



**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*:

**Przegląd literatury na temat metod pomiaru hałaśliwości
nawierzchni**

*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 1.2.

Przegląd literatury

Przygotowany przez:

Adam Zofka, Tomasz Mechowski, Mirosław Graczyk, Jacek Sudyka, Przemysław Harasim
IBDiM

Spis treści:

1.	Cel i zakres załącznika.....	4
1.1.	Metoda pomiaru hałaśliwości SPB	4
1.1.1.	Odmiany rodzaje metody.....	5
1.1.2.	Opis metody badawczej.....	8
1.2.	Metoda pomiaru hałaśliwości CPX.....	9
1.2.1.	Historycznie o pomiarach	9
1.2.2.	Odmiany/rodzaje metody CPX.....	11
1.2.3.	Opis procedury badawczej.....	14
1.3.	Metoda pomiaru hałaśliwości OBSI	15
1.3.1.	Historycznie o pomiarach	15
1.3.2.	Odmiany/rodzaje metody OBSI	16
1.3.3.	Opis metody i procedury badawczej.....	18
2.	Czynniki wpływające na pomiary hałaśliwości.....	19
2.1.	Metoda SPB.....	19
2.1.1.	Parametry urządzenia.....	20
2.1.2.	Parametry opon	21
2.1.3.	Parametry otoczenia.....	21
2.2.	Metoda CPX.....	23
2.2.1.	Parametry opon	23
2.2.2.	Parametry otoczenia.....	25
2.2.3.	Parametry fizyczne pojazdu.....	31
2.2.4.	Parametry nawierzchni	33
2.2.5.	Prędkość, tolerancja prędkości	35
2.3.	Metoda OBSI.....	37
2.3.1.	Parametry urządzenia.....	37
2.3.2.	Parametry opon	38
2.3.3.	Parametry fizyczne pojazdu.....	40
2.3.4.	Parametry otoczenia.....	40
2.3.5.	Parametry drogi	41
2.3.6.	Parametry nawierzchni	42
2.3.7.	Prędkość, tolerancja prędkości	43
2.3.8.	Inne, np. przejazdy “rozbiegowe”, ilość przejazdów	43
3.	Kontrola jakości danych	46
4.	Interpretacja wyników, uśrednianie, poprawki, normalizowanie	48
4.1.	SPB.....	48
4.2.	CPX	49
4.3.	OBSI.....	51
5.	Zastosowanie wyników.....	52

5.1.	Porównania między metodami	52
5.1.1.	CPX, OBSI, SPB	54
5.1.2.	CPX vs OBSI	56
5.1.3.	CPX vs SPB	61
5.1.4.	OBSI vs CPB and SPB	65
6.	Istniejące dokumenty normowe	68
7.	Bibliografia	69

Spis rysunków:

Rysunek 1.	Mikrofon SPB zainstalowany na sztywnej odbijającej dźwięk płycie.....	7
Rysunek 2.	Przyczepka CPX wraz z pozycją mikrofonów używana przez NCAT	10
Rysunek 3.	Schemat urządzenia CPX i pass-by w jednym (Hojer & Nilsson, 2008).....	12
Rysunek 4.	Schemat rozmieszczenia mikrofonów do pomiarów w polu bliskim (CPX).....	12
Rysunek 5.	Przyczepka M + P do badań metodą CPX	14
Rysunek 6.	Pozycje mikrofonów	15
Rysunek 7.	Urządzenie OBSI o pojedynczym mierniku zainstalowane w piaście prawego tylnego koła pojazdu testowego	17
Rysunek 8.	System OBSI zamontowany w piaście koła z dwoma miernikami napięcia i osłonami przeciwwietrznymi	17
Rysunek 9.	Zestaw pomiarowy OBSIe zamontowany na pojeździe EV, BMW i3	18
Rysunek 10.	Wyniki analizy statystycznej współczynników korekty temperaturowej	27
Rysunek 11.	Uzyskane zależności między temperaturą nawierzchni i powietrza.	30
Rysunek 12.	Zestawy pomiarowe do pomiarów CPX stosowane w badaniach na „Round Robin”	32
Rysunek 13.	Rysunek Ogólna zależność między współczynnikami prędkości A i B.	35
Rysunek 14.	Wpływ wzrostu prędkości na maksymalny poziom dźwięku od przejazdu statystycznego pojazdu w zależności od nawierzchni (Gardziejczyk, 2015).....	36
Rysunek 15.	Wpływ wzrostu prędkości na maksymalny poziom dźwięku od przejazdu statystycznego na nawierzchniach betonowych (Gardziejczyk, 2015).....	37
Rysunek 16.	Zależność pomiędzy hałaśliwością a różnymi typami opon (Sandberg 2001) ...	39
Rysunek 17.	Poziomy OBSI względem temperatury powietrza dla odcinków testowych DPG	41
Rysunek 18.	Możliwe mechanizmy ograniczania hałasu na nawierzchniach porowatych.....	42
Rysunek 19.	Analiza wrażliwości temperaturowej dla widm w 1/3 zakresu oktawy	50
Rysunek 20.	Porównanie wyników otrzymanych metodą CPX i SPB (Ronavan, 2009b)	54
Rysunek 21.	Porównanie wyników otrzymanych metodą OBSI i SPB (Ronavan, 2009b)	55
Rysunek 22.	Porównanie wyników otrzymanych metodą CPX i OBSI (Ronavan, 2009b)	55
Rysunek 23.	Regresja liniowa pomiędzy wynikami CPX i OBSI	57
Rysunek 24.	Zależność między temperaturą a pomiarami CPX i OBSI.....	57
Rysunek 25.	Widok urządzenia do pomiaru hałaśliwości metodą CPX	58
Rysunek 26.	Sposób montażu urządzenia OBSI na samochodzie testowym.....	59
Rysunek 27.	Zależność wyników pomiarów metodami CPX i OBSI.....	60
Rysunek 28.	Widma średniej częstotliwości zmierzone dwiema metodami	60
Rysunek 29.	Porównanie poziomów ciśnienia dźwięku uzyskanych metodą CPX z poziomami napięcia dźwięku uzyskanymi metodą OBSI (NCHRP 630, 2009).....	61
Rysunek 30.	Poziomy ciśnienia dźwięku dla metody CPB w stosunku do poziomów napięcia dźwięku dla metody OBSI (znormalizowane) (NCHRP 630, 2009)	66

Rysunek 31. Poziomy ciśnienia dźwięku dla metody SPB w stosunku do poziomów natężenia dźwięku dla metody OBSI (znormalizowane) (NCHRP 630, 2009) 66

Spis tablic:

Tabela 1. Klasyfikacja nawierzchni pod względem hałaśliwości według Prof. Ejsmonta i Prof. Gardziejczyka (Gardziejczyk et al., 2008)	20
Tabela 2. Współczynniki korekcyjne dla opon referencyjnych	31
Tabela 3. Rozstęp przy użyciu SRTT dla pomiarów OBSI	44
Tabela 4. Podsumowanie z przejazdów wykonanych w ramach projektu NCHRP 1-44 z uwzględnieniem parametrów zewnętrznych.	45
Tabela 5. Parametry/Zmienne Testowe dla metody OBSI, (opracowano na podstawie NCHRP 1-44, Appendix C, 2009).....	46
Tabela 6. Rekomendowane wartości graniczne parametrów (opracowano na podstawie NCHRP 630, 2009)	47
Tabela 7. Współczynniki poprawkowe ze względu na temperaturę (F. Anfosso-Lede, et al., 2007).	49
Tabela 8. Porównanie metod pomiaru hałaśliwości nawierzchni (Gardziejczyk et al., 20015), (Gardziejczyk et al.,2014)	53
Tabela 9. Parametry korelacji i dopasowania dla metody CPX i OBSI (NCHRP 630, 2009). 61	
Tabela 10. Kryteria oceny hałaśliwości nawierzchni (Gardziejczyk, 2010).....	62
Tabela 11. Odcinki badawcze i pomierzone różnice LCPX przy prędkości 50 km/h	64
Tabela 12. Wyniki pomiarów metodą CPX na odcinkach: z gumą i DAC.....	64
Tabela 13. Wyniki badań SPB (1,2 m i 3,0 m nad poziomem jezdni).....	65
Tabela 14. Współczynniki temperaturowe.....	65
Tabela 15. Parametry dopasowania dla metody CPB i OBSI.....	67
Tabela 16. Parametry dopasowania dla metody SPB i OBSI	67

1. CEL I ZAKRES ZAŁĄCZNIKA

Celem niniejszego załącznika pt. „Przegląd literatury” jest przedstawienie przeglądu literatury na temat dostępnych metod pomiaru hałaśliwości w literaturze krajowej i światowej.

W tym Załączniku przedstawiono kolejno: trzy podstawowe metody pomiaru hałaśliwości: SPB, CPX oraz OBSI opisując metody historycznie, przedstawiając różne odmiany metod oraz opis procedury badawczej. W kolejnym rozdziale przedstawiono czynniki mające wpływ na pomiary hałaśliwości dla każdej z metod, przy uwzględnieniu takich zmiennych jak parametry urządzenia, otoczenia, opon, nawierzchni, ilość przejazdów oraz tolerancja prędkości. Rozdział trzeci natomiast przedstawia kontrolę jakości danych uwzględniając powtarzalność, odtwarzalność i dopasowanie danych. W rozdziale czwartym przedstawiono interpretacje wyników ewentualne poprawki, uśrednianie i normalizacje. W kolejnym rozdziale przedstawiono porównania pomiędzy metodami w tym wady i zalety każdej z metod. W ostatnim rozdziale umieszczono spis dokumentów normowych regulujących badania poszczególnymi metodami pomiaru hałaśliwości.

1.1. Metoda pomiaru hałaśliwości SPB

Statystyczna metoda pomiaru hałasu (SPB – statistical pass-by method) podczas przejazdu (według normy PN-EN ISO 11819-1) to procedura pomiarowa przeznaczona do oceny hałasu pojazdu i ruchu generowanego na różnych odcinkach nawierzchni drogi w określonych warunkach ruchu. Pomiary są wykonywane dla dużej liczby pojazdów normalnie poruszających się po drodze. Wyniki uzyskane z zastosowaniem tej procedury są normalizowane do standardowych prędkości według kategorii lub rodzaju rozpatrywanej drogi.

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

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

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

- kategoria 1 - samochody osobowe - samochody osobowe z wyłączeniem innych lekkich pojazdów,

- kategoria 2 - pojazdy ciężkie - wszystkie pojazdy ciężarowe, autobusy i autokary dwuosiove, mające więcej niż cztery koła. Kategoria składa się z kategorii 2a i 2b,
- kategoria 2a - pojazdy ciężkie dwuosiove – pojazdy ciężarowe, autobusy i autokary z dwiema osiami i więcej niż czterema kołami,
- kategoria 2b - pojazdy ciężkie wieloosiove – pojazdy ciężarowe, autobusy i autokary z więcej niż dwiema osiami.

1.1.1. Odmiany rodzaje metody

Zastosowanie metody SPB w środowisku miejskim

Metoda ISO 11819-1 jest dobrze ugruntowana, a kilka jej wariantów jest używanych na całym świecie do określania wpływu nawierzchni na emisję hałasu z ruchu drogowego. Zawiera już kategorię "niskiej" prędkości dla dróg miejskich. Niemniej jednak nawet jej użycie w przypadku dróg o dużej prędkości jest zwykle ograniczone do wybranych lokalizacji miejsc badawczych ze względu na rygorystyczne wymagania dotyczące warunków terenowych (M. Haider & Descornet, 2006). Szczególnie w środowisku miejskim, zastosowanie praktyczne metody jest dużym wyzwaniem dla użytkownika. Szczegółowa ocena przydatności metody SPB w ocenie hałaśliwości nawierzchni dróg miejskich przedstawia się następująco:

- 1) Możliwość zastosowania dla zakresu prędkości 30 - 80 km/h.
- 2) Standardowa prędkość 50 km/h obejmuje większą część spodziewanego zakresu prędkości w środowisku miejskim. Ponadto prędkość odniesienia jest równa dla wszystkich trzech kategorii, co sprawia, że wyniki dla $L_{veh}(V_0)$ pojazdu są łatwo porównywalne. W metodzie SPB stosuje się również korektę względem prędkości odniesienia.

Mierząc maksymalny poziom ciśnienia akustycznego LAF,max należy stwierdzić, że wartości są stosunkowo odporne na hałas w tle. Mimo to mnogość możliwych źródeł hałasu w miastach, w tym innych rodzajów ruchu, takich jak tramwaje, może sprawić, że wiele miejsc nie będzie spełniało wymagań do pomiarów. Wzmożony ruch na obszarach miejskich jest szczególnie poważnym problemem. Pojazdy na pasach wyprzedzających lub innych jezdniach pojawiają się równie często, a separacja przestrzenna jest zazwyczaj niewielka. W większości przypadków nie ma podziału między pasami ruchu dla każdego kierunku. Czynniki te sprawiają, że pomiary w godzinach szczytu są bardzo trudne, a niektóre testy SPB trzeba przeprowadzać nawet późno w nocy. Ponadto czas wymagany do wykonania badania może stać się bardzo długi z powodu wielu nieprawidłowych pomiarów.

Pomimo, iż pomiar wystarczającej liczby pojedynczych przejazdów pojazdów jest wyzwaniem, dodatkowo należy uwzględnić minimalne wymagania dotyczące liczby w każdej kategorii pojazdów. Samochody ciężarowe kategorii 2b mogą nie występować w niektórych obszarach. Dlatego obliczenie SPBI może nie być możliwe. Niemniej jednak należy przynajmniej próbować zapewnić wartość L_1 dla samochodów osobowych. W przypadku głównych dróg do pełnej oceny może być potrzebna również L_{2a} dla lekkich pojazdów ciężarowych. Analiza powinna zawsze uwzględniać wszelkie dostępne dane dotyczące rzeczywistego składu potoku ruchu.

Minimalna długość odcinka testowego do pomiarów SPB wynosi 60 m, czyli dość krótko. Jednak ze względu na częste prace naprawcze ten odcinek może nie być wystarczająco jednorodny, aby wykluczyć skutki nieciągłości nawierzchni. Pomiar LAF, max w momencie uzyskania prędkości rozgraniczającej (cross-over speed), rozwiązuje ten problem, ponieważ

tylko zakłócenia nawierzchni zbliżone do punktu rozgraniczenia/przejścia mogą mieć wpływ na zmierzony poziom hałaśliwości.

