pozostawienie jednego mikrofonu, jako referencyjnego oraz zmianę lokalizacji drugiego mikrofonu. Łatwiejsze może być także odwrócenie badanej próbki w rurze impedancyjnej niż zmiana lokalizacji głośnika, który bardzo często jest umieszczany w przyrządach pomiarowych na stałe [109].

Poniżej na rys. 1.27 i rys. 1.28 przedstawiono zestawienie wyników pomiarów impedancji charakterystycznej i liczby falowej uzyskane [109] za pomocą dwóch metod: metody dwóch źródeł oraz dwóch przestrzeni. Dla materiału wysoko pochłaniającego dźwięk (poliester) obydwie metody dają bardzo zbliżone wyniki.



Rys. 1.27. Wyniki pomiarów złożonej liczby falowej wykonanych za pomocą metody dwóch źródeł i dwóch przestrzeni dla materiału wysoko pochłaniającego dźwięk (poliester) [109]



Rys. 1.28. Wyniki pomiarów złożonej impedancji akustycznej wykonanych za pomocą metody dwóch źródeł i dwóch przestrzeni dla materiału wysoko pochłaniającego dźwięk (poliester) [109]

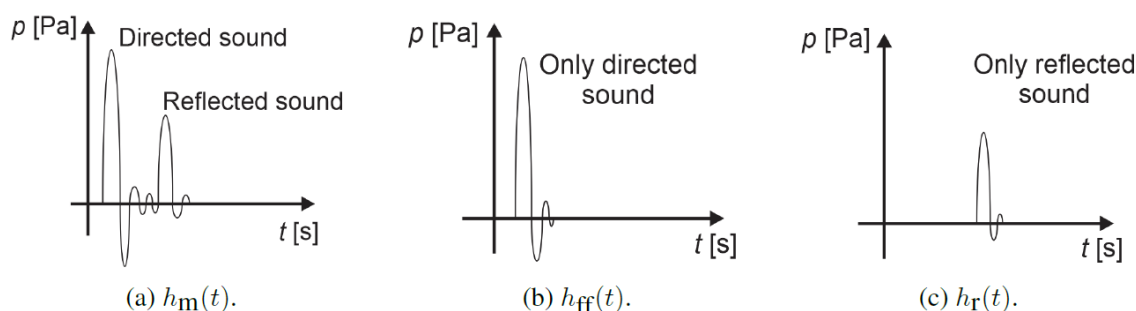
Lobato i Carneiro opisali w artykule [111] metodę alternatywną do tych, które wykorzystuje się w pomiarach wykorzystanych za pomocą rury impedancyjnej. Jest nieniszcząca metoda „in situ” pomiarów pochłaniania dźwięku za pomocą skonstruowanego przez nich systemu pomiarowego. Celem pracy było stworzenie nowego przyrządu pomiarowego, którym mogliby się posługiwać studenci inżynierii akustycznej na Uniwersytecie Federalnym Santa Maria w Brazylii

W chwili obecnej do pomiarów impedancji powierzchniowej oraz współczynnika pochłaniania dźwięku materiałów stosuje się powszechnie metodę rury impedancyjnej opisaną w (ISO 10534-2, 1998) oraz metodę komory pogłosowej opisaną w (PN-EN ISO 354, 2005). Obydwie one posiadają pewne ograniczenia. Metoda rury impedancyjnej wymaga pobrania z istniejącej struktury próbki (jest metodą niszcząca). Posiada ona także ograniczony zakres częstotliwościowy, który jest uzależniony od wymiarów przyrządu (długości oraz średnicy wewnętrznej). Metoda komory pogłosowej wymaga natomiast zastosowania próbki o stosunkowo dużej powierzchni ok. 12 m² (w zależności od wymiarów komory pogłosowej). Metoda in situ opisana w [111] jest dla nich alternatywą, ponieważ jest techniką niedestrukcyjną, może być stosowana w warunkach rzeczywistych, może być stosowana przy prostym i ukośnym padaniu fali na próbkę pomiarową oraz ma rozszerzony roboczy zakres częstotliwościowy [113].

Metody „in situ” zostały podzielone [113] na dwie grupy: metody czasowej separacji oraz metody pola akustycznego. Pierwsza z nich została opisana w [114] na podstawie [115]. Polega na odseparowaniu podczas prowadzenia pomiarów fali padającej na badaną próbkę oraz fali odbitej. Poprzez uzyskanie wielkości ciśnienia akustycznego fali odbitej p_r oraz ciśnienia akustycznego fali padającej p_i możliwe jest obliczenie współczynnika odbicia dźwięku R z zależności:

$$R = \frac{p_r}{p_i} \quad (1.41)$$

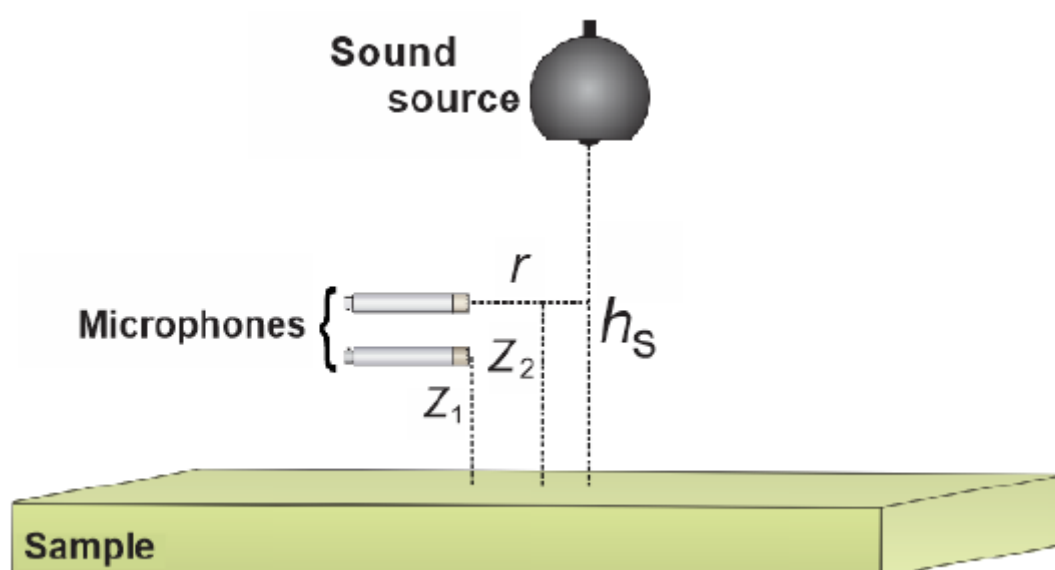
W praktyce badanie takie wykonuje się poprzez pomiar ciśnienia akustycznego fali padającej i odbitej od badanej próbki (rys. 1.29a), a następnie pomiar tylko fali padającej na próbkę (rys. 1.29b) poprzez jej usunięcie. Na tej podstawie możliwe jest obliczenie ciśnienia akustycznego pochodzącego od fali odbitej (rys. 1.29c) oraz obliczenie współczynnika odbicia dźwięku z powyższej zależności [111].



Rys. 1.29. Graficzne przedstawienie zależności ciśnienia akustycznego fali padającej i odbitej od próbki (a), tylko fali padającej na badaną próbkę (b) oraz tylko fali odbitej od badanej próbki (c) [111].

Druga grupa metod pomiarowych in situ opisana w [113], to metody pola akustycznego. Polegają one na opisywaniu pola akustycznego nad badaną próbką poprzez zastosowanie formuł matematycznych dla tych zmiennych, które można zmierzyć. Z reguły tymi zmiennymi jest ciśnienie akustyczne lub prędkość dźwięku. Na podstawie tych pomiarów możliwe jest obliczenie powierzchniowej impedancji akustycznej przy wykorzystaniu wielu formuł matematycznych [111].

Metoda in situ „PP-system” opisana w [111] zalicza się do grupy metod pola akustycznego. Schemat układu pomiarowego przedstawiono poniżej na rys. 1.30, gdzie z_1 i z_2 są odległościami mikrofonów pomiarowych od badanej powierzchni, h_s jest odległością źródła dźwięku od badanej powierzchni, a r jest poziomą odległością mikrofonów pomiarowych od osi prostopadłej do badanej powierzchni wychodzącej od źródła dźwięku. Ciśnienia akustyczne zmierzone w obydwu mikrofonach są następnie wykorzystywane w algorytmach obliczeniowych opisujących pole akustyczne.

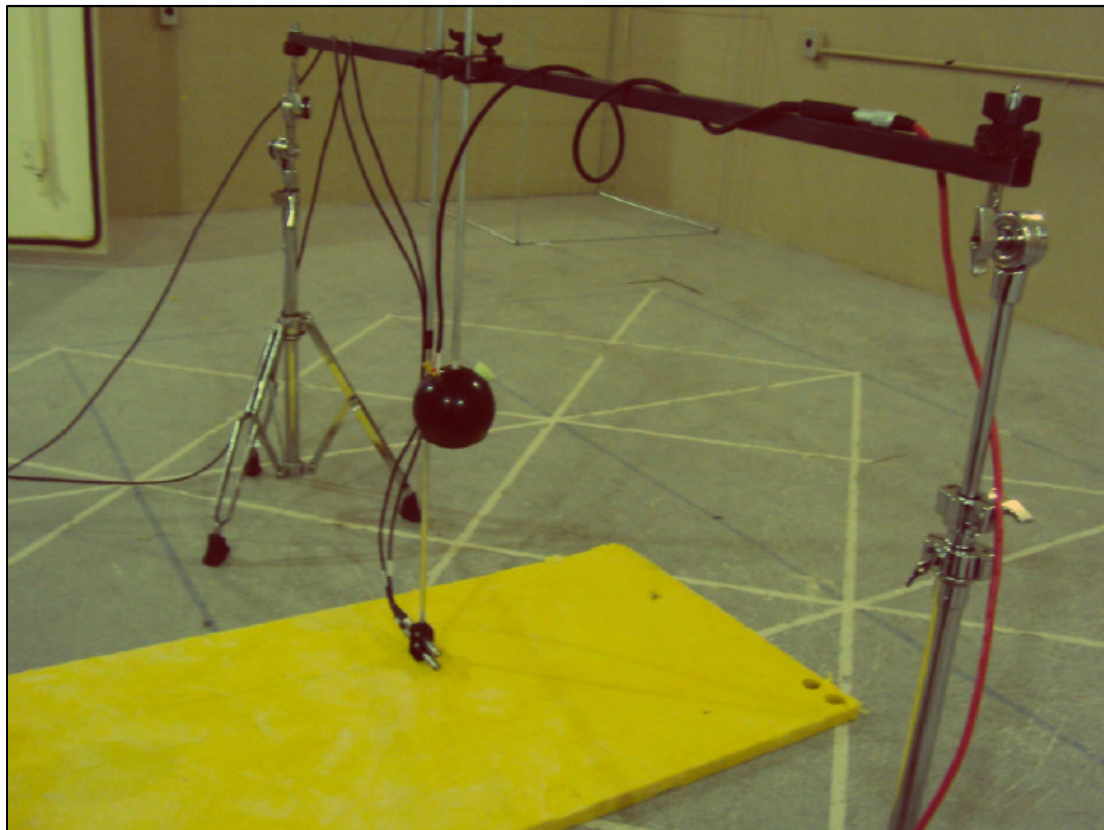


Rys. 1.30. Schemat układu pomiarowego wykorzystywanego do pomiarów parametrów akustycznych materiałów za pomocą metody PP-system [111]

W metodzie opracowanej przez Lobato i Carneiro [111] wykorzystane zostały dwa algorytmy obliczeniowe PWA i Q-term. W metodzie PWA opisane są zależności kulistego źródła dźwięku przy założeniu, że fala dźwiękowa odbita od badanej powierzchni staje się falą płaską. Występuje tu zatem uproszczenie w stosunku do rzeczywistości. Metoda Q-term określa natomiast falę odbitą, jako kulistą. Z tego powodu metoda Q-term jest metodą dokładniejszą. Wielkości wejściowe do tego algorytmu są natomiast dostarczane z obliczeń wykonanych metodą PWA. Metoda Q-term została opisana w [116] i oparta na poniższym wyrażeniu opracowanym przez Xiao i Gilberta w [117]:

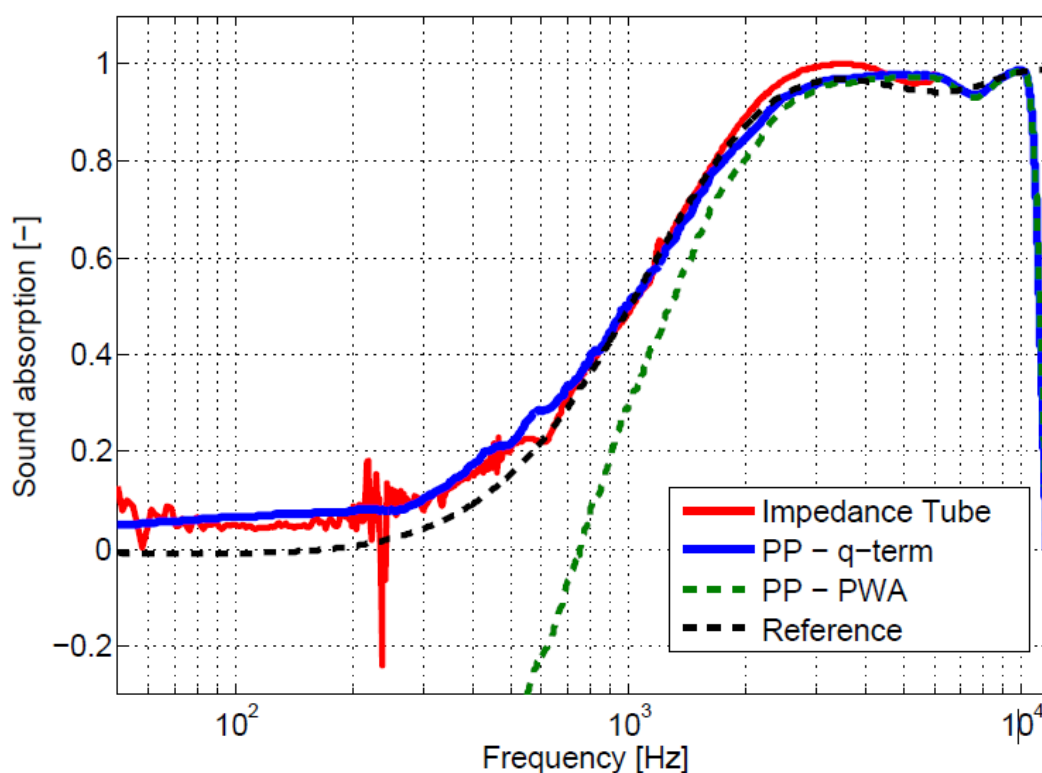
$$p = \frac{e^{-jk_0|r_1|}}{|r_1|} + \frac{e^{-jk_0|r_2|}}{|r_2|} - 2k_0\beta \int_0^\infty e^{-k_0\beta q} \frac{e^{-jk_0\sqrt{r^2+(h_s+h_r-jq)^2}}}{\sqrt{r^2+(h_s+h_r-jq)^2}} dq \quad (1.42)$$

Lobato i Carneiro zbudowali także konstrukcję umożliwiającą wykonanie pomiarów za pomocą metody opisanej przez nich w [111]. Poniżej na fot. 1.1 przedstawiono widok przyrządów pomiarowych oraz ich układu względem siebie w komorze pogłosowej, w której wykonano badania.



Fot. 1.1. Widok prototypu układu przyrządów PP-system do pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku za pomocą metody opisanej przez Lobato i Carneiro [111]

W celu wykonania badań porównawczych Lobato i Carneiro użyli prototypu urządzenia PP-system z następującymi ustawieniami (zgodnie z oznaczeniami na rys. 1.30) $z_1 = 1$ cm, $z_2 = 2.5$ cm, $h_s = 30$ cm oraz $r = 0$ cm [111]. Badana próbka posiadała wymiary 1.2×0.6 m, grubość równą 2 cm oraz oporność przepływu równą $54\,700$ Nsm⁻⁴. Wyniki pomiarów przy zastosowaniu algorytmów Q-term i PWA z porównaniem do wyników otrzymanych za pomocą pomiarów z użyciem rury impedancyjnej (na podstawie (ISO 10534-2, 1998)) oraz do modelu Delany-Bazleya dla materiałów porowatych [118] przedstawiono poniżej na rys. 1.31.



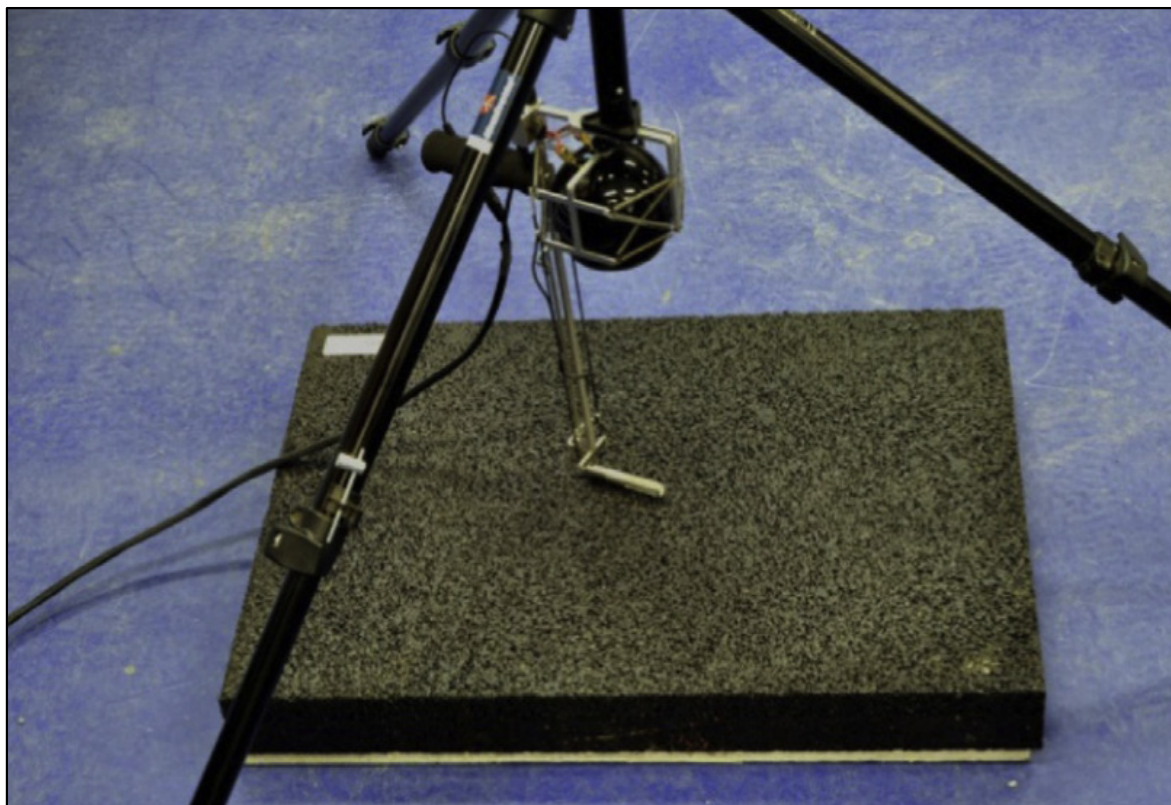
Rys. 1.31. Wyniki pomiarów wykonanych za pomocą metody opisanej przez Lobato i Carneiro [111] przy użyciu algorytmów Q-term i PWA w porównaniu do wyników otrzymanych z pomiarów wykonanych rurą impedancyjną oraz otrzymanych za pomocą metody Delany-Bazleya [118]

Analizując wyniki przedstawione powyżej stwierdzono, że wyniki pomiarów otrzymane za pomocą algorytmu PWA zbliżają się do wartości odniesienia jedynie dla wyższych częstotliwości (podobnie, jak wyniki obliczeń). Wyniki pomiarów otrzymanych przy użyciu algorytmu Q-term pokrywają się z wynikami otrzymanymi za pomocą rury impedancyjnej w częstotliwościach od 50 do 6000 Hz oraz z wynikami otrzymanymi za pomocą metody Delany-Bazleya [118] dla częstotliwości od 500 do 10 kHz. W niższych częstotliwościach można zauważyć różnicę na poziomie 0.05 w porównaniu do tej metody (różnice te mogą być spowodowane małą odległością pomiędzy mikrofonami pomiarowymi oraz niepewnością metody Delany-Bazleya dla niskich częstotliwości).

W ostatnich latach bardzo popularne w Holandii oraz kilku innych krajach Europy stały się cienkie warstwy nawierzchni porowatych [61]. Są one stosowane zarówno na drogach zlokalizowanych w obszarach zurbanizowanych, jak i prowincjonalnych. Mają grubość od 20 do 30 mm. W Holandii stosuje się typowo warstwy o grubości 25 mm. Redukcja hałasu jest w tych przypadkach osiągnięta poprzez drobną teksturę nawierzchni i wysoki współczynnik pochłaniania dźwięku [119]. Rozważano także możliwość zastosowania tego rozwiązania na holenderskich autostradach [2]. W ramach artykułu [61] zostały przeprowadzone badania akustyczne próbek wykonanych z trzech rodzajów kruszywa. Posiadały następujące wymiary: długość – 700 mm i szerokość 500 mm. Grubość próbek była równa 70 mm, przy czym 30 mm stanowiła górna warstwa wykonana z mieszanek o cechach przedstawionych powyżej, a 40 mm stanowiła warstwa wykonana z szczelnego betonu asfaltowego. Taki zestaw może być

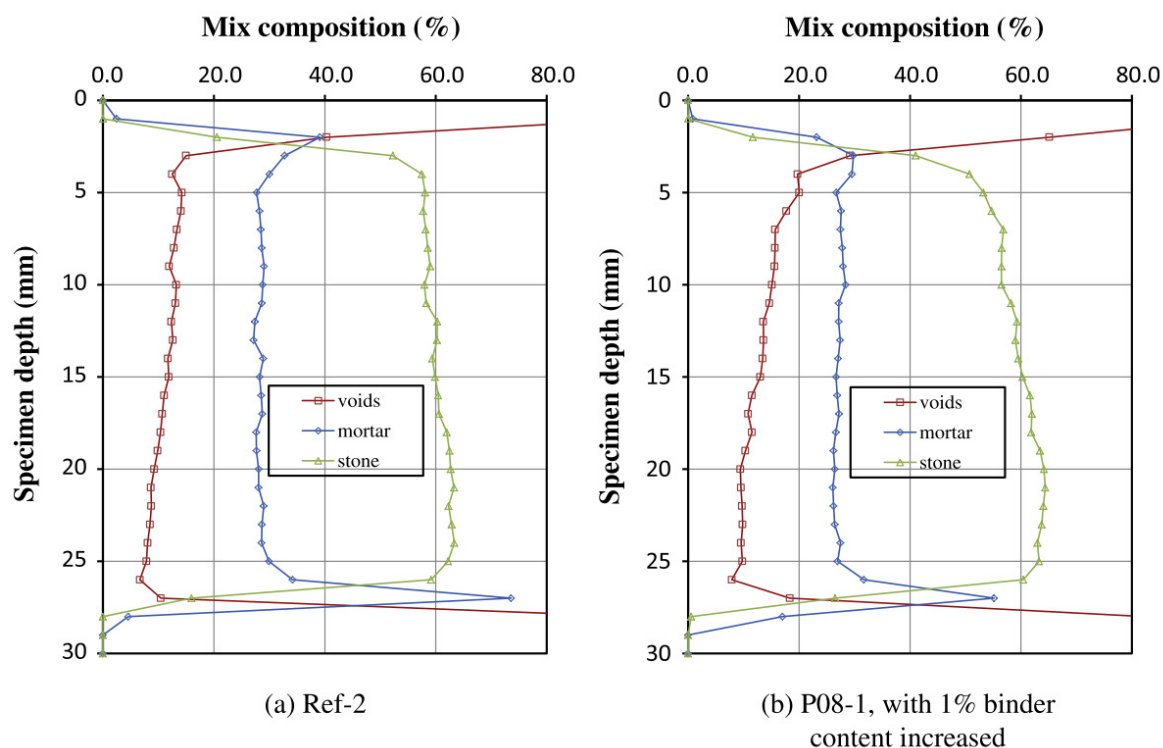
traktowany, jak typowo stosowana konstrukcja drogi [61]. Dodatkowo przeprowadzono badania z próbek nawierzchni pobranych z odcinków testowych wykonanych w Kloosterzande w Holandii, gdzie realizowano inny projekt badawczy [120].

Metodą użytą do badań, których wyniki zostały zaprezentowane w artykule [61] była tzw. metoda P-U opisana wcześniej w [121]. Polega ona na pomiarach ciśnienia akustycznego (P) oraz prędkości prędkości cząsteczek (U) bardzo blisko powierzchni badanej próbki. Na podstawie wyników tych pomiarów obliczana jest następnie powierzchniowa impedancja akustyczna. Poniżej, na fot. 1.2, przedstawiono widok zestawu pomiarowego wraz z badaną próbką.



Fot. 1.2. Układ pomiarowy wykorzystany do pomiarów powierzchniowej impedancji akustycznej metodą P-U wraz z badaną próbką nawierzchni [61]

Badania składu mieszanek wykorzystanych do badań przeprowadzono na podstawie szarych obrazów wygenerowanych po przeprowadzeniu tomografii komputerowej. Na tej podstawie określono zawartość w badanych próbkach kruszywa (o rozmiarze większym niż 2 mm), lepiszcza oraz wolnych przestrzeni. Parametry te zostały określone w funkcji głębokości badanych próbek. Przykładowe wyniki tomografii przedstawiono poniżej na rys. 1.32 [61].



Rys. 1.32. Przykładowe wyniki tomografii komputerowej badanych próbek przedstawiające zawartość kruszywa, lepiszcza i wolnych przestrzeni w funkcji głębokości [61].

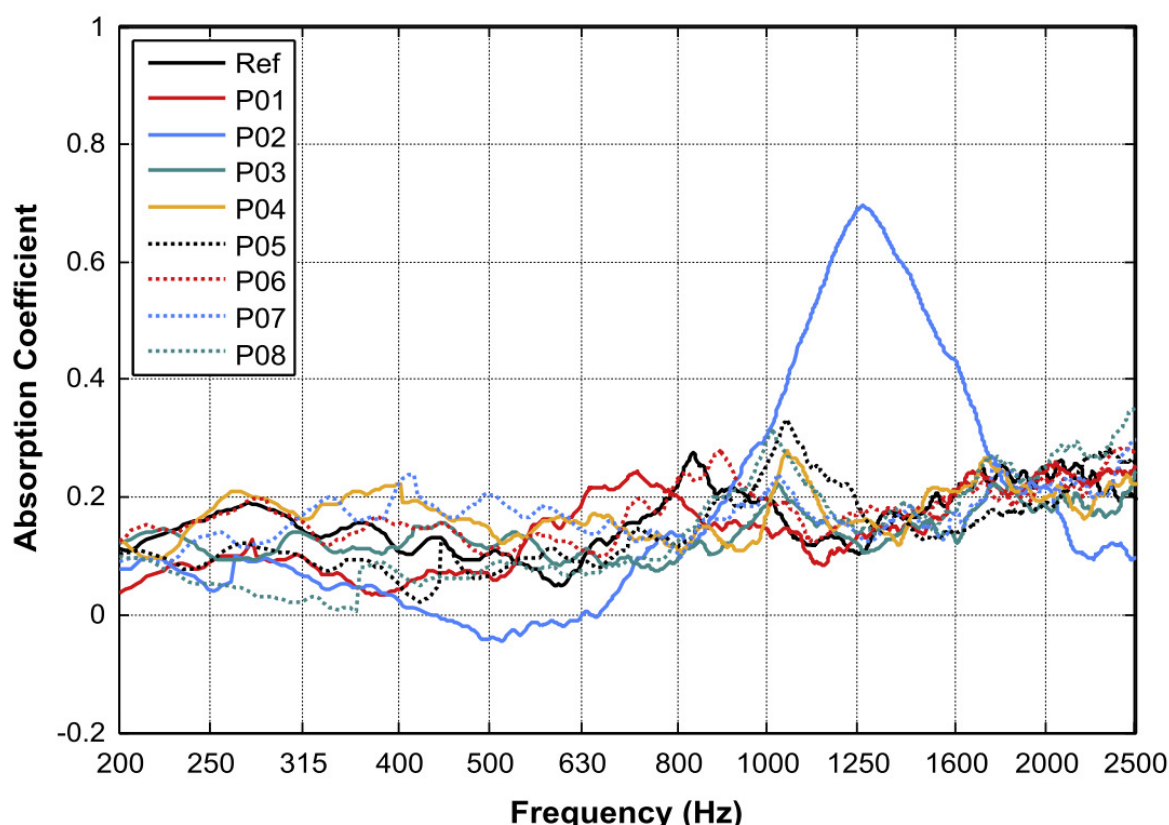
Analizując wyniki badań stwierdzono, że zawartość wolnych przestrzeni w strukturze badanych próbek na ich powierzchniach jest bardzo duża (znacznie większa od wartości projektowanej). Maleje ona natomiast wraz ze wzrostem głębokości. Dla przykładu w próbce oznaczonej, jako Ref-2 zawartość porów w głębokości bliskiej powierzchni próbki jest równa ok. 15%, podczas gdy na średniej głębokości maleje do 11.9%, a na samym dnie jest równa 6.7%. Wartość projektowana wolnych przestrzeni dla tej próbki jest natomiast równa 12%. Zawartość lepiszcza jest natomiast stała i niezależna od głębokości. Podobne wyniki otrzymano dla wszystkich badanych próbek, co przedstawiono poniżej w tablicy 3.4 [61].