Być może największym problemem dla metody SPB jest obecność dużych powierzchni odbijających dźwięk w pobliżu pozycji mikrofonu. Budynki, latarnie, znaki drogowe lub drzewa mogą sprawić, że wiele odcinków nie będzie spełniało kryteriów pomiarowych. Metody radzenia sobie z takimi obiektami to ich usuwanie, zakrywanie materiałem pochłaniającym lub obliczanie korekt w celu normalizacji wyników w środowisku swobodnego pola. Inną strategią, która odbiega od zasad normy ISO 11819-1 i eliminuje porównywalność z innymi miejscami, jest akceptacja środowiska akustycznego i utrzymanie sytuacji na możliwie stałym poziomie, podczas wykonywania pomiarów przed i po wymianie nawierzchni.

Pozycja pomiarowa w odległości 7,5 m jest ustandaryzowana i stosowana również w wielu innych badaniach. Zwykle jest to wystarczająco blisko drogi aby skoncentrować się na drodze jako głównym źródle hałasu. W środowisku miejskim konieczne może być ustawienie mikrofonu bliżej drogi. W tym przypadku porównywalność jest również ograniczona do pomiarów przed/po lub zależy od obliczonych korekt.

Adaptacja metody SPB do środowiska miejskiego

Aby można było wykorzystać metodę SPB w warunkach miejskich konieczny jest odpowiedni wybór czasu i miejsca pomiarów. Należy unikać godzin szczytu, a pomiary w nocy zapewniają zwykle mniejsze natężenie ruchu. Jednak skład potoku ruchu może się znacznie zmienić w porównaniu do dnia, przy znacznie mniejszej liczbie pojazdów ciężarowych. Wybór odpowiednich lokalizacji może prowadzić do pomiarów tylko na głównych ulicach i drogach, które również nie są reprezentatywne.

Część niechcianych odbić może zostać usunięta, jeśli mikrofon jest używany z tak zwaną płytą tylną. Metoda ta działa poprzez ekranowanie mikrofonu przed wszelkim hałasem dochodzącym z tyłu przy akceptacji dobrze zdefiniowanej zmiany zmierzonych poziomów szumów. Korzystając z tego wariantu metody SPB, wciąż mamy do czynienia z możliwymi obiektami odbijającymi przed mikrofonem i sytuacją hałasu tła.

Idea użycia mikrofonu wbudowanego w sztywną, odbijającą dźwięk płytę tylną w celu przeprowadzenia pomiarów drogowych można znaleźć w artykule Wattsa (1996), a jego teorię opisuje artykuł Fégeanta (1997). Prace Gouberta (2005) ponownie dowiodły jego użyteczności (Rysunek 1 **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**).



Rysunek 1. Mikrofon SPB zainstalowany na sztywnej odbijającej dźwięk płycie

Mikrofon osadzony w całkowitej odbijającej dźwięk płaszczyźnie powinien teoretycznie doświadczyć podwojenia amplitudy ciśnienia dźwięku uderzającej fali dźwiękowej, która prowadzi do określonego wzrostu o 6 dB w porównaniu do sytuacji w polu swobodnym. Główną zaletą przyjęcia tego celowo wprowadzonego zwiększenia poziomu ciśnienia akustycznego jest całkowite ekranowanie mikrofonu z każdego źródła dźwięku i odbić zlokalizowanych za płaszczyzną. Dobrze znany wzrost o 6 dB można odjąć od zmierzonych poziomów, które następnie można porównać do pomiarów w polu swobodnym. Niepokojące mogą być zakłócające źródła dźwięku lub odbijające obiekty, takie jak budynki lub ekrany akustyczne, które często znajdują się za mikrofonem.

W praktyce należy zastosować pewne środki ostrożności przy stosowaniu metody SPB-BB. Przede wszystkim płaszczyzna odbijająca nie może być nieskończona, jak w teorii. W większości przypadków stosuje się prostokątną drewnianą deskę o bokach od 0,5 do 1,5 m długości. Brzegi tej płyty powodują dyfrakcję uderzającej fali dźwiękowej, która tworzy charakterystyczne wzory o różnym poziomie dźwięku w różnych punktach na powierzchni płyty. Co więcej, płyta nie będzie idealną tarczą dla źródeł szumu lub odbić zza mikrofonu. Niemniej jednak można osiągnąć wystarczającą wydajność, wybierając minimalnie rozszerzoną przestrzennie dyfrakcję znajdującą się w pobliżu określonego położenia na powierzchni płyty.

Goubert (2005) przedstawił następujące wyniki dotyczące zastosowania metody SPB-BB:

- różnice w całkowitym A-ważonym poziomie ciśnienia akustycznego pomiędzy tablicą rozdzielczą a pomiarami pola swobodnego mieściły się w zakresie od 5,0 do 5,8 dB,
- różnice w ogólnych poziomach nie zależą w dużym stopniu od wielkości deski, typu pojazdu czy prędkości,
- różnice w ogólnych poziomach nie zależą w dużym stopniu od wielkości deski, typu pojazdu czy prędkości,
- przy porównywaniu widm płyty i pola swobodnego w pasmach trzeciej oktawy występują pewne odchylenia od wartości 6 dB spowodowane dyfrakcjami,

- w zakresie wysokich częstotliwości odchylenia wynikały z tego, że membrana mikrofonu nie była dokładnie równa poziomowi płyty,
- efekty dyfrakcji niskiej częstotliwości zmniejszyły się wraz z rozmiarem płyty podkładowej. Prowadzone są dalsze badania dotyczące kształtu płyty.

Wykorzystanie metody płyty podkładowej do pomiarów SPB na drogach miejskich można w związku z tym zalecić przynajmniej do określenia ogólnych poziomów ciśnienia akustycznego A, które są wystarczające do określenia wartości L_{veh} i SPBI.

Metodę SPB w warunkach miejskich można uprościć do pomiaru poziomów emisji hałasu przed i po wymianie nawierzchni. Podstawowym wymaganie jest to, aby warunki wykonywania badania były takie same w obu przypadkach, w tym również rozkład potoku ruchu drogowego. W tym przypadku różnica poziomów hałasu wynika tylko z zastosowanej technologii wykonania nowej powierzchni drogi.

Zgodnie z propozycją Sandberga (2005) grupa SILENCE WP F4 omówiła uproszczoną procedurę pomiarową, która ma za zadanie rozwiązanie problemów związanych z wykorzystaniem metody SPB. Uproszczona metoda otrzymała nazwę przed/po (befor/after - B/A), ponieważ koncentruje się na efektach nawierzchni w określonym miejscu.

W tej metodzie należy zwrócić szczególną uwagę, aby otoczenie akustyczne pozostało takie samo pomiędzy dwoma pomiarami. Niektóre parametry nie mogą być utrzymywane na stałym poziomie, co oznacza, że poziomy ciśnienia akustycznego muszą zostać znormalizowane do standardowych wartości tych parametrów za pomocą algorytmów z modeli HARMONOISE (Nota i in., Harmonoise 2005).

Wymagany sprzęt i procedura kalibracji są zasadniczo takie same jak w metodzie SPB. Mierzy się A-ważony równoważny poziom ciśnienia akustycznego LA_{eq} w sposób ciągły przez co najmniej jedną, ale najlepiej przez 4 godziny. Pomiary odbywają się w ciągu dnia i obejmują godzinę szczytu. Liczbę lekkich i ciężkich pojazdów przechodzących przez pozycję mikrofonu należy policzyć osobno. Mierzy się średnią prędkość pojazdu dla każdej kategorii. Może to wystarczyć do zmierzenia prędkości tylko około 10% przejeżdżających pojazdów. Temperatura powietrza podczas pomiaru mierzona jest w pozycji mikrofonu.

Hałas tła pochodzący z innych źródeł hałasu niż przejeżdżające pojazdy musi być o 10 dB poniżej zmierzonych poziomów hałasu. Powierzchnia drogi musi być sucha, a prędkość wiatru nie powinna przekraczać 5 m/s (uśredniona przez 5 minut). Różnica temperatur między dwoma pomiarami nie powinna przekraczać 15 °C.

Równoważny A-ważony poziom ciśnienia akustycznego LA_{eq} jest mierzony przez co najmniej 1 godzinę. Mikrofon znajduje się 1,2 m nad ziemią i co najmniej 3,0 m od linii krawędzi drogi. Jeśli obecny jest chodnik, minimalna odległość od granicy nawierzchni wynosi 2,0 m. Rejestrowana jest liczba i średnia prędkość przejeżdżających pojazdów. Obserwator powinien wyeliminować przedziały czasowe z poważnymi zakłóceniami dźwięku z innych źródeł.

1.1.2. Opis metody badawczej

Statystyczna metoda pomiaru podczas przejazdu SPB (PN-EN ISO 11819-1:2014) stosowana jest do oceny różnych typów nawierzchni w odniesieniu do generowanego poziomu hałasu drogowego. Polega ona na rejestracji i porównaniu poziomów dźwięków wywołanych ruchem pojazdów na nawierzchni. Metoda stosowana jest do klasyfikowania nawierzchni, pod względem ich wpływu na hałas drogowy oraz do oceny wpływu zmiany nawierzchni na hałas w miejscu zastosowania zmiany.

Zasada pomiaru polega na rejestracji maksymalnych poziomów dźwięku wywołanych przejazdem pojazdu oraz prędkości pojazdu w punkcie pomiaru. Pod uwagę brane są tylko pojazdy zaliczane do jednej z trzech kategorii: samochody osobowe, ciężkie pojazdy dwuosiowe oraz ciężkie pojazdy wieloosiowe. Dla każdej kategorii wyznaczane są poziomy dźwięku, które w wyniku obliczeń wyznaczają statystyczny wskaźnik podczas przejazdu (SPBI). Do wykonywania pomiarów wykorzystywane są: miernik poziomu dźwięku, aparatura do analizy częstotliwościowej, urządzenie do pomiaru prędkości pojazdów oraz przyrządy do pomiaru temperatury otoczenia i nawierzchni.

Kontrolowana metoda pomiaru podczas przejazdu (z ang. Controlled Pass-By) jest szczególnym przypadkiem metody SPB. Polega na zastosowaniu typowego pojazdu osobowego z ustalonym ogumieniem oraz poruszającego się z określonymi prędkościami (od 70km/h do 110 km/h). Warunki pomiaru pozostają bez zmian względem metody SPB (Anfosso-Ledee, Do, Anfosso-Lédée, & Do, 2002), (BERENGIER C & Anfosso-Ledee, 1998).

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

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

1.2. Metoda pomiaru hałaśliwości CPX

1.2.1. Historycznie o pomiarach

(Sandberg, Buhlmann, Conter, Mioduszewski, & Wehr, 2016) przedstawia pokrótce chronologię powstawania wymagań technicznych odnoszących się do metody CPX, które ostatecznie zawarto w projekcie normy ISO/FDIS 11819-2 z 2016 roku. Jednocześnie zwraca uwagę na zalety metody CPX w pomiarze hałasu w porównaniu do metody SPB, z których najistotniejsze to:

- pomiar na całej długości odcinka, a nie w jednym lub kilku punktach, co ma szczególne znaczenie w nawierzchniach porowatych oraz na odcinkach o zróżnicowanej zabudowie infrastruktury drogowej (np. różnego rodzaju bariery)
- powtarzalność i stabilność wyników uzyskana dzięki wprowadzeniu opon referencyjnych i między innymi korekt temperaturowych i twardnienia gumy opony.

(Paul R. Donovan, 2009b) w artykule przedstawiono opis urządzenia CPX wykorzystanego w (National Center for Asphalt Technology) NCAT, Alabama, USA . Mikrofony zostały rozmieszczone w standardowych pozycjach: 100 mm nad ziemią 200 mm od czoła opony, 200 mm przed i za linią środkową opony (Rysunek 2)



Rysunek 2. Pryczepka CPX wraz z pozycją mikrofonów używana przez NCAT

Sygnaly z mikrofonów wprowadzono do kondycjonerów sygnału PCB Model 480E09, które z kolei wprowadzono do dwukanałowego analizatora czasu rzeczywistego Larson Davis 2900. Poziomy widmowe dźwięku CPX w paśmie 1/3 oktawy były w dużej mierze przetwarzane w czasie rzeczywistym. Dane wyjściowe LD 2900 zostały również zapisane na dwukanałowej nagrywarce Digital Audio Tape (DAT) Sony LCD-100 w celu wykonania kopii zapasowej i wszelkich dalszych analiz uznanych za konieczne. Mikrofony zostały skalibrowane za pomocą zestawu kalibratorów akustycznych Larson Davis Model CAL200 na 94 dB na początku i na końcu każdego zestawu pomiarów. Po zebraniu danych poziomy ciśnienia akustycznego dla przednich i tylnych mikrofonów uśredniono uzyskując pojedyncze widmo hałasu.

(Parra, Casas, Sotomayor, Cerro, & Castillo, 2012) w artykule przedstawiono krótką charakterystykę urządzenia CPX o klasycznej konstrukcji, wykorzystywanego przez CEDEX. Dla celów opisanych badań pomiary prowadzono w dwóch prędkościach (50 i 80km/h) na oponie A Uniroyal Tigerpaw 225/60-R16 (SRTT) i oponie D Avon Supervan AV4 195-R14C.

(Paul R. Donavan, 2009a) w artykule przedstawiono podsumowanie przeglądu literatury obejmującej trzy ogólne kategorie pomiarów akustycznych. Kategorie te obejmują pomiar poziomu ciśnienia akustycznego (SPL), pomiary poziomu natężenia dźwięku (SI) i pomiary pola akustycznego za pomocą technologii akustycznej (AAT). Historycznie pierwsza z metod pomiaru SPL to „pomiar za kołem”, w którym mikrofon umieszczany jest bezpośrednio za oponą, zwykle blisko opony i nawierzchni. Ta pozycja została wybrana, ponieważ uważano, że zmniejsza hałas powodowany przez wiatr na mikrofonie. Druga metoda to tak zwany „pomiar w polu bliskim”, w którym kilka mikrofonów umieszcza się w różnych punktach wokół opony. To podejście przekształciło się w formalną procedurę ISO Draft Standard (ISO 11819-2), której angielskie określenie to close proximity measurement (CPX). Podejście CPX obejmuje również techniki, w których mikrofony są chronione przed przepływem powietrza otaczającego oponę testową oraz te, w których mikrofony są narażone na przepływ.

Jak wcześniej wspomniano pomiary hałasu nawierzchni opony przy użyciu technik SPL wykonywano z różną liczbą mikrofonów i ich lokalizacjami. W 1980 r. zaczęło pojawiać się zainteresowanie standaryzacją procedur pomiarowych SPL, szczególnie w Europie. W połowie lat 90. XX wieku normalizacja metody CPX rozpoczęła się, gdy temat ten został podjęty przez grupę roboczą ISO 33, która zajmuje się mierzaniem wpływu nawierzchni na emisję hałasu. Do 1997 r. opracowano pierwszy projekt normy CPX, w której w dużej części

przyjęto rozwiązania proceduralne opracowane przez Sandberga i Ejsmonta w 1986 roku (Sandberg, U. et al., 1986). W niniejszym artykule opisano również metody walidacji wydajności przyczepy używanej do wykonywania pomiarów CPX.

Kolejny projekt normy z 2000 r. wprowadzał trzy opcjonalne położenia mikrofonów (pod kątami 0°, 90° i 180°), zostały określone odległości mikrofonów z przodu i z tyłu 650 mm od linii środkowej opony na wysokości 200 mm, a także zdefiniowano odległości mikrofonu znajdując się pod kątem 90° (200 mm od ściany bocznej i 100 mm nad ziemią). Standard wskazywał na cztery różne opony testowe, z których dwie (A i D), albo wszystkie cztery (od A do D) są stosowane w zależności od typu badania. Zdefiniowano też referencyjne prędkości testowe, dane dotyczące obciążenia opon i ciśnienia powietrza w oponach oraz przewidziano zarówno korektę prędkości, jak i korektę temperatury powietrza znormalizowaną do 20°C.

W kolejnych latach odnotowano wiele badań na podstawie danych uzyskanych zgodnie z projektem standardu ISO CPX. Niektóre z nich dają dalszy wgląd w technikę w dziedzinie projektowania i walidacji aparatury badawczej, korelacji z innymi metodami pomiaru hałasu opony i nawierzchni oraz innymi zastosowaniami.

1.2.2. Odmiany/rodzaje metody CPX

Rozróżnia się dwa zasadnicze warianty wykonywania badań metodą CPX (J. A. Ejsmont & Wozniak, 2000). Pierwszy opiera się na założeniu, że pomiar będzie realizowany bezpośrednio na poruszającym się samochodzie, na jednym z jego kół. W drugim wariantcie badanie jest wykonywane w specjalnie do tego zbudowanym pojeździe lub przyczepie. Zaletą pierwszej metody jest niski koszt, związany jedynie z odpowiednią adaptacją samochodu oraz wykonaniem instalacji mikrofonów i ewentualnie dodatkowego odseparowania od hałasu generowanego przez pojazd. Wadą jest hałas zakłócający powstały z opływu powietrza wokół mikrofonów oraz odbicia dźwięku od elementów samochodu. W drugiej metodzie koszty wykonania urządzenia są znacznie wyższe, lecz korzystniejsze są warunki realizacji pomiarów dzięki izolacji mikrofonów od hałasów zewnętrznych. Przykłady urządzeń do badania hałasu od opon samochodowych:

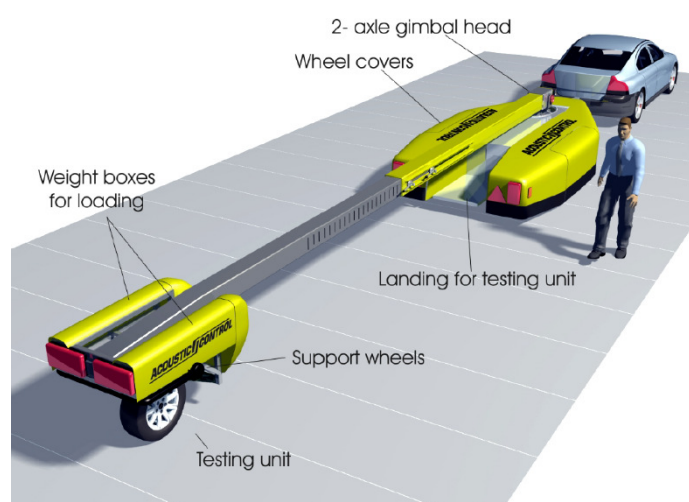
- przyczepa „Tiresonic” (Politechnika Gdańska) – składa się z trzech kół, z czego dwa przednie są na zewnątrz komory bezechowej i służą do prowadzenia przyczepy i utrzymywaniu jej stabilności; koło pomiarowe jest zamocowane sztywno do ramy, dzięki czemu wyeliminowany jest hałas zakłócający od zawieszenia koła; istnieje możliwość regulacji prześwitu przyczepy nad jezdnią oraz obciążenia koła,
- arsenal Trailer (Austria) – przyczepa jednokołowa; stabilizowana jest za pośrednictwem samochodu poprzez sztywne z nim połączenie dyszlem holowniczym,
- przyczepa TÜV (Niemcy) – z czterema kołami pomiarowymi, po dwie na każdej osi; obciążana jest przednia lub tylna oś za pośrednictwem przesuwanego balastu; badanie wykonuje się na jednej z osi, druga jest wówczas podniesiona; mikrofony umieszczone są pomiędzy kołami; przyczepa stabilizowana jest przez samochód ciągnący,
- przyczepa DWW (Holandia) – stabilizowana dzięki czterem kołom podporowym na zewnątrz komory; opona pomiarowa jest zainstalowana w dużej komorze bezechowej co daje możliwość instalacji mikrofonów w różnych, niestandardowych pozycjach; istnieje możliwość regulacji prześwitu komory nad nawierzchnią,
- MARGA (Niemcy) – służy do badania hałasu opon toczących się ze znacznym poślizgiem i pewnym kątem, znoszenia; posiada cztery koła podporowe na zewnątrz komory bezechowej,

- przyczepa TS-1 (Politechnika Gdańska) – służy do badania hałasu od opony obciążonej momentem napędowym lub hamującym; zmiana poślizgu koła badanego w zakresie $\pm 20\%$,
- pojazd badawczy TRL (Wielka Brytania) – koło pomiarowe jest umieszczone pod podwoziem samochodu ciężarowego, obudowane komorą bezchową.

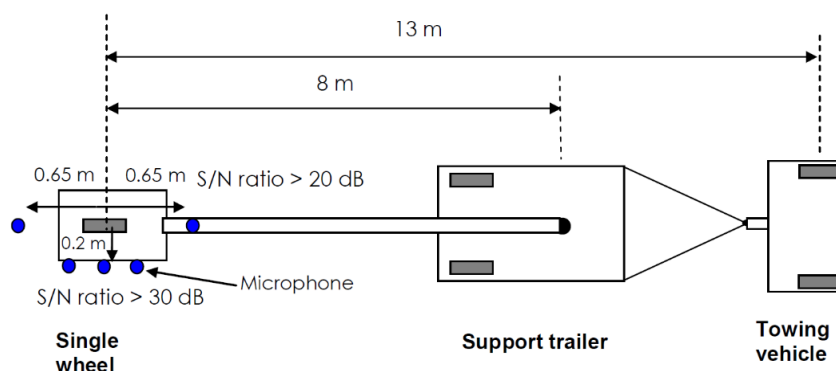
W artykule (Hojer & Nilsson, 2008) przedstawiono nową koncepcję przyczepy do badania hałaśliwości, która jest połączona z pojazdem holującym za pośrednictwem przyczepy pomocniczej teleskopową belką holowniczą o długości do 8 m. Układ zapewnia niski hałas zakłócający pochodzący od kół podporowych i pojazdu holującego, bez konieczności stosowania komory bezchowej. Dzięki temu przyczepa może być używana zarówno do pomiarów CPX z wbudowanymi mikrofonami, jak i do pomiarów metodą przejazdów, przy użyciu mikrofonów ustawionych przy drodze.

Przyczepa (Rysunek 3) jest przystosowana do średnic kół od R10 do R20 i szerokości kół od 69 mm do 364 mm. Aby zachować stabilność przyczepy pomiarowej koło musi być zamontowane centralnie, czemu służą specjalne płytki dystansowe wykonane dla każdego zestawu felg. Wielkość nacisku koła na nawierzchnię można regulować, dzięki czemu można wykonywać badania przy różnym ciśnieniu w oponie.

W przypadku pomiarów na poboczach drogi stosunek S / N wynoszący 10 dB może być osiągnięty przy odległości mikrofonu 3,75 m od badanej opony.



Rysunek 3. Schemat urządzenia CPX i pass-by w jednym (Hojer & Nilsson, 2008)



Rysunek 4. Schemat rozmieszczenia mikrofonów do pomiarów w polu bliskim (CPX)

W przypadku pomiarów na poboczach drogi stosunek mocy pożądanego sygnału do mocy szumu (S/N ratio, w skrócie SNR) wynoszący 10 dB może być osiągnięty przy odległości mikrofonu 3,75 m od badanej opony.

Zastosowanie metody CPX ma kilka zalet. Gdy sprzęt jest dostępny, można go łatwo zastosować, szybko i elastycznie. Może być stosowany w niemal dowolnych lokalizacjach i mierzy znaczne długości powierzchni drogi w kilku przebiegach.

Prędkość odniesienia wynosząca 50 km/h mieści się w wymaganym zakresie prędkości (30 – 80 km/h) pojazdów poruszających się w miastach. Kiedy rozważane są dopuszczalne odchylenia prędkości do 15 km/h, dopuszczalny zakres prędkości dla pojedynczego przejazdu obejmuje 35 - 65 km/h. Metoda CPX uwzględnia jedynie wpływ nawierzchni na hałas opona/droga. Zwykle jest to wystarczające w sytuacjach o ciągłym natężeniu ruchu z poszczególnymi pojazdami jadącymi ze stosunkowo stałą prędkością powyżej 30-50 km/h, gdy hałas silnika jest znikomy. Wspinanie się po stromych zboczach lub zatrzymywanie się na drodze wymagające znacznego momentu obrotowego i przyspieszenia nie może być objęte CPX. Systemy z obudowami zwykle wykazują bardzo wysoką odporność na hałas zewnętrzny, szczególnie w konfiguracjach przyczepy. Dobrze skonstruowana obudowa i przyczepa utrzymują ustawienia pomiarowe w prawie całkowicie odizolowanym od niepożądanego hałasu. Jeżeli stosowane są inne systemy, procedury pomiarowe muszą gwarantować, że pomiar nie zostanie zakłócony. Metoda CPX nie może całkowicie pokryć efektów opon pojazdów ciężarowych, ale może być wystarczająca w zastosowaniach miejskich, w których samochody osobowe dominują w składzie ruchu. Certyfikowane systemy CPX z obudową nie powinny mieć problemów z odbijaniem obiektów w pobliżu drogi. Natomiast systemy bez obudowy nadal cieszą się dużym stosunkiem sygnału do szumu ze względu na niewielką odległość od mikrofonów do miejsca interakcji opona/droga w porównaniu do odległości od obiektów przydrożnych. Pomiaru są wykonywane bezpośrednio w torze kół i mogą jednocześnie obejmować kilka kilometrów powierzchni drogi.

Główną wadą stosowania metody CPX na nawierzchniach dróg miejskich jest brak uwzględnienia hałasu silnika w zakresie niskich prędkości i ograniczonej reprezentatywności w odniesieniu do hałasu pojazdów ciężkich. Metodę CPX zaprojektowano tak, aby mierzyć poziom hałasu w obszarze opona/nawierzchni i można ją uznać za reprezentatywną dla ogólnej emisji hałasu przez pojazd w sytuacjach, w których dominuje hałas na styku opony z drogą, czyli w przypadku pojazdów poruszających się ze stosunkowo stałą prędkością powyżej 30-50 km / h. Kiedy znaczny procent pojazdów przyczyniających się do całkowitej emisji hałasu przyspiesza, hamuje, steruje raptownie, wykorzystuje niskie przełożenia i klaksony, wspina się lub schodzi po zboczu lub przenosi ładunek emitujący hałas, metoda CPX nie może tego wyjaśnić. Oczywiście nie wszystkie z tych zdarzeń będą silnie uzależnione od rodzaju nawierzchni, ale powierzchnie porowate mogą pochłaniać znaczną ilość hałasu generowanego lub propagowanego w pobliżu powierzchni drogi.

Próbując zastosować metodę CPX do oceny wpływu nawierzchni dróg na emisję hałasu przez pojazdy ciężkie, hałas opona/droga i hałas silnika należy traktować oddzielnie. Efekty powierzchniowe dotyczące hałasu silnika są, jak stwierdzono powyżej, poza zasięgiem metody CPX. Hałas generowany na styku drogi z nawierzchnią pochodzący z opon ciężkich pojazdów może być przynajmniej częściowo oceniony przez wpływ nawierzchni dróg na poziomy opon D. Zwłaszcza opony z mniejszych kategorii ciężkich pojazdów, takich jak lekkie ciężarówki dostawcze, można naśladować całkiem dobrze. Co więcej, na wielu drogach miejskich, które nie należą do sieci autostrad i nie są głównymi drogami, ciężkie pojazdy będą mniej powszechne.

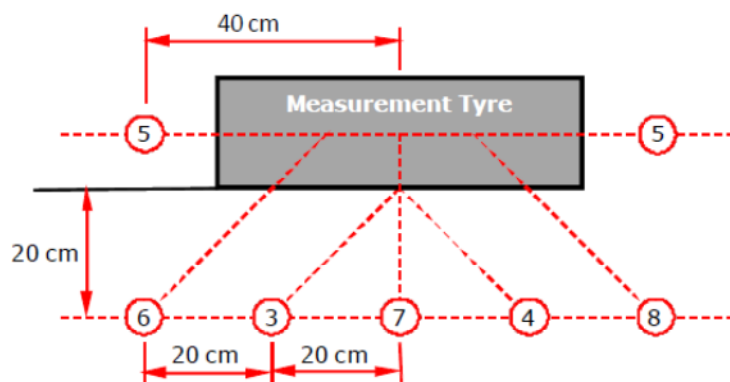
Niemniej jednak metoda CPX wydaje się dobrze pasować do miejskich nawierzchni dróg, przynajmniej pod względem użyteczności i jako narzędzie do oceny składowej opona/droga hałasu drogowego. W chwili obecnej jest ona traktowana jedynie jako metoda drugorzędna do celów klasyfikacji, ale może nadal zapewniać ocenę sytuacji w konkretnych miejscach miejskich z typami nawierzchni już zaklasyfikowanymi przez kombinację pomiarów SPB i CPX.