Tablica 1.4. Zawartość wolnych przestrzeni i stopień ich połączenia w badanych próbkach [61]

Slab samples	Degree of connectivity	Air voids content, %	Maximum aggregate size, mm	Cores from trial sections	Degree of connectivity	Air voids content, %	Maximum aggregate size, mm
Ref	0.04	11.8	6	2-1	0.01	11.0	4
P01	0.09	10.7	6	2-2	0.00	4.8	4
P02	0.68	17.8	6	3-1	0.00	8.0	6
P03	0.03	8.8	6	4-1	0.77	18.0	6
P04	0.01	7.6	6	4-2	0.02	15.0	6
P05	0.42	12.6	8	5-1	0.51	14.3	8
P06	0.02	11.0	6	5-2	0.12	13.1	8
P07	0.00	12.1	6	9-1	0.89	24.0	8
P08	0.02	11.1	6	9-2	0.93	20.3	8
				15-1	0.23	18.9	6
				15-2	0.55	18.4	6
				24-1	0.98	27.4	8
				6-1	0.93	19.4	11
				7-1	0.90	19.1	16
				8-1	0.88	21.3	8
				31-1	0.99	31.3	11

Badania współczynnika pochłaniania dźwięku zostały wykonane w środkowych częściach każdej z próbek, przy czym pomiary wykonywano w piętnastu różnych pozycjach

mikrofonu. Następnie wykorzystano dwie metody prezentacji wyników. Pierwsza z nich polegała na przedstawieniu wartości współczynnika pochłaniania dźwięku dla wszystkich badanych częstotliwości. Z uwagi na fakt, że przy takim uśrednieniu może dojść do „rozmycia” wartości szczytowej i częstotliwości, w której ta wartość występuje, wykorzystano także drugą metodę. Polegała ona na uśrednianiu tylko wartości szczytowych współczynnika pochłaniania dźwięku oraz określania częstotliwości, w której ona występuje. Wyniki badań przedstawiających współczynnik pochłaniania dźwięku przez badane próbki w całym obserwowanym widmie przedstawiono poniżej na rys. 1.33 [61].



Rys. 1.33. Współczynnik pochłaniania dźwięku badanych próbek [61]

Analizując wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku przedstawione na powyższym rysunku należy stwierdzić, że tylko dla próbki P02 można zauważyć wyraźny peak dla częstotliwości zbliżonej do 1250 Hz. Współczynnik pochłaniania dźwięku osiąga dla tej częstotliwości wartość ok. 0.7. Próbka ta charakteryzowała się największą zawartością wolnych przestrzeni (17% - nawierzchnia pół-otwarta). Dla wszystkich pozostałych próbek obserwowane wartości szczytowe są znacznie mniejsze i zawierają się w przedziale od 0.2 do 0.3. Zakres częstotliwości, w których się one pojawiają, zawiera się w przedziale od 700 Hz do 1100 Hz. Można zatem stwierdzić, że nawierzchnia pół-otwarta (próbka P02) charakteryzowała się lepszymi właściwościami pochłaniającymi dźwięk w stosunku do nawierzchni pół-szczelnych i szczelnych, dla których współczynnik pochłaniania dźwięku jest zbliżony [61].

Wyniki pomiarów przedstawiono także poniżej w tabelicy 3.5 w formie wartości szczytowych współczynnika pochłaniania dźwięku oraz odpowiadających im częstotliwości.

Tablica 1.5. Zestawienie wartości szczytowych współczynnika pochłaniania dźwięku badanych próbek oraz częstotliwości, w których one występują [61]

	Peak 1	Std	Frequency (Hz)	Std (Hz)
Ref	0.30	0.08	970.3	114.6
P01	0.23	0.04	925.0	159.3
P02	0.70	0.07	1215.8	97.4
P03	0.27	0.03	972.3	160.2
P04	0.31	0.06	1034.4	129.0
P05	0.33	0.07	958.0	133.1
P06	0.31	0.07	869.5	148.7
P07	0.29	0.06	885.5	95.5
P08	0.31	0.05	1040.0	169.2

Wyniki przedstawione w powyższej tabeli potwierdzają wnioski sformułowane powyżej. Najwyższą wartość szczytową współczynnika pochłaniania dźwięku zaobserwowano dla pół-otwartej nawierzchni (próbka P02). Z pozostałych próbek najwyższą wartość szczytową zaobserwowano dla próbki P05, która wykonana była z kruszywa o większym rozmiarze w porównaniu do pozostałych próbek i charakteryzowała się większą zawartością wolnych przestrzeni w strukturze (tablica 1.4). Należy jednak zaznaczyć, że różnice te nie są duże. Można zatem stwierdzić, że wszystkie nawierzchnie pół-szczelne i szczelne charakteryzują się podobnymi właściwościami pochłaniania dźwięku i są one dużo niższe od nawierzchni pół-otwartej. Dodatkowo można stwierdzić, że niewielkie zmiany w strukturze próbek (zawartość wolnych przestrzeni zmieniała się w zakresie od 8% do 12%) nie mają dużego wpływu na właściwości akustyczne [61].

2. METODYKA PROWADZENIA BADAŃ METODĄ Z WYKORZYSTANIEM RURY IMPEDANCYJNEJ

Metoda pomiarowa „in situ” z użyciem rury impedancyjnej opisana w normie (ISO 13472-2 Acoustics. Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ. Part 2: Spot method for reflective surfaces, 2010) jest ściśle powiązana z metodą opisaną w normie (ISO 10534-2 Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: Transfer-function method, 1998). Pomiar przeprowadzane przy jej użyciu są wykonywane na istniejącej nawierzchni drogowej, a wykorzystywana metodyka jest nieniszcząca – nie wymaga pobierania próbek z asfaltu (co powoduje zniszczenie nawierzchni drogi). W ramach projektu wykonane zostały pilotażowe pomiary zarówno na istniejących nawierzchniach drogowych, jak i w warunkach laboratoryjnych. W tym drugim przypadku, do pomiarów, zostały wykorzystane próbki pobrane z nawierzchni drogowych w tych samych miejscach, w których przeprowadzono pomiary „in situ”. Wyniki tych pomiarów przedstawiono w rozdziale 4.

Metoda wykonania pomiaru współczynnika pochłaniania dźwięku przez nawierzchnie drogowe przy użyciu rury impedancyjnej (ISO 13472-2, 2010) określa szczegółowe

wymagania dotyczące wymiarów rury impedancyjnej, lokalizacji mikrofonów pomiarowych oraz tzw. łącznika „in situ”, który łączy rurę z badaną nawierzchnią. Widok rury impedancyjnej wraz z osprzętem uzupełniającym przedstawiono poniżej na fot. 2.1.



Fot. 2.1. Widok rury impedancyjnej użytej do wykonania pomiarów współczynnika pochłaniania nawierzchni

Celem metody pomiarowej opisanej w normie (ISO 13472-2, 2010) jest wykonywanie pomiarów na nawierzchniach drogowych gładkich i odbijających dźwięk, dla których współczynnik pochłaniania dźwięku w każdej częstotliwości środkowej pasm 1/3 oktawowych jest nie większy niż 0.15 – np. takich, które stosuje się na torach testowych zbudowanych wg wymagań normy (ISO 10844, 2014). Norma (ISO 13472-2, 2010) wymaga przedstawiania wyników pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku przez nawierzchnie drogowe w częstotliwościach 1/3 oktawowych w zakresie częstotliwości środkowych od 250 do 1600 Hz. Wymusza to zastosowanie rury impedancyjnej o określonych parametrach (średnica wewnętrzna i długość), które umożliwią przeprowadzenie pomiarów w tym zakresie częstotliwości. Zależności te zostały opisane szerzej w dalszej części opracowania.

Należy zaznaczyć, że metoda pomiarowa opisana w normie (ISO 13472-2, 2010) jest zawodna dla nawierzchni, dla których współczynnik pochłaniania dźwięku jest większy od 0.15. Metodę tę można traktować jako uzupełniającą to metody rozszerzonej określonej w normie (ISO 13472-1, 2002). Różnią się one między sobą m.in. wielkością wymaganej powierzchni na badanej nawierzchni drogowej niezbędnej do wykonania badań (w przypadku metody punktowej jest ona równa ok. 0.008 m², a w przypadku metody rozszerzonej ok. 3 m²) oraz zakresem częstotliwości pomiarowej (metoda rozszerzona: od 250 Hz do 4 000 Hz, metoda punktowa: od 250 Hz do 1 600 Hz). Wyniki badań wykonanych za pomocą obydwu metod w zakresie częstotliwości od 250 do 1 600 Hz nie powinny od siebie odbiegać, ale ich precyzja jest już różna. Należy dodać, że metoda rozszerzona opisana w normie (ISO 13472-1, 2002) ma ograniczoną precyzję przy pomiarach prowadzonych na nawierzchniach o niskim współczynniku pochłaniania dźwięku, natomiast metoda opisana w normie (ISO 13472-2, 2010) zawodzi przy badaniach nawierzchni charakteryzujących się wyższym współczynnikiem pochłaniania dźwięku.

Wyniki otrzymane za pomocą metody badawczej opisanej w normie (ISO 13472-2, 2010) są porównywalne do wyników otrzymywanych za pomocą metody rury impedancyjnej przy wykorzystaniu próbek z nawierzchni w postaci wyciętych rdzeni zgodnie z takimi dokumentami, jak (PN-EN ISO 10534-1, 2004), (ISO 10534-2, 1998) oraz (American Society for Testing and Materials, ASTM E1050 1998). Należy natomiast podkreślić, że wyniki

otrzymane za pomocą tej metody nie mogą być bezpośrednio porównywane z wynikami badań wykonanych w komorze pogłosowej za pomocą metody opisanej w normie (PN-EN ISO 354 Akustyka. Pomiar pochłaniania dźwięku w komorze pogłosowej, 2005), ponieważ w metodzie wykorzystującej rurę impedancyjną mamy do czynienia z falą płaską padającą prostopadle na badaną powierzchnię, natomiast w metodzie „pogłosowej” dźwięk jest rozproszony. Dodatkowo próbka badana w komorze pogłosowej powinna charakteryzować się wyraźną strukturą zarówno w kierunkach poprzecznym, jak i prostopadłym. Przy pomiarach właściwości akustycznych w komorach pogłosowych muszą być stosowane próbki o dużych powierzchniach, co w przypadku nawierzchni drogowych może być kłopotliwe i niewygodne do zastosowania. Można natomiast dokonać przekształcenia wyników pomiarów wykonanych za pomocą rury impedancyjnej w warunkach prostopadłego padania dźwięku do warunków takich jak dla pola rozproszonego. Sposób ten jest podany w załączniku F normy (ISO 10534-2, 1998). Zaletą metody pomiarowej opisanej w normie (ISO 13472-2, 2010) jest możliwość wykonania szybkiego pomiaru przez wykwalifikowanego operatora bez konieczności uszkodzenia nawierzchni drogi.

Metodyka pomiaru współczynnika pochłaniania dźwięku w warunkach prostopadłego padania fali dźwiękowej na podstawie normy (ISO 10534-2 Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: Transfer-function method, 1998)

Jak wspomniano we wstępie metoda pomiarowa opisana w normie (ISO 13472-2, 2010) jest ściśle powiązana z normą (ISO 10534-2, 1998). Pierwsza z nich jest w zasadzie rozwinięciem metodyki pomiarowej i dostosowaniem jej warunków „in situ”, podczas gdy druga norma określa szczegółowe wymagania wykonywania pomiarów i opracowania wyników. W związku z tym w pierwszej kolejności opisano bardziej szczegółowo wymagania określone w normie (ISO 10534-2, 1998).

Norma (ISO 10534-2, 1998) opisuje sposób pomiaru współczynnika pochłaniania dźwięku badanych materiałów w warunkach prostopadłego padania dźwięku. Próbka badanego materiału jest zamocowana na końcu płaskiej, sztywnej i gładkiej rury. Na przeciwnym końcu przyrządu zainstalowane jest źródło dźwięku generujące płaskie fale padające prostopadle na badaną powierzchnię. Następnie przy zastosowaniu mikrofonów w dwóch stałych pozycjach lub mikrofonu przemieszczającego się wewnątrz rury określany jest rozkład interferencyjny pola poprzez pomiary ciśnienia akustycznego. W następnej kolejności obliczana jest zespolona akustyczna funkcja przejścia oraz współczynniki pochłaniania i składowe impedancji w warunkach prostopadłego padania fali dźwiękowej na badany materiał. Współczynniki te obliczane są w funkcji częstotliwości dźwięku. Zakres częstotliwości możliwych do zmierzenia jest zależny od przekroju poprzecznego rury oraz od odległości pomiędzy dwoma mikrofonami pomiarowymi. Poprzez zmianę tych parametrów (zastosowanie innego przekroju rury lub zmianę odległości pomiędzy mikrofonami) można rozszerzyć badany zakres częstotliwości (ISO 10534-2, 1998). Metoda ta jest podobna do metody opisanej w (ISO 10534-1, 1996), jednak jest o wiele szybsza w zastosowaniu.

Wykonując pomiary przy zastosowaniu metodyki określonej w (ISO 10534-2, 1998) można stosować dwie techniki pomiarowe. Pierwsza z nich – metoda dwumikrofonowa (dwa mikrofony są zastosowane w ustalonych pozycjach) wymaga zastosowania dodatkowej procedury korekcyjnej, aby zminimalizować różnicę charakterystyk amplitud i faz między dwoma mikrofonami. Jest ona jednak szybsza oraz charakteryzuje się większą dokładnością

i łatwością wykonania od drugiej techniki pomiarowej – metody jednomikrofonowej, która polega ona na zastosowaniu jednego mikrofonu w dwóch różnych pozycjach. Technika ta jest bardziej czasochłonna i dodatkowo wymaga szczególnego rodzaju sygnału oraz jego przetwarzania. Jej zaletą jest natomiast możliwość wyeliminowania przesunięcia fazy między mikrofonami. W przypadku jej zastosowania mogą zostać dodatkowo wybrane optymalne pozycje mikrofonów dla poszczególnej częstotliwości. Pomiaru wykonane w ramach niniejszego opracowania zostały przeprowadzone przy użyciu techniki dwumikrofonowej.

W skład zestawu pomiarowego stosowanego do badań wykonywanych za pomocą metody opisanej w (ISO 10534-2, 1998) wchodzi przede wszystkim rura impedancyjna. Po jednej jej stronie znajduje się pojemnik na badaną próbkę, a po drugiej montowane jest źródło dźwięku. Wzdłuż ściany rury są umieszczone gniazda mikrofonów (w dwóch lub trzech pozycjach). Opcjonalne jest natomiast zastosowanie mikrofonu w centrum rury lub sondy mikrofonowej.

Rura impedancyjna spełniająca wymagania (ISO 10534-2, 1998) powinna być prosta i mieć stały przekrój. Dopuszczalna tolerancja przekrojów poprzecznych jest równa 2%. Ściany przyrządu powinny być gładkie i nieporowate. Konstrukcja rury musi zapewniać brak szczelin i otworów (z wyjątkiem miejsc, w których montowane są mikrofony pomiarowe). Ściany rury impedancyjnej muszą być ciężkie i grube. Ich konstrukcja musi zapewnić brak pobudzania do drgań generowanym sygnałem akustycznym, aby przyrząd nie miał widocznych drgań rezonansowych w badanym zakresie częstotliwości. Kształt przekroju poprzecznego rury jest dowolny, natomiast zaleca się stosowanie przyrządów o kołowym lub kwadratowym przekroju. Rury impedancyjne powinny być izolowane pod względem akustycznym i drganiowym od zewnętrznych źródeł hałasu i drgań.

Roboczy zakres częstotliwości rury impedancyjnej wg (ISO 10534-2, 1998) określa się w następujący sposób:

$$f_l < f < f_u \quad (2.1)$$

gdzie:

f_l – dolna częstotliwość robocza rury,
 f – częstotliwość pomiarowa,
 f_u – górna częstotliwość robocza rury.

Dolna częstotliwość robocza rury f_l jest ograniczona dokładnością aparatury do obróbki sygnału. Należy także spełnić warunek związany z odległością mikrofonów pomiarowych [s], która powinna być większa o 5% od długości fali odpowiadającej dolnej częstotliwości. Dodatkowo większa odległość pomiędzy mikrofonami zwiększa dokładność pomiarów. Odległość pomiędzy mikrofonami musi spełniać także warunek dla górnej częstotliwości roboczej rury, która jest określona następująco:

$$f_u \cdot s < 0.45 c_0 \quad (2.2)$$

gdzie:

f_u – górna częstotliwość robocza rury,
 s – odległość między mikrofonami pomiarowymi,
 c_0 – prędkość dźwięku w metrach na sekundę.

Górna częstotliwość f_u uwarunkowana jest natomiast koniecznością zapewnienia braku występowania propagacji modów fal niepełaskich. Z tego względu powinien być spełniony następujący warunek:

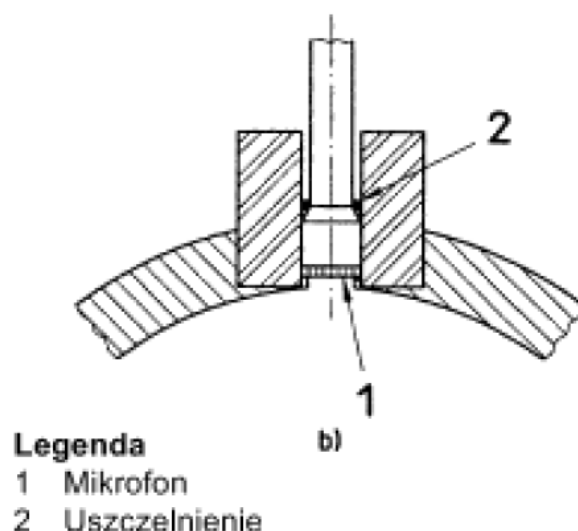
$$d \leq 0.58 \lambda_u; f_u \cdot d < 0.58 c_0 \quad (2.3)$$

gdzie:

d – średnica wewnętrzna rury w metrach,
 λ_u – długość fali górnej częstotliwości roboczej,
 f_u – górna częstotliwość robocza rury,
 c_0 – prędkość dźwięku w metrach na sekundę.

Długość rury impedancyjnej musi być na tyle duża, aby zapewnić warunki, w których może powstać fala płaska pomiędzy źródłem dźwięku i badaną próbką. Gniazda na mikrofony pomiarowe powinny być umieszczone w odległości nie mniejszej niż długość równa średnicy rury od źródła dźwięku, a zaleca się, aby długość ta była większa niż ok. trzy średnice rury.

Zgodnie z wymaganiami normy (ISO 10534-2, 1998) mikrofony pomiarowe zastosowane w obydwu pozycjach powinny być identyczne. Ich średnica powinna być mała w porównaniu z wielkością równą c_0/f_u . Mikrofony powinny być zamontowane w rurze w taki sposób, aby ich membrana znajdowała się w płaszczyźnie wewnętrznej rury. Powinny być one zamontowane w sposób szczelny, uniemożliwiający przedostawanie się powietrza do wnętrza przyrządu. Sposób montażu mikrofonu w rurze impedancyjnej o przekroju poprzecznym kołowym przedstawiono poniżej na rys. 2.1 oraz fot. 2.2.

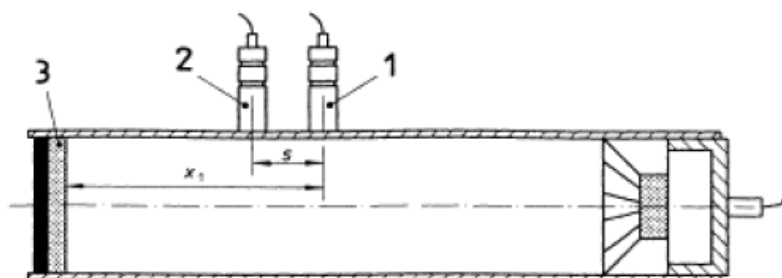


Rys. 2.1. Przykład typowego montażu mikrofonu pomiarowego w rurze impedancyjnej o przekroju kołowym (ISO 10534-2, 1998)



Fot. 2.2. Sposób montażu mikrofonów pomiarowych w rurze impedancyjnej – widok wnętrza urządzenia.

Pozycje mikrofonów powinny być ustalone z dokładnością ± 0.2 mm lub większą. Schematyczne ich rozmieszczenie w rurze impedancyjnej przedstawiono poniżej na rys. 2.2.



Legenda

- 3 Mikrofon A
- 4 Mikrofon B
- 3 Badana próbka

Rys. 2.2. Schematyczne rozmieszczenie mikrofonów pomiarowych w rurze impedancyjnej (ISO 10534-2, 1998)

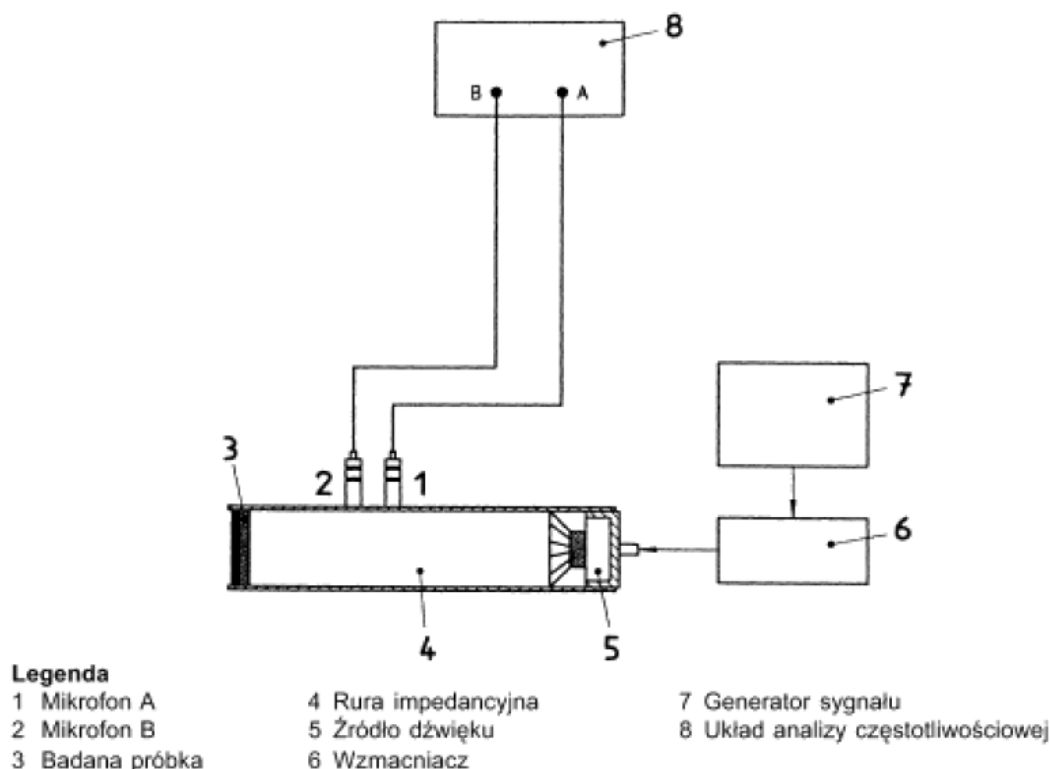
Próbka badana za pomocą metody opisanej w normie (ISO 10534-2, 1998) umieszczana jest w odpowiednim pojemniku, który jest integralną częścią rury lub jest odrębnym elementem mocowanym szczelnie do jednego z końców rury. Powierzchnie, które łączą rurę oraz pojemnik na próbkę powinny być starannie wykończone, co pozwoli uniknąć powstawania nieszczelności mogących wpłynąć na wynik pomiaru (zaleca się stosowanie uszczelnienia np. w formie wazeliny lub plasteliny). Montaż próbki w przypadku wykorzystania metody opisanej w normie (ISO 13472-2, 2010), która została wykorzystana do wykonania pomiarów w ramach niniejszego opracowania jest inny w stosunku do opisanego powyżej. Szerzej opisano go w dalszej części rozdziału.

W skład wyposażenia pomiarowego wchodzi także aparatura do przetwarzania sygnałów, która powinna się składać ze wzmacniacza i dwukanałowego systemu analizy metodą szybkiej transformaty Fouriera (FFT). Zakres dynamiki tej aparatury powinien być, zgodnie z (ISO 10534-2, 1998) większy niż 65 dB, a błędy oszacowania funkcji przejścia wynikające z nieliniowości, rozdzielczości, niestabilności i czułości temperaturowej wyposażenia do przetwarzania sygnałów powinny być nie większe niż 0.2 dB. Głośnik, zamontowany po przeciwnej stronie niż badana próbka, powinien pokrywać powierzchnię równą co najmniej 2/3 przekroju poprzecznego rury impedancyjnej. Powinien on być zamontowany w obudowie dźwiękoizolacyjnej, a pomiędzy nim a rurą należy zastosować elastyczną izolację przeciwdrganiową. Generator sygnału stosowany w pomiarach powinien emitować sygnał stacjonarny o płaskiej charakterystyce gęstości widmowej w rozważanym zakresie częstotliwości. Widok i sposób montażu głośnika w rurze impedancyjnej przedstawiono poniżej na fot. 2.3. System pomiarowy powinien być także wyposażony w termometr i barometr, za pomocą których mierzona będzie temperatura i ciśnienie wewnątrz rury impedancyjnej.



Fot. 2.3. Widok i sposób montażu głośnika w rurze impedancyjnej

Poniżej na rys. 2.3 przedstawiono schemat całego układu pomiarowego wykorzystywanego do wykonania pomiarów za pomocą metody opisaną w (ISO 10534-2, 1998).



Rys. 2.3. Schemat układu pomiarowego wykorzystywanego do pomiarów wykonywanych za pomocą metody opisaną w (ISO 10534-2, 1998).

Przed rozpoczęciem wykonywania pomiarów za pomocą metody określonej w (ISO 10534-2, 1998) lub bezpośrednio po ich zakończeniu należy przeprowadzić sprawdzenie poprawności wskazań przyrządów pomiarowych przez wykonanie badań kalibracyjnych. W celu stabilizacji temperaturowej należy przed takimi pomiarami włączyć głośnik na co najmniej 10 minut. Sprawdzenia te powinny dotyczyć stałości odpowiedzi mikrofonu, pomiarów temperatury i stosunku sygnału do szumu.

Próbki wykorzystywane do badań powinny być zamontowane w sposób szczelny do jednego z końców rury impedancyjnej. Można użyć w tym przypadku uszczelnacza (np. wazeliny lub plasteliny). Powinny być one zamontowane w taki sposób, aby ich płaszczyzna była prostopadła do osi rury. W przypadku powierzchni płaskich i gładkich umiejscowienie próbek powinno być określone z minimalną tolerancją ± 0.5 mm. Zaleca się zbadanie co najmniej dwóch próbek (jeżeli są one niejednorodne potrzebna może być większa liczba) poprzez powtórzenie pomiaru w tych samych warunkach montażu.

Pierwszym krokiem procedury opisaną w (ISO 10534-2, 1998) jest ustalenie płaszczyzny odniesienia ($x = 0$). W zdecydowanej większości przypadków jest to powierzchnia badanej próbki. W przypadku, gdy badana próbka ma powierzchnię profilowaną lub strukturę poprzeczną płaszczyzna odniesienia powinna się znajdować w pewnej odległości od badanej próbki. Lokalizacja płaszczyzny odniesienia w stosunku do mikrofonu pomiarowego nr 1 przedstawionego na rys. 2.2 powinna spełniać wymagania określone w (ISO 10534-2, 1998) i powinna być zmierzona z dokładnością ± 0.5 mm lub większą.