1.2.3. Opis procedury badawczej

W artykule (Morgan, Sandberg, & van Blokland, 2009) opisano procedurę badawczą; przeprowadzono obszerny program pomiarowy, głównie w Holandii w projekcie o nazwie Robust CPX, w celu wyboru opon referencyjnych, które będą zamiennikami do obecnie stosowanych. Dodatkowe i obszerne pomiary zostały wykonane również na Politechnice Gdańskiej w Polsce. Wskazano wstępną listę 16 opon (8 do zastąpienia opony ISO A i 8 do zastąpienia opony ISO D), a w fazie 1 programu zmniejszono ich liczbę do 4 dla każdej opony, w oparciu o korelację w pomiarach CPX, wykorzystując istniejące i nowe opony. Pomiary wykonano na wielu powierzchniach, zarówno zamkniętych, jak i porowatych. Poziomy CPX w projekcie Robust CPX zostały zmierzone za pomocą przyczepy (Rysunek 5) z mikrofonami w 7 miejscach wokół opony testowej (Rysunek 6), w tym dwie standardowe pozycje mikrofonów zgodne z normą ISO 11819-2. Następnie obliczono średnie poziomy hałasu. Standardowe pozycje mikrofonu osiągały dobre wyniki, gdy zmierzone poziomy w tych pozycjach zostały porównane ze średnimi poziomami.



Rysunek 5. Przyczepka M + P do badań metodą CPX



Rysunek 6. Pozycje mikrofonów

1.3. Metoda pomiaru hałaśliwości OBSI

1.3.1. Historycznie o pomiarach

Metoda pomiaru hałaśliwości przy użyciu OBSI (on-board sound intensity) została pierwotnie opracowana przez firmę General Motors (GM) w celu pomiarów hałaśliwości opon na testowych odcinkach pomiarowych firmy. Metoda OBSI umożliwia bezpośredni pomiar hałaśliwości na styku opony i nawierzchni drogowej i oparta jest na pomiarze natężenia dźwięku, które jest zdefiniowane jako ilość energii przepływającej na jednostkę czasu oraz jednostkę powierzchni które jest prostopadłe do kierunku propagacji fali dźwiękowej.

Akustyczna koncepcja intensywności dźwięku została opracowana w latach 80-tych, a wkrótce potem została wykorzystana przez dział badań firmy GM produkującej samochody do testowania hałasu pochodzącego z różnych opon na standardowej nawierzchni drogowej. W roku 2001 wydział Analizy Środowiska Departamentu Zarządzania Drogami w Kalifornii (Caltrans) rozpoczął poważnie przekształcać i udoskonalać tę metodę, używaną dotychczas do testowania cichych nawierzchni aby w 2004 roku nazwać ją ostatecznie OBSI. Od tego czasu stanowe wydziały zarządzania drogami oraz konsultanci wykazali zainteresowanie wykorzystaniem i udoskonalaniem tej metody testowania hałaśliwości.

Poniższa lista zawiera podsumowanie od kiedy poszczególne stany i agencje w USA zaczęły aktywnie używać metody OBSI:

- Kalifornia: rozpoczęła od ulepszeń metody OBSI w 2002 roku i używała metody do testowania nawierzchni dróg szybkiego ruchu w tym autostradowych i nawierzchni mostowych. Caltrans zawarł umowę z wiodącym konsultantem z dziedziny akustyki w OBSI oraz z Naukowym Centrum Zarządzania Nawierzchniami przy Uniwersytecie Kalifornijskim (University of California Pavement Research Center (UCRPC)), które rozpoczęło testowanie w 2005 roku.
- Teksas: wyposażył dwa testowe pojazdy w instrumenty OBSI w roku 2006: jeden dla departamentu/wydziału transportu a drugi w Centrum naukowo-badawczym na Uniwersytecie w Teksasie w Austin (Center for Transportation Research at UT Austin); badano tam poziomy hałaśliwości z uwzględnieniem agresywnych zabiegów powierzchniowych oraz różnych rodzajów nawierzchni używanych przez Departament/Wydział Transportu w Teksasie (TxDOT).

- Stan Waszyngton: rozpoczął testowanie w roku 2006. Stanowa agencja drogowa korzysta z pojazdów oraz personelu państwowego w celu przeprowadzania comiesięcznych testów na odcinkach, w których zbudowano ciche nawierzchnie.
- Stan Minnesota rozpoczął testowanie w 2007 r. testy były przeprowadzane na nawierzchni betonowej wykonanej w technologii szlifowania podłużnego na odcinku testowym zwanym MnRoad gdzie również były przeprowadzane badania nawierzchni elastycznych.
- Na Florydzie przeprowadzono badania porównawcze pomiędzy metoda OBSI a SPB w roku 2008.
- W stanie New Jersey zaczęto testować ciche nawierzchnie w roku 2009 skupiając się na mieszankach mineralno-asfaltowych, które są ciche i mogą być używane do prac utrzymaniowych.

Ilość urządzeń typu OBSI wzrosła z jednego w 2002r do 18 w roku 2011. Co najmniej 7 urządzeń typu OBSI jest używanych przez inżynierskie firmy konsultingowe oraz firmy akustyczne. Ponadto urządzenia OBSI pomimo iż w większości są używane przez amerykańskie agencje drogowe są także testowane i były używane w krajach Europejskich (Dania, Holandia, Francja, Belgia, Niemcy) oraz w Południowej Afryce i Australii.

Jak wspomniano wyżej na początku 2002 r. metoda pomiaru intensywności natężenia była szeroko stosowana w Kalifornii i Arizonie w celu skwantyfikowania nawierzchni generujących największą hałaśliwość na styku nawierzchni i opony (Kohler, E. 2011). Na bazie tych pomiarów została utworzona tzw. Baza Danych Intensywności Dźwięku na nawierzchniach (SI Database). Ogólnie rzecz biorąc, określa ona zakres hałaśliwości, jakiego można oczekiwać w przypadku różnych nawierzchni. Ciche nawierzchnie są identyfikowane poprzez pełen zakres pomiarów lub poprzez poszczególne kategorie. Baza danych jest wykorzystywana do zbadania różnic parametrów nawierzchni i powiązania ich z hałaśliwością oraz w procesie decyzyjnym dotyczącym różnych alternatyw obniżania hałaśliwości.

1.3.2. Odmiany/rodzaje metody OBSI

Istnieją dwie odmiany metody OBSI: z dwiema parami mierników natężenia dźwięku (dual probes) ustawionymi prostopadle do nawierzchni oraz z jedną parą mierników (single probe) zamontowaną równolegle do kierunku nawierzchni, oba rodzaje są montowane w prawym tylnym kole pojazdu testowego (2007 NITE Study).

Urządzenia o pojedynczym mierniku (single probe) składają się z dwóch mikrofonów usytuowanych w bliskiej odległości od siebie. Do pomiarów hałaśliwości na styku opony i nawierzchni potrzebne są dwie lokalizacje/umiejscowienia mierników natężenia: jedna naprzeciwko styku krawędzi wiodącej koła i druga na styku tylnej krawędzi koła. Miernik jest umiejscowiony w odległości około 75mm od nawierzchni drogowej oraz 100 mm z boku opony (Rysunek 7).

Pomiary są dokonywane osobno dla ustawienia instrumentu przy krawędzi wiodącej koła i osobno dla tylnej krawędzi koła, dlatego wymagane są przynajmniej dwa ważne przejazdy testowe. Przejazdy te są następnie uśredniane poprzez średnie energetyczne w celu uzyskania natężenia dźwięku dla danej opony lub nawierzchni. Zakres częstotliwości do badań w 1/3 pasma oktawy od 500 Hz to 5000 Hz.



Rysunek 7. Urządzenie OBSI o pojedynczym mierniku zainstalowane w piaście prawego tylnego koła pojazdu testowego

Urządzenie OBSI o podwójnym mierniku (dual probe) składają się z dwóch par mikrofonów natężeniowych usytuowanych w bliskiej odległości od siebie (209 mm), w odległości ok 76mm od krawędzi nawierzchni (licząc bez osłony przeciwwietrznej) zamocowanych na specjalnym stelażu montowanym do piasty koła (Rysunek 8), dodatkowo tak jak w przypadku miernika pojedynczego w skład zestawu pomiarowego OBSI wchodzi przetwornik analogowo/cyfrowy, komputer PC z oprogramowaniem do rejestracji i przetwarzania danych oraz okablowanie.



Rysunek 8. System OBSI zamontowany w piaście koła z dwoma miernikami natężenia i osłonami przeciwwietrznymi

Zestaw pomiarowy może być montowany na pojeździe elektrycznym EV (Rysunek 9), hybrydowym HEV, na ogniwa paliwowe FCEV oraz hybrydowym ładowanym z gniazdką elektrycznego PHEV. W przypadku wyboru pojazdu elektrycznego zasięg obecnie ograniczony jest do zaledwie około 120-200 km, z uwagi na ograniczoną pojemność akumulatorów. Aby móc przeprowadzić zaplanowaną kampanię pomiarową w sposób

nieprzerwany, taki pojazd elektryczny można transportować na lawecie samochodowej. Zaletą pojazdów HEV lub PHEV jest możliwość ręcznej aktywacji przez kierowcę trybu jazdy na silniku elektrycznym, co nie powoduje generowania hałasu od napędu. Tryb ten można by uruchamiać na czas prowadzenia pomiaru, a przy przemieszczaniu pojazdu pomiędzy odcinkami testowymi można używać silnika spalinowego i ładować akumulatory. Funkcjonalność ta w znaczącym stopniu ułatwia prowadzenie kampanii pomiarowych i umożliwia ominięcie konieczności transportu pojazdu pomiarowego na lawecie.



Rysunek 9. Zestaw pomiarowy OBSIe zamontowany na pojeździe EV, BMW i3

Obie metody instalacji zestawu pomiarowego OBSI skutecznie izolują różnice w propagacji dźwięku na styku opony i nawierzchni od innych źródeł dźwięku. Mogą one również służyć do szybkiego i skutecznego oceniania dużej liczby odcinków drogowych pod względem hałaśliwości nawierzchni, również w miejscach gdzie dostęp tradycyjna przyczepa CPX jest utrudniony (centra miejskie).

1.3.3. Opis metody i procedury badawczej

Jak opisano w rozdziale 1.3.2 zestaw pomiarowy OBSI składa się z co najmniej jednego miernika pomiaru intensywności dźwięku, przetwornika analogowo/cyfrowego, komputera PC z oprogramowaniem do rejestracji i przetwarzania danych oraz okablowania do zamontowania na/w pojeździe osobowym. W przeciwieństwie do pomiarów ciśnienia dźwięku za pomocą CPX, pomiar natężenia dźwięku wymaga wyznaczenie wektora. Dźwięk w tym przypadku promieniuje (rozchodzi się) od styku opony i nawierzchni w kierunku mierników natężenia. Każdy miernik zawiera dwa mikrofony. Przetwornik analogowo cyfrowy analizuje sygnał odebrany przez mikrofony i kalkuluje ciśnienie dźwięku oraz poziomy natężenia dźwięku w 1/3 pasmie oktawy z częstotliwością centralną w zakresie pomiędzy 400 Hz a 5000Hz.

Do pomiarów używana jest opona standardowa typu SRTT (Standard Reference Test Tire) zgodnie ze specyfikacją ASTM F 2493 zainstalowana z prawej tylnej strony pojazdu testowego (samochód osobowy). Procedura testowa/badawcza rozpoczyna się od zmiany opony na oponę SRTT już na miejscu (na odcinku testowym) tuż przed rozpoczęciem pomiarów. Zestaw mierników OBSI zostaje następnie zamontowany zgodnie z wytycznymi (Propozycja wytycznych prowadzenia pomiarów hałaśliwości nawierzchni dla metody OBSI) w piąście koła z oponą SRTT. Mikrofony umieszczone w miernikach muszą być kolejno

skalibrowane przed rozpoczęciem pomiarów. Temperatura powietrza, ciśnienie opon oraz temperatura nawierzchni zostają zarejestrowane (zgodnie z wytycznymi) tuż przed rozpoczęciem pomiarów. Gdy czynności wstępne są wykonane poprawnie wówczas pojazd testowy zostaje wprowadzony do prędkości testowej (48, 72, 84 lub 97 km/h), przy wyborze odcinka testowego trzeba wziąć pod uwagę fakt iż odcinek musi mieć wystarczającą długość aby pojazd testowy mógł bezpiecznie rozpędzić się do wymaganej prędkości (szczególnie ważne przy badaniach w prędkościach powyżej 84km/h).

Przetwornik analogowo cyfrowy jest aktywowany zaraz po starcie pojazdu testowego, na początku odcinka testowego, kalkuluje on i zapisuje natężenie dźwięku we wskazanym przedziale czasu, przeważnie przez 5 sekund. Pięć sekund przy prędkości 97km/h daje standardową długość odcinka równą 134 metry, używaną przez większość użytkowników OBSI. Zazwyczaj wykonywane są trzy przejazdy przy tej samej prędkości, i parametrach początkowych (temperatura, ciśnienie opon, itd.) na tej samej nawierzchni. Po spełnieniu kryteriów ważności (wyznaczone przez oprogramowanie do pomiarów OBSI zainstalowane na komputerze podłączonym do zestawu pomiarowego) przejazdy są następnie uśredniane. Redukcja danych polega na połączeniu pomiarów dla części przodującej koła z częścią tylną (tocząca) na styku opony i nawierzchni (dla metody z podwójnym miernikiem), uśrednianiu przejazdów, oraz redukowaniu zawartości widma lub częstotliwości do pojedynczego pomiaru, będącego ogólnym poziomem natężenia z danego przejazdu. Interpretacja wyników jest dokonywana na podstawie widm dźwięku oraz poziomów natężenia uzyskanych w wyniku odpowiedniej interpretacji pomiarów.

Procedura badawcza przyjęta do badań hałaśliwości za pomocą podwójnego miernika natężenia dźwięku OBSI oparta jest na doświadczeniu innych krajów oraz normie amerykańskiej AASHTO: T 360-16. W oparciu o przegląd literatury światowej oraz własne doświadczenia, zostały opracowane wytyczne do badań OBSI umieszczone w dokumencie pt.: Propozycja wytycznych prowadzenia pomiarów hałaśliwości nawierzchni dla metody OBSI.

Badania hałasowości w tym projekcie były wykonywane przy użyciu podwójnego miernika natężenia przy prędkościach 48, 72, 84 i 97 km/h. Opona testowa typu Michelin/Uniroyal SRTT z ciśnieniem 30 psi podczas tzw. „zimnego” stanu napompowania. Ford Mondeo 2011 był użyty jako testowy do badań hałaśliwości metodą OBSI. Użycie podwójnego miernika natężenia dźwięku pozwala na mierzenie natężenia w obu pozycjach (na krawędzie przodującej i tylnej) w tym samym czasie. Warunki bazowe przyjęte podczas pomiarów dla każdego typu nawierzchni przy użyciu opony normowej SRTT zostały sformułowane i zastosowane zgodnie z wytycznymi umieszczonymi w dokumencie pt.: Propozycja wytycznych prowadzenia pomiarów hałaśliwości nawierzchni dla metody OBSI.

2. CZYNNIKI WPLYWAJACE NA POMIARY HAŁAŚLIWOŚCI

2.1. Metoda SPB

Metoda SPB polega na pomiarze maksymalnego poziomu dźwięku dla pojazdów przejeżdżających pojedynczo. Metoda ta daje możliwość odniesienia jej wyników

bezpośrednio do klimatu akustycznego otoczenia drogi. W literaturze krajowej występuje wiele publikacji na temat pomiarów hałaśliwości nawierzchni metodą SPB. Autorami większości tych prac na terenie Polski jest zespół Politechniki Białostockiej oraz zespół Politechniki Gdańskiej. W wyniku ich prac powstało wiele publikacji pokazujących wyniki badań na nawierzchniach betonowych (W. Gardziejczyk, et al., 2014) i nawierzchniach bitumicznych (W. Gardziejczyk, 2014), (W. Gardziejczyk, et al., 2012) (W. Gardziejczyk, et al., 2008). W wyniku prac badawczych zespołu badawczego Politechniki Gdańskiej i Białostockiej powstała klasyfikacja nawierzchni pod względem hałaśliwości według Prof. Ejsmonta i Prof. Gardziejczyka (W. Gardziejczyk, et al., 2008).

Klasa	Poziom hałasu toczenia, dB	
	CPXI	SPB
NC	poniżej 93,5	poniżej 73
ZH	93,5-96,4	73-75,9
NH	96,5-99,5	76-79
PH	99,6-102,5	79,1-82
NNH	powyżej 102,5	powyżej 82

Tabela 1. Klasyfikacja nawierzchni pod względem hałaśliwości według Prof. Ejsmonta i Prof. Gardziejczyka (Gardziejczyk et al., 2008)

gdzie:

NC- nawierzchnie ciche

ZH- nawierzchnie o zredukowanej hałaśliwości

NH- nawierzchnie o normalnej hałaśliwości

PH- nawierzchnie podwyższonej hałaśliwości

NNH- nawierzchnie o nadmiernej hałaśliwości

W latach 2004 i 2005 Instytut Badawczy Dróg i Mostów na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad wykonał badania właściwości akustycznych nawierzchni drogowych. W badaniach brała udział Politechnika Białostocka. W wyniku tego raportu powstała klasyfikacja nawierzchni pod względem hałaśliwości (Sybilski et al., 2005).

2.1.1. Parametry urządzenia

W badaniach opisywanych przez (Kuemmel et al., 2000), w odróżnieniu od standardowych warunków pomiaru metodą SPB, zastosowano dwa mikrofony oddalone od siebie o 61 m (200 ft) wzdłuż drogi. Wg autorów takie rozmieszczenie mikrofonów eliminuje błędy pomiarowe związane ze zmianą zachowań kierowców w punkcie pomiaru, zmianami terenu oraz niekontrolowanymi błędami pomiarowymi. Ponadto wskazano, że umieszczenie mikrofonów w odległości 7,6m (25 ft) od środka pasa ruchu, w odróżnieniu od stosowanej powszechnie w Ameryce odległości 15,2 m (50 ft), poprawia stosunek sygnału do szumu o 5 dBA, w sytuacji jednoczesnego mijania się pojazdu kontrolowanego z pojazdem jadącym w przeciwnym kierunku.

2.1.2. Parametry opon

Metoda SPB nie pozwala na bezpośredni pomiar hałaśliwości opony. W metodzie tej mierzone są pojedyncze pojazdy w potoku ruchu o różnym stanie opon i ich rodzaju. Nie można określić wartości dla poszczególnych opon ze względu na brak danych o ogumieniu w pojazdach przejeżdżających przez dany przekrój. Położenie mikrofonu również wpływa na brak możliwości odniesienia rodzaju opony do wyników pomiaru. Mikrofony położonych jest 7,5 m od osi analizowanego pasa i na wysokości 1,2 m od powierzchni tego pasa. Zjawisko to opisane jest w (W. Gardziejczyk et al., 2011).

W artykule (Kumar et al., 2011) zaprezentowano wyniki badań wpływu rozmiaru opon na poziom hałasu. Pomiary hałasu przeprowadzono metodą Coast-By przy wykorzystaniu 14 modeli opon z kategorii C1 (wg UNECE R-30) na dwóch odcinkach: autostradowych oraz na nawierzchni testowej zgodnej z ISO 10844. Badania wykonano według normy ISO 13325:2003, a wyniki przeliczono zgodnie z dokumentem UNECE R117. W wyniku badań stwierdzono, że wraz ze zwiększaniem szerokości opony wzrasta hałas generowany na styku opony i nawierzchni. Średni wzrost hałasu dla odcinka autostradowego wyznaczono na 0,973dB/10mm oraz 0,916dB/10mm na nawierzchni testowej. W zakresie badań korelacji pomiędzy poziomem hałasu a średnicą opony nie osiągnięto spójnych wyników dla wszystkich testowanych opon. Dla wyników spójnych określono spadek poziomu hałasu wraz ze wzrostem średnicy opony wynoszący 0,1459dB/10mm dla autostrady oraz 0,0272/10mm dla nawierzchni testowej.

2.1.3. Parametry otoczenia

W artykule opisano sposób korekcji wyników badań hałasu w odniesieniu do referencyjnej temperatury powietrza 20°C (Bergiers, Visscher, Denolf, Destree, & Vuye, 2014). Dla pomiarów przeprowadzonych w zakresie temperatur od 5 do 30°C stosuje się poprawkę -0,1 dB(A)/°C. Dla przykładu, poziomu dźwięku 75 dB(A) zarejestrowany w temperaturze 15°C przyjmie wartość 74,5 dB(A) w temperaturze odniesienia 20°C.

W artykule (Kneib, Belcher, Beckenbauer, & Beyeler, 2016) opisano wyniki dwuletniego programu badawczego polegającego na ciągłej rejestracji hałasu oraz pomiarów właściwości warstwy ściernalnej dla dwóch nawierzchni testowych w Szwajcarii. Do pomiarów użyto automatycznej stacji typu Müller-BBM Inomos z mikrofonami zlokalizowanymi na wysokości 5m i w odległości 7,5m od środka prawego pasa ruchu. Nawierzchnie testowe stanowiły mieszanki mineralno - asfaltowe o maksymalnym uziarnieniu 8 mm i zawartości wolnych przestrzeni 12% (SDA 8-12) oraz 16% (SDA 8-16). Odcinki zlokalizowane były jeden przy drugim na odcinku autostradowym. Ponieważ pomiary prowadzone były w sposób ciągły w ciągu roku, możliwa była analiza wpływu warunków środowiskowych na wartość rejestrowanego hałasu, w szczególności temperatury powietrza i siły wiatru. W odniesieniu do temperatury referencyjnej 20°C, średni poziom hałasu dla mieszanki SDA 8-12 wzrósł o 2,2 dB(A), a dla mieszanki SDA 8-16 o 2,7 dB(A). Stwierdzono również, że na skutek zmian kierunku wiatru, różnice pomiędzy średnimi miesięcznymi poziomami hałasu mogą się zawierać w przedziale 3 dB(A). Rozpatrywana siła wiatru wynosiła od 1,5 do 8 m/s.

Ze względu na występowanie barier na autostradach niemieckich, BAST rozszerza metodę SPB o lokalizację mikrofonów również na wysokościach 2,4m, 3,6m i 4,8m. Pomiary meteorologiczne (temperatura powietrza i powierzchni nawierzchni, kierunek i prędkość

wiatru) mierzone są poza drogą na wysokości 2,4m. Jeżeli temperatura powietrza różni się od 20°C stosowana jest następująca korekta:

$$L' = L + K_T (20^\circ\text{C} - T_{air})$$

gdzie:

L' – skorygowany maksymalny poziom dźwięku, dB(A)

L – zarejestrowany maksymalny poziom dźwięku, dB(A)

K_T – współczynnik korekcji temperatury: 0,05dB/°C

T_{air} – temperatura powietrza, °C.

W przypadku gdy pomiary wykonywane są na innej niż ustalona w normie wysokości stosuje się następującą korektę temperaturową:

$$L' = L + K_H \left(\frac{h}{d} - \frac{1,2}{7,5} \right)$$

gdzie:

L' – skorygowany maksymalny poziom dźwięku, dB(A)

L – zarejestrowany maksymalny poziom dźwięku, dB(A)

K_H – współczynnik korekcji temperatury: 5dB

h – wysokość mikrofonu ponad powierzchnią jezdni

d – pozioma odległość pomiędzy mikrofonem a środkową osią pojazdu.

Dla dróg o wysokim natężeniu ruchu stosowana jest metoda matrycy mikrofonów (Array) Polega na użyciu sześciu mikrofonów zlokalizowanych wzdłuż drogi w różnych odległościach względem siebie. Dzięki temu źródła hałasu zlokalizowane w odległości 10m względem siebie mogą być odseparowane.

W obszarach zurbanizowanych stosowana jest metoda Backing Board, BB. Jest to modyfikacja metody SPB opisana w ISO/PAS 11819-4:2013. Zasada pomiaru polega na zastosowaniu płyty izolującej, osłaniającej mikrofon w płaszczyźnie zewnętrznej względem źródła hałasu i tym samym eliminującej hałas niebędący przedmiotem pomiaru. Ze względu na zmianę geometrii obszaru, z przestrzeni na półprzestrzeń, stosowany jest następujący współczynnik korekcyjny:

$$L' = L + K_B$$

gdzie:

L' – skorygowany maksymalny poziom dźwięku, dB(A)

L – zarejestrowany maksymalny poziom dźwięku, dB(A)

K_B – współczynnik płyty izolującej: $20 \log(2) = 6 \text{ dB(A)}$.

Wymogi normy ISO ograniczają maksymalną dopuszczalną prędkość wiatru podczas pomiaru do 5 m/s na wysokości lokalizacji mikrofonu tj. 1,2 m (Bartolomaeus, 2013).

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu prędkości wiatru na poziom rejestrowanego dźwięku. W ramach pracy wykonano analizy obliczeniowe oraz symulacyjne, które zweryfikowano w warunkach polowych. W rezultacie w przypadku mikrofonu zlokalizowanego na wysokościach 1,2 m (zgodnie z SPB) oraz 3,0 m wykazano pomijalnie mały wpływ wiatru na wyniki pomiarów. Dla prędkości wiatru wynoszącej 5 m/s i mikrofonu

zlokalizowanego na wysokości 1,2m nad powierzchnią gruntu, w wyniku obliczeń analitycznych wpływ wiatru określono na poniżej 0,4 dB.

2.2. Metoda CPX

2.2.1. Parametry opon

Różne badania dostarczyły dowodów, że starzeniu opon towarzyszą znaczące i ciągle zmiany właściwości emisji hałasu (Bühlmann, Schulze, & Ziegler, 2013). Dlatego przy dokonywaniu pomiarów hałasu przy użyciu metody CPX należy wziąć pod uwagę zmieniający się stan opon referencyjnych. Dokładne rozpoznanie efektów starzenia i ich wpływu na poziom emisji hałasu wymaga, aby poszczególne zestawy opon referencyjnych były monitorowane w czasie. Opony referencyjne muszą być wymieniane w regularnych odstępach czasu. Projekt normy dla opon referencyjnych ISO/TS 11819-3 określa marginesy dla maksymalnej twardości gumy i maksymalnej ścieralności bieżnika. Czas między pierwszym użyciem opony a wymianą może być jednak bardzo różny. Zależy od właściwości materiału opony, czasu i warunków przechowywania, a także od czasu użytkowania, intensywności i odpowiednich warunków środowiskowych.

Liczne badania wykazały, że temperatura jest ważnym, jeśli nie najważniejszym czynnikiem wpływającym na starzenie się gumy. Temperatury opon podczas pomiarów są znacznie wyższe niż temperatura otoczenia. Biorąc pod uwagę średnią temperaturę 20,3°C dla temperatury powietrza i 34,1°C dla temperatury opon, różnica ta wynosi średnio prawie 14°C. Chociaż wydaje się banalne, że wysokie temperatury nawierzchni powodują podwyższone temperatury opon, to zmierzono również temperatury opon, które przewyższają temperatury nawierzchni drogi w kilka zimnych dni pomiarowych we wczesnych i późnych sezonach pomiarowych. Oznacza to, że podwyższona temperatura opon, zarówno ze względu na wysokie temperatury powierzchni drogi, jak i wytwarzane ciepło z siły tarcia między nawierzchnią a oponami, może stanowić ważny czynnik przy badaniu starzenia się opon.

Badania CPX wykonane na początku i na końcu sezonu pomiarowego wykazały dla obu opon wzrost hałasu o 0,9 dB, co w odniesieniu do twardości opon oznacza: zwiększenie się poziomu hałasu o 0,3 dB/jednostkę Shore A dla opony SRTT i o 0,15 dB/jednostkę Shore A dla opony Avon AV4 (Bühlmann, Schulze, & Ziegler, 2013).

Różnice te można wytłumaczyć znacznie odmiennym układem rzeźby bieżnika i prawdopodobnymi rozbieżnościami w ich materiałach. Dane sugerują, że potrzebne jest indywidualne podejście do opon referencyjnych CPX SRTT i Avon AV4, przy korygowaniu poziomu hałasu w odniesieniu do twardości opony.