Następnie należy obliczyć prędkość dźwięku w rurze impedancyjnej, długość fali oraz impedancję właściwą według wzorów podanych poniżej:

$$c_0 = 343.2\sqrt{T/293} \quad (2.4)$$

gdzie T oznacza temperaturę [K].

$$\lambda_0 = c_0/f \quad (2.5)$$

Gęstość powietrza ρ może być obliczona z wzoru:

$$\rho = \rho_0 \frac{p_a T_0}{p_0 T} \quad (2.6)$$

gdzie:

T – temperatura [K],
 p_a – ciśnienie atmosferyczne [kPa],
 T_0 – 293 K
 p_0 – 101.325 kPa,
 ρ_0 – 1.186 kg/m³.

Impedancję właściwą powietrza wyznacza się z iloczynu ρc_0 .

Kolejnym krokiem procedury pomiarowej opisanej (ISO 10534-2, 1998) jest wybór amplitudy sygnału pomiarowego. Powinna być ona na tyle duża, aby zapewniony był odstęp do tła akustycznego o więcej niż o 10 dB dla każdej badanej częstotliwości pomiarowej w pozycjach mikrofonów pomiarowych. Należy także dobrać odpowiednią liczbę uśrednień, tak aby wyeliminować błędy spowodowane szumem. Jest ona zależna od badanego materiału oraz dokładności oszacowania funkcji przejścia. W następnej kolejności należy przeprowadzić procedurę korekcji funkcji przejścia związanej z niedopasowaniem kanałów (w przypadku gdy stosowana jest technika dwumikrofonowa). Szczegółowe informacje związane z powyższymi krokami procedury opisane są w normie (ISO 10534-2, 1998).

Na podstawie wykonanych pomiarów określana jest funkcja przejścia pomiędzy dwoma mikrofonami, współczynniki odbicia i pochłaniania dźwięku oraz właściwa impedancja akustyczna. Wzory, na podstawie których można obliczyć współczynniki odbicia (r) i pochłaniania (α) dźwięku badanej próbki, przedstawiono poniżej (ISO 10534-2, 1998).

$$r = |r|e^{j\theta_r} = r_r + jr_i = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0 x_1} \quad (2.7)$$

gdzie:

r_r – składowa rzeczywista
 r_i – składowa urojona
 x_1 – odległość próbki od dalszej pozycji mikrofonu
 Φ_r – kąt fazowy współczynnika odbicia przy prostopadłym padaniu fali dźwiękowej
 H_{12} – funkcja przejścia z pozycji mikrofonu 1 do pozycji 2,
 H_I – funkcja przejścia fali padającej
 H_R – funkcja przejścia fali odbitej
 k_0 – liczba falowa

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2 \quad (2.8)$$

Metoda pomiaru współczynnika pochłaniania nawierzchni drogowych „in situ” opisana w normie (ISO 13472-2 Acoustics. Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ. Part 2: Spot method for reflective surfaces, 2010)

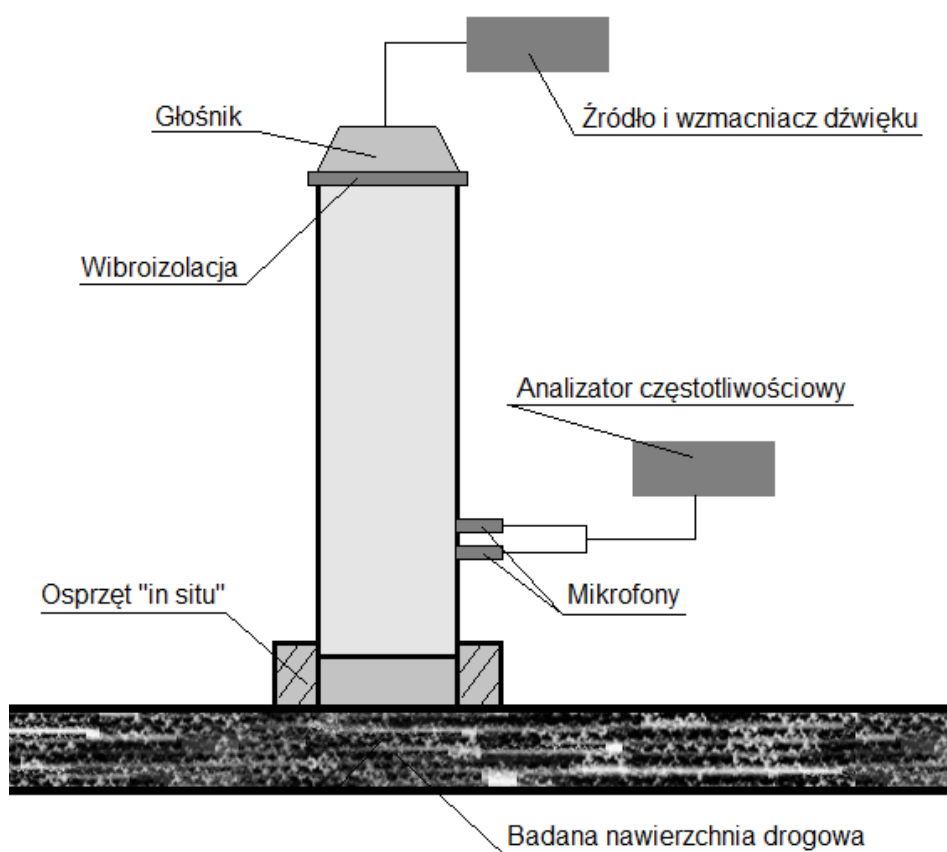
Metodyka pomiarowa opisana powyżej na podstawie normy (ISO 10534-2, 1998) zawiera podstawowe zasady i wymagania, które wykorzystywane są przy pomiarach współczynnika pochłaniania nawierzchni drogowych „in situ” wykonywanych w ramach niniejszego opracowania na podstawie normy (ISO 13472-2, 2010). Jak wspomniano we wstępie metodyka ta pozwala na ocenę charakterystyki pochłaniania dźwięku nawierzchni bez konieczności jej uszkodzenia. Może być ona używana zarówno do badań związanych z pochłanianiem hałasu emitowanego przez pojazdy i ich opony, jak i do projektowania oraz utrzymania nawierzchni, a także innych badań związanych z oddziaływaniem hałasu. Ograniczeniem metodyki jest możliwość stosowania jej do nawierzchni mało pochłaniających dźwięk, charakteryzujących się współczynnikiem pochłaniania nie większym niż 0.15.

Metoda badawcza określona w normie (ISO 13472-2, 2010) jest przeznaczona przede wszystkim do:

1. Oznaczania współczynnika pochłaniania dźwięku szczelnych i pół-szczelnych nawierzchni drogowych oraz ich impedancji akustycznej, jeżeli jest to potrzebne,
2. Określania właściwości pochłaniania dźwięku torów testowych wybudowanych zgodnie ze standardami określonymi w c i nawierzchni testowych zdefiniowanych w narodowych i międzynarodowych przepisach dotyczących homologacji pojazdów i opon samochodowych,
3. Weryfikacji zgodności współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchni drogowych z specyfikacjami projektowymi lub innymi wymaganiami.

Metoda badań opisana w normie (ISO 13472-2, 2010) polega na generowaniu sygnału testowego z źródła dźwięku na badaną powierzchnię i z powrotem do odbiornika przy użyciu rury impedancyjnej. Rura zajmuje powierzchnię ok. 0.008 m² i umożliwia badania w częstotliwościach pasm 1/3 oktaowych w zakresie od 250 Hz do 1 600 Hz. Należy zaznaczyć, że norma (ISO 13472-2, 2010) opisuje metodykę wykonywania badań w terenie - „in situ”, natomiast szczegółowa procedura przeprowadzania pomiarów i opracowywania wyników jest określona w normie (ISO 10534-2, 1998) powołanej jako źródło w (ISO 13472-2, 2010) i opisanej szczegółowo w poprzednim rozdziale.

Poniżej na rys. 2.4 przedstawiono schemat układu pomiarowego wykorzystywanego w pomiarach wykonywanych za pomocą metody opisanej w normie (ISO 13472-2, 2010), a na fot. 2.4 widok urządzenia pomiarowego wraz z dodatkowym osprzętem.



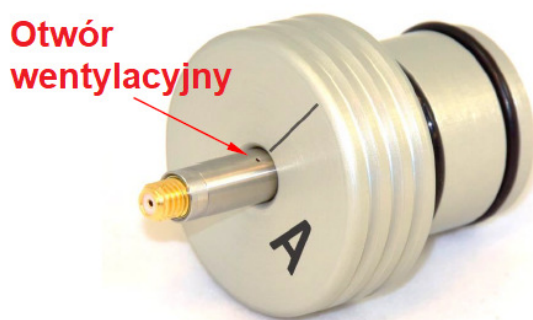
Rys. 2.4. Schemat układu pomiarowego wykorzystywanego w metodzie opisanej w normie (ISO 13472-2, 2010)



Fot. 2.4. Widok rury impedancyjnej wykorzystywanej do pomiarów współczynnika pochłaniania nawierzchni drogowych wraz z dodatkowym wyposażeniem

Wyposażenie pomiarowe, używane do wykonywania pomiarów, składa się z generatora sygnału, źródła dźwięku, rury impedancyjnej, dwóch mikrofonów zamontowanych równo z wewnętrzną ścianą rury w ściśle określonych pozycjach, dodatkowego urządzenia „in situ” umożliwiającego hermetyczne połączenie tuby z badaną powierzchnią oraz jednostki przetwarzania sygnału umożliwiającej wykonanie transformaty Fouriera w dwóch kanałach jednocześnie. Wyposażenie pomiarowe powinno spełniać wymagania określone w normie (ISO 10534-2, 1998), które szczegółowo zostały opisane we wcześniejszym rozdziale.

Średnica rury impedancyjnej wg wymagań określonych w (ISO 13472-2, 2010) powinna być równa 100 ± 1 mm. Rura powinna być ona prosta i mieć kołowy przekrój poprzeczny, przy czym tolerancja różnic średnic nie powinna być większa niż 0.2%. Ścianki rury powinny być gładkie, nieporowate, bez otworów i szczelin oraz powinny być sztywne, aby zapobiegać niepożądanemu utracie energii akustycznej. Rura powinna mieć mały otwór wentylacyjny w pobliżu głośnika, aby zapobiec powstawaniu statycznego ciśnienia w jej wnętrzu (fot. 2.5).



Fot. 2.5. Widok otworu wentylacyjnego w mikrofonie pomiarowym zapobiegającego powstawaniu statycznego ciśnienia we wnętrzu rury impedancyjnej [127]

Długość rury impedancyjnej powinna umożliwić wykształcenie wewnątrz płaskiej fali dźwiękowej pomiędzy źródłem dźwięku i mikrofonem pomiarowym. Przy średnicy rury równej 100 mm jej długość powinna być nie mniejsza niż 480 mm, a niższy mikrofon powinien być zamontowany ok. 100 mm od badanej płaszczyzny. Odległość pomiędzy obydwojema mikrofonami pomiarowymi powinna być ustalona w zakresie od 77 do 85 mm. Odległości te są uwarunkowane minimalną i maksymalną częstotliwością dźwięku używanego do pomiarów. Przy takim układzie mikrofonów można wykonywać pomiary w zakresie roboczym częstotliwości od 210 do 1900 Hz (ISO 13472-2, 2010). Na fot. 2.6 poniżej przedstawiono sposób montażu mikrofonów pomiarowych w ściśle określonych odległościach w rurze impedancyjnej użytej do wykonania pomiarów w ramach niniejszego opracowania.



Fot. 2.6. Widok portów mikrofonowych wykonanych w ściśle określonych odległościach od badanej nawierzchni drogowej w urządzeniu wykorzystanym do wykonywania pomiarów w ramach niniejszego opracowania.

Obydwa mikrofony pomiarowe używane do wykonania pomiarów powinny być identyczne i zamontowane w określonych pozycjach. Średnica mikrofonów powinna być mała w stosunku do odległości pomiędzy portami, w których będą zamocowane. Z tego względu zaleca się zastosowanie mikrofonów 1/4 calowych. Montaż mikrofonów powinien być wykonywany w taki sposób, aby zachować szczelność pomiędzy ich powierzchniami i ścianką rury impedancyjnej. Przy montażu mikrofonów pomiarowych należy dbać o to, aby nie były zablokowane otwory wyrównujące ciśnienie. W przeciwnym razie może powstać statyczne ciśnienie ponad membranę, które zmieni charakterystykę fazową badanego sygnału i jego odpowiedzi, co doprowadzi do powstania błędów grubych silnie wpływających na wyniki badań (ISO 13472-2, 2010).

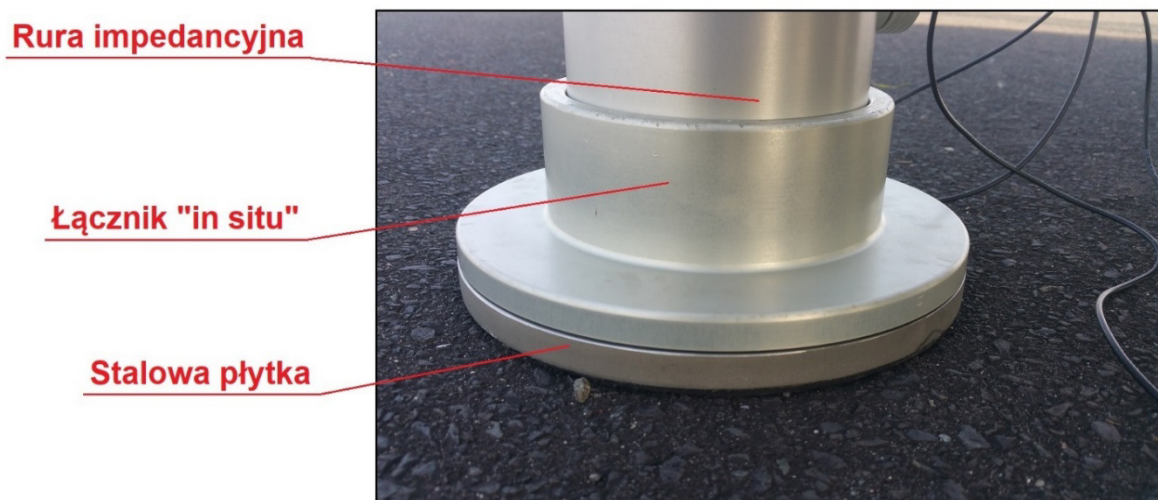
Ponadto metoda ta określa dodatkowe wymagania związane m.in. ze sprawdzeniem szczelności układu pomiarowego, które polegają na przeprowadzeniu pomiarów z użyciem referencyjnej powierzchni odbijającej. Pomiary takie wykonuje się z użyciem grubej stalowej płytki, która charakteryzuje się właściwościami znaczącego odbijania dźwięku (fot. 2.7).



Fot. 2.7. Stalowa płytki referencyjna o grubości ok. 10 mm używana do pomiarów kalibracyjnych

Aby spełnić warunek określony w normie (ISO 13472-2, 2010) wynik pomiaru kalibracyjnego z użyciem stalowej płytki, wyrażony współczynnikiem pochłaniania dźwięku, nie może być większy niż 0.03 w każdej 1/3 częstotliwości oktawowej. Wyniki tych

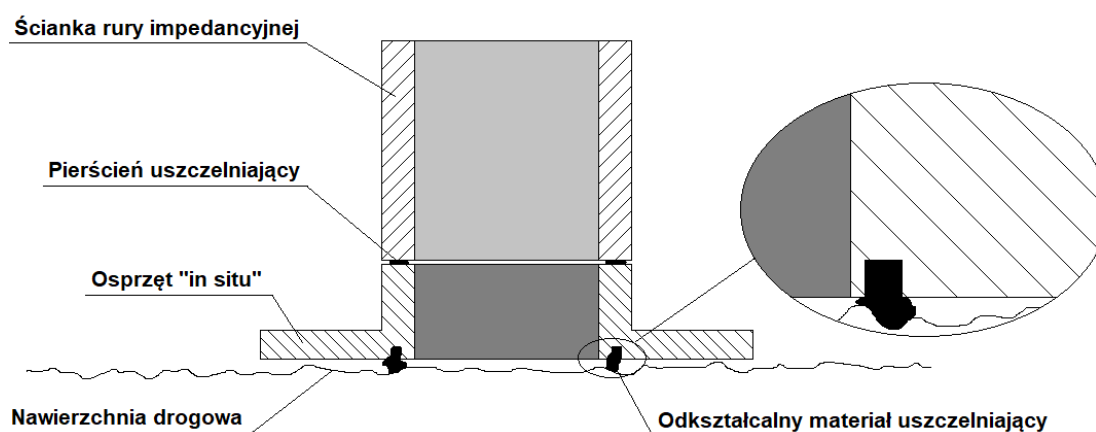
pomiarów są uważane, jako straty własne układu pomiarowego i powinny być odejmowane od wyników pomiarów, o czym wspomniano nieco więcej w części opisującej niepewność pomiarów wykonywanych za pomocą rury impedancyjnej. Widok połączenia rury impedancyjnej, łącznika „in situ” oraz stalowej płytki w trakcie wykonywania pomiarów kalibracyjnych przedstawiono poniżej na fot. 2.8.



Fot. 2.8. Widok połączenia rury impedancyjnej, łącznika „in situ” i referencyjnej płytki stalowej w trakcie wykonywania pomiarów kalibracyjnych

W trakcie wykonywania pomiarów muszą być także spełnione warunki dotyczące tła akustycznego. Poziom dźwięku musi charakteryzować się odstępem od zakłócającego pomiar tła większym niż 10 dB w każdej częstotliwości środkowej pasm 1/3 oktawowych. Z reguły wykonuje się je bezpośrednio po pomiarze z użyciem płytki stalowej.

Przy wykonywaniu pomiarów metodą opisaną w (ISO 13472-2, 2010) istotne jest uszczelnienie systemu pomiarowego w taki sposób, aby był on hermetyczny i zapobiegał przedostawaniu się powietrza przez szczeliny pomiędzy rurą impedancyjną i badaną powierzchnią. Każda nieszczelność może spowodować, że wynik pomiaru będzie zniekształcony w taki sposób, jakby w badanym materiale występowała dodatkowa absorpcja (pochłanianie) dźwięku. W tym celu stosuje się dodatkowy przyrząd - łącznik „in situ”, który powinien być bardzo dobrze dopasowany do kształtu rury i jej wymiarów. Szkic tego elementu przedstawiono poniżej na rys. 2.5, a widok łącznika używanego do pomiarów wykonanych w ramach opracowania przedstawiono na fot. 2.9.



Rys. 2.5. Szkic przyrządu uszczelniającego rurę impedancyjną z badaną nawierzchnią drogową (ISO 13472-2, 2010).



Fot. 2.9. Widok połączenia rury impedancyjnej, łącznika „in situ” i referencyjnej płytki stalowej w trakcie wykonywania pomiarów kalibracyjnych

Łącznik „in situ”, którego zastosowanie w tej metodzie jest niezbędne, powinien charakteryzować się średnicą większą od tej, którą posiada rura impedancyjna. Pozwala to na ustabilizowanie układu pomiarowego względem badanej nawierzchni oraz na zapewnieniu wymaganego uszczelnienia pomiędzy nawierzchnią drogi i rurą impedancyjną

System pomiarowy powinien być także wyposażony w dwukanałowy analizator sygnału dźwiękowego, który powinien spełniać wymagania określone w (ISO 10534-2, 1998). Widok analizatora użytego do wykonania pomiarów przedstawiono poniżej na fot. 2.10.



Fot. 2.10. Widok analizatora dźwięku używanego do wykonania pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku w ramach opracowania.

Do monitorowania warunków atmosferycznych używa się także termometru, który umożliwi odczyt wyniku z dokładnością $\pm 1^{\circ}\text{C}$ oraz barometru, który umożliwi odczyt wyniku z dokładnością $\pm 0.5\text{ kPa}$. Przyrządy te nie muszą być ściśle powiązane z rurą impedancyjną – mogą stanowić niezależne wyposażenie.

Pierwszym krokiem właściwej procedury pomiarowej opisanej w (ISO 13472-2, 2010) jest stabilizacja temperaturowa systemu pomiarowego. W związku z tym wszystkie przyrządy przed rozpoczęciem pomiaru należy włączyć na co najmniej 15 minut i pozostawić działające. Później nie mogą być one wystawiane na bezpośrednie działanie promieni słonecznych i innych silnych źródeł ciepła. Następnie należy przeprowadzić proces kalibracji systemu pomiarowego. Zależności pomiędzy fazą i amplitudą sygnału oraz mikrofonami muszą być ustalone przed każdą serią pomiarową oraz po każdej godzinie pomiaru dla każdej pozycji mikrofonu według procedury opisanej w (ISO 10534-2, 1998). Należy także przeprowadzić pomiar kalibrujący bezpośrednio przed lub po każdej serii pomiarowej przy użyciu referencyjnej próbki całkowicie odbijającej dźwięk, o czym wspomniano już bardziej szczegółowo we wcześniejszej części opracowania). Wyniki pomiaru kalibracyjnego powinny być użyte do korekcji wyników zgodnie z załącznikiem A do normy (ISO 13472-2, 2010). Należy także przeprowadzić pomiary tła akustycznego przy wyłączonym źródle dźwięku. W celu zapobieżenia możliwym zakłóceniom z niestacjonarnych źródeł dźwięku, pomiary powinny być prowadzone w odległości co najmniej 25 m od przejeżdżających samochodów ciężkich i motocykli. Każdy pomiar zawierający potencjalne zakłócenia z zewnętrznych źródeł dźwięku powinien być pomijany.

Zgodnie z wymaganiami normy (ISO 13472-2, 2010) lokalizacje stanowisk pomiarowych powinny być rozmieszczone regularnie na badanym docinku drogi i powinny być ustalone w miejscu, w którym występują ślady kół pojazdów. Badana nawierzchnia powinna być gładka, płaska i wolna od zanieczyszczeń. Pomiaru nie należy prowadzić na mokrych nawierzchniach.

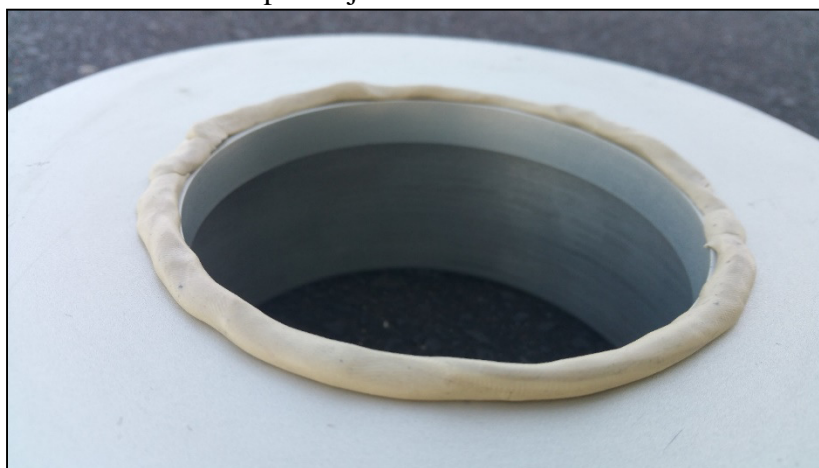
W trakcie prowadzenia pomiaru za pomocą metody opisanej w (ISO 13472-2, 2010) temperatura powietrza powinna być pomiędzy 5°C i 30°C , a nawierzchni pomiędzy 5°C i 45°C . Pomiary nie powinny być prowadzone przy bezpośrednim narażeniu na promienie słoneczne i w bliskiej odległości od źródeł ciepła.

Właściwy pomiar należy rozpocząć od montażu przystawki „in situ” poprzez zastosowanie właściwej ilości substancji uszczelniającej (np. kitu hydraulicznego - przykładowy uszczelniacz przedstawiono na fot. 2.11).



Fot. 2.11. Widok przykładowego uszczelniacza (kit sanitarny), który może zostać używany do uszczelnienia układu pomiarowego

Należy sprawdzić czy zapewnione zostało hermetyczne połączenie systemu pomiarowego z badaną powierzchnią. Można to zrobić np. przy użyciu stetoskopu, za pomocą którego sprawdza się cały obwód połączenia. Sposób uszczelnienia przedstawiony został na rys. 2.5 oraz na fot. 2.12 i fot. 2.13 poniżej.



Fot. 2.12. Sposób naniesienia kitu sanitarnego na łącznik „in situ” w celu uszczelnienia układu pomiarowego



Fot. 2.13. Widok łącznika „in situ” szczelnie zamontowanego na badanej nawierzchni drogowej za pomocą kitu sanitarnego

Następnie należy wykonać pomiar przy sprawdzeniu czy stosunek sygnału dźwiękowego do szumu nie jest zbyt mały. Jeżeli tak jest, należy zwiększyć poziom dźwięku, usunąć źródło zakłóceń lub poczekać na cichy moment. Procedura pomiarowa jest określona w (ISO 10534-2, 1998). Po zakończeniu pomiaru należy sprawdzić czy materiał uszczelniający ściśle przylega do nawierzchni i tworzy zamknięty pierścień (fot. 2.14). Jeżeli są co do tego wątpliwości należy powtórzyć procedurę uszczelniania i pomiaru. Po wykonaniu wszystkich pomiarów należy usunąć z badanej nawierzchni pozostałości uszczelnacza.



Fot. 2.14. Widok pozostałości uszczelnacza po wykonaniu pomiarów i zdemontowaniu łącznika „in situ”

Sposób prezentacji wyników pomiarów jest szczegółowo opisany w (ISO 13472-2, 2010), która przytacza także wzór raportu z badań. Niepewność pomiaru, zgodnie z zaleceniami normy, należy obliczać na podstawie [128]. Zgodnie z tym dokumentem, wszystkie znaczące źródła błędów i niepewności powinny być zidentyfikowane, a wynik pomiaru powinien być skorygowany o odpowiednie współczynniki. Poniżej przedstawiono ogólną ich charakterystykę.

Jednymi z możliwych błędów mogącymi wpływać na wyniki obliczeń współczynnika pochłaniania dźwięku związane są z zastosowaniem metody funkcji przejścia (ISO 10534-2, 1998). Źródłami tych błędów mogą być m.in.: niepewność odległości pomiędzy mikrofonami pomiarowymi czy statystyczne błędy w określaniu funkcji przejścia z sygnałów stochastycznych. Dodatkowo wpływ na wyniki pomiarów mogą mieć zmiany warunków meteorologicznych panujących w trakcie wykonywania badań.

Na niepewność wyników pomiarów wykonywanych przy pomocy rury impedancyjnej mogą wpływać także wewnętrzne straty energii we wnętrzu przyrządu. Błąd ten może występować, jeżeli powierzchnia pomiarowa charakteryzuje się mniejszym współczynnikiem odbicia dźwięku. Ten rodzaj błędu jest częściowo korygowany poprzez obowiązek prowadzenia pomiarów kalibracyjnych przy użyciu referencyjnej powierzchni odbijającej.

Kolejnym źródłem błędów może być nieszczelność w systemie pomiarowym (np. pomiędzy przyrządami i nawierzchnią drogi). Zniekształca on głównie wyniki pomiarów w niższych pasmach częstotliwości dźwięku. Ten rodzaj błędu pomiarowego może w istotny sposób wpływać na wyniki pomiarów, jeżeli są one wykonywane na nawierzchniach półzamkniętych. Nieszczelności układu pomiarowego powodują błąd, który charakteryzuje się zniekształceniem wyników pomiarów, w taki sposób, jakby w badanej nawierzchni powstało dodatkowe pochłanianie dźwięku (jest on zawsze dodatni) (ISO 13472-2, 2010).

Może być także popełniony błąd wynikający z niedostatecznej liczby pomiarów. Nie jest on związany bezpośrednio z techniką pomiarową, ale z właściwościami pochłaniania dźwięku całego mierzonego odcinka nawierzchni, które to mogą się zmieniać w zależności od

lokalizacji przyrządu pomiarowego. Błąd ten może być zminimalizowany poprzez zwiększenie liczby pomiarów, w taki sposób, że zostanie osiągnięte akceptowalne odchylenie standardowe wyników pomiarów (ISO 13472-2, 2010).

W związku z powyższym wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchni drogowych $\alpha(f)$ przedstawia się, zgodnie z wymaganiami normy (ISO 13472-2, 2010), z uwzględnieniem współczynników korygujących opisanych poniżej:

$$\alpha(f) = \alpha_m(f) - \alpha_{\text{system}}(f) + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 \quad (2.9)$$

gdzie:

$\alpha_m(f)$ – zmierzony współczynnik pochłaniania dźwięku,

$\alpha_{\text{system}}(f)$ – wewnętrzne tłumienie układu pomiarowego otrzymane na podstawie pomiarów powierzchni referencyjnej,

δ_1 – współczynnik uwzględniający niepewność procedury opisanej w (ISO 10534-2, 1998),

δ_2 – współczynnik uwzględniający niepewność spowodowaną warunkami zewnętrznymi zgodnie z (ISO 10534-2, 1998),

δ_3 – współczynnik uwzględniający niepewność procedury kalibracyjnej,

δ_4 – współczynnik uwzględniający niezamierzone straty ciśnienia.