W publikacji (Berge, 2013) opisano wyniki badań metodą CPX, z prędkością 80 km/h, na 40 różnych oponach (w tym 2 oponach referencyjnych SRTT), na 10 różnych nawierzchniach drogowych. Wyciągnięto następujące wnioski z przeprowadzonych badań:

- przy porównywaniu 40 opon występuje rozrzut poziomu hałasu o wartości około 4-5 dB (A) na wszystkich mierzonych powierzchniach,
- ranking hałasu opon jest ogólnie dość podobny na wszystkich nawierzchniach,
- maksymalna różnica poziomu hałasu pomiędzy najgłośniejszą oponą na najgłośniejszej nawierzchni drogi (SMA16) a najcichszą oponą na najcichszej nawierzchni drogi (DAC6) wynosi około 8 dB; wskazuje to na potencjalną redukcję hałasu jeśli

zastosowano optymalną kombinację opony i nawierzchni, mimo że w tym porównaniu nie uwzględniono nawierzchni porowatych,

- pomiary na 4 oponach całorocznych i 5 oponach zimowych (bez kolców) wykonywano w temperaturach około 14-19°C, czyli poza normalnym zakresem temperatur dla tego typu opon; wyraźnie wpływa to na względnie niski poziom hałasu zmierzony dla tych opon,
- wyniki pomiarów na powszechnie używanych norweskich nawierzchniach drogowych wskazują, że stosowanie jako opony referencyjnej w metodzie CPX opony Uniroyal Tigerpaw ASTM SRTT jest dobrą propozycją.

Wyniki badania CPX zależą od zmian właściwości opon referencyjnych. (Schubert, Mannel, Ertsey, & Hoever, 2016). Aby zapewnić stałą jakość i porównywalność pomiarów CPX, należy uwzględnić zmienność akustycznie istotnych właściwości opon referencyjnych w celu zmniejszenia niepewności pomiaru. W związku z tym, aby zapewnić porównywalność, norma ISO 11819-3 określa wartości twardości, które mają być sprawdzane w regularnych odstępach czasu i porównywane z wartościami normatywnymi. Zgodnie z doświadczeniem autorów w pomiarach CPX, określenie twardości Shore'a opon nie jest wystarczające do opisanie ich istotnych właściwości akustycznych. Wyniki badań autorów pokazują konieczność korekty poziomu hałasu do 0,14 dB na jeden stopień Shore A w celu uwzględnienia odchyłeń od twardości odniesienia wynoszącej 66 Shore A. Niemniej jednak wartość korekcji powinna być dostosowana do rodzaju nawierzchni drogi, a niektóre wyniki nie wykazują w ogóle korelacji między poziomem dźwięku i twardością opon.

Jako alternatywny proces mierzono mobilność różnych opon referencyjnych. Na podstawie wyników przeprowadzono symulacje hałasu toczenia. Porównanie wyników pomiarów spektralnych z wynikami symulacji pokazuje, że oba są całkiem zbieżne. Ranking akustyczny był taki sam dla obu pomiarów i obliczeń, a zmiany w widmach były porównywalne. W oparciu o te wyniki zostaną podjęte dalsze badania w celu poprawy jakości i porównania pomiarów CPX w oparciu o pomiary mobilności opon.

(Sandberg, Buhlmann, Conter, Mioduszewski, & Wehr, 2016) przedstawia procedurę normalizacji opony ze względu na twardość gumy. Istotą tej procedury jest zależność:

$$H_A = H_{A, \text{ zmierzone}} + 0.25(T_{\text{zmierzone}} - 20)$$

gdzie:

$H_{A, \text{ zmierzone}}$ – twardość gumy zmierzona w przedziale temperatur 15°C-25°C

$T_{\text{zmierzone}}$ – temperatura pomiaru twardości gumy 15°C-25°C

Autorzy zwracają uwagę na to, że problemem jest utrzymanie stabilności pomiarów przez wzrost twardości gumy opony w czasie. Proponowane rozwiązanie tego problemu to wprowadzenie procedury korekty wyników do „twardości referencyjnej”:

$$C_{HA,t} = \beta t(H_A - H_{ref})$$

gdzie:

$C_{HA,t}$ poziom korekcji CPX ze względu na efekt twardnienia gumy

H_A – twardość gumy zmierzona

H_{ref} – referencyjna twardość gumy

β_t – współczynnik twardości gumy opony t

Innym zagadnieniem podnoszonym przez autorów jest kwestia korekty temperaturowej, która powinna być następująca:

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

gdzie:

$C_{T,t}$ poziom korekcji CPX ze względu na temperaturę pomiaru

T – temperatura powietrza

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

γt – współczynnik temperaturowy opony t , który w zależności od rodzaju badanej powierzchni może być następujący:

$\gamma_{P1,H1} = -0.14 + 0.0006 v$ – dla gęstych mieszanek asfaltowych

$\gamma_{P1,H1} = -0.10 + 0.0004 v$ – dla betonu cementowego

$\gamma_{P1,H1} = -0.08 + 0.0004 v$ – dla porowatych nawierzchni z mieszanek asfaltowych

v – predkość pomiaru

P1, H1 oznaczają typy opon

(Conter et al., 2016) przedstawia nowe procedury oceny hałasu, które zostały ujęte w trzech kategoriach: kategoryzacja akustyczna (acoustic labelling), zgodność produkcji (conformity of production) oraz monitoring. W procedurach tych stosuje się dwa rodzaje opon: opona P dla pojazdów osobowych oraz opona H dla pojazdów ciężarowych.

(Wehr & Fuchs, 2016) przedstawia różne metody korekcji hałaśliwości LCPX ze względu na temperaturę i twardość opony:

$$L_{CPX}^{shoreA} = L_{CPX} - \alpha (H_A^{T_{ref}} - H_A^{ref})$$

gdzie $H_A^{T_{ref}}$ twardość Shora typu A w temperaturze referencyjnej $T_{ref}=20^{\circ}\text{C}$ i referencyjnej twardości Shora typu A H_A^{ref} (np. 66 dla opony P1 ASTM SRTT), współczynnik α 0,10 do 0,3 dB. W przedstawionej analizie porównuje trzy metody korekcji danych: standardową (zgodnie z ISO/CD TS 11819-3 z korektą twardości według (Bühlmann, Schulze, & Ziegler, 2013)), twardości opony i temperatury powietrza (jako niezależne zmienne) oraz temperatury opony pomiarowej (wyznaczona twardość opony przy temperaturze pomiaru). Uzyskane wyniki nie wykazują istotnych różnic nie mniej należy zaznaczyć za autorem, że bazowano na pomiarach wykonanych w bardzo zbliżonych warunkach zewnętrznych. Warto zwrócić uwagę na rozkład nieskorygowanych danych uzyskanych dla opon w różnym wieku (1-9 lat) (rys. 2). Autor podaje zależność liniową hałasu i twardości. Wyniki przedstawione w tym artykule są częścią projektu ROSANNE.

2.2.2. Parametry otoczenia

Wśród badaczy nie ma wątpliwości (Bühlmann & Blokland, 2014), że temperatura jest znaczącym źródłem zmienności podczas przeprowadzania pomiarów hałasu generowanego przez opony poruszające się po drodze. Jednak wielkość tego efektu jest nadal przedmiotem dyskusji. W literaturze zauważamy, że efekt może być nawet dwukrotnie większy niż wcześniej zakładano i poprawiono w międzynarodowych standardach. Efekt jest złożony i nie poddaje się łatwej weryfikacji empirycznej, prowadząc do sprzecznych sprawozdań z badań. Omawiany artykuł ma na celu rzucić światło na kontrowersje dotyczące przeglądu badań

empirycznych na ten temat, różnicując metody badań i koncepcyjne podstawy podejść stosowanych do gromadzenia i analizy danych.

Spośród analizowanych wyników 17 programów badawczych większość skupiała się na izolowanych pomiarach hałasu: metodą CPX (n=5), metodą OBSI (n=4), metodą CPB (n=4). W mniejszej liczbie prac wykorzystano całkowitą emisję hałasu w ruchu drogowym (w tym składową hałasu silnika), stosując metodę statystycznego przejazdu SPB (n=1) lub LAeq (n=2).

Niezawodna kwantyfikacja efektów temperaturowych wymaga przeprowadzenia szeregu identycznych pomiarów w szerokim zakresie temperatur. Około połowa analizowanych badań (n=8) dotyczyła pomiarów przeprowadzonych w różnych porach roku. Aby uniknąć zanieczyszczenia danych przez zmianę właściwości powierzchni toru testowego i opon, w niektórych badaniach (n=4) wybrano konfigurację pomiaru, umożliwiającą przeprowadzenie serii pomiarów w ciągu jednego dnia. W większości badań (n=15) zarejestrowano temperaturę powietrza, w 11 badaniach odnotowano również temperaturę powierzchni drogi w torze kół, a w 5 przypadkach rejestrowano dodatkowo temperaturę bieżnika opony za pomocą czujników podczerwieni lub sond. W 2 badaniach odnotowano tylko temperaturę powierzchni drogi.

Chociaż wszystkie badania wpływu temperatury obejmowały pomiary na nawierzchniach o strukturze zamkniętej (n=17), znaczną liczbę pomiarów wykonano również na nawierzchniach porowatych (n=5) i betonowych (n=6). Efekty temperaturowe zostały ocenione dla różnych opon samochodów osobowych i niektórych opon do samochodów ciężarowych. Szczególny nacisk położono na standardową referencyjną oponę testową SRTT, która stanowi proponowaną oponę wzorcową do samochodów osobowych w standardach OBSI i CPX (n = 8). Tylko w jednym badaniu oceniło oponę Avon AV4 (proponowana opona referencyjna dla ciężkich pojazdów w standardzie CPX). W czterech badaniach analizowano wpływ temperatury na opony ciężarowe o pełnym wymiarze. Efekty temperaturowe zostały ocenione dla prędkości w zakresie od 50 do 140 km/h.

Ważnym pytaniem jest, która temperatura powinna być preferowana jako podstawa do korekty. Wielu autorów przeanalizowało współzależność między temperaturą powietrza, powierzchni drogi i bieżnika opony. W zdecydowanej większości przypadków ustalono silne zależności dające współczynniki determinacji R^2 między 0,75 a 0,95. Z przyczyn praktycznych temperatura powietrza najczęściej była preferowaną temperaturą do korelacji z poziomem hałasu. Ponadto zastosowanie temperatury powietrza ma tę zaletę, że jest mniej wrażliwe na promieniowanie słoneczne (a tym samym na zmienne zachmurzenie, cień lub kolor nawierzchni drogi) niż temperatura powierzchni drogi czy temperatura opon. Dlatego też podstawą do korekty powinna być temperatura powietrza.

Większość autorów stwierdza, że wpływ temperatury na hałas to zjawiska zasadniczo liniowe. Wydaje się, że jest tak w przypadku przedziału temperatur między 5°C a 30°C. Dlatego w rozważanych badaniach oceniano jedynie zależności liniowe, stosując następującą formułę:

$$LA(20^{\circ}\text{C}) = LA(T) + \beta(20 - T)$$

gdzie:

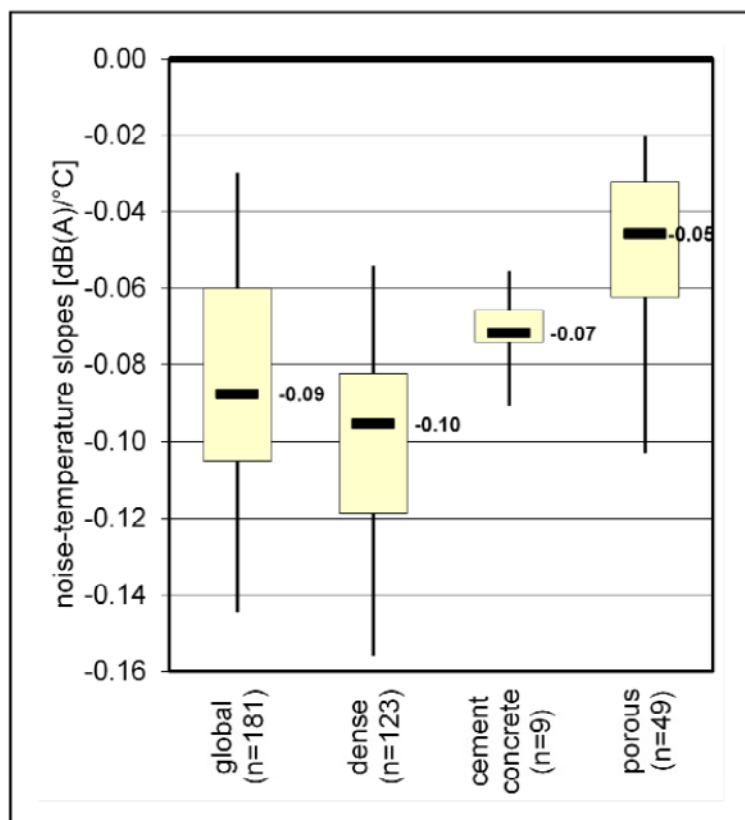
LA jest poziomem A ważonego hałasu w dB (A),

T jest temperaturą powietrza w °C,

β współczynnikiem korekty temperaturowej dB (A)/°C.

Statystyczna ocena danych z literatury potwierdza, że w przypadku nawierzchni o strukturze zamkniętej należy zastosować współczynnik korekcji temperatury o około dwukrotnie większej niż wcześniej przyjęto i wdrożony w międzynarodowych normach i przepisach. Ponadto różnice mediany dla betonu cementowego i powierzchni porowatych pokazują, że zastosowanie jednego ogólnego współczynnika korekty jest niewystarczające. Proponowane na podstawie przeprowadzonej analizy współczynniki korekcyjne dobrze korespondują z tymi przedstawionymi przez dużą liczbę autorów w literaturze.

Te same współczynniki można zastosować w przypadku opon referencyjnych określonych w normach międzynarodowych (SRTT i Avon AV4), ponieważ maksymalne odchylenie od wartości mediany przedstawionych na rysunku 1 wynosi 0,01 dB (A)/°C. Jedynym wyjątkiem był Avon AV4 na nawierzchniach porowatych, gdzie uzyskano współczynnik -0,08 dB (A)/°C zamiast -0,05 dB (A)/°C (Rysunek 10). Zrewidowane dane sugerują, że proponowane współczynniki korekcyjne można stosować dla wszystkich metod pomiarowych (OBSI, CPX, CPB, SPB i Leq), gdy hałas generowany na styku opony i drogi stanowi główny czynnik. Jednak przy korekcie pomiarów SPB i Leq dla prędkości niższych niż 50 km/h, wielkość współczynników korekcyjnych może być nieco mniejsza (ze względu na większy składnik hałasu napędowego).



Rysunek 10. Wyniki analizy statystycznej współczynników korekty temperaturowej

Na podstawie zweryfikowanych danych empirycznych z 17 projektów badawczych zaproponowano współczynniki korekty temperaturowej:

- dla nawierzchni o strukturze zamkniętej: -0,10 dB (A)/°C
- dla betonu cementowego: -0,07 dB (A)/°C,

- dla nawierzchni porowatych: $-0,05 \text{ dB (A)/}^{\circ}\text{C}$.

W projekcie ROSANNE grupa robocza nr 4 zajmowała się wpływem tekstury, opon referencyjnych i cech powierzchniowych (Bergiers & Maeck, 2016). Jednym z celów jest zbadanie wydajności różnych opon referencyjnych, w celu ustalenia ich powtarzalności i stabilności w czasie. W świetle opracowywania normy ISO/TS 11819-3 dotyczącej opon referencyjnych przeprowadzono badania w celu uzupełnienia brakujących danych. Pomiary CPX zostały powtórzone z nowymi oponami P1 i H1 w różnych kilometrach na 10 nawierzchniach drogowych w celu zweryfikowania wpływu docierania. Dodatkowo wykonano pomiary z trzema zestawami opon P1 aby zweryfikować odtwarzalność. Wpływ kierunku montażu nowych opon P1 został zweryfikowany na porowatym asfalcie lanym w celu uzupełnienia dostępnych badań.

Grupa robocza nr 2 zajmowała się metodami pomiaru właściwości emisji hałasu. Jednym z zadań jest określenie wpływu temperatury i wprowadzenie ew. korekt. W ramach opracowywania normy ISO/TS 13471-1 o korekcji temperatury dla metody CPX przeprowadzono kampanię pomiarową na porowatej nawierzchni drogowej. Przeprowadzono 24 pomiary z oponą P1 w zakresie temperatur powietrza od 9 do 22°C.

W wyniku przeprowadzonych badań zalecono wykonywanie 400 km docierania przed użyciem opon testowych do wykonania pomiarów CPX. Co więcej, znaczenie docierania wydaje się być większe w przypadku nawierzchni redukujących hałas.

Uznano, że potrzebne są dalsze badania w celu zweryfikowania możliwej zmiany uzyskiwanych wyników na oponie referencyjnej P1, po wprowadzeniu oznaczenia kierunku obrotów za pomocą strzałki, na ostatnio produkowanych oponach. Należy zbadać, czy poprzednie i nowe opony P1 i ich zmieniona pozycja montażowa dla opon lewych (zgodnie z oznaczeniem kierunku obrotu lub zgodnie z mikrofonami skierowanymi w stronę DOT) utrudnia porównanie między starymi i nowymi pomiarami. Zaleca się wykonanie testu w warunkach kontrolowanych w laboratorium na bębnie, aby uzupełnić tę pracę. W każdym przypadku pokazano znaczenie kierunku montażu, szczególnie w przypadku ostatnich opon P1 ze znakiem strzałki. Zaleca się wyraźne określenie tego w opracowywanym standardzie.

Stwierdzono, że powtarzalność opon P1 daje dobre korelacje. Ranking nawierzchni od cichego do hałaśliwego jest taki sam przy stosowaniu różnych zestawów opon i przy wykluczeniu sekcji niehomogenicznych w złym stanie technicznym. Podano, że przestrzeganie kierunku obrotu wskazanego za pomocą oznaczenia strzałki na ostatnich oponach P1 daje najlepsze porównanie wartości bezwzględnych z poprzednimi oponami P1 bez oznakowania strzałką. Największe różnice między zestawami opon stwierdzono w przypadku nawierzchni najbardziej redukujących hałas.

Przeprowadzono badania korekcji temperatury dla pomiarów CPX na nawierzchni porowatej. Uzyskano współczynnik korekcji temperatury $-0,07 \text{ dB (A)/}^{\circ}\text{C}$, w odniesieniu do temperatury powietrza. Efekt temperaturowy jest najbardziej widoczny przy częstotliwościach 400-800 Hz i 2000-5000 Hz.

Temperatura powietrza i nawierzchni, a także temperatura opon, znacząco wpływają na emisję hałasu generowanego na styku opony z nawierzchnią. Naukowcy badający tę problematykę znaleźli dość dobrą korelację między emisją hałasu a temperaturą (Mioduszewski, Taryma, & Wozniak, 2014). Ze względów praktycznych do korekty wyników badań wybrano temperaturę powietrza.

Pomiary hałasu przy użyciu metody SPB i CPX należy wykonywać, gdy temperatura otoczenia mieści się w zakresie od 5° C do 30° C zgodnie z odpowiednimi normami ISO. Rejestracja temperatury powietrza jest obowiązkowe dla obu metod. Zalecane jest również

mierzenie temperatury powierzchni drogi. Uzyskane poziomy ciśnienia akustycznego powinny być znormalizowane do temperatury odniesienia 20°C. Jednak procedury korekcyjne są nadal rozważane i przygotowywane. Przyjmuje się, że zależność między hałasem a temperaturą jest zasadniczo zjawiskiem liniowym, a wzór korekcji temperatury można opisać w następujący sposób:

$$L_{A(20^{\circ}\text{C})} = L_{A(T)} - CT_t \cdot (T - 20^{\circ}\text{C})$$

gdzie:

$L_{A(20^{\circ}\text{C})}$ - poziom dźwięku w dB znormalizowany do temperatury odniesienia 20°C,

$L_{A(T)}$ - poziom dźwięku rejestrowany w temperaturze T,

CT_t - współczynnik korekcji temperatury.

Według publikacji dotyczących tego zagadnienia współczynniki korekcji temperatury mieszczą się w zakresie od -0,001 dB/°C do -0,14 dB/°C. Grupa robocza Międzynarodowej Organizacji Normalizacyjnej zajmująca się normalizacją metody korygowania wpływu temperatury na pomiary hałasu zaproponowała następujące współczynniki korekcji względem temperatury, takie same dla metody SPB i CPX:

-0,10 dB / °C dla nawierzchni asfaltowych zamkniętych,

-0,05 dB / °C dla nawierzchni asfaltowych porowatych,

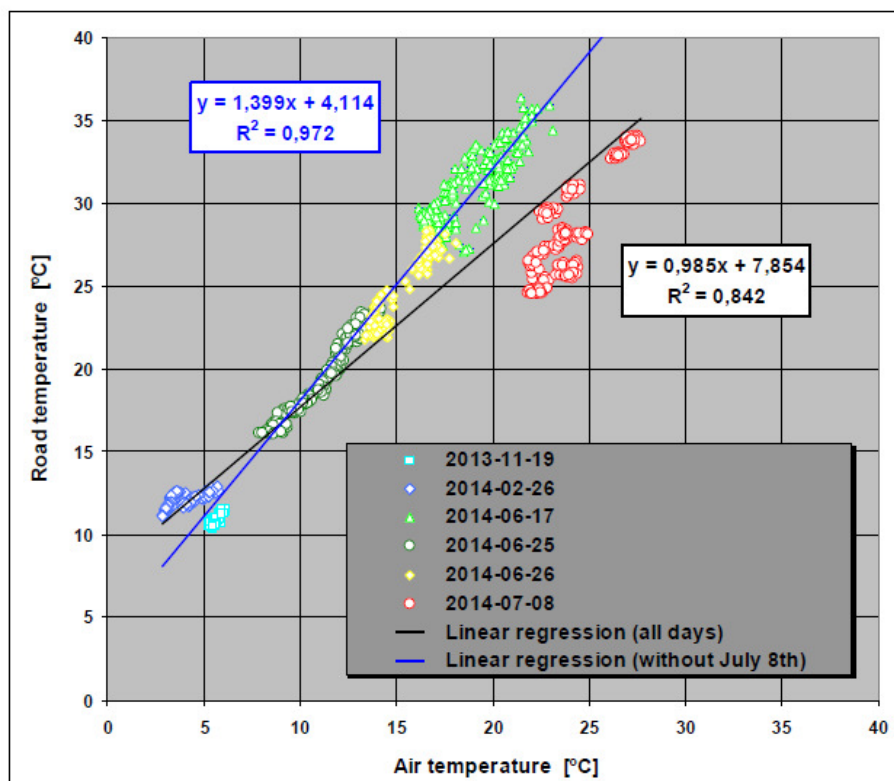
-0,07 dB / °C dla nawierzchni z betonu cementowego.

Wpływ temperatury na emisję hałasu jest również jednym z głównych zadań projektu ROSANNE, a prace przedstawione w publikacji były realizowane w ramach tego projektu.

Badania wykonywano urządzeniem Tiresonic Mk4 na odcinku testowym zlokalizowanym na obrzeżach Gdańska, wykonanym w technologii SMA 8. Pomiary wykonywano gdy nawierzchnia miała od 1,5 do 2 lat eksploatacji. W każdej serii pomiarowej wykonywano co najmniej 8 pomiarów hałasu metodą CPX.

W badaniach stosowano 10 opon samochodowych, w tym dwie referencyjne SRTT i AV4. Podczas pomiarów uzyskiwano temperatury powietrza i nawierzchni drogi z dokładnością do 0,1°C. Czujnik temperatury powietrza został umieszczony na poruszającym się pojeździe CPX na wysokości 1,4 m. Temperaturę nawierzchni drogi mierzono "w śladzie koła" za pomocą bezdotykowego czujnika podczerwieni umieszczonego również w badanym pojeździe.

Podczas eksperymentu temperatura powietrza zmieniała się w zakresie od 3 do 28°C a temperatura nawierzchni w przedziale od 10 do 36°C. W stabilnych warunkach temperatury powietrza i drogi są co najmniej wprost proporcjonalne, ale w rzeczywistości wyjątki często występują szczególnie w ciepłe dni. Podczas wykonywania pomiarów zaobserwowano znaczące zmiany temperatury powietrza w ciągu dnia w czerwcu i lipcu. Jednocześnie zmiany temperatury powierzchni drogi były mniejsze. Związek pomiędzy temperaturą powietrza i nawierzchni przedstawiono na Rysunek 11.



Rysunek 11. Uzyskane zależności między temperaturą nawierzchni i powietrza.

Analizując dane na (Rysunek 11) można zauważyć, że temperatura powierzchni drogi mierzona 8 lipca nie odpowiada temperaturze powietrza. Tego dnia testy przeprowadzono wieczorem, gdy nawierzchnia drogi wyschła po krótkim deszczu. Temperatura powietrza była ponownie stosunkowo wysoka, ale deszcz ochłodził nawierzchnię. Podobne warunki mogą występować w rzeczywistości dość często podczas wykonywania pomiarów. Również łatwo wyobrazić sobie możliwe podobne sytuacje, np. kiedy sekcja testowa znajduje się w cieniu i jest o wiele chłodniejsza niż na otwartym terenie lub w zupełnie odwrotnej sytuacji - odcinek drogi jest wystawiony na działanie bezpośredniego światła słonecznego i wieczorem pozostaje bardzo ciepły, podczas gdy temperatura powietrza znacznie spadła. Niemniej jednak ogólnie istnieje bardzo dobra zależność między temperaturą powietrza i nawierzchni drogi.

Sprawdzono również korelację liniową między zmierzonymi temperaturami a wynikami uzyskiwanymi na oponach. Dwie spośród opon charakteryzowały się słabą korelacją: opona całoroczna oraz opona przeznaczona do samochodów elektrycznych. Pozostałe testowane opony wykazują bardzo dobrą, dobrą lub co najmniej zadowalającą korelację R^2 od 0,71 do 0,93. Bardzo dobrą korelację uzyskano dla opony AV4 i dobrą dla referencyjnej opony SRTT.

Wpływ prędkości na współczynnik korekty temperatury zależy również od konkretnej opony. Dla niektórych z nich niższe wartości CT_t są odnotowywane dla wyższej prędkości, dla innych opon pozostają prawie niezmiennione lub są nieco wyższe. Po uśrednieniu dla obu prędkości współczynniki CT_t są podobne (różnica 0,006 dla temperatury powietrza i 0,004 dla temperatury powierzchni drogi).

Współczynniki korekty temperatury CT_t dla opony AV4 (H1) są znacznie wyższe niż dla opony SRTT (P1). Również wpływ prędkości na wartość CT_t jest większy dla tej opony w porównaniu do SRTT. Ale ze względów praktycznych powinien to być tylko jeden czynnik niezależnie od prędkości badania i opony testowej. Zatem, po uśrednieniu, współczynniki

korygujące CT_t są równe $-0,088$ dB/°C dla temperatury powietrza i $-0,090$ dB/°C dla temperatury powierzchni drogi. Przy zaokrągleniu do setnej wartości dB, zgodnie z propozycją zawartą w normie, można zastosować ten sam współczynnik $-0,09$ dB/°C w przypadku korekty dotyczącej temperatury powietrza lub nawierzchni drogi. Wyniki uzyskane dla opon referencyjnych zestawiono w Tabeli 2. Współczynniki korekcyjne dla opon referencyjnych.

Opona	Temperatura powietrza			Temperatura nawierzchni		
	50 km/h	80 km/h	średnia	50 km/h	80 km/h	średnia
	CT_t , dB/°C			CT_t , dB/°C		
AV4	- 0,093	- 0,122	- 0,107	- 0,091	- 0,124	- 0,107
SRTT	- 0,067	- 0,070	- 0,069	- 0,070	- 0,076	- 0,073
średnia	- 0,080	- 0,096	- 0,088	- 0,080	- 0,100	- 0,090

Tabela 2. Współczynniki korekcyjne dla opon referencyjnych

2.2.3. Parametry fizyczne pojazdu

W Holandii znaczna część dróg została wykonana w technologiach redukujących hałas. W celach kontrolnych wykonywane są regularne badania emisji hałasu nowych i istniejących nawierzchni drogowych. Pomiary te są przeprowadzane za pomocą metod SPB i CPX. W ostatnich latach zwiększyło się wykorzystanie metody CPX, a także liczba operatorów wykonujących pomiary CPX. Z praktycznego doświadczenia wynikało, że pomiędzy wynikami różnych operatorów mogą wystąpić stosunkowo duże różnice. Dlatego pojawiła się potrzeba zbadania niepewności pomiaru tą metodą. Pięć organizacji, które wykonują testy CPX na zasadach komercyjnych, wzięło udział w badaniach porównawczych na torze doświadczalnym „Round Robin” i udostępniło swoje wyniki w celu ich analizy.

W badaniach wzięły udział 4 zestawy pomiarowe. Jedna z przyczep została wykorzystana przez 2 różnych operatorów, którzy korzystali z własnego systemu pomiarowego i systemu przetwarzania danych. Każde urządzenie wykonało 6 przebiegów pomiarowych na 8 różnych odcinkach dróg, które zostały wykonane w 4 technologiach: dwuwarstwowy asfalt porowaty, beton asfaltowy 0/16, SMA 0/11, cienka warstwa redukująca hałas. Każda przyczepa używała 4 różnych rodzajów opon testowych: opony A i D według normy ISO 11819-2: 2000 oraz nowe opony SRTT AV4.