Norma (ISO 13472-2, 2010) określa wielkości tych wszystkich niepewności i podaje, że łącznie jest ona szacowana na poziomie 0.015 dla każdej częstotliwości 1/3 oktaawowej, przy czym niepewność rozszerzona dla 95% poziomu ufności jest równa 0.029.

Należy również wspomnieć o potencjalnych przyczynach błędów powstających nie na skutek stosowanie procedury opisanej w normie, ale niewłaściwym wykonywaniem pomiarów. Jednym z przykładów błędów tego typu może być nieprawidłowy montaż mikrofonów pomiarowych bez zapewnienia odpowiedniej wentylacji. Może to spowodować powstanie dodatkowego ciśnienia statycznego, które wpłynie na wyniki pomiarów. Innym przykładem może być brak adaptacji systemu pomiarowego do warunków atmosferycznych. Procedura opisana w (ISO 13472-2, 2010) wymaga włączenia przyrządów na co najmniej 15 minut przed rozpoczęciem pomiaru. Pominięcie tego kroku może w znaczny sposób wpłynąć na wyniki pomiarów.

3. ODCINKI DRÓG, NA KTÓRYCH WYKONANO BADANIA

W ramach niniejszego opracowania wykonano pomiary współczynnika pochłaniania dźwięku na kilkunastu wybranych odcinkach dróg. Wyselekcjonowano je w taki sposób, aby badane nawierzchnie charakteryzowały się zróżnicowanymi właściwościami akustycznymi (przede wszystkim w zakresie pochłaniania padającej na nie fali dźwiękowej). W pierwszej

kolejności zostały wykonane pomiary na odcinku badawczym w Bolimowie pod Warszawą zrealizowanym w ramach projektu „Innowacyjna technologia nawierzchni drogowych o obniżonej emisji hałasu” realizowanym przez konsorcjum Politechniki Warszawskiej, Mostostalu Warszawa S.A. i Instytutu Badawczego Dróg i Mostów współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Widok odcinka doświadczalnego przedstawiono poniżej na fot. 3.1.



Fot. 3.1. Widok doświadczalnego odcinka w Bolimowie pod Warszawą

W ramach ww. zadania zaprojektowano i wykonano odcinki testowe z nawierzchni, które charakteryzowały się obniżoną hałaśliwością. Odcinki, które zostały zbadane za pomocą rury impedancyjnej, zostały wykonane z następujących typów nawierzchni [129]:

1. Odcinek nr 1 – nawierzchnia wykonana z mieszanki mineralno – asfaltowej AC 11,
2. Odcinek nr 2 – nawierzchnia typu OGFC 11 (Open-graded friction courses – mieszanka o otwartej strukturze stosowana w USA),
3. Odcinek nr 3 – nawierzchnia wykonana z asfaltu porowatego PA 11,
4. Odcinek nr 4 – nawierzchnia typu OGFC 8 (Open-graded friction courses – mieszanka o otwartej strukturze stosowana w USA),
5. Odcinek nr 5 – nawierzchnia wykonana z mieszanki mastyksowo – grysowej SMA 8,
6. Odcinek nr 6 – nawierzchnia wykonana z asfaltu porowatego PA 8,
7. Odcinek nr 7 – nawierzchnia wykonana z mieszanki mastyksowo – grysowej SMA 5.

Przekrój poprzeczny konstrukcji wszystkich nawierzchni składał się z warstwy ścieralnej (różne rodzaje mieszanek) grubości 4 cm, warstwy uszczelniającej, warstwy wiążącej grubości 6 cm z betonu asfaltowego AC 16W oraz podbudowy stabilizowanej mechanicznie (istniejąca nawierzchnia, grubość około 20 cm). Należy zaznaczyć, że pomimo faktu, iż nawierzchnie te charakteryzowały się obniżoną hałaśliwością, nie wszystkie z nich posiadały właściwości większego pochłaniania dźwięku. Część z nich (np. SMA 5 i SMA 8) posiadała inne cechy wpływające na obniżenie hałaśliwości np. makroteksturę. Wyższym współczynnikiem pochłaniania dźwięku charakteryzowały się przede wszystkim te nawierzchni, które zostały wykonane jako porowate, z dużą ilością wolnych przestrzeni. Były to odcinki wykonane z nawierzchni typu OGFC i PA. Odcinki poddane badaniom można podzielić na trzy grupy pod względem zawartości wolnych przestrzeni [130]:

1. Nawierzchnie o niskiej porowatości (od 3.5 do 4.0%) – SMA 5 i SMA 8,
2. Nawierzchnia o pośredniej porowatości (13.8%) – OGFC 8,
3. Nawierzchnie o wysokiej porowatości (od 18.6 do 25.8%) – OGFC 11, PA 8 i PA 11.

Nawierzchnia referencyjna, którą w tym przypadku była nawierzchnia z mieszanki mineralno – asfaltowej AC 11, charakteryzowała się zawartością wolnych przestrzeni na poziomie 3.2%.

Na fot. 3.2 - fot. 3.8 przedstawiono widoki badanych nawierzchni zlokalizowanych na odcinku badawczym w Bolimowie.



Fot. 3.2. Widok badanej nawierzchni drogowej wykonanej z mieszanki mineralno -asfaltowej typu AC 11



Fot. 3.3. Widok badanej nawierzchni drogowej wykonanej z mieszanki o otwartej strukturze OGFC 11



Fot. 3.4. Widok badanej nawierzchni drogowej wykonanej z asfaltu porowatego PA 11



Fot. 3.5. Widok badanej nawierzchni drogowej wykonanej z mieszanki o otwartej strukturze OGFC 8



Fot. 3.6. Widok badanej nawierzchni drogowej wykonanej z mieszanki mastyksowo – grysowej SMA 8



Fot. 3.7. Widok badanej nawierzchni drogowej wykonanej z asfaltu porowatego PA 8



Fot. 3.8. Widok badanej nawierzchni drogowej wykonanej z mieszanki mastyksowo – grysowej SMA 5

Z każdego badanego odcinka zostały pobrane po trzy próbki (fot. 3.9), które następnie zostały zbadane w warunkach laboratoryjnych. Próbki te posiadały średnicę 15 cm, która umożliwiała ustawienie na nich rury impedancyjnej o mniejszej średnicy, równej 10 cm. Zostały one pobrane, w każdym przypadku, w bliskiej odległości od miejsca wykonania badania „in situ” (fot. 3.10), tak aby możliwe było zbadanie korelacji pomiędzy wynikami badań przeprowadzonych w terenie oraz w laboratorium. Porównanie tych wyników przedstawiono w rozdziale 4.



Fot. 3.9. Widok pobranych próbek w miejscu prowadzenia pomiarów na odcinku badawczym w Bolimowie



Fot. 3.10. Widok lokalizacji rury impedancyjnej w trakcie wykonywania badań w stosunku do miejsca, w którym pobrano próbki nawierzchni.

Dodatkowo, na innym odcinku testowym zlokalizowanym na torze Ułęż pod Dęblinem, wykonano pomiary przy równoczesnym wykorzystaniu trzech różnych metod: OBSI, CPX oraz rury impedancyjnej. Poniżej na fot. 3.11 przedstawiono sprzęt pomiarowy użyty do wykonania tych pomiarów oraz widok odcinka badawczego. Odcinek ten spełnia wymagania określone w normie (ISO 10844, 2014) do wykonywania pomiarów hałaśliwości pojazdów i ich opon.



Fot. 3.11. Sprzęt pomiarowy użyty do wykonania pomiarów na odcinku testowym (tor Ułęż pod Dęblinem) – metody OBSI, CPX i rury impedancyjnej.

W ramach niniejszego opracowania przeprowadzono także pomiary na wybranych odcinkach dróg, na których odbywa się typowy ruch pojazdów. Ze względów bezpieczeństwa (konieczność chwilowego zajęcia pasa drogi), pomiary te zostały wykonane na odcinkach dróg wojewódzkich, na których panuje mniejsze natężenie ruchu w stosunku do dróg krajowych. Wybrano trzy odcinki zlokalizowane w województwie małopolskim:

1. Odcinek drogi wojewódzkiej nr 964 w Wieliczce wykonany z betonu asfaltowego do bardzo cienkich warstw BBTM 8,
2. Odcinek drogi wojewódzkiej nr 780 w Liskach wykonany z mieszanki mastykowo - grysowej SMA 5,
3. Odcinek drogi wojewódzkiej nr 774 w Kryspinowie wykonany z betonu asfaltowego do bardzo cienkich warstw BBTM 8.

Pomiary te miały na celu porównanie wyników otrzymanych z badań prowadzonych na nawierzchniach wyłączonych z ruchu zlokalizowanych na odcinku badawczym w Bolimowie z wynikami badań przeprowadzonych na nawierzchniach eksploatowanych w typowy sposób. Odcinki dróg wojewódzkich w Małopolsce zostały wykonane z warstw ścieralnych o grubości 3 cm i warstwy wiążącej AC 16W o grubości co najmniej 6 cm. Charakteryzowały się obniżoną hałaśliwością [28], [131].

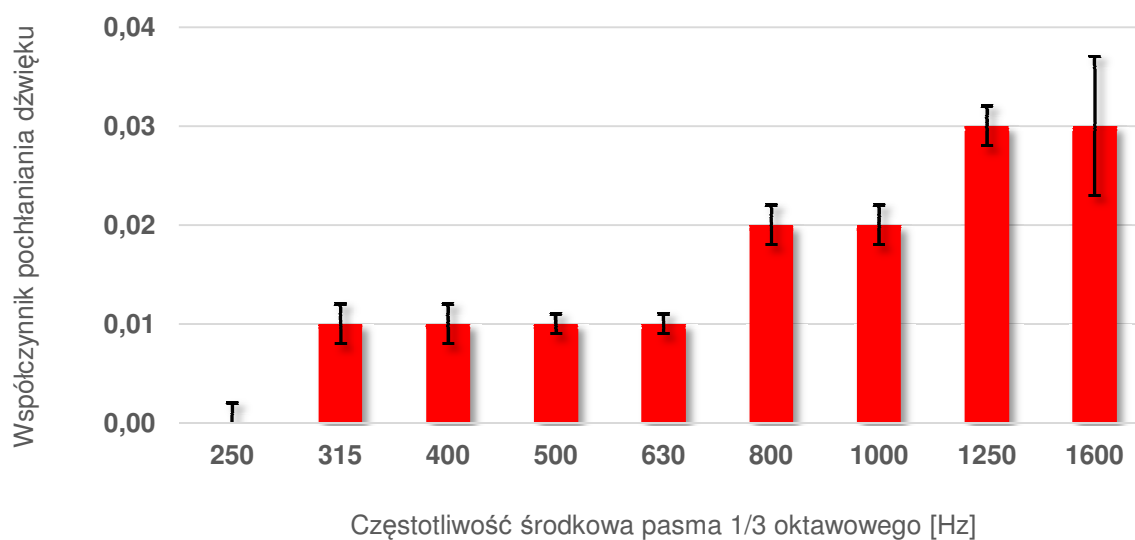
4. BADANIA – ZAKRES I PODSTAWOWE WYNIKI

Badania wykonane w ramach niniejszego opracowania wykonane zostały zgodnie z metodyką określoną w normie (ISO 13472-2, 2010). Szczegółowy opis tej metodyki przedstawiono w rozdziale 2 opracowania. Zgodnie z jej wymaganiami wyniki badań zostały przedstawione w postaci współczynnika pochłaniania dźwięku w podziale na częstotliwości środkowe pasm 1/3 oktaowych w zakresie od 250 do 1600 Hz. Na wykresach przedstawiających wyniki pomiarów, oprócz wartości zmierzonej współczynnika pochłaniania dźwięku zaznaczono także odchylenie standardowe wyników dla każdej mierzonej częstotliwości (za pomocą przedziału oznaczonego kolorem czarnym). Dodatkowo na każdym rysunku przedstawiającym wyniki pomiarów oznaczono również linią kreskowaną koloru niebieskiego wartość współczynnika pochłaniania dźwięku równą 0.15 (o ile występowała), która stanowi ograniczenie zakresu stosowania procedury określonej w normie (ISO 13472-2, 2010). Ograniczenie to wynika z faktu, iż pomiar dla powierzchni charakteryzującej się współczynnikiem pochłaniania dźwięku wyższym od wartości równej 0.15 jest dużo mniej precyzyjny. Wyniki znajdujące się ponad tą granicą należy zatem traktować jako orientacyjne. Niemniej na ich podstawie można stwierdzić, że dana nawierzchnia charakteryzuje się dużymi zdolnościami pochłaniania dźwięku emitowanego przez przejeżdżającą pojazdy.

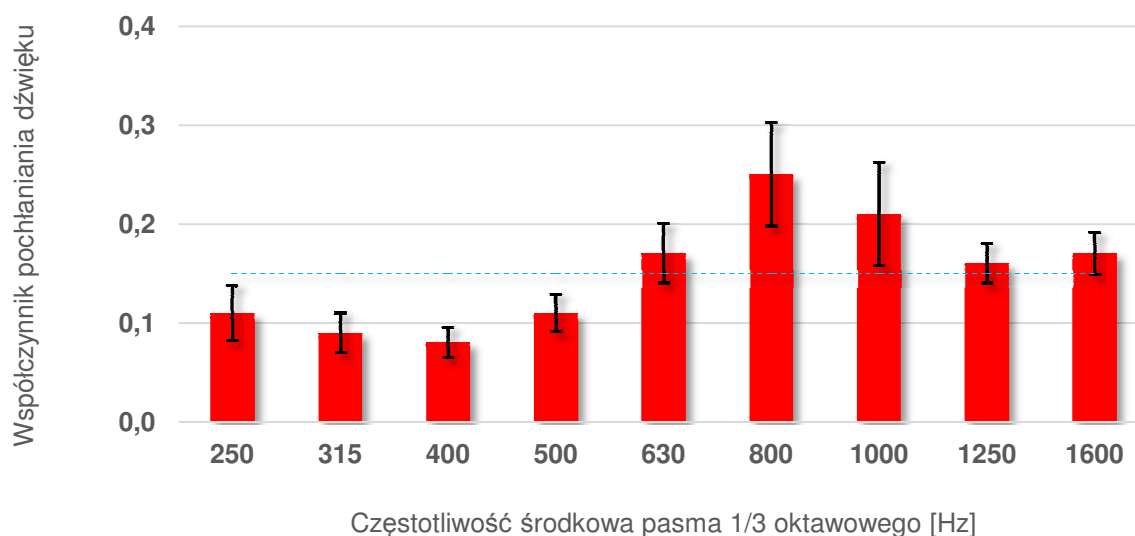
W pierwszej kolejności przedstawiono wyniki badań „in situ” wykonane na nawierzchniach zastosowanych na odcinku badawczym w Bolimowie pod Warszawą. Na każdym badanym odcinku, zgodnie z wymaganiami normy (ISO 13472-2, 2010), wykonano pomiar współczynnika pochłaniania dźwięku przy użyciu rury impedancyjnej w czterech punktach. Z uwagi na fakt, że odcinki te są wyłączone z eksploatacji (nie odbywa się po nich codzienny ruch samochodów) oraz z uwagi na ograniczoną ich długość (maks. 90 m) punkty te zlokalizowano w bliskiej odległości od siebie. Stanowiło to niewielkie odstępstwo od wymagań normowych, które nie miało żadnego wpływu na wyniki badań. Poniżej, na fot. 4.1, przedstawiono lokalizację miejsc w których wykonano pomiar na jednym z badanych odcinków. Wyniki badań przedstawiono natomiast na rys. 4.1 - rys. 4.7.



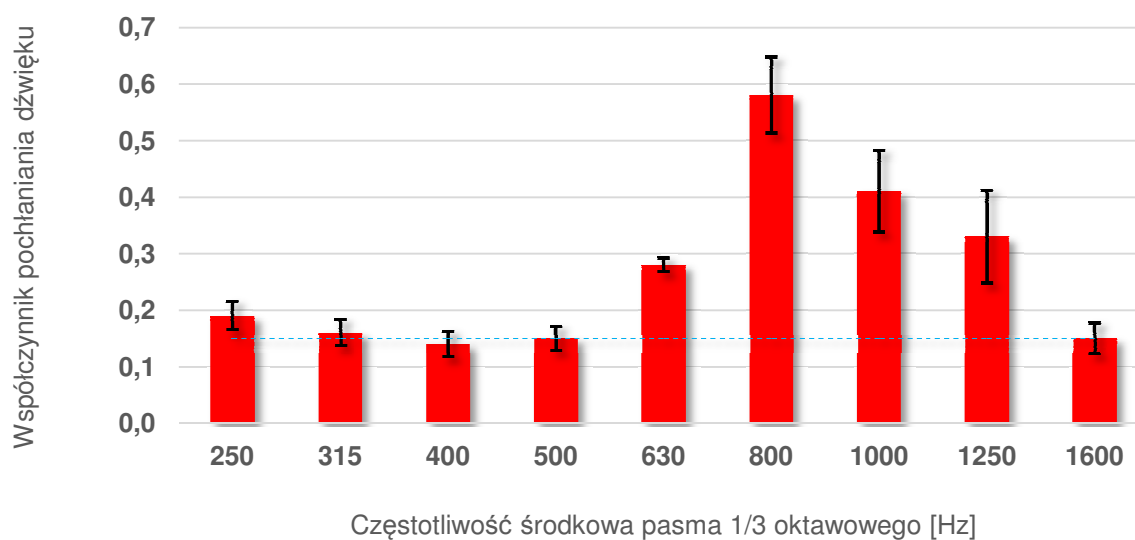
Fot. 4.1. Przykładowa lokalizacja punktów, w których została wykonany pomiar współczynnika pochłaniania dźwięku na wybranej nawierzchni zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie koło Warszawy.



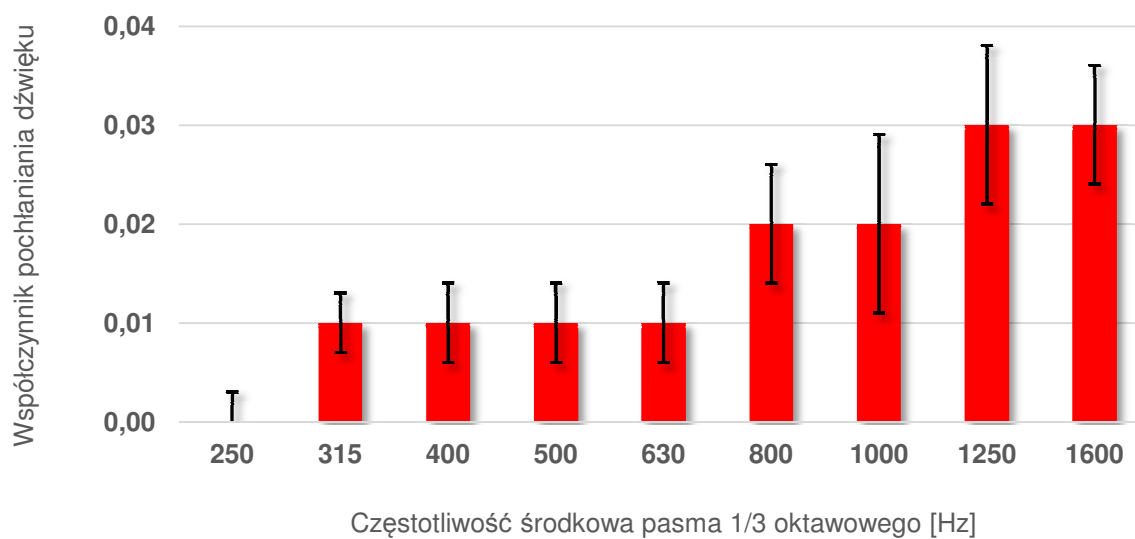
Rys. 4.1. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchni AC 11 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie – pomiar „in situ”



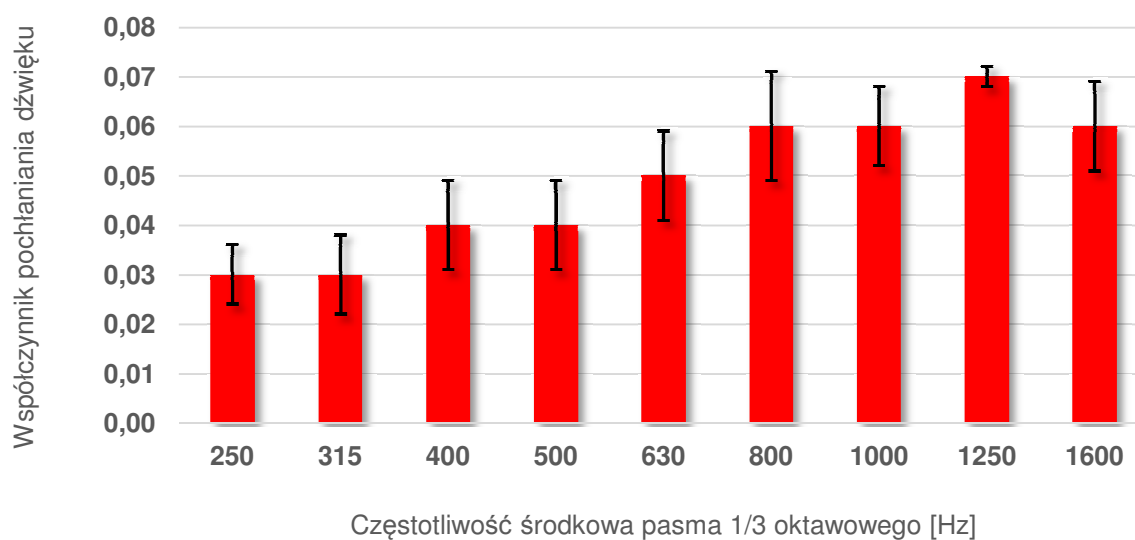
Rys. 4.2. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchni OGFC 11 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie – pomiar „in situ”



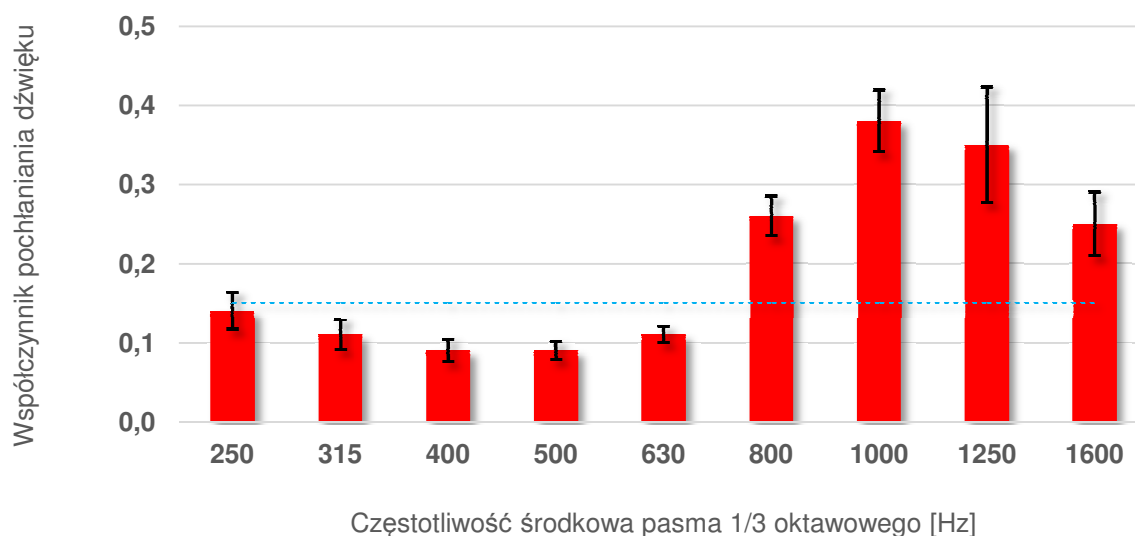
Rys. 4.3. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchni PA 11 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie – pomiar „in situ”



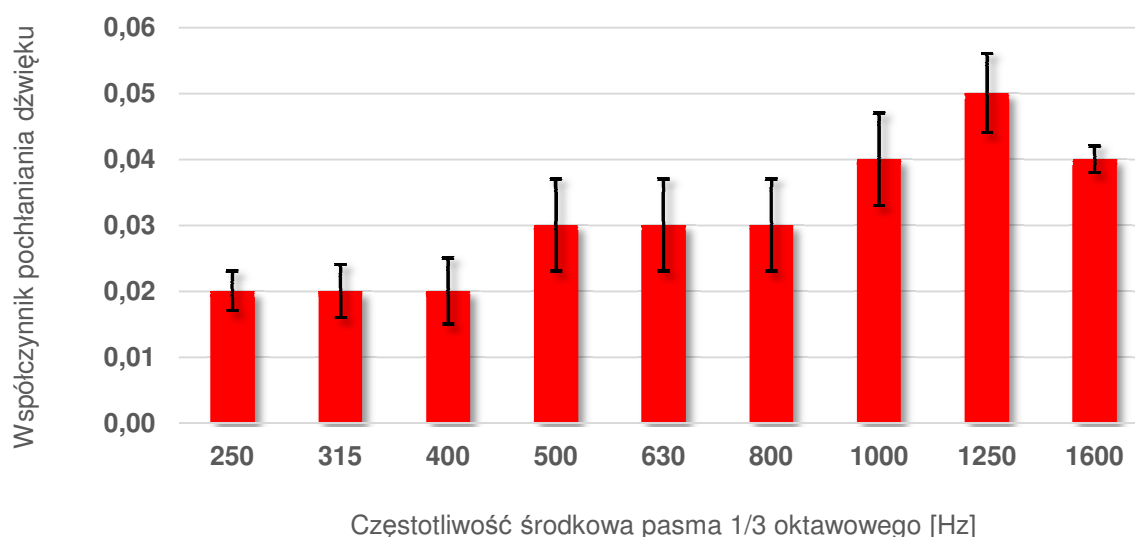
Rys. 4.4. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchni OGFC 8 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie – pomiar „in situ”



Rys. 4.5. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchni SMA 8 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie – pomiar „in situ”

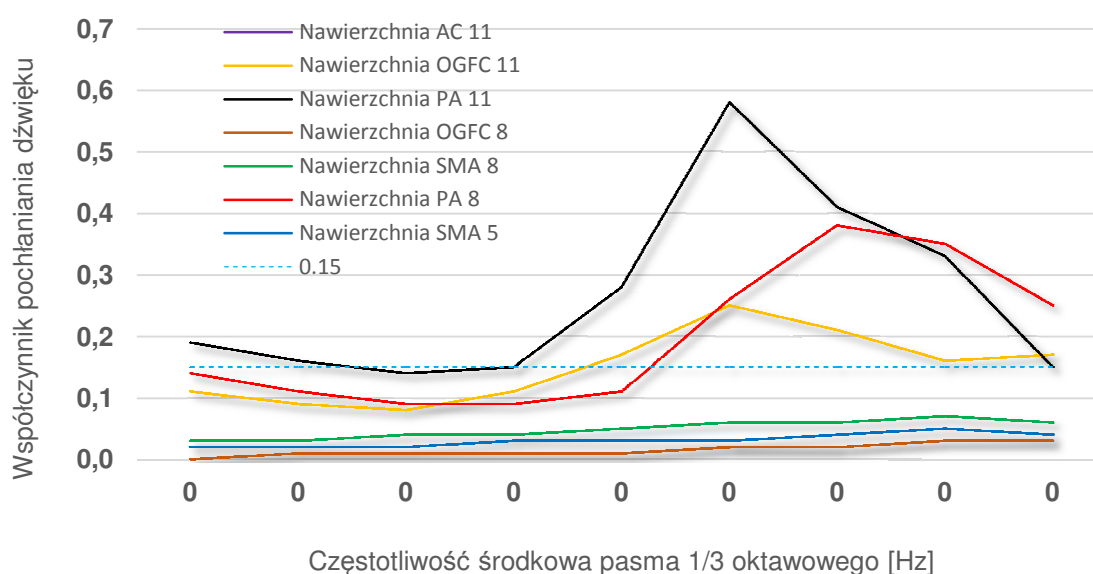


Rys. 4.6. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchni PA 8 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie – pomiar „in situ”



Rys. 4.7. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchni SMA 5 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie – pomiar „in situ”

W celu porównania właściwości pochłaniania dźwięku badanych nawierzchni, wyniki pomiarów przedstawiono zbiorczo na poniżej na rys. 4.8. Na rysunku tym nie zostały przedstawione odchylenia standardowe wyników pomiarów, aby nie zmniejszać jego czytelności.



Rys. 4.8. Zbiorcze zestawienie wyników pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku w warunkach „in situ” dla nawierzchni zastosowanych na odcinku badawczym w Bolimowie

Analizując wyniki badań przedstawione w sposób zbiorczy na powyższym rysunku, należy stwierdzić, że trzy nawierzchnie: PA 11, PA 8 i OGFC 11 charakteryzują się najlepszymi właściwościami absorpcji hałasu samochodowego. Współczynniki pochłaniania dźwięku zmierzone w warunkach „in situ” w każdej analizowanej częstotliwości osiągają w przypadku tych nawierzchni wysokie wartości. Szczególnie korzystne warunki pochłaniania dźwięku charakteryzują nawierzchnię PA 11. Wspólną cechą tych trzech nawierzchni jest duża zawartość wolnych przestrzeni w ich strukturze. Porowatość jest parametrem, który w największym stopniu decyduje o własnościach pochłaniania dźwięku. Z tego powodu zmierzone współczynniki pochłaniania dźwięku osiągają w ich przypadku największe wartości. Nawierzchnią, która posiada nieco mniejszy udział wolnych przestrzeni jest OGFC 8. Wyniki pomiaru współczynnika pochłaniania dźwięku są jednak dla niej zaskakująco niskie (wyniki te potwierdzono następnie w laboratorium powtarzając pomiar na pobranych próbkach, o czym szerzej napisano w dalszej części rozdziału). Przyczyną tego mogą być zanieczyszczenia, które dostały się do jej wnętrza i spowodowały zatkanie porów w jej strukturze. Jest to częsta przyczyna spadku własności obniżających hałaśliwość nawierzchni porowatych [58]. Nawierzchnie takie wymagają specjalistycznych zabiegów czyszczących polegających na usunięciu zanieczyszczeń przy użyciu wody pod odpowiednio dużym ciśnieniem. Powodem tej sytuacji mogła być także obecność bitumu na ziarnach kruszywa nie zużywającego się w związku z faktem, iż odcinek testowy jest zamknięty dla ruchu [132].

Pozostałe nawierzchnie zastosowane na odcinku badawczym w Bolimowie (SMA 5 i SMA 8) nie charakteryzują się zwiększonymi właściwościami pochłaniania dźwięku w stosunku do nawierzchni referencyjnej AC 11. Nie świadczy to jednak, że nie posiadają one właściwości obniżających dźwięk. Nawierzchnie te są typu zamkniętego - zawartość wolnych przestrzeni w ich strukturze jest określona na poziomie od 3.5 do 4.0%. Charakteryzują się one natomiast mniejszym wymiarem maksymalnym zastosowanego kruszywa w porównaniu do nawierzchni referencyjnej. W związku z tym właściwości redukcji dźwięku osiągane po ich zastosowaniu wynikają z innych mechanizmów. Wpływa na to w głównej mierze ich makrotekstura. W takim przypadku ograniczany jest przede wszystkim tzw. hałas toczenia

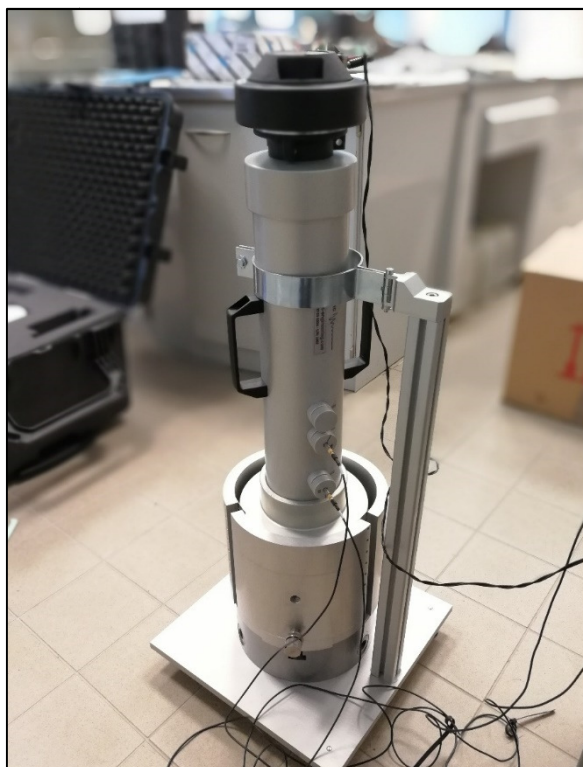
powstający na styku nawierzchni i opony. Jest to osiągane poprzez unikanie w makroteksturze nawierzchni dużych nierówności (tzw. peaków). Należy natomiast pamiętać, że nawierzchnia nie może być jednocześnie zbyt równa i gładka, ponieważ może to doprowadzić to zmniejszenia przepływu powietrza w miejscu styku nawierzchni z kołami pojazdów, co z kolei prowadzi do wzmocnienia tzw. efektu rogu (horn effect) i w konsekwencji do zwiększenia hałasu toczenia. Z tego względu, przy projektowaniu nawierzchni drogowych trzeba brać pod uwagę obydwie te efekty. Należy także wspomnieć, że hałas toczenia zwiększa się na nawierzchniach równych i gładkich w przypadku ruchu z poślizgiem (ISO 10844, 2014), [5].

W następnej kolejności zbadano próbki nawierzchni pobrane z odcinka testowego w warunkach laboratoryjnych. Dla każdej nawierzchni przebadane zostały trzy próbki, których widok (po wykonaniu badań) przedstawiono poniżej na fot. 4.2. Celem tych pomiarów było porównanie wyników otrzymanych w warunkach „in situ” i w warunkach laboratoryjnych dla tych samych nawierzchni.



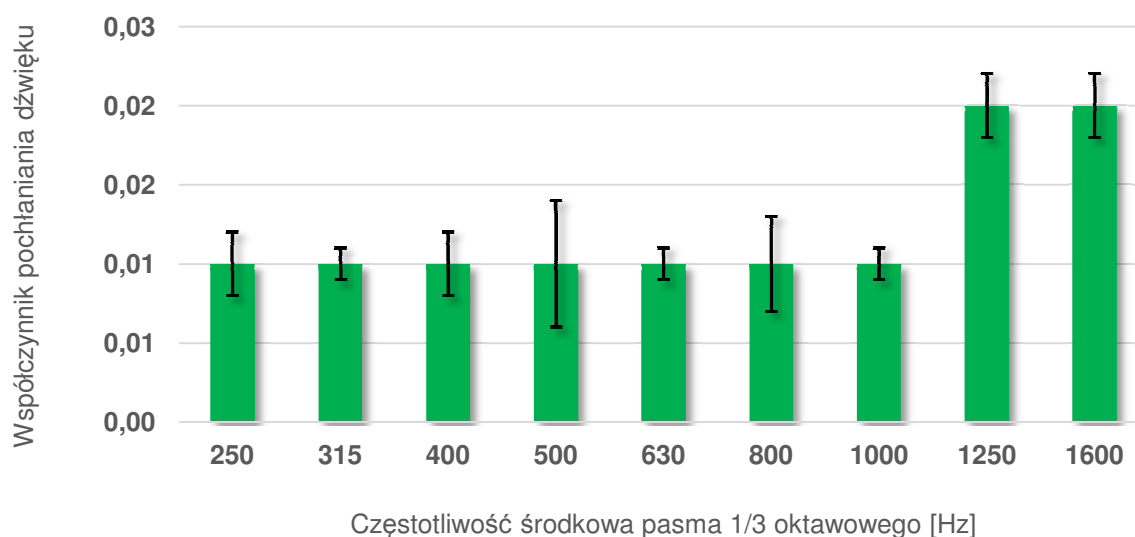
Fot. 4.2. Widok próbek nawierzchni pobranych z odcinka badawczego w Bolimowie, na których wykonano pomiary w warunkach laboratoryjnych.

Do przeprowadzenia badań wykorzystano stanowisko zaprojektowane w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów. Oprócz sprzętu używanego do pomiarów „in situ” składało się ono z uchwytu umożliwiającego montaż rury impedancyjnej na badanej próbce fot. 4.3.

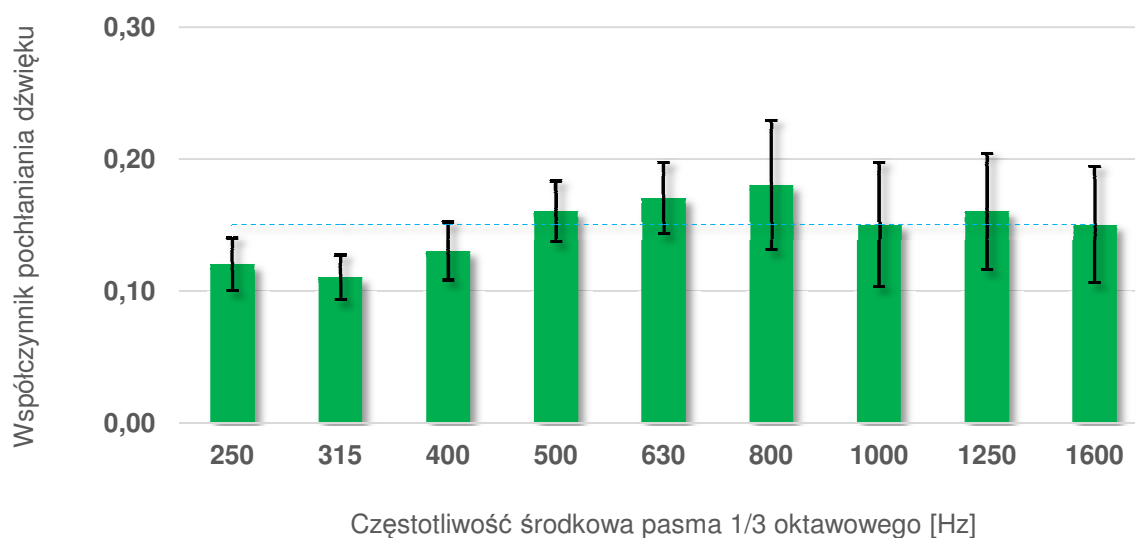


Fot. 4.3. Widok stanowiska pomiarowego wykorzystanego do badania współczynnika pochłaniania dźwięku przez nawierzchnie drogowe w warunkach laboratoryjnych

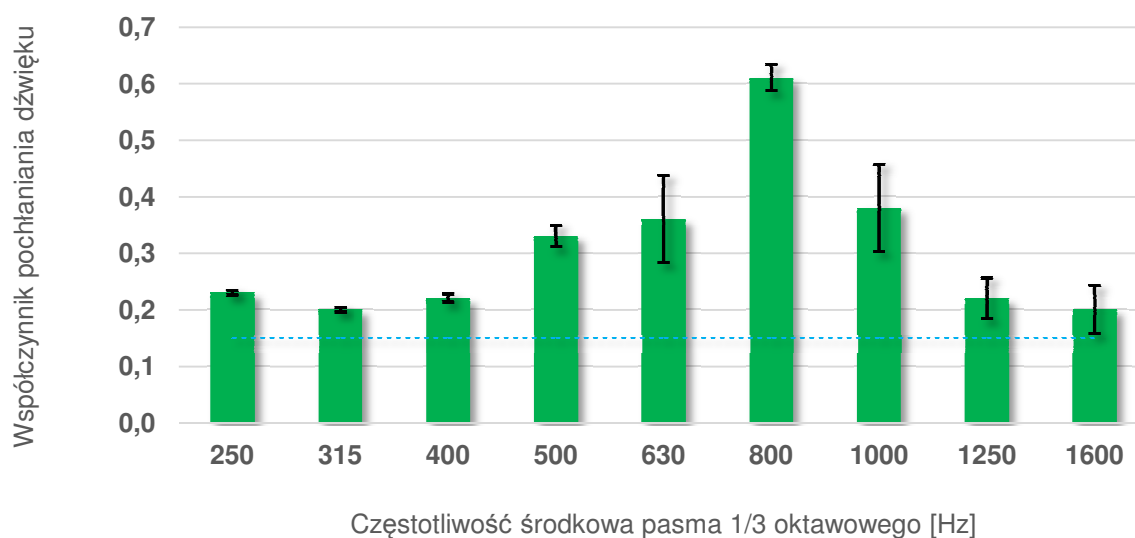
Wyniki badań wykonanych w warunkach laboratoryjnych na próbkach pobranych z odcinka badawczego w Bolimowie przedstawiono poniżej na rys. 4.9 - rys. 4.15. Na rys. 4.16 przedstawiono natomiast zbiorcze zestawienie wyników wszystkich pomiarów wykonanych w warunkach laboratoryjnych.



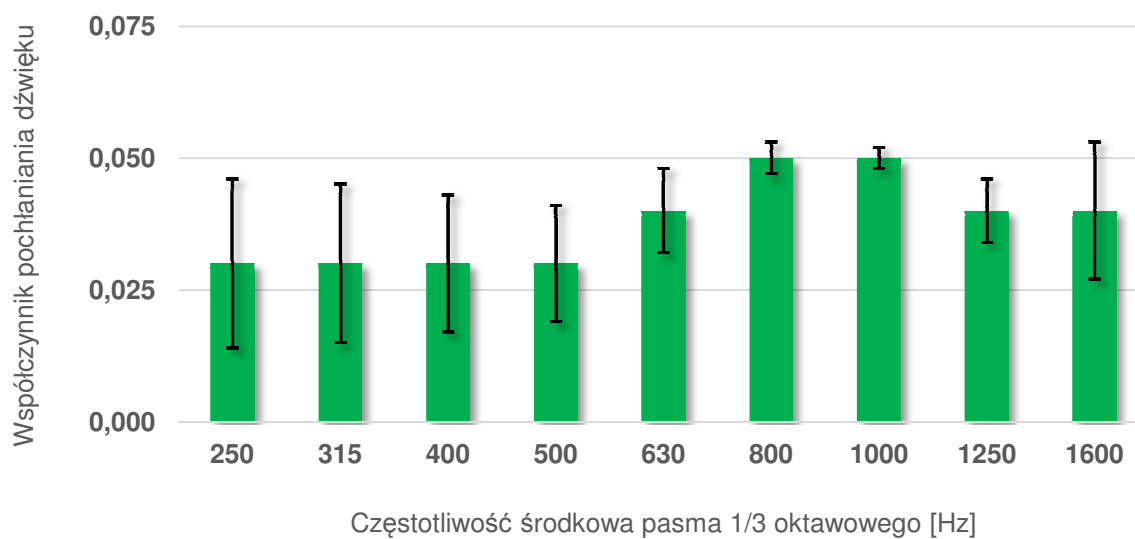
Rys. 4.9. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych na próbkach nawierzchni AC 11 pobranych z odcinka badawczego w Bolimowie



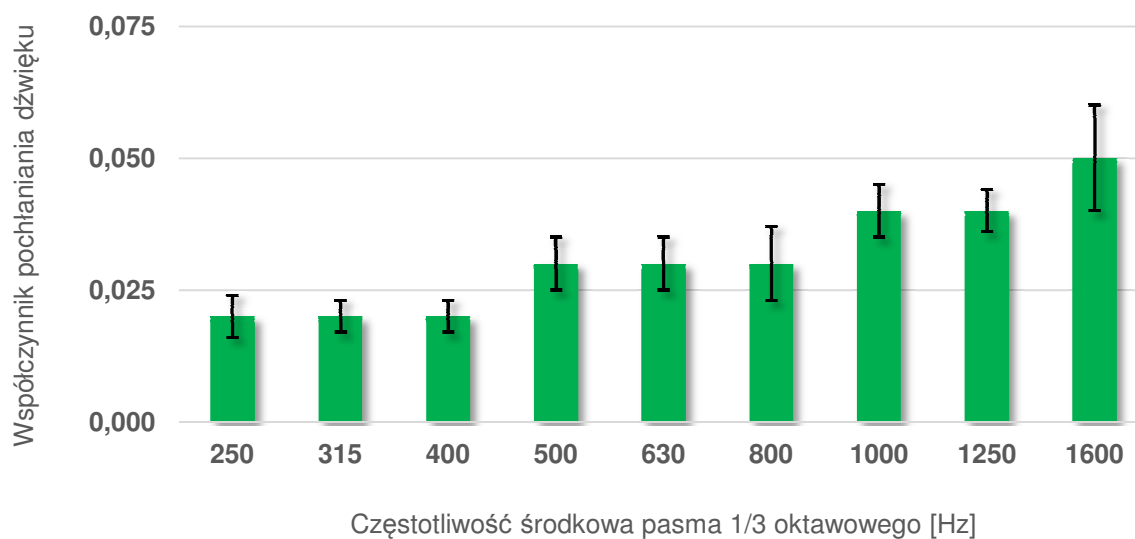
Rys. 4.10. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych na próbkach nawierzchni OGFC 11 pobranych z odcinka badawczego w Bolimowie



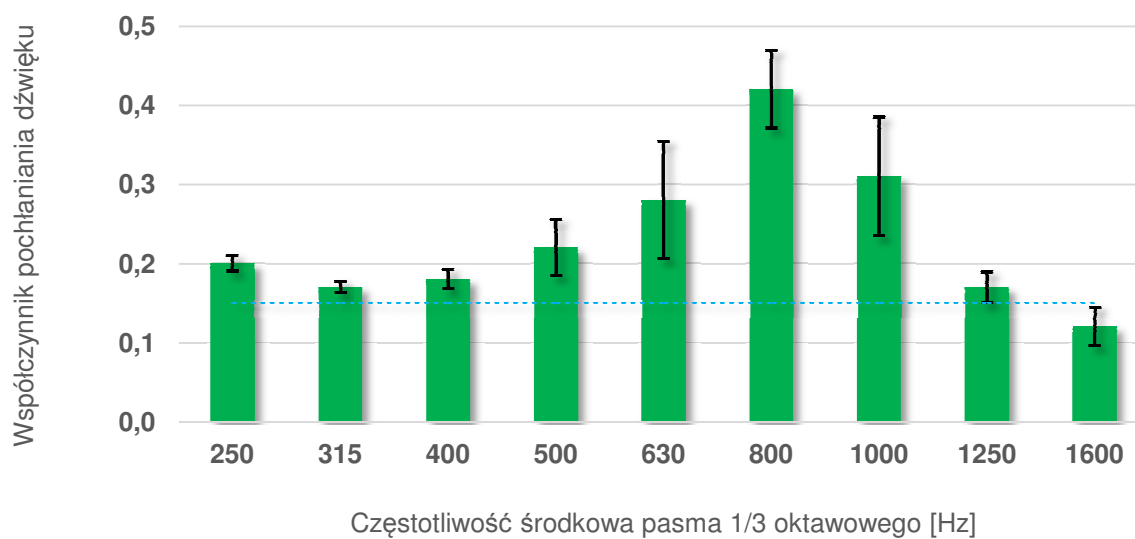
Rys. 4.11. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych na próbkach nawierzchni PA 11 pobranych z odcinka badawczego w Bolimowie



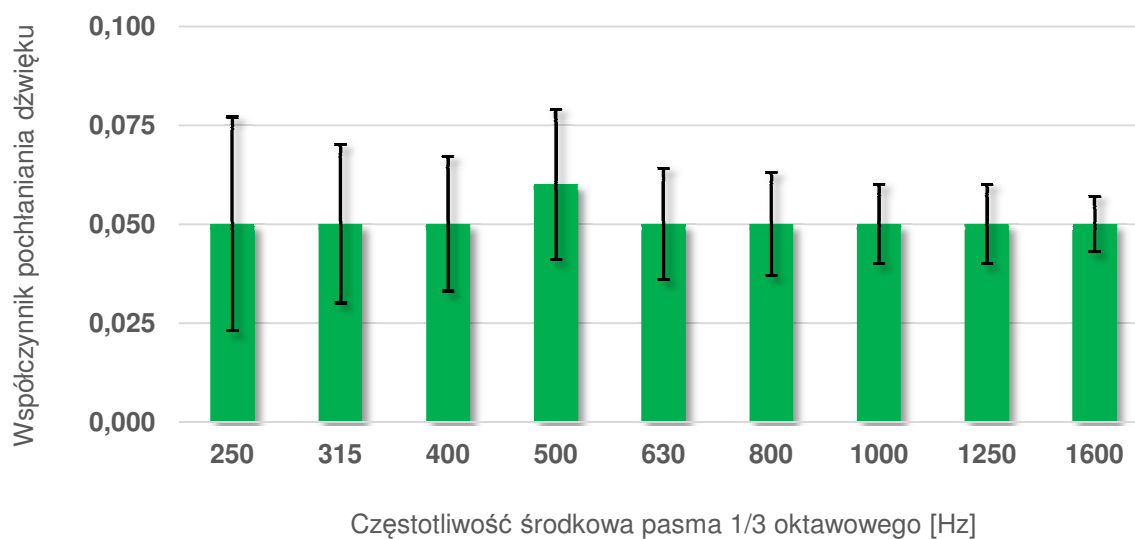
Rys. 4.12. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych na próbkach nawierzchni OGFC 8 pobranych z odcinka badawczego w Bolimowie



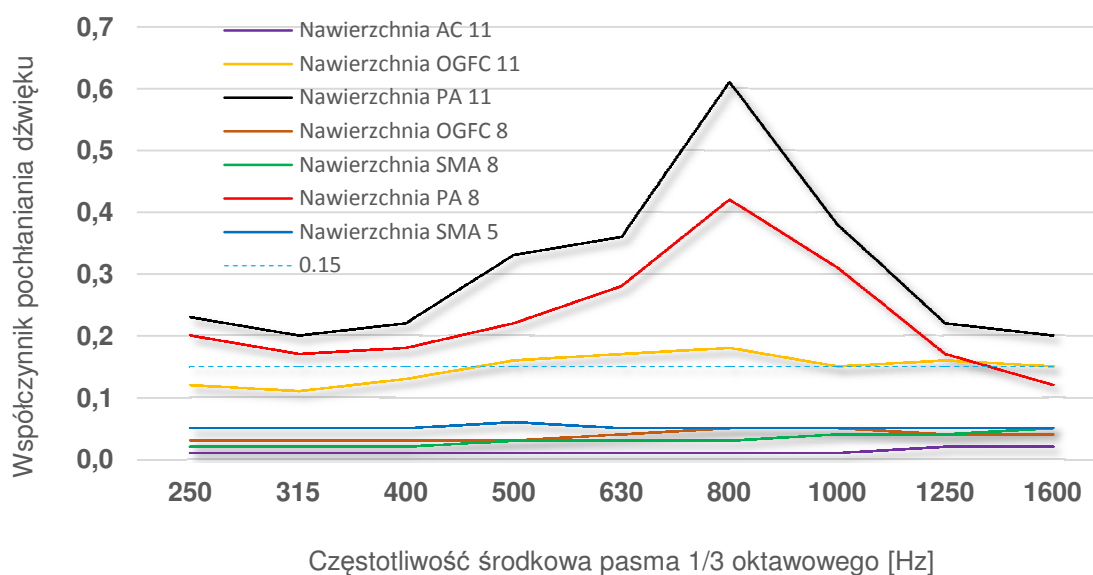
Rys. 4.13. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych na próbkach nawierzchni SMA 8 pobranych z odcinka badawczego w Bolimowie



Rys. 4.14. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych na próbkach nawierzchni PA 8 pobranych z odcinka badawczego w Bolimowie



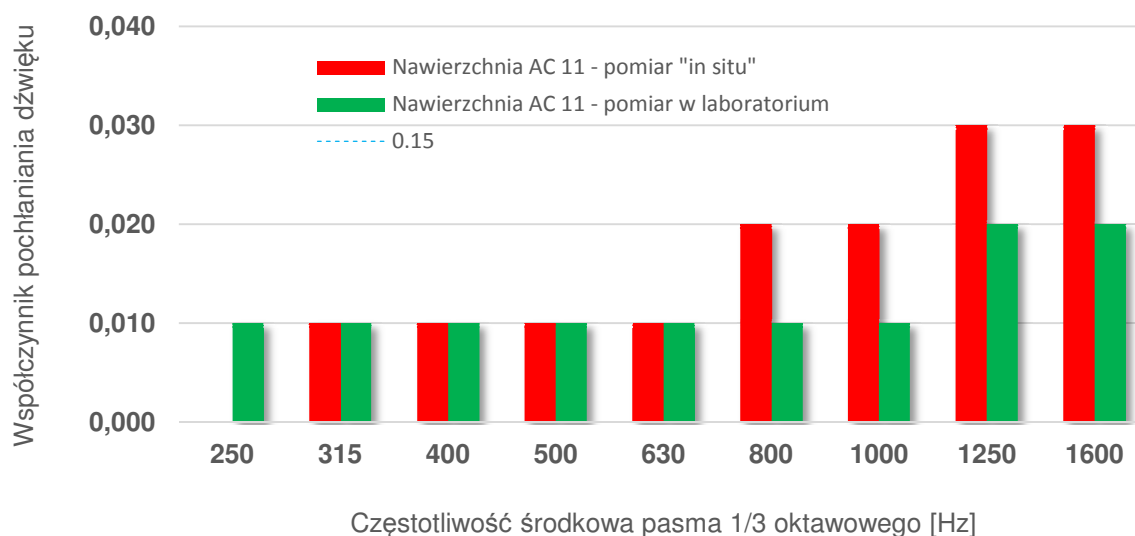
Rys. 4.15. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych na próbkach nawierzchni SMA 5 pobranych z odcinka badawczego w Bolimowie



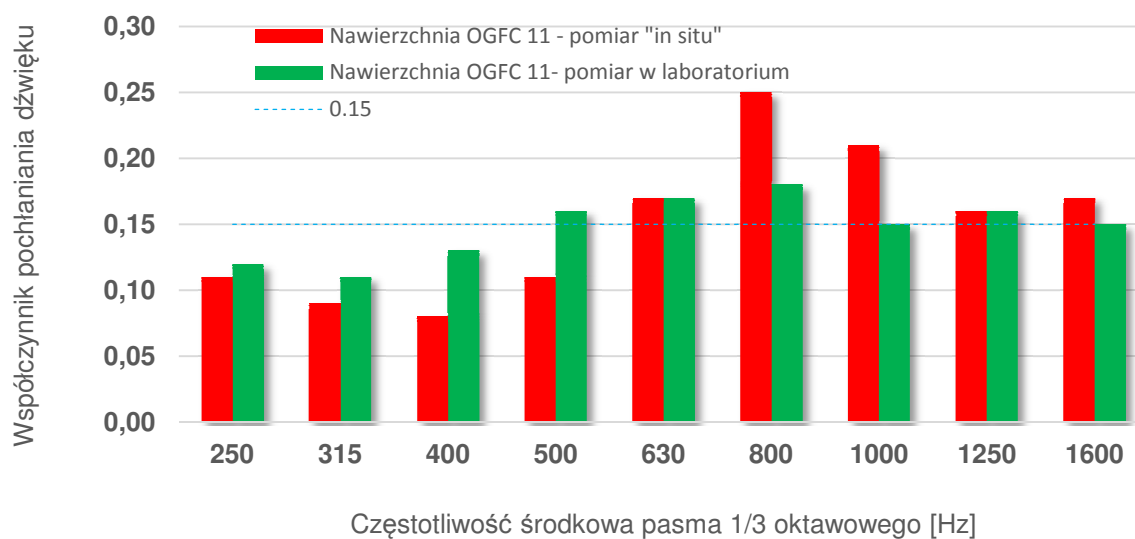
Rys. 4.16. Zbiorcze zestawienie wyników pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku w warunkach laboratoryjnych wykonanych na próbkach pobranych z odcinka badawczego w Bolimowie

Analizując wyniki badań wykonanych w warunkach laboratoryjnych na próbkach pobranych z odcinka badawczego w Bolimowie, można sformułować podobne wnioski, jak w przypadku badań przeprowadzonych w warunkach „in situ”. Trzy nawierzchnie porowate (PA 11, PA 8 i OGFC 11) charakteryzują się najlepszymi właściwościami pochłaniania dźwięku. Pozostałe badane próbki nawierzchnie (SMA 5, SMA 8) charakteryzują się dużo niższym współczynnikiem pochłaniania dźwięku, zbliżonym do nawierzchni referencyjnej AC 11. Można także potwierdzić wniosek dotyczący niższych, niż oczekiwane, wyników pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchnie OGFC 8, które prawdopodobnie były wynikiem zatkania porów w tej nawierzchni (próbki pobrane z odcinka badawczego nie były poddawane czyszczeniu).

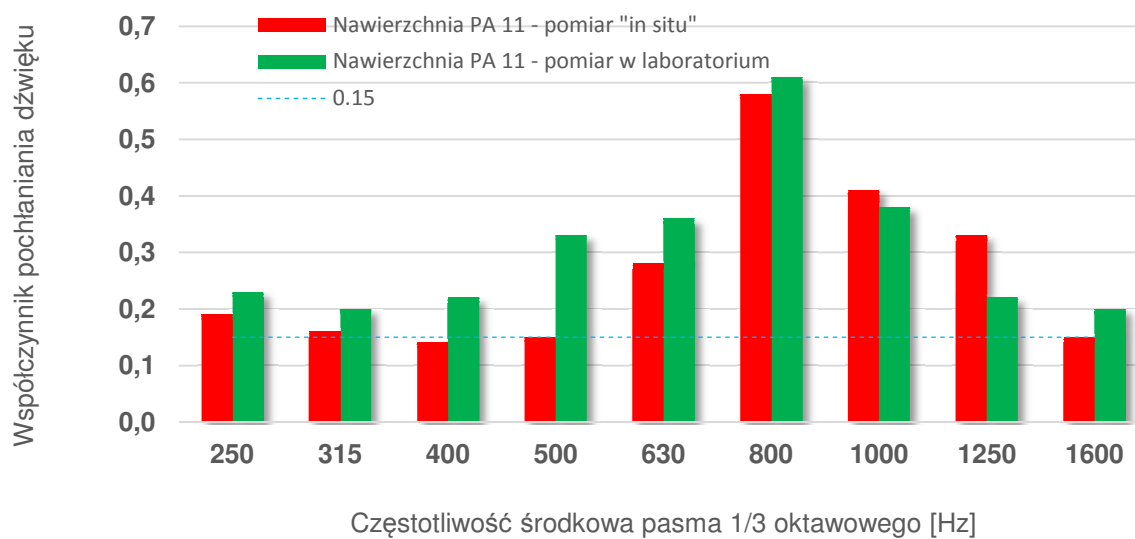
Pomiary w warunkach laboratoryjnych miały także na celu sprawdzenie korelacji wyników pomiarów „in situ” i pomiarów wykonanych w warunkach laboratoryjnych. W związku z tym na poniższych wykresach (rys. 4.17 - rys. 4.23) przedstawiono zbiorczo wyniki badań terenowych i laboratoryjnych dla każdej nawierzchni wykonanej na odcinku badawczym w Bolimowie.



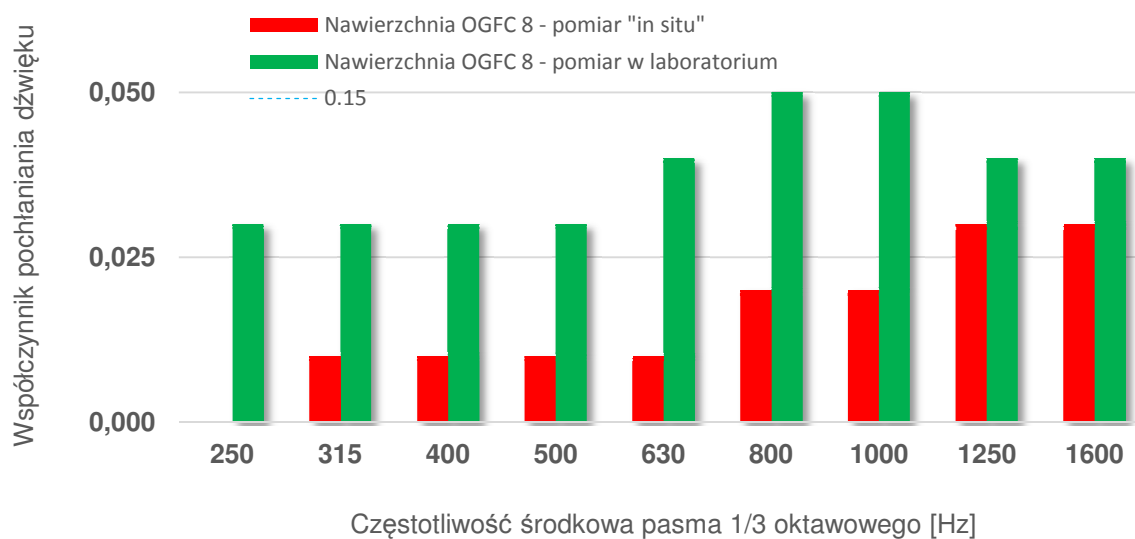
Rys. 4.17. Porównanie wyników badań współczynnika pochłaniania dźwięku „in situ” i w laboratorium dla nawierzchni AC 11 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie



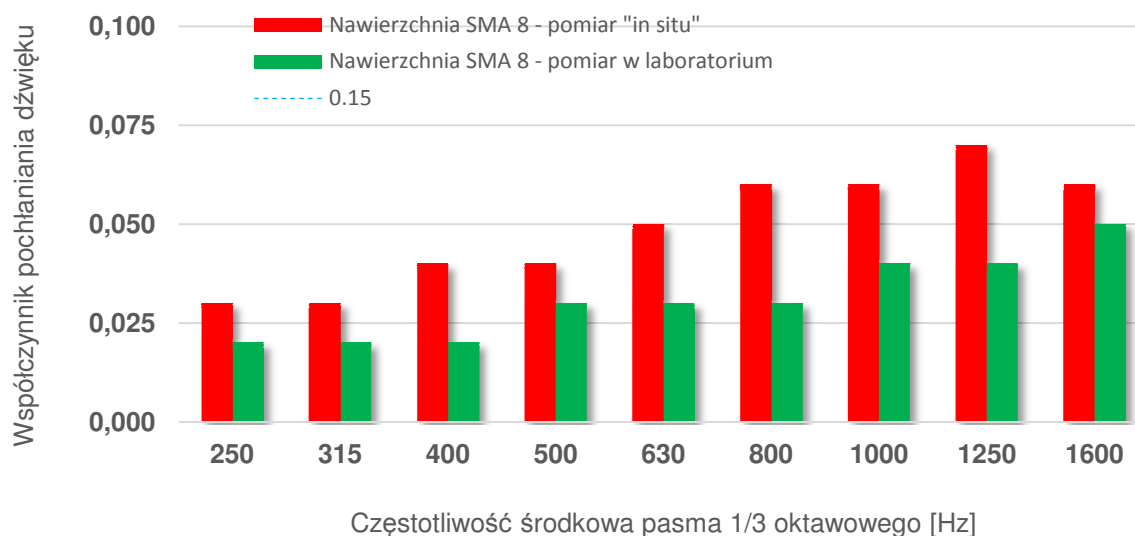
Rys. 4.18. Porównanie wyników badań współczynnika pochłaniania dźwięku „in situ” i w laboratorium dla nawierzchni OGFC 11 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie



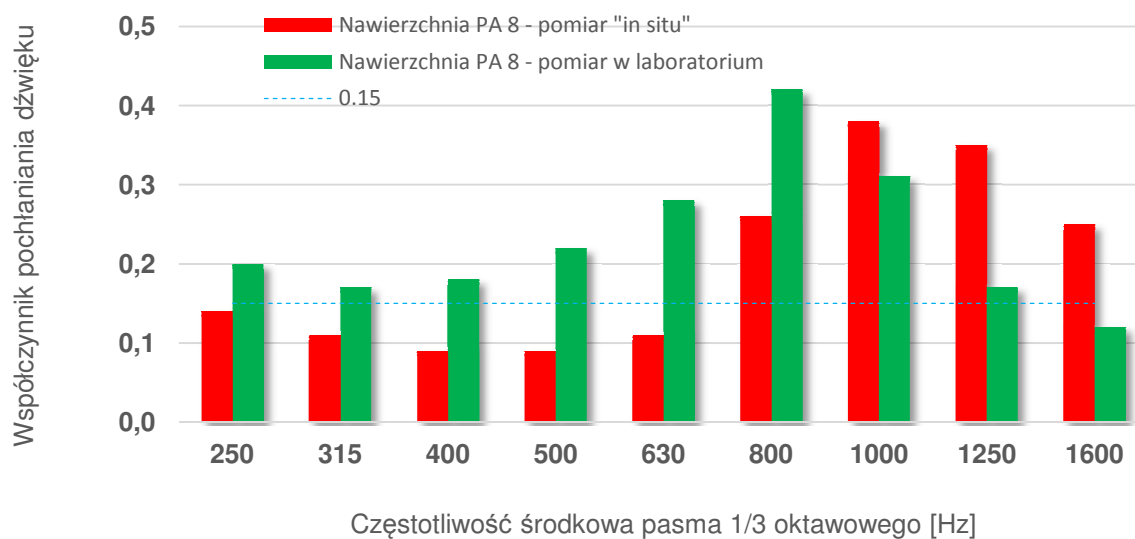
Rys. 4.19. Porównanie wyników badań współczynnika pochłaniania dźwięku „in situ” i w laboratorium dla nawierzchni PA 11 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie



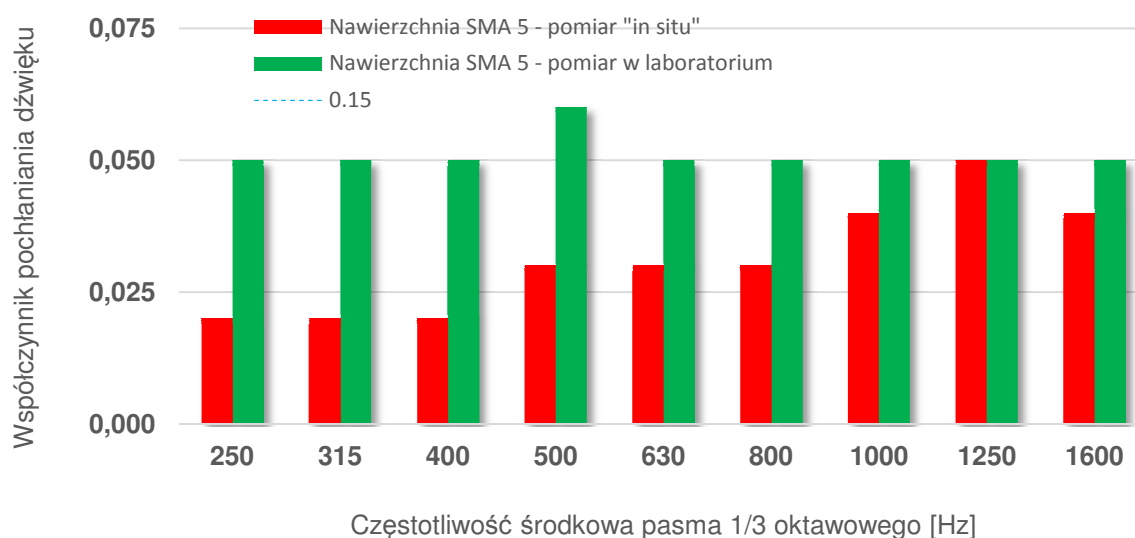
Rys. 4.20. Porównanie wyników badań współczynnika pochłaniania dźwięku „in situ” i w laboratorium dla nawierzchni OGFC 8 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie



Rys. 4.21. Porównanie wyników badań współczynnika pochłaniania dźwięku „in situ” i w laboratorium dla nawierzchni SMA 8 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie



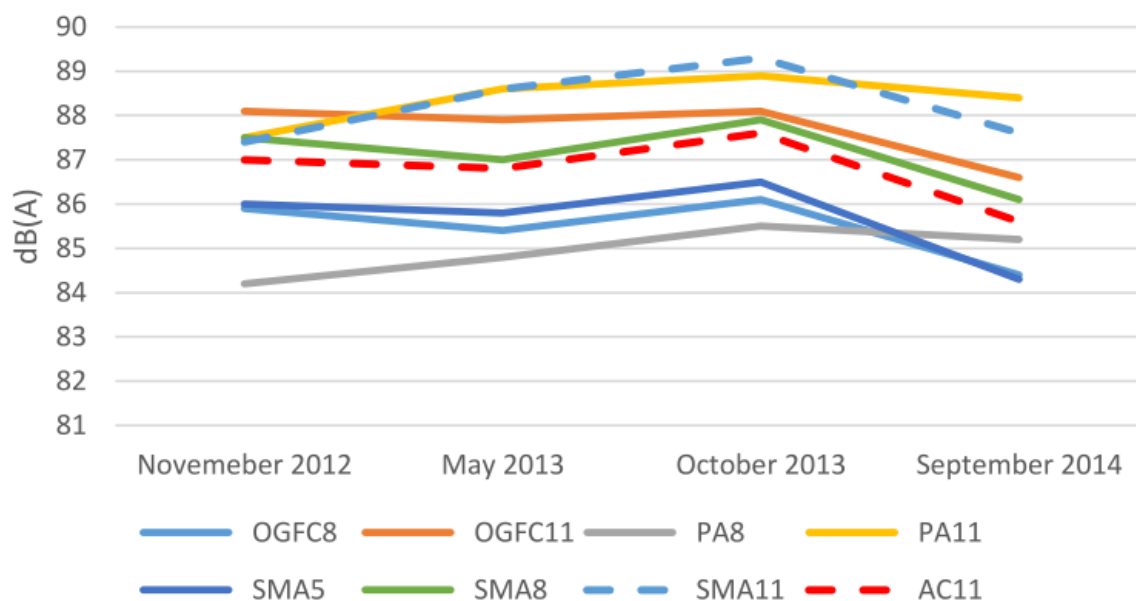
Rys. 4.22. Porównanie wyników badań współczynnika pochłaniania dźwięku „in situ” i w laboratorium dla nawierzchni PA 8 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie



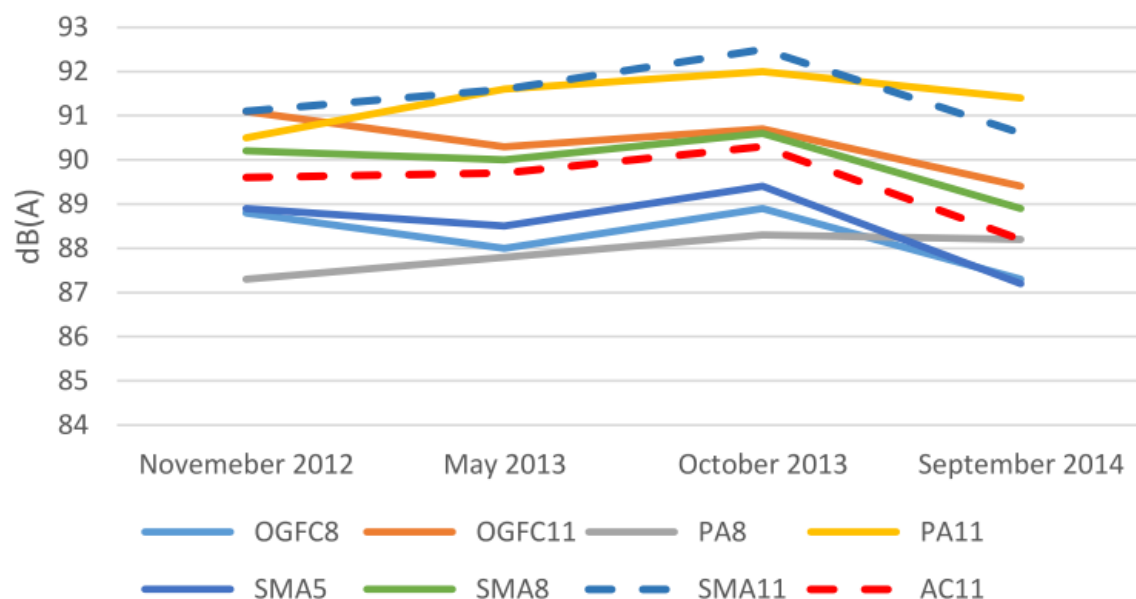
Rys. 4.23. Porównanie wyników badań współczynnika pochłaniania dźwięku „in situ” i w laboratorium dla nawierzchni SMA 5 zastosowanej na odcinku badawczym w Bolimowie

Analizując dane przedstawione na powyższych wykresach należy stwierdzić, że wyniki pomiarów wykonanych w warunkach terenowych są zbieżne z wynikami pomiarów w laboratorium. W większości przypadków różnica pomiędzy wynikami w każdej częstotliwości jest zdecydowanie mniejsza od wartości 0.1. Większe można zauważyć dla nawierzchni porowatych charakteryzujących się wysokimi współczynnikami pochłaniania dźwięku: PA 11 (maksymalna różnica 0.18), PA 8 (maksymalna różnica 0.18) i OGFC 11 (maksymalna różnica 0.07). Różnice te wynikają ze specyfiki metody pomiarowej (ISO 13472-2, 2010), która charakteryzuje się mniejszą precyzją w przypadku pomiarów nawierzchni, dla których współczynnik pochłaniania dźwięku jest większy od 0.15. Dla pozostałych nawierzchni różnice te były zdecydowanie mniejsze i wynosiły odpowiednio 0.03 dla nawierzchni OGFC 8, SMA 8 i SMA 5 oraz 0.01 dla nawierzchni AC 11.

Na odcinku testowym w Bolimowie przeprowadzono także pomiary przy użyciu metody CPX [133]. Ich wyniki opisano w artykule [132]. W celu wykonania pomiarów użyto dwóch typów opon: SRTT reprezentujących samochody osobowe i AAV4 reprezentujących samochody ciężkie. Z uwagi na bardzo krótką długość odcinków testowych, zdecydowano się na wykonanie pomiarów jedynie przy prędkościach równych 40 i 50 km/h. Pomiary hałaśliwości nawierzchni metodą CPX wykonano czterokrotnie: w listopadzie 2012 r., w maju 2013 r., w październiku 2013 r. (zaraz po dodatkowym zabrudzeniu nawierzchni) oraz w sierpniu 2014 r. (bezpośrednio po wykonaniu czyszczenia nawierzchni). Wyniki tych pomiarów przedstawiono poniżej na rys. 4.24 i rys. 4.25.



Rys. 4.24. Wyniki pomiarów hałasu wykonanych metodą CPX przy prędkości 40 km/h na odcinku testowym w Bolimowie [132]



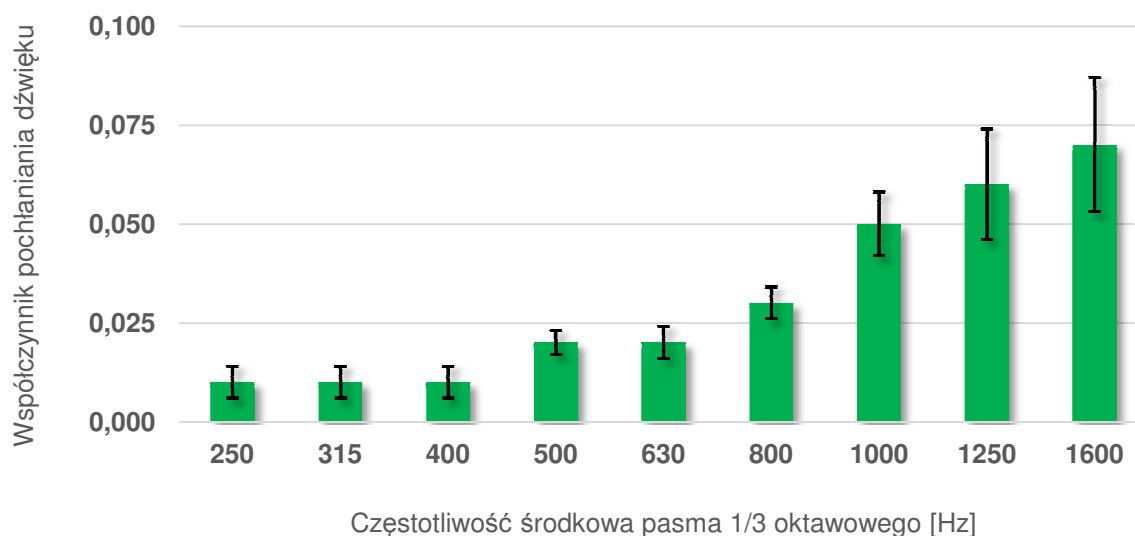
Rys. 4.25. Wyniki pomiarów hałasu wykonanych metodą CPX przy prędkości 50 km/h na odcinku testowym w Bolimowie [132]

Na podstawie analizy wyników pomiarów stwierdzono, że niezależnie od czasu wykonywania pomiaru oraz prędkości największymi powierzchniami były: OGFC 8, PA 8 i SMA 5. Nadspodziewanie dobrze, w stosunku do innych, wypadła jedna z nawierzchni referencyjnych: AC 11. Na podstawie wyników pomiarów można byłoby także stwierdzić, że nawierzchnie OGFC 11 i PA 11 nie są skutecznym rozwiązaniem, które mogłyby być

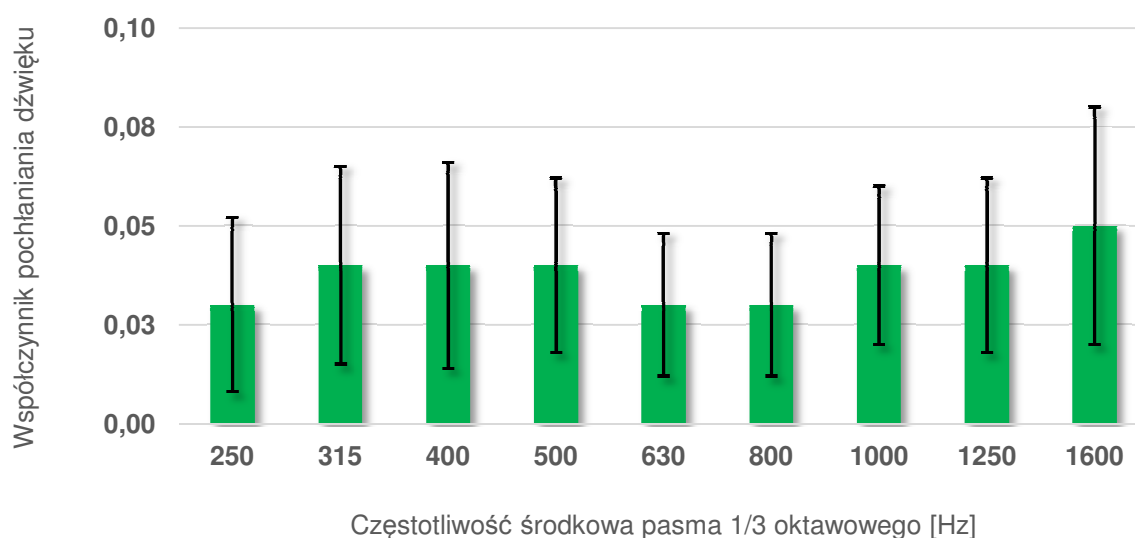
stosowane w celu zmniejszenia emisji hałasu. Wynik ten jest jednak dość nieoczekiwany. Może być spowodowany obecnością bitumu na cząstkach kruszywa pozostającego w związku z faktem, iż odcinek testowy był zamknięty dla ruchu. W przypadku większości mieszanek można było zaobserwować wzrost hałaśliwości po zabrudzeniu oraz poprawę własności akustycznych po ich wyczyszczeniu [132], co jest wnioskiem dosyć oczywistym. Niemniej pokazuje to w jaki sposób na redukcję oddziaływania akustycznego może wpływać zabrudzenie nawierzchni, z czym mamy do czynienia w zasadzie w przypadku każdego typowo eksploatowanego odcinka drogi. Różnice w wynikach dwóch ostatnich serii pokazują także, jaki wpływ na zwiększenie własności akustycznych mają zabiegi pielęgnacyjne.

Wnioski sformułowane w ramach [132] są nieco inne w porównaniu do wniosków otrzymanych na podstawie pomiarów wykonanych za pomocą rury impedancyjnej. Należy jednak pamiętać, że zakres obydwu metod jest znacząco różny. Za pomocą rury impedancyjnej i przy wykorzystaniu metodyki opisanej w normie (ISO 13472-2, 2010) mierzy się w zasadzie tylko jeden z parametrów mających wpływ na hałaśliwości nawierzchni - współczynnik pochłaniania dźwięku. Metoda CPX uwzględnia natomiast przede wszystkim zjawiska, które występują na styku koła i jezdni drogi (opisane bardziej szczegółowo w rozdziale 1 opracowania). W związku z powyższym w przypadku wykonywania pomiarów za pomocą rury impedancyjnej w zasadzie nie uwzględnia się np. wpływu tekstury nawierzchni – nie jest możliwe stwierdzenie za jej pomocą wpływu zmiany rozmiaru kruszywa w mieszance, co oczywiście ma wpływ na emisję hałasu powstającego podczas przejazdów pojazdów. Dodatkowo należy zaznaczyć, że pomiary wykonane za pomocą metody CPX w ramach [132] prowadzone były przy niewielkich prędkościach (40 – 50 km/h), co było uwarunkowane ograniczeniami w długościach odcinków badawczych. Natomiast skuteczność działania cichych nawierzchni wzrasta wraz ze wzrostem prędkości. W związku z tym należy się spodziewać, że nawierzchnie o większych zawartościach wolnych przestrzeni (OGFC 8, OGFC 11, PA 8 i PA 11) będą bardziej skutecznie obniżały hałas generowany przez ruch drogowy i wyniki pomiarów wykonanych za pomocą metody CPX powinny kształtować się w inny sposób. Jednocześnie należy pamiętać, że nawierzchnie te nie są użytkowane w typowy sposób. Odcinek badawczy jest zamknięty dla ruchu drogowego, co powoduje zjawiska opisane w artykule [132] i we wcześniejszej części opracowania, które mają wpływ na wyniki pomiarów wykonanych zarówno metodą CPX, jak i metodą przy użyciu rury impedancyjnej.

W warunkach laboratoryjnych wykonano także badania współczynnika pochłaniania dźwięku na czterech próbkach nawierzchni, na których wcześniej nie wykonywano pomiarów w terenie. Wyniki te przedstawiono poniżej na rys. 4.26 i rys. 4.27. Wyniki te przedstawiono w niniejszym raporcie, jako poglądowe.



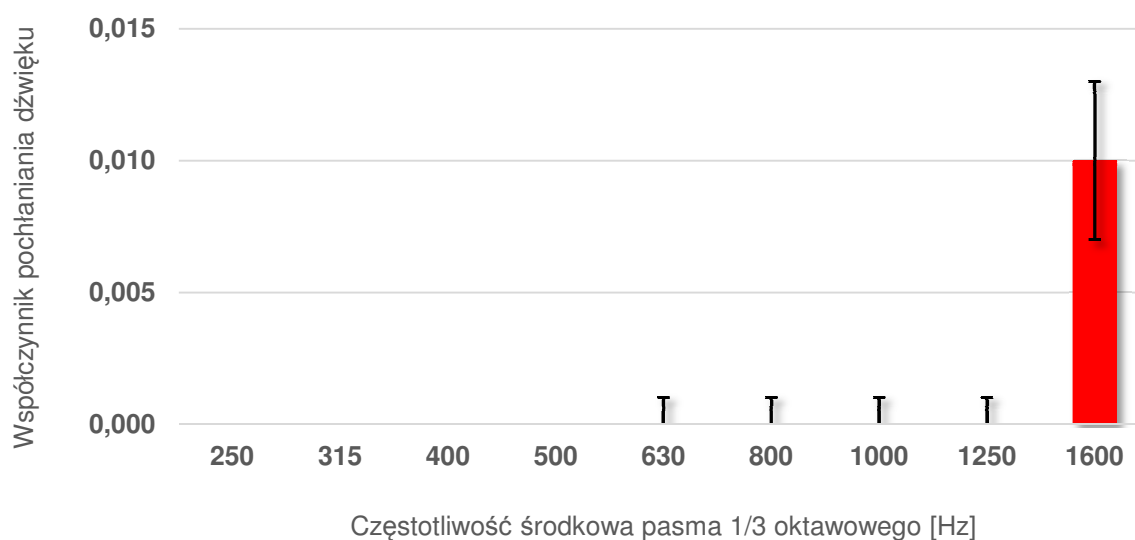
Rys. 4.26. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonane na próbce nawierzchni SMA 8 S z asfaltem 45/80-65 CR zagęszczonej w laboratorium w prasie żyratorowej – pomiar wykonany w warunkach laboratoryjnych



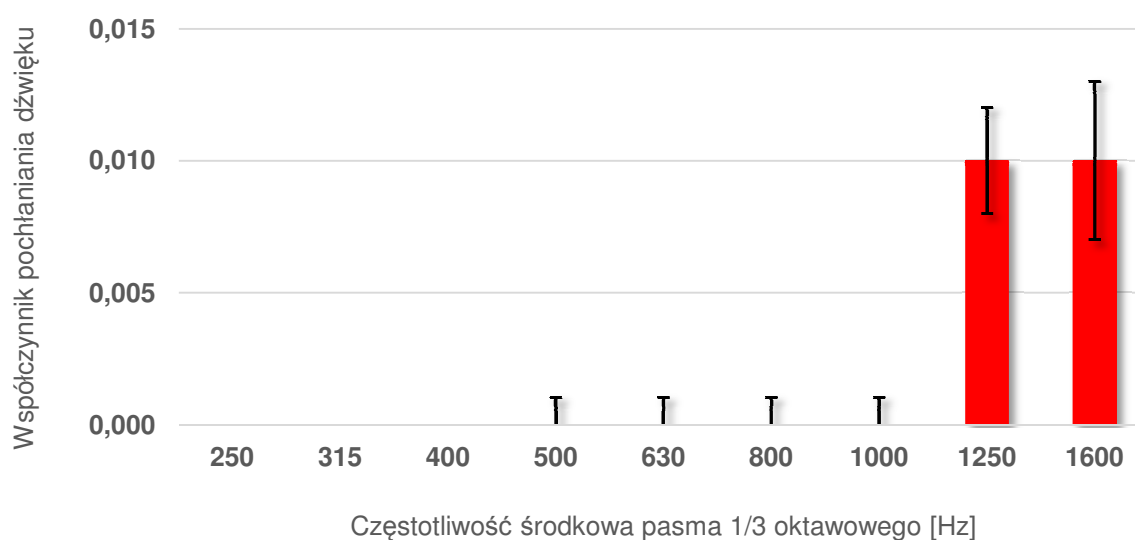
Rys. 4.27. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonane na próbce nawierzchni SMA 8 S z asfaltem 45/80-65 CR pobranej z warstwy ścieralnej nawierzchni ul. Przyczółkowej w Warszawie – pomiar wykonany w warunkach laboratoryjnych

Wszystkie wyniki badań przedstawione powyżej zostały wykonane na odcinkach dróg lub próbkach pobranych z nawierzchni, które nie były eksploatowane w typowy sposób. W związku z tym faktem, w ramach niniejszego opracowania wykonano także pomiary „in situ” na kilku wybranych odcinkach dróg, po których odbywa się ruch pojazdów. Pomiary te wykonano dla dwóch odcinków dróg, na których zastosowano nawierzchnię typu BBTM 8 (droga wojewódzka nr 964 w Wieliczce i droga wojewódzka nr 774 w Kryspinowie) oraz na odcinku, na którym warstwę ścieralną wykonano z mieszanki mastyksowo – grysowej SMA 5

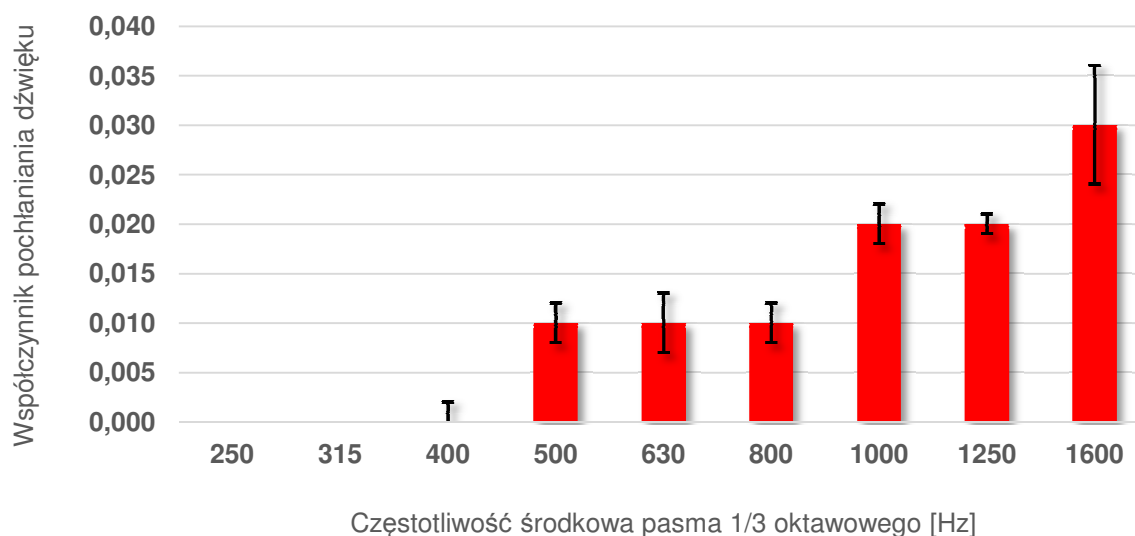
(droga wojewódzka nr 780 w Liskach). Wyniki tych pomiarów przedstawiono poniżej na rys. 4.28 - rys. 4.30.



Rys. 4.28. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych na odcinku o nawierzchni SMA 5 w ciągu drogi wojewódzkiej nr 780 w Liskach



Rys. 4.29. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych na odcinku o nawierzchni BBTM 8 w ciągu drogi wojewódzkiej nr 774 w Kryspinowie

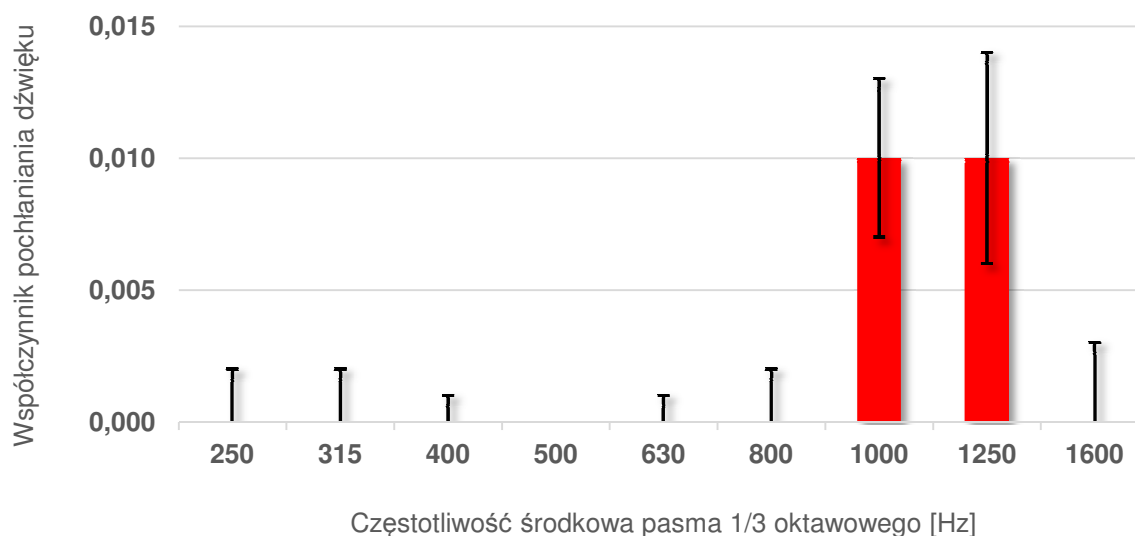


Rys. 4.30. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych na odcinku o nawierzchni BBTM 8 w ciągu drogi wojewódzkiej nr 964 w Wieliczce

Analizując wyniki badań „in situ” wykonanych na wybranych nawierzchniach eksploatowanych w chwili obecnej, można stwierdzić, że charakteryzują się one niskimi współczynnikami pochłaniania dźwięku. Pomimo faktu, iż są one klasyfikowane, jako nawierzchnie o obniżonej hałaśliwości, nie posiadają własności podwyższonej absorpcji dźwięku. W przypadku nawierzchni SMA 5 jest to fakt oczywisty. Jest to nawierzchnia typu zamkniętego o bardzo małej zawartości wolnych przestrzeni. W tym przypadku działają inne mechanizmy redukcji hałasu, o czym szerzej pisano we wcześniejszym fragmencie niniejszego rozdziału.

Pozostałe dwa odcinki dróg badane w ramach niniejszego opracowania, których warstwy ścieralne wykonane zostały jako BBTM 8 były eksploatowane od dłuższego czasu. Nie były na nich natomiast wykonywane zabiegi czyszczące. Niskie wartości współczynnika pochłaniania dźwięku są skutkiem ich zabrudzenia, które spowodowało zapchanie porów i ograniczenie własności akustycznych.

Pomiary terenowe wykonano także na nawierzchni toru Ułęż pod Dęblinem. Odcinek ten spełnia wymagania normy (ISO 10844, 2014). Wyniki tych pomiarów przedstawiono poniżej na rys. 4.31.



Rys. 4.31. Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku wykonanych na nawierzchni toru testowego Ułęż pod Dęblinem

Nawierzchnia zastosowana na torze testowym Ułęż charakteryzuje się niskimi właściwościami pochłaniania dźwięku. Na podstawie wyników przedstawionych na rys. 4.31 powyżej można stwierdzić, że spełnia ona wymagania normy (ISO 10844, 2014) dla torów badawczych, na których można prowadzić badania hałaśliwości pojazdów i opon samochodowych. Na odcinku tym wykonano także pomiary metodami CPX i OBSI w tym samym czasie, co pomiary współczynnika pochłaniania dźwięku za pomocą rury impedancyjnej. Ich wyniki przedstawiono w osobnych częściach opracowania.

5. WNIOSKI Z BADAŃ

W ramach opracowania wykonano pomiary współczynnika pochłaniania dźwięku za pomocą rury impedancyjnej na kilkunastu wybranych odcinkach dróg. Odcinki dróg oraz badane próbki wyselekcjonowano je w taki sposób, aby charakteryzowały się one zróżnicowanymi właściwościami akustycznymi (przede wszystkim w zakresie pochłaniania padającej na nie fali dźwiękowej). Z badanych odcinków zostały pobrane próbki, które następnie zostały zbadane w warunkach laboratoryjnych przy wykorzystaniu stanowiska zaprojektowanego i wykonanego w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów.

Analizując wyniki badań stwierdzono, że trzy z przebadanych nawierzchni: PA 11, PA 8 i OGFC 11 charakteryzują się najlepszymi właściwościami absorpcji hałasu samochodowego. Wspólną cechą tych trzech nawierzchni jest duża zawartość wolnych przestrzeni w ich strukturze. Nawierzchnią, która posiada nieco mniejszy udział wolnych przestrzeni od powyższych jest OGFC 8. Wyniki pomiaru współczynnika pochłaniania dźwięku są jednak dla niej zaskakująco niskie (wyniki te potwierdzono następnie w laboratorium powtarzając pomiar na pobranych próbkach). Przyczyną tego mogły być

zanieczyszczenia, które dostały się do jej wnętrza i spowodowały zatkanie porów w jej strukturze,

Analizując wyniki badań wykonanych w warunkach laboratoryjnych na pobranych próbkach sformułowano podobne wnioski, jak w przypadku badań przeprowadzonych w warunkach "in situ". Trzy nawierzchnie porowate (PA 11, PA 8 i OGFC 11) charakteryzują się najlepszymi właściwościami pochłaniania dźwięku. Pozostałe badane próbki nawierzchnie charakteryzują się dużo niższym współczynnikiem pochłaniania dźwięku, zbliżonym do nawierzchni referencyjnej AC 11.

Analizując wyniki pomiarów w warunkach laboratoryjnych stwierdzono także ich zbieżność z wynikami pomiarów wykonanych w warunkach terenowych. W większości przypadków różnica pomiędzy wynikami w każdej częstotliwości jest zdecydowanie mniejsza od wartości 0.1. Większe różnice zauważono dla nawierzchni porowatych charakteryzujących się wysokimi współczynnikami pochłaniania dźwięku: PA 11 (maksymalna różnica 0.18), PA 8 (maksymalna różnica 0.18) i OGFC 11 (maksymalna różnica 0.07). Różnice te wynikają ze specyfiki metody pomiarowej (ISO 13472-2, 2010), która charakteryzuje się mniejszą precyzją w przypadku pomiarów nawierzchni, dla których współczynnik pochłaniania dźwięku jest większy od 0.15. Dla pozostałych nawierzchni różnice te były zdecydowanie mniejsze i wynosiły odpowiednio 0.03 dla nawierzchni OGFC 8, SMA 8 i SMA 5 oraz 0.01 dla nawierzchni AC 11.

6. WYTYCZNE WYKONYWANIA BADAŃ WSPÓŁCZYNNIKA POCHŁANIANIA DŹWIĘKU NAWIERZCHNI DROGOWYCH PRZY WYKORZYSTANIU RURY IMPEDANCYJNEJ

6.1. Zakres

Pomiary współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchni drogowych za pomocą rury impedancyjnej „in situ” powinny być wykonywane zgodnie z procedurą opisaną w normie (ISO 13472-2 Acoustics. Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ. Part 2: Spot method for reflective surfaces, 2010).

Pomiary wykonywane na istniejącej nawierzchni drogowej, a wykorzystywana metodyka jest nieniszcząca – nie wymaga pobierania próbek z asfaltu. Celem metody pomiarowej opisanej w normie (ISO 13472-2, 2010) jest wykonywanie pomiarów na nawierzchniach drogowych gładkich i odbijających dźwięk, dla których współczynnik pochłaniania dźwięku w każdej częstotliwości środkowej pasm 1/3 oktaowych jest nie większy niż 0.15. Wyniki przedstawiane są w częstotliwościach 1/3 oktaowych w zakresie od 250 do 1600 Hz.

Wyniki otrzymane za pomocą przedmiotowej metody badawczej są porównywalne do wyników otrzymywanych za pomocą metody rury impedancyjnej przy wykorzystaniu próbek z nawierzchni w postaci wyciętych rdzeni zgodnie z takimi dokumentami, jak (PN-EN ISO 10534-1, 2004), (ISO 10534-2, 1998) oraz (ASTM E1050, 1998). Nie mogą być natomiast bezpośrednio porównywane z wynikami badań wykonanych w komorze pogłosowej za pomocą metody opisanej w normie (PN-EN ISO 354, 2005), ponieważ w metodzie wykorzystującej rurę impedancyjną mamy do czynienia z falą płaską padającą prostopadle na badaną powierzchnię, natomiast w metodzie „pogłosowej” dźwięk jest rozproszony.

6.2. Powiązane dokumenty

Dokumenty powiązane z opisywaną metodyką pomiarową zestawiono poniżej. W każdym przypadku należy brać pod uwagę najnowsze wydanie norm, o ile nie określono innego trybu postępowania.

1. ISO 10534-2 Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: Transfer-function method
2. ISO 13472-1 Acoustics. Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ. Part 1: Extended surface method
3. ISO 13472-2 Acoustics. Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ. Part 2: Spot method for reflective surfaces
4. ISO 10844 Acoustics. Specification of test tracks for measuring noise emitted by road vehicles and their tyres
5. ISO/IEC Guide 98-3 Uncertainty of measurement. Part 3: Guide to expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)
6. IEC 61260. Electroacoustics. Octave-band and fractional-octave-band filters

6.3. Podstawowe oznaczenia i definicje, słowa kluczowe

1. **Admitancja powierzchniowa (G)** – odwrotność impedancji powierzchniowej Z (ISO 10534-2, 1998)
2. **Impedancja powierzchniowa (Z)** – stosunek wartości zespolonej ciśnienia akustycznego $p(0)$ do wartości zespolonej składowej normalnej prędkości cząstki akustycznej $v(0)$ dla pojedynczej wartości częstotliwości na płaszczyźnie odniesienia (ISO 13472-2, 2010)
3. **Liczba falowa (k_0)** – zmienna zdefiniowana, jako:

$$k_0 = \omega/c_0 = 2\pi f/c_0 \quad (6.1)$$

gdzie:

ω – częstość kątowna,
 f – częstość,
 c_0 – prędkość dźwięku

4. **Płaszczyzna odniesienia** – przekrój poprzeczny rury impedancyjnej, dla którego określa się współczynnik odbicia r , impedancję Z lub admitancję G. Jest to zazwyczaj powierzchnia badanych próbek, jeżeli są one płaskie. Przyjmuje się, że na płaszczyźnie odniesienia $x=0$ (ISO 10534-2, 1998, ISO 13472-2, 2010)
5. **Stosunek sygnału do szumu** – różnica, w decybelach, pomiędzy poziomem użytecznego sygnału oraz poziomem tła akustycznego (ISO 13472-2, 2010)
6. **Współczynnik odbicia ciśnienia akustycznego dla prostopadłego padania fali dźwiękowej (r)** – wartość zespolona stosunku amplitudy ciśnienia fali odbitej od amplitudy fali padającej w płaszczyźnie odniesienia, dla fali płaskiej padającej prostopadle na badaną próbkę (ISO 10534-2, 1998, ISO 13472-2, 2010)
7. **Współczynnik pochłaniania dźwięku dla prostopadłego padania fali dźwiękowej (α)** – stosunek mocy akustycznej przenikającej przez powierzchnię badanej próbki (bez powrotu) do mocy akustycznej fali płaskiej padającej prostopadle na próbkę (ISO 10534-2, 1998, ISO 13472-2, 2010)
8. **Zakres częstotliwości** – zakres, w którym wyniki pomiarów uznaje się za zwalidowane, określony w pasmach 1/3 oktaowych wg normy IEC 61260. Electroacoustics. Octave-band and fractional-octave-band filters (ISO 10534-2, 1998, ISO 13472-2, 2010)
9. **Zespolona wartość ciśnienia akustycznego (p)** – transformata Fouriera z czasowych wartości ciśnienia akustycznego (ISO 13472-2, 2010)

6.4. Wymagania dotyczące przyrządów pomiarowych

Szczegółowe wymagania dotyczące przyrządów pomiarowych opisane są w normach, na podstawie których wykonywane są pomiary współczynnika pochłaniania dźwięku (ISO 10534-2, 1998, ISO 13472-2, 2010). Poniżej przedstawiono podstawowe wymagania, które powinny spełnić przyrządy wykorzystywane do wykonywania pomiarów.

Wyposażenie pomiarowe, używane do wykonywania pomiarów „in situ”, składa się z generatora sygnału, źródła dźwięku, rury impedancyjnej, dwóch mikrofonów zamontowanych równo z wewnętrzną ścianą rury w ściśle określonych pozycjach,

dodatkowego urządzenia „in situ” umożliwiającego hermetyczne połączenie tuby z badaną powierzchnią oraz jednostki przetwarzania sygnału umożliwiającej wykonanie transformaty Fouriera w dwóch kanałach jednocześnie. Widok przykładowego zestawu pomiarowego przedstawiono poniżej na fot. 6.1.



Fot. 6.1. Widok przykładowego zestawu pomiarowego wykorzystywanego do pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku w warunkach „in situ”

Średnica rury impedancyjnej wg wymagań określonych w (ISO 13472-2, 2010) powinna być równa 100 ± 1 mm. Rura powinna być ona prosta i mieć kołowy przekrój poprzeczny, przy czym tolerancja różnic średnic nie powinna być większa niż 0.2%. Ścianki rury powinny być gładkie, nieporowate, bez otworów i szczelin oraz powinny być sztywne, aby zapobiegać niepożądanemu utracie energii akustycznej. Rura powinna mieć mały otwór wentylacyjny w pobliżu głośnika, aby zapobiec powstawaniu statycznego ciśnienia w jej wnętrzu.

Długość rury impedancyjnej powinna umożliwić wykształcenie wewnątrz płaskiej fali dźwiękowej pomiędzy źródłem dźwięku i mikrofonem pomiarowym. Przy średnicy rury równej 100 mm jej długość powinna być nie mniejsza niż 480 mm, a niższy mikrofon powinien być zamontowany ok. 100 mm od badanej płaszczyzny. Odległość pomiędzy obydwooma mikrofonami pomiarowymi powinna być ustalona w zakresie od 77 do 85 mm.

Obydwa mikrofony pomiarowe używane do wykonania pomiarów powinny być identyczne i zamontowane w określonych pozycjach. Średnica mikrofonów powinna być mała w stosunku do odległości pomiędzy portami, w których będą zamocowane. Z tego względu zaleca się stosowanie mikrofonów 1/4 calowych. Montaż mikrofonów powinien być wykonywany w taki sposób, aby zachować szczelność pomiędzy ich powierzchniami i ścianką rury impedancyjnej c.

W przypadku wykonywania pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku w warunkach laboratoryjnych konieczne jest zastosowanie uzupełniającego przyrządu, jakim jest stojak umożliwiający zamocowanie rury impedancyjnej na badanej próbce. Szkic stanowiska pomiarowego przedstawiono poniżej na rys. 6.1.



Rys. 6.1. Szkic stanowiska do pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku w warunkach laboratoryjnych

6.5. Procedura wykonywania pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku za pomocą rury impedancyjnej

W trakcie wykonywania pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku za pomocą rury impedancyjnej należy ściśle przestrzegać wymagań określonych w normach (ISO 10534-2, 1998, ISO 13472-2, 2010). Dodatkowo należy także mieć na uwadze instrukcje przyrządów pomiarowych wykorzystywanych do pomiarów, które powinny być dostarczone lub udostępnione przez producentów. Poniżej, w sposób ogólny, przedstawiono kolejne kroki, które powinny być realizowane w trakcie wykonywania pomiarów „in situ”.

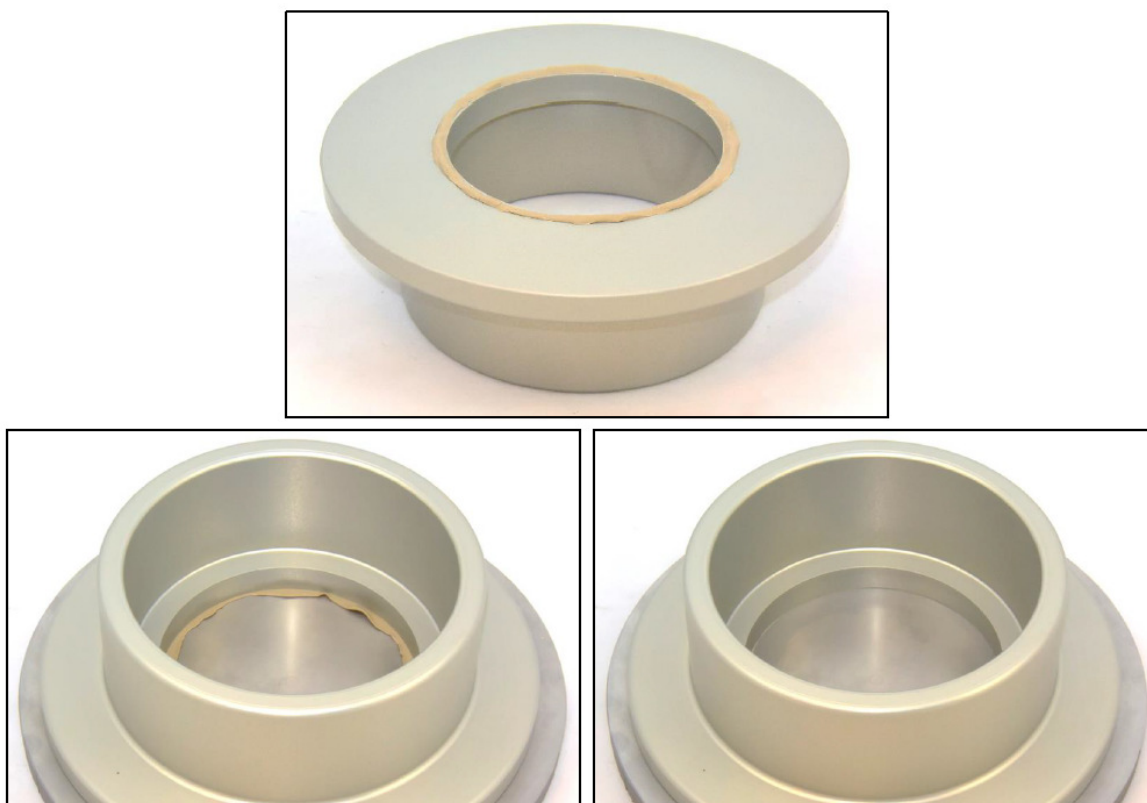
1. Włączyć wszystkie używane przyrządy, połączone wcześniej zgodnie z instrukcją / instrukcjami producenta i pozostawić działające przez co najmniej 15 minut.
2. Upewnić się, że wszystkie przyrządy (rura impedancyjna, mikrofony, łącznik „in situ”) są połączone ze sobą w sposób szczelny.
3. Upewnić się, że wszystkie przyrządy działają w sposób prawidłowy (np. mikrofony pomiarowe są zamontowane w prawidłowych portach oraz podłączone do właściwych kanałów w analizatorze dźwięku, generator sygnału jest ustawiony w sposób prawidłowy). Sprawdzenia poprawności należy przeprowadzić zgodnie z instrukcjami producentów.
4. Przeprowadzić pomiar warunków meteorologicznych, upewniając się, że spełniają one wymagania określone w dokumentach normowych (m.in. temperatura otoczenia od 5°C do 30°C oraz temperatura badanej nawierzchni pomiędzy 5°C i 45°C).

5. Wprowadzić do ustawień programowych i/lub sprzętowych wszystkie wymagane parametry (m.in. warunki meteorologiczne, ustawienia przyrządów, dane dotyczące odległości mikrofonów od płaszczyzny odniesienia i inne).
6. Przed wykonaniem pomiarów upewnić się, że badana nawierzchnia jest gładka, sucha i wolna od zanieczyszczeń.
7. Do wykonania pomiarów należy wybrać miejsce nie narażone na bezpośrednie oddziaływanie promieni słonecznych i/lub innych źródeł ciepła. Preferowane są miejsca zacienione lub prowadzenie pomiarów po zachodzie słońca.
8. W celu uniknięcia zakłóceń pochodzących z innych źródeł dźwięku należy (o ile jest to możliwe) wybrać miejsca, w których prowadzone będą pomiary w odległości większej niż 25 m od tych źródeł (np. poruszających się pojazdów).
9. Przeprowadzić procedurę kalibracji przed rozpoczęciem pomiaru. Procedurę tę należy powtarzać za każdym razem przy zmianie lokalizacji wykonywania pomiarów, zmianie ustawień przyrządów pomiarowych oraz nie rzadziej niż co 60 minut.
10. Przeprowadzić kalibrację mikrofonów pomiarowych za pomocą wzorcowego źródła dźwięku (kalibratora akustycznego) przy użyciu sygnału dźwiękowego o określonej częstotliwości (z reguły 1000 Hz) oraz poziomie (z reguły 94 lub 114 dB).
11. Przy użyciu materiału o właściwościach silnie pochłaniających dźwięk (np. gąbki) (fot. 6.2) przeprowadzić kalibrację sprzętu pomiarowego mającą na celu zminimalizowanie różnic w charakterystykach amplitud i faz pomiędzy mikrofonami. W tym celu należy wykonać ten sam pomiar przy prawidłowych oraz zamienionych względem siebie pozycjach mikrofonów.



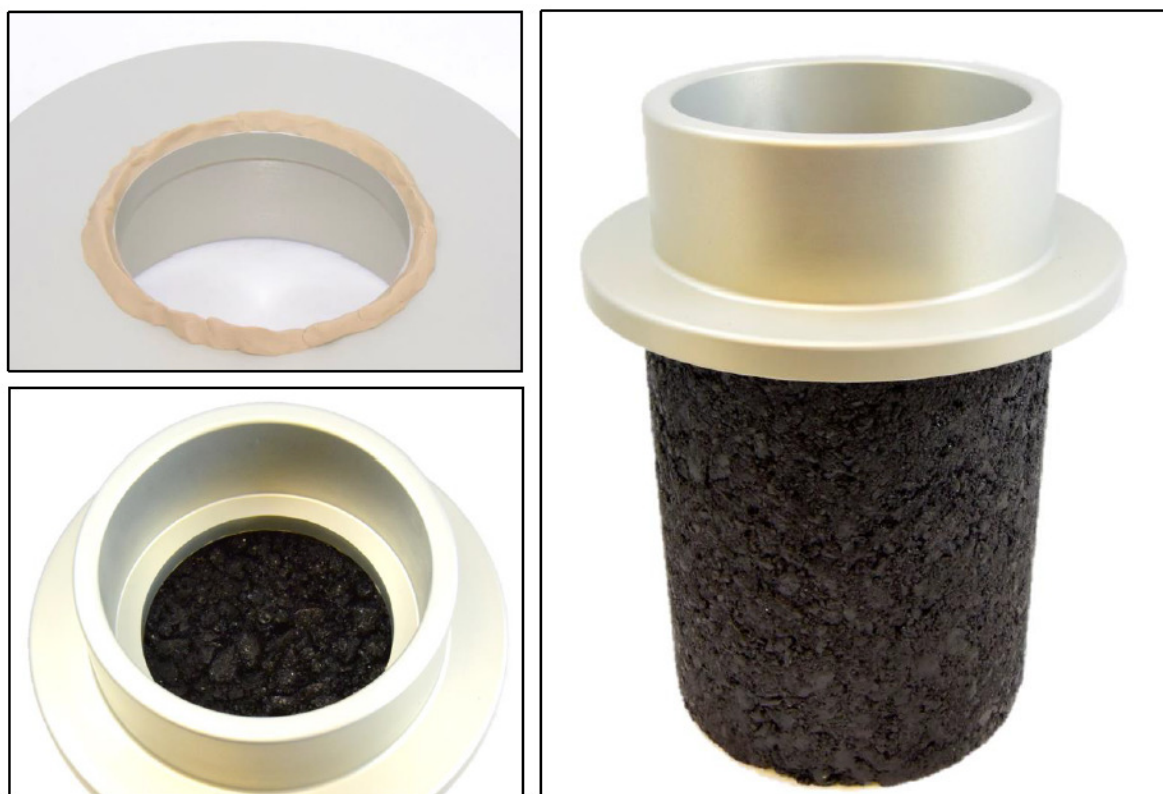
Fot. 6.2. Przykładowe ustawienie sprzętu pomiarowego z użyciem materiału silnie pochłaniającego dźwięk w celu wykonania kalibracji mającej na celu zminimalizowanie różnic w charakterystykach amplitud i faz mikrofonów pomiarowych [127]

12. Po ponownym zamontowaniu mikrofonów we właściwych pozycjach oraz usunięciu materiału pochłaniającego należy przeprowadzić kalibrację z użyciem stalowej płytki o grubości co najmniej 10 mm, która ma na celu określenie współczynnika korygującego straty własne układu pomiarowego. Należy pamiętać o szczelnym połączeniu stalowej płytki z łącznikiem „in situ” oraz usunięciu resztek uszczelniacza (np. kitu sanitarnego) z powierzchni płytki, jak przedstawiono to na fot. 6.3 poniżej.



Fot. 6.3. Prawidłowe połączenie łącznika „in situ” i stalowej płytki w celu wykonania kalibracji urządzenia pomiarowego [127]

- 13.** Sprawdzić, czy zachowany jest wymagany odstęp sygnału pomiarowego od szumu (dźwięków zakłócających). Wymagany poziom odstępu sygnału od szumu jest równy 10 dB (zaleca się jednak, żeby była to większa wartość – ok. 20 dB) Jeżeli odstęp ten nie jest zachowany, należy zwiększyć poziom generowanego sygnału lub wybrać inne miejsce, mniej narażone na oddziaływanie zewnętrznych źródeł dźwięku.
- 14.** Zamontować łącznik „in situ” na badanej nawierzchni (zgodnie z wymaganiami dokumentów normowych) lub próbce nawierzchni (w przypadku wykonywania badań w laboratorium) w sposób szczelny, uniemożliwiający przedostanie się do środka rury impedancyjnej powietrza. Usunąć resztki uszczelnacza, jeżeli dostały się na badaną powierzchnię, jak przedstawiono to na fot. 6.4 poniżej.



Fot. 6.4. Montaż łącznika „in situ” na badanej nawierzchni lub próbce (w przypadku badań wykonywanych w laboratorium) [127]

15. Połączyć rurę impedancyjną z zamontowanym na nawierzchni łącznikiem „in situ” i przeprowadzić pomiar współczynnika pochłaniania dźwięku.
16. Pomiary należy powtórzyć w co najmniej 4 miejscach zlokalizowanych na badanej nawierzchni oddalonych od siebie o co najmniej 10 m.
17. Po wykonaniu pomiaru usunąć z badanej nawierzchni resztki uszczelnacza.
18. Otrzymane wyniki opracować w sprawozdaniu z badań w formie opisanej w dokumentacji normowej oraz w rozdziale 6.6 poniżej.

6.6. Raportowane wyniki

Wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania dźwięku nawierzchni drogowych w warunkach „in situ” powinny być przedstawiane w formie sprawozdania z badań. Ich zawartość jest ściśle określona w normie (ISO 13472-2, 2010). Zgodnie określonymi wytycznymi, sprawozdanie takie powinno zawierać:

1. Odniesienie do metodyki pomiarowej określonej w normie (ISO 13472-2, 2010),
2. Nazwę i adres laboratorium badawczego,
3. Datę i miejsce badania,
4. Opis poligonu pomiarowego (rysunki, szkice i fotografie przedstawiające badaną nawierzchnię drogową i ustawienia zestawu pomiarowego),
5. Szczegółowy opis badanej nawierzchni: wiek, warunki pomiaru, specyfikację nawierzchni (grubość, materiał itp.),

6. Informację o warunkach charakteryzujących badaną nawierzchnię, jak jej suchość oraz temperatura,
7. Opis warunków meteorologicznych panujących w trakcie pomiarów (ciśnienie atmosferyczne, temperatura powietrza),
8. Informację o wyposażeniu użytym do wykonania pomiarów i analizy wyników (nazwa, typ, numer seryjny, producent),
9. Wynik badania (wartości średnie oraz odchylenie standardowe),
10. Niepewność rozszerzoną wyników pomiarów dla prawdopodobieństwa równego 80% i 95% wraz z współczynnikiem rozszerzenia,
11. Podpis osoby odpowiedzialnej za realizację badań,

Zgodnie z zapisami normy (ISO 13472-2, 2010) wyniki pomiarów współczynnika pochłaniania nawierzchni drogowych powinny być podawane w formie wykresu lub tabeli w podziale na częstotliwości środkowe pasm 1/3 oktawowych w zakresie od 250 do 1600 Hz.

W przypadku pomiarów prowadzonych w laboratorium, w sprawozdaniach z badań, należy także podać opis próbek, na których prowadzone były badania wraz z fotografiami obrazującymi ich powierzchnię.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Luong J., Bueno M., Vázquez V. F. F., i Paje S. E. E., Ultrathin porous pavement made with high viscosity asphalt rubber binder: A better acoustic absorption?, *Applied Acoustics*, t. 79, s. 117–123, maj 2014.
- [2] Morgan P., „IPG Research Report - Innovative mitigation measures for road traffic noise. Report DVS-2008-18”, Delft, the Netherlands, 2008.
- [3] „2012/C 113/08 Committee of the regions on ‘the Environmental Noise Directive – the way forward’”, 2012.
- [4] van Keulen W., i Duškov M., „Inventory study of basic knowledge on tyre/road noise. Report DWW-2005-022”, 2005.
- [5] Sandberg U., i Ejsmont J., *Tyre/road noise reference book*. Informex, 2002.
- [6] Wayson R. L., NCHRP synthesis 268 – relationship between pavement surface texture and highway traffic noise. Washington D.C.: Transportation Research Board. National Academy Press, 1998.
- [7] von Meier A., i van Blokland, G. J. Descornet G., „The influence of texture and sound absorption on the noise of porous road surfaces”, [w:] PIARC 2nd international symposium on road surface characteristics, 1992, s. 7–19.
- [8] Losa M., i Leandri P., A comprehensive model to predict acoustic absorption factor of porous mixes, *Mater Struct*, t. 45, nr 6, s. 923–940, 2012.
- [9] Sandberg U., Road traffic noise—The influence of the road surface and its characterization, *Applied Acoustics*, t. 21, nr 2, s. 97–118, 1987.
- [10] Hamet J. F., i Klein P., „ENRa, Expected pass-by noise level reduction from acoustic absorption of the road surface. SILVIA Project, Report SILVIA-INRETS-018-02- WP2-040505”, 2005.
- [11] Klein P., i Hamet J. F., „ENDT, Expected pass-by noise level difference from texture level variation of the road surface. SILVIA, Report SILVIA-INRETS-021-01-WP2- 070705”, 2005.
- [12] O’Boy D. J., i Dowling A. P., Tyre/road interaction noise-Numerical noise prediction of a patterned tyre on a rough road surface, *Journal of Sound and Vibration*, t. 323, nr 1–2, s. 270–291, 2009.
- [13] Larsson K., Barrelet S., i Kropp W., The modelling of the dynamic behaviour of tyre tread blocks, *Applied Acoustics*, t. 63, nr 6, s. 659–677, 2002.
- [14] Li M., van Keulen W., van de Ven M., i Molenaar A., „Development of a New Type of Prediction Model for Predicting Tyre/Road Noise”, [w:] Second International Conference on Sustainable Construction Materials: Design, Performance, and Application, 2012.
- [15] Olszacki J., „Określenie wodoprzepuszczalności i dźwiękochłonności betonów asfaltowych stosowanych w nawierzchniach drenujących. Rozprawa doktorska”, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, 2005.
- [16] Kucharski R. J., *Hałas drogowy*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1979.
- [17] Ronowski G., „Prognozowanie hałasu drogowego”, [w:] IV Koszalińska Konferencja Naukowo - Techniczna „Hałas - Profilaktyka - Zdrowie 2000”, 2000, s. 160–168.
- [18] Engel Z., *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*. Wydanie drugie i poprawione. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2001.
- [19] Chrostowska H., *Hałas ruchu drogowego i sposoby jego zwalczania. Ochrona Środowiska w drogownictwie*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1976.
- [20] Puzyna C., *Zwalczanie hałasu w przemyśle: zasady ogólne*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, 1974.
- [21] Makarewicz R., *Dźwięki i fale*. Poznań: Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza, 2014.
- [22] Beckenbauer T., „Akustische Eigenschaften von Strassenoberflächen”, [w:] Deutscher Strassen- und Verkehrskongress, 2000, s. 234–240.

- [23] Schulte W., i Gladbach B., Offenporiger asphalt. Lärmschutzwirkung, -bedingungen und -dauer, Asphalt, t. 2/2004, 2004.
- [24] Olszacki J., Hałas ruchu drogowego. Część 1. Mechanizm powstawania hałasu, Drogownictwo, t. 3/2008, s. 80–84, 2008.
- [25] Ejsmont J., „Ciche nawierzchnie drogowe”, [w:] IV Koszalińska Konferencja Naukowo - Techniczna „Hałas - Profilaktyka - Zdrowie 2000”, 2000.
- [26] Ranieri V., „Porous pavements: practice and developments”, [w:] Konferencja Transnoise 2013, 2013.
- [27] Bohatkiewicz J., Biernacki S., Hałucha M., i Pasternak Ł., „Materiały do wniosku o dofinansowanie z WFOŚiGW nawierzchni redukującej hałas wraz z dodatkowymi elementami mającymi wpływ na zmniejszenie hałasu na odcinkach dróg wojewódzkich Województwa Małopolskiego”, Kraków, 2014.
- [28] Bohatkiewicz J., i Hałucha M., The impact of quiet pavements' usage on traffic noise on people in loosely built-up areas, [w:] Traffic Noise: Exposure, Health Effects and Mitigation, (pod. red.: Łucjan C., i Gerard D.) New York: Nova Science Publishers, ch. Chapter 5, 2017.
- [29] Olszacki J., Nawierzchnie porowate, Orlen Asphalt, t. 3/2006, 2006.
- [30] Łączkowski R., Wibroakustyka maszyn i urządzeń. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, 1983.
- [31] Neithalath N., Marolf A., Weiss J., i Olek J., Modeling the influence of pore structure on the acoustic absorption of enhanced porosity concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, t. 3, nr 1, s. 29–40, 2005.
- [32] Bohatkiewicz J., i Biernacki S., „Aktualne problemy związane z hałasem drogowym”, [w:] Ochrona środowiska i estetyka a rozwój infrastruktury drogowej, 2011, s. 38–47.
- [33] Bendtsen H., Raaberg J., i Thomsen S. N., „International experiences with thin layer pavements”, grudz. 2005.
- [34] Kim H. K., i Lee H. K., Acoustic absorption modeling of porous concrete considering the gradation and shape of aggregate sand void, Journal of Sound and Vibration, t. 329, s. 866–879, 2009.
- [35] Lui W. K., i Li K. M., A theoretical study for the propagation of rolling noise over a porous road pavement, The Journal of the Acoustical Society of America, t. 116, nr 1, s. 313–322, 2004.
- [36] Crocker M. J., i Li Z., Measurements of tyre/road noise and of acoustical properties of porous road surfaces, International Journal of Acoustics and Vibration, t. 10, nr 2, s. 52–60, 2005.
- [37] Yamaguchi M., Nakagawa H., i Mizuno T., Sound absorption mechanism of porous asphalt pavement, Journal of the Acoustical Society of Japan (E), t. 20, nr 1, s. 29–43, 1999.
- [38] Kropp W., Kihlman T., Forssen J., i Ivarsson L., Reduction potential of road traffic noise. A pilot study. Stockholm: Chalmers University of Technology, 2007.
- [39] Baughan C. J., Chinn L., Harris G., Stait R., i Phillips S., „Resurfacing a motorway with porous asphalt: effects on rural noise exposure and community response. TRL536”, Crowthorne, UK, 2002.
- [40] Christory J. P., „Urban and peri-urban porous pavements”, [w:] Internationales Betonstrassen-Symposium, 1994, s. 11–15.
- [41] Delanne Y., Compromis bruit/adherence pour les couches de roulement, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussée, t. 185, s. 99–103, 1993.
- [42] Lin S. J., Steuerung des Hohlraumgehaltes von Dränasphalt im Hinblick auf die Optimierung seiner bau- technischen Eigenschaften, Veröffentlichungen des Institutes für Strassen- und Eisenbahnwesen der Uni- versität (TH) Karlsruhe, s. 102, 1993.
- [43] Potschka V., Dränasphalt in Deutschland - Ein Flop oder die Strassendeckschicht der Zukunft?, Asphalt, t. 28, nr 5, s. 19–28, 1994.
- [44] Drüschnner L., i Stephan F., „Offenporige Asphaltdeckschichten - ein Beitrag zur Griffigkeit”, [w:] 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress Vienna 2004 - Paper 271, 2004.
- [45] Voskuilen J. L. M., Tolman F., i Rutten E., „Do modified porous asphalt mixtures have a longer service life?”, [w:] 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress Vienna 2004 - Paper 331, 2004.
- [46] Schäfer V., „Experiences with porous asphalt of a new generation on the motorway A 2

- in Northern Germany (Lower Saxony)", [w:] 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress Vienna 2004 - Paper 192, 2004.
- [47] Głowacka A., Porowatość nawierzchni - zaleta czy wada?, *Drogownictwo*, t. 3/2002, 2002.
- [48] Chałaczkiwicz E., Zmniejszenie hałasu na nawierzchni wykonanej z porowatego betonu asfaltowego. Nowości zagranicznej techniki drogowej, Wydawnictwo IBDiM, t. 131/1997, 1997.
- [49] Sybilski D., Długowieczne nawierzchnie asfaltowe w świecie i w Polsce, *Drogownictwo*, t. 3/2004, 2004.
- [50] Ejsmont J., Hałas opon samochodowych - wybrane zagadnienia", *Zeszyty Naukowe, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, „Mechanika”*, t. 68, 1992.
- [51] Radziszewski P., i Piłat J., Mieszanki mineralno-gumowo-asfaltowe. Konferencja „Asphalt Rubber 2003", *Drogownictwo*, t. 5/2004, 2004.
- [52] Rolla S., Nawierzchnie drenujące, *Drogownictwo*, t. 10/1993, 1993.
- [53] Praca zbiorowa, Słownik drogowy. Wydanie pierwsze. Warszawa: Wydawnictwo IBDiM, 2003.
- [54] Sybilski D., „Ciche nawierzchnie", [w:] Zastosowanie nowoczesnych technologii w konstrukcjach nawierzchni. 15 - 17 września 2010 r., 2010.
- [55] Hamet J. F., i Berengier M., „Acoustical characteristics of porous pavements: a new phenomenological model", [w:] *Inter-Noise 93: People versus noise*, 1993, s. 641–646.
- [56] Nelson J. T., Kohler E., Öngel A., i Rymer B., Acoustical absorption of porous pavement, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, t. 2058, s. 125–132, grudz. 2008.
- [57] Meiarashi S., Ishida M., Nakashiba F., Niimi H., Hasebe M., i Nakatsuji T., Improvement in the effect of drainage asphalt road surface on noise reduction, *Applied Acoustics*, t. 47, nr 3, s. 189–204, 1996.
- [58] Praticò F. G., i Anfosso-Lédée F., Trends and Issues in Mitigating Traffic Noise through Quiet Pavements, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, t. 53, s. 203–212, 2012.
- [59] Praca zbiorowa, Merkblatt für den Bau offener Asphaltdeckschichten. Ausgabe: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 1998.
- [60] Gamperli M., i Kretzer P., Drainasphalt, *Materialbericht in Ausführung 3 WS 2002/03*, HSR Hochschule für Technik Rapperswil, 2002.
- [61] Li M., van Keulen W., van de Ven M., Molenaar A., i Tang G., Investigation on material properties and surface characteristics related to tyre-road noise for thin layer surfacings., *Construction and Building Materials*, t. 59, s. 62–71, maj 2014.
- [62] Mun S., Sound absorption characteristics of porous asphalt concrete pavements, *Canadian Journal of Civil Engineering*, t. 37, nr 2, s. 273–278, luty 2010.
- [63] Morgan P., *Guidance manual for the implementation of low-noise road surfaces*. FEHRL, 2006.
- [64] Peeters B., i Kuijpers A., „The effect of porous road surfaces on radiation and propagation of tyre noise", [w:] *Acoustics 2008*, 2008, s. 4305–4310.
- [65] Sandberg U., „Tyre/road noise – Myths and realities", [w:] *The 2001 International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering*, 2001.
- [66] Allard J. F., i Noureddine A., *Propagation of Sound in Porous Media, Modelling Sound Absorbing Materials*, Elsevier Applied Science, 1993.
- [67] Pfretzschner J., i Rodriguez R. M., Acoustic properties of rubber crumbs, *Polymer Testing*, t. 18, nr 2, s. 81–92, 1999.
- [68] Champoux Y., i Stinson M. R., On acoustical models for sound propagation in rigid frame porous materials and the influence of shape factors, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 92, nr 2, s. 1120–1131, 1992.
- [69] Garai M., i Pompoli F., A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications, *Applied Acoustics*, t. 66, nr 12, s. 1383–1398, 2005.
- [70] Sachakamol P., i Dai L., Parametric Influence on Prediction of Sound Absorption Coefficients for Asphalt Pavements, *Journal of Environmental Informatics*, t. 18, nr 1, s. 1–11, wrz. 2011.
- [71] Attenborough K., Bashir I., i Taherzadeh S., Outdoor ground impedance models, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 129, nr 5, s. 2806–2819, 2011.

- [72] Frías M., Jiménez-Mateos J. M., Pfretzschner J., Olmeda J., Rodríguez R. M., i Sánchez De Rojas M. I., Development of blended cement mortars with acoustic properties using petroleum coke, *Construction and Building Materials*, t. 25, nr 2, s. 1086–1092, 2011.
- [73] Tiwari V., Shukla A., i Bose A., Acoustic properties of cenosphere reinforced cement and asphalt concrete, *Applied Acoustics*, t. 65, nr 3, s. 263–275, 2004.
- [74] Knabben R. M., Trichês G., Gerges S. N. Y., i Vergara E. F., Evaluation of sound absorption capacity of asphalt mixtures, *Applied Acoustics*, t. 114, s. 266–274, grudz. 2016.
- [75] Cox T. J., i D'Antonio P., *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. Second edition. Taylor & Francis, 2009.
- [76] Wolkesson M., „Evaluation of impedance tube methods - A two microphone in-situ method for road surfaces and the three microphone transfer function method for porous materials”, Chalmers University of Technology, 2013.
- [77] „UNE-EN 12697-8 Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt – Part 8: determination of voids characteristics of bituminous specimens”, 2003.
- [78] Sobieski W., „Obliczanie krętości w złożu porowatym składającym się z cząstek sferycznych o znanych rozmiarach i rozmieszczeniu w przestrzeni. Raport badawczy 1/2009”, Winnipeg, 2009.
- [79] United States Environmental Protection Agency, *A Lexicon of Cave and Karst Terminology with Special Reference to Environmental Karst Hydrology EPA/600/R-99/006*. Washington, D.C., 2002.
- [80] Allard J. F., Castagnede B., Henry M., i Lauriks W., Evaluation of tortuosity in acoustic porous materials saturated by air, *Review of Scientific Instruments*, t. 65, nr 3, s. 754–755, 1994.
- [81] Iwase T., Izumi Y., i Kawabata R., „A new measuring method for sound propagation constant by using sound tube without any air spaces back of a test material”, [w:] *InterNoise 98*, 1998, s. 888–1338.
- [82] Salissou Y., i Panneton R., Wideband characterization of the complex wave number and characteristic impedance of sound absorbers, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 128, nr 5, s. 2868–2876, lis. 2010.
- [83] Song B. H., i Bolton J. S., A transfer-matrix approach for estimating the characteristic impedance and wave numbers of limp and rigid porous materials, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 107, nr 3, s. 1131–1152, 2000.
- [84] Doutres O., Salissou Y., Atalla N., i Panneton R., Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube, *Applied Acoustics*, t. 71, nr 6, s. 506–509, 2010.
- [85] American Society for Testing and Materials, „ASTM E1050. Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and digital frequency analysis system”. 1998.
- [86] „ISO 10534-2 Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: Transfer-function method”, 1998.
- [87] Chung J. Y., i Blaser D. A., Transfer function method of measuring in duct acoustic properties. II. Experiment, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 68, nr 3, s. 907–913, wrz. 1980.
- [88] Seybert A. F., i Ross D. F., Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 61, nr 5, s. 1362–1370, 1977.
- [89] Seybert A. F., „Notes on Absorption and Impedance Measurements”, [w:] *Noise and Vibration Conference SAE*, 2010.
- [90] Haines J., Standing wave and two-microphone impedance tube round-robin test program, *ASTM Research Report No. RR:E33-1006*, 1989.
- [91] American Society for Testing and Materials, „ASTM C384. Test method for impedance and absorption of acoustical materials by the impedance tube method”. 2016.
- [92] Seybert A. F., „Measurement of pavement absorption of pass-by tracks based on ISO 13472-2”, [w:] *Inter-Noise 2009*, 2009.

- [93] Li M., Van Keulen W., Tijss E., Van De Ven M., i Molenaar A. A., Sound absorption measurement of road surface with in situ technology, *Applied Acoustics*, t. 88, s. 12–21, luty 2015.
- [94] Rochat J. L., Donavan P., Seybert A. F., i Dare T., Pavement sound absorption measurements in the U.S., 41st International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2012, INTER-NOISE 2012, t. 3, s. 2612–2626, 2012.
- [95] Alauddin Ahammed M., i Tighe S. L., Acoustic absorption of conventional pavements, *International Journal of Pavement Research and Technology*, t. 4, nr 1, s. 41–47, 2011.
- [96] Dare T., Woldemariam W., McDaniel S R., Olek J., i Bernhard R., Comparing Tests for Near-Grazing-Incidence Noise Reduction and Sound Absorption Tests for Hot-Mix Asphalt, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, nr 2270, s. pp 1–8, 2012.
- [97] Crocker M. J., Hanson D., Zhuang L., Karjatkar R., i Vissamraju K. S., Measurements of Acoustical and Mechanical Properties of Porous Road Surfaces and Tire and Road Noise, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, t. 1891, s. 16–22, 2004.
- [98] Fernandes A. G., „Impacto de ruído de tráfego em edificações escolares: Metodologia de Avaliação para Diretrizes de Planejamento Urbano. Florianópolis: Dissertação (Mestrado)”, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- [99] American Society for Testing and Materials, „ASTM D4123. Standard method of indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures”. 1982.
- [100] „NLT-352/86. Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste”, 1986.
- [101] Association Française de Normalisation, „AFNOR NF P 98-254-2. Mesure de propriétés liées à la perméabilité des matériaux des mélanges hydrocarbonés, partie 2.” 1993.
- [102] Liu J., i Herrin D. W., „A Simplified Two-Load Method for Measuring Source Impedance”, [w:] *Noise-Con 2008*, 2008.
- [103] Utsuno H., Tanaka T., Fujikawa T., i Seybert A. F., Transfer function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous materials, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 86, nr 2, s. 637–643, 1989.
- [104] Zwikker C., i Kosten C. W., *Sound Absorbing Materials*. New York, Amsterdam, London, Brussels: Elsevier Publishing Company, INC., 1949.
- [105] Scott R. A., The absorption of sound in a homogeneous porous medium, *Proceedings of the Physical Society*, t. 58, nr 2, s. 165–183, mar. 1946.
- [106] Yaniv S. L., Impedance tube measurement of propagation constant and characteristic impedance of porous acoustical material, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 54, nr 5, s. 1138–1142, lis. 1973.
- [107] Smith C. D., i Parrott T. L., Comparison of three methods for measuring acoustic properties of bulk materials, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 74, nr 5, s. 1577–1582, lis. 1983.
- [108] Terao M., i Sekine H., On substructure boundary element techniques to analyze acoustic properties of air-duct component, *Proceeding of Inter-Noise 87*, s. 1523 – 1526, 1987.
- [109] Tao Z., Herrin D. W., i Seybert A. F., „Measuring Bulk Properties of Sound-Absorbing Materials Using the Two-Source Method”, [w:] *Society of Automotive Engineers*, 2003, nr 724.
- [110] Munjal M. L., i Doige A. G., Theory of a two source-location method for direct experimental evaluation of the four-pole parameters of an aeroacoustic element, *Journal of Sound and Vibration*, t. 141, nr 2, s. 323–333, wrz. 1990.
- [111] Lobato L. C., i Carneiro E. B., „Numerical and experimental analysis for the construction of an in situ measurement system of the acoustic impedance”, [w:] *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 2015, t. 25, nr April 2016, s. 30001.
- [112] „PN-EN ISO 354 Akustyka. Pomiar pochłaniania dźwięku w komorze pogłosowej”, 2005.
- [113] Brandão E., Lenzi A., i Paul S., A Review of the in situ impedance and sound absorption

- measurement techniques, *Acta Acustica united with Acustica*, t. 101, nr 3, s. 443–463, maj 2015.
- [114] Mommertz E., Angle-dependent in-situ measurement of reflection coefficients using a subtraction technique, *Applied Acoustics*, t. 46, s. 251–263, 1995.
- [115] Garai M., Measurement of the sound-absorption coefficient in situ: The reflection method using periodic pseudo-random sequences of maximum length, *Applied Acoustics*, t. 39, nr 1–2, s. 119–139, 1993.
- [116] Alvarez J. D., i Jacobsen F., „An iterative method for determining the surface impedance of acoustic materials in situ”, [w:] *Proceedings of Inter-Noise 2008*, 2008.
- [117] Xiao D., i Gilbert E., An exact Laplace transform formulation for a point source above a ground surface, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 93, nr 2, s. 714–720, 1993.
- [118] Delany M. E., i Bazley E. N., Acoustical properties of fibrous absorbent materials, *Applied Acoustics*, t. 3, nr 2, s. 105–116, 1970.
- [119] COWI, „Noise classification of road pavements Task 1: Technical background information”, Brussels, Belgium, 2006.
- [120] van Blokland G. J., Reinink H. F., i Kropp W., „Acoustic optimization tool. RE3: Measurement data Kloosterzande test track. M+P Report DWW06048”, Vught, the Netherlands, 2007.
- [121] de Bree H.-E., Leussink P., Korthorst T., Jansen H., Lammerink T. S. J., i Elwenspoek M., The μ -flown: a novel device for measuring acoustic flows, *Sensors and Actuators A: Physical*, t. 54, nr 1–3, s. 552–557, cze. 1996.
- [122] „ISO 13472-2 Acoustics. Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ. Part 2: Spot method for reflective surfaces”, 2010.
- [123] „ISO 10844 Acoustics. Specification of test tracks for measuring noise emitted by road vehicles and their tyres”, 2014.
- [124] „ISO 13472-1 Acoustics. Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ. Part 1: Extended surface method”, 2002.
- [125] „PN-EN ISO 10534-1 Akustyka. Określanie współczynnika pochłaniania dźwięku i impedancji akustycznej w rurach impedancyjnych. Część 1: Metoda wykorzystująca współczynnik fal stojących”, 2004.
- [126] „ISO 10534-1. Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 1: Method using standing wave ratio”, 1996.
- [127] AVEC Acoustical and Vibrations Engineering Consultants Inc., *Road Surface Sound Absorption (ROSSA) Software v 1.0. User Manual*, 2016.
- [128] „ISO/IEC Guide 98-3 Uncertainty of measurement. Part 3: Guide to expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)”, 2008.
- [129] Błaszczak M., Kowalski K. J., i Król J., Friction coefficient, texture depth and tyre/road noise evaluation method by analysis of tyre print image, *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, t. 14, nr 2, s. 85–100, 2015.
- [130] Mostostal Warszawa S.A., Politechnika Warszawska, i Instytut Badawczy Dróg i Mostów, *Innowacyjna technologia nawierzchni drogowych o obniżonej emisji hałasu*. Warszawa, 2015.
- [131] Bohatkiewicz J., Dudek M., Jukowski M., Dębiński M., Biernacki S., Hałucha M., i Stępnia K., *Ekspertyza Naukowa. Analiza wpływu wymiany nawierzchni na obniżenie hałasu przy drogach wojewódzkich Województwa Śląskiego*. Lublin: Zarząd Dróg Wojewódzkich w Katowicach, 2017.
- [132] Kowalski K. J., Bańkowski W., Król J. B., Gajewski M., Horodecka R., i Świeszewski P., Selection of Quiet Pavement Technology for Polish Climate Conditions on the Example of CiDRO Project, *Transportation Research Procedia*, t. 14, s. 2724–2733, 2016.
- [133] „ISO 11819-2 Acoustics. Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise. Part 2: The close-proximity method”, 2017.
- [134] „IEC 61260. Electroacoustics. Octave-band and fractional-octave-band filters”, 2014.
- [135] „PN-EN ISO 10534-2 Akustyka. Określanie współczynnika pochłaniania dźwięku i impedancji akustycznej w rurach impedancyjnych. Część 2: Metoda funkcji przejścia”, 2003.