W badaniach użyto przyczepy o różnych konstrukcjach (Rysunek 12):

- przyczepa 1 - zamknięta, bez elementów wyciszających, 2 koła pomiarowe, szerokość toru: 2,00 m,
- przyczepa 2 - zamknięta, z elementami wyciszającymi (komora bezechowa), 2 koła pomiarowe; szerokość toru: 1,88 m,
- przyczepa 3 – otwarta, 2 koła pomiarowe, szerokość toru: 1,84 m, 2 operatorów,
- przyczepa 4 - zamknięta, komora bezechowa, 1 koło pomiarowe (w środku).

Według operatorów wszystkie przyczepy były zgodne z ISO 11819-2.



Rysunek 12. Zestawy pomiarowe do pomiarów CPX stosowane w badaniach na „Round Robin”

Wyniki uzyskiwane przyczepą 1 były systematycznie wyższe niż z innych urządzeń, za wyjątkiem badań na oponie typu A. Ta przyczepa nie była wyposażona w materiał wyciszający, co prawdopodobnie miało znaczący wpływ na odbicia dźwięku pochodzącego od silnika. W tym przypadku powinien zostać określony współczynnik korekcyjny za pomocą procedury kalibracji, a dane powinny zostać skorygowane za pomocą tego współczynnika. Korekta ta nie została ustalona i zastosowana dla przyczepy 1. Po stwierdzeniu, że wyniki opony A są wadliwe z powodu wyczerpania zasilania mikrofonu na końcu odcinków testowych, zdecydowano się odrzucić dane uzyskane na oponie A. Bez wyników na oponie A wszystkie dane z przyczepy 1 były systematycznie wyższe niż dane z innych przyczep, więc współczynnik korygujący o wartości $-1,8$ dB (A) mógł być zastosowany w celu uwzględnienia systematycznych odchyleń tych danych.

Z dalszej oceny danych wynikało, że również wyniki przyczepy 4 były w wielu przypadkach odbiegające od pozostałych. To odchylenie było zapewne spowodowane centralnym położeniem koła pomiarowego tej przyczepy. Charakterystyka nawierzchni drogi na środku pasa może się różnić od charakterystyki w lewym i prawym śladzie koła. Dlatego dane z przyczepy 4 nie mogą być uważane za należące do tego samego zestawu danych, co inne wyniki. Dane te nie zostały zatem uwzględnione przy określaniu wartości średnich i odchyleń standardowych różnych podzbiorów danych.

Wszystkie dane analizowano następnie metodą analizy wariancji. Przy pomocy tej metody można określić wpływ różnych czynników na wynik (charakterystykę przyczepy, stronę montażu opony i wariancję resztkową).

Ogólne wartości średnie (po korekcie dla przyczepy 1) pokazały, że wyniki przyczep nie odbiegają znacznie od ogólnej średniej, aczkolwiek w przypadku pojedynczych kombinacji opona-droga wyniki uzyskiwane dla jednej przyczepy mogą znacznie odbiegać od średniej dla tej kombinacji. Niestety, odchylenia od średniej są nieco większe, gdy porównywane są tylko opony przeznaczone do przyszłego użytku (SRTT i Avon AV4).

Określono wpływ różnych czynników na ogólną niepewność pomiaru. Ważnym źródłem różnic pomiędzy przyczepami jest jej konstrukcja. Wyniki przyczepy z centralnym kołem pomiarowym różnią się zasadniczo od wyników przyczep dwukołowych. Różnica między otwartą i zamkniętą konstrukcją przyczepy nie prowadzi do znaczących różnic w wynikach, o ile zamknięta przyczepa jest wyposażona w komorę bezechową i pod warunkiem, że wpływ odbicia zostanie skorygowany za pomocą współczynnika korygującego. Jeśli brak jest komory bezechowej, kalibracja i korekcja odbić stają się jeszcze ważniejsze. Drugim aspektem niepewności związanej z pomiarami jest zmienność właściwości opony. Fakt ten został uznany przez ISO, a dalsze procedury zakupu i obsługi opon w trakcie ich eksploatacji są w trakcie opracowywania.

Raczej nieoczekiwanym źródłem różnic pomiędzy pomiarami była strona montażu opony. Różnice te są spowodowane różną charakterystyką powierzchni w lewym i prawym torze, różnicami właściwości lewej i prawej opony testowej oraz różnicami pomiędzy lewym i prawym układem pomiarowym. Efekt ten okazał się jeszcze ważniejszy niż wpływ czynników związanych z przyczepą. Można go łatwo zniwelować stosując dwie podobne opony testowe po obu stronach przyczepy i uśrednić wyniki obu opon.

Zgodnie z ISO dane dotyczące emisji hałasu są korygowane o temperaturę powietrza i prędkość pomiaru. Oznacza to, że dokładności urządzeń pomiarowych dla prędkości końcowej temperatury są istotne dla niepewności pomiaru. Z zarejestrowanych danych wynika, że regularna kalibracja tych urządzeń i bardziej jednolita procedura pomiaru temperatury powietrza może pomóc w zmniejszeniu niepewności pomiaru CPX.

Opierając się na wynikach przedstawionego testu, przygotowujemy zestaw dodatkowych wytycznych, które mogą uzupełnić instrukcje podane w ISO/CD 11819-2 i przyczynią się do zmniejszenia niepewności pomiaru metody CPX. Wytyczne te mają na celu ujednolicenie konstrukcji przyczepy lub zwiększenie zgodności między przyczepami za pomocą kalibracji. Dodatkowe instrukcje będą określać testy z dwiema podobnymi oponami po obu stronach przyczepy, a kalibracji urządzeń pomiarowych temperatury, prędkości i odległości również będzie poświęcone więcej miejsca. Opracowane procedury ISO dotyczące zakupu, obsługi i przechowywania opon testowych zostaną prawdopodobnie wprowadzone do praktyki holenderskich pomiarów CPX wcześniej niż publikacja ISO w ramach dodatkowych wytycznych.

2.2.4. Parametry nawierzchni

W artykule (Bergiers, Visscher, Denolf, Destree, & Vuye, 2014) przedstawiono wyniki badań trwałości akustycznej 10 odcinków testowych: 8 wykonanych w technologii cienkich warstw asfaltowych redukujących hałas, grubości do 30 mm i zawartości wolnych przestrzeni do 18%, jednego z dwuwarstwowego asfaltu porowatego i jednego z SMA10 (sekcja odniesienia). Badania wykonywano w ciągu pierwszych dwóch lat po wybudowaniu, metodami SPB i CPX.

Odcinek o długości 2 km podzielono na dziesięć odcinków po 200 m długości. Dwie sekcje przeznaczono dla powierzchni odniesienia a pozostałe wykonano z cienkich warstw asfaltowych. Sekcje 8 i 9 zostały wykonane w tej samej technologii lecz o różnej grubości (25 i 30 mm).

Oprócz sprawdzenia właściwości akustycznych oceniano również zmianę hałaśliwości nawierzchni w czasie.

Na odcinkach testowych wykonano m.in. badania hałaśliwości metodami CPX i SPB oraz teksturę. Pomiary CPX prowadzono z prędkością 80 km/h. Badanie SPB realizowano tylko dla samochodów osobowych, przy prędkości odniesienia 80 km/h.

Pomiary SPB wykonywano po 1 miesiącu, 11, 15 i 22 miesiącach. Sekcje 1 (SMA) i 5 (2-warstwowe PA) to sekcje testowe porównawcze. Wszystkie wyniki zostały skorygowane dla temperatury przy użyciu współczynnika korekcji temperatury $-0,06 \text{ dB}/^\circ \text{C}$ i temperatury odniesienia 20°C .

Pomiary CPX przeprowadzane w kilku odstępach czasowych: 1, 5, 11, 15, 18, 22 miesiące po zakończeniu budowy. Wszystkie wyniki zostały skorygowane dla temperatury przy użyciu współczynnika korekcji temperatury $-0,03 \text{ dB (A)}/^\circ \text{C}$ i temperatury odniesienia 20°C . 18 miesięcy po budowie wszystkie cienkie warstwy wykazują nagły wzrost hałasu. Przyczyna tego wysokiego poziomu ciśnienia akustycznego pozostaje niejasna. Pomiary były wykonywane w zimny dzień w listopadzie. Temperatura powietrza wynosiła 11°C , a

temperatura powierzchni poniżej 5°C. Autorzy planują nowe pomiary w zimny dzień, aby wyjaśnić przyczynę wysokich wartości hałasu. Jakość akustyczna referencyjnej sekcji testowej SMA-10 pozostaje z czasem mniej więcej stabilna. Wszystkie pozostałe sekcje testowe pokazują wzrost poziomów ciśnienia akustycznego.

Pomiary tekstury wykonano 2, 5, 10 i 24 miesiące po budowie. Sekcja z asfaltu porowatego odznacza się znaczną zmianą tekstury. Tekstura badanych odcinków była stabilna w pierwszych pięciu miesiącach (w okresie letnim), a wyraźny wzrost widoczny jest 10 miesięcy po budowie (po okresie zimowym). Dwa lata po zakończeniu budowy można zaobserwować wzrost tekstury. Wzrost obejmuje pełny zakres megatekstury i część zakresu makrotekstury. Zwiększenie megatekstury może spowodować więcej wibracji opon, a tym samym hałasu.

Zakładając liniową zależność oceniono wpływ starzenia na zmianę hałasu. Cienkie warstwy wykazują wzrost poziomu hałasu od 0,11 do 0,28 dB (A) na miesiąc, w oparciu o pomiary CPX. Efekt starzenia jest mniejszy dla pomiarów SPB z 0,03 do 0,16 dB (A) miesięcznie. Wszystkie te wyniki są większe niż spodziewany.

Krótko po zakończeniu budowy, na prawie wszystkich sekcjach testowych uzyskano większą redukcję hałasu w przypadku opon samochodowych (P1) niż w przypadku opon ciężarowych (H1). Zmienia się to z czasem, ponieważ niektóre cienkie warstwy wykazują więcej redukcji hałasu w przypadku opon ciężarówek niż w przypadku opon samochodowych po prawie dwóch latach.

Wyniki badań wskazują, że trudno jest osiągnąć jednocześnie doskonałą redukcję hałasu i trwałość nawierzchni. Należy dążyć do osiągnięcia najlepszego kompromisu między tymi celami. Dobrze przemyślany wybór powinien opierać się na charakterystyce terenu budowy. Cienkich warstw nie stosuje się w miejscach takich, jak skrzyżowania w miastach lub w miejscach, w których pojazdy wywierają duże siły ścinające na warstwę powierzchniową. Szczególną ostrożność należy zachować podczas budowy, ponieważ cienkie warstwy mają większą wrażliwość na warunki atmosferyczne podczas układania nawierzchni.

(Bezemer-Krijnen, Wijnant, & De Boer, 2016) W artykule wyniki pomiarów CPX, pomiarów tubą impedancji akustycznej oraz tekstury nawierzchni połączono w celu zbadania zależności między emitowanym hałasem a charakterystyką bieżnika opony i powierzchni drogi. Wszystkie pomiary przeprowadzono na specjalnym obszarze testowym na lotnisku Twente, gdzie skonstruowano 8 różnych rodzajów nawierzchni asfaltowych. Konstrukcja dwóch nawierzchni oparta jest na nowych modelach pochłaniania dźwięku i przyczepności, a sześć z nich to porowaty beton asfaltowy.

Zależność między charakterystyką drogi a rozchodzeniem się dźwięku zbadano za pomocą właściwości drogi, takich jak rozmiar kruszywa, porowatość i pochłanianie dźwięku oraz niektóre parametry tekstury.

Wyniki pokazały, że zarówno parametry opony, jak charakterystyka drogi, są ważne dla zmniejszenia promieniowania akustycznego. Wpływ porowatości drogi i pochłaniania dźwięku przez drogę na emitowany dźwięk jest bardziej znaczący dla częstotliwości w paśmie oktawowym 2000 Hz niż wpływ badanych bieżników opon na dźwięk emitowany. Jednak w paśmie oktawowym 1000 Hz wpływ parametrów bieżnika opony na promieniowanie dźwiękowe jest większy. Ponadto stwierdzono zależność między dźwiękiem wypromieniowanym a maksymalnymi rozmiarami kruszywa w betonie asfaltowym.

2.2.5. Prędkość, tolerancja prędkości

Żaden inny pojedynczy czynnik nie ma tak znaczącego wpływu na hałas pochodzący z kontaktu opony z nawierzchnią, jak prędkość (Sandberg, 2001). Powszechnie wiadomo, że stosunek hałasu do prędkości pojazdu bardzo ściśle odpowiada relacji:

$$L = A + B \cdot \log(V)$$

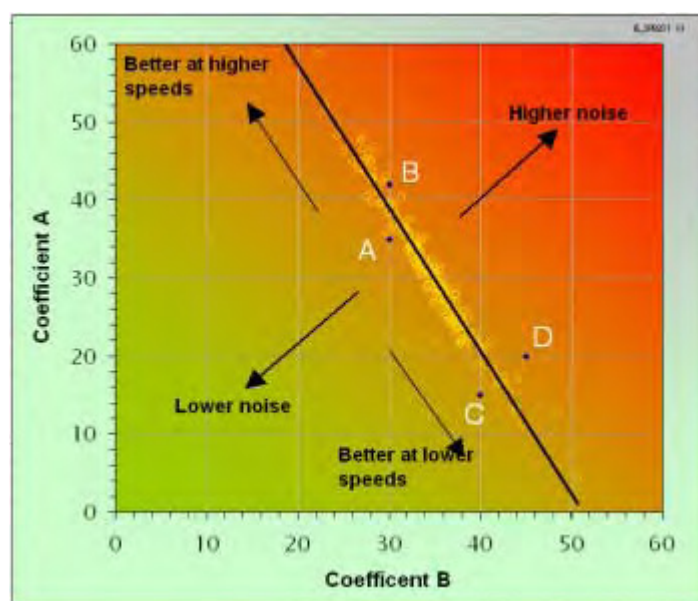
gdzie:

L = poziom ciśnienia akustycznego (SPL) w dB,

V to prędkość w km / h,

A, B to współczynniki prędkości (stałe).

Na Politechnice Gdańskiej (TUG) w Polsce badacze wyznaczyli 1700 par współczynników A i B i odkryli, że odchylenie od linii regresji jest bardzo małe (Rysunek 13). Stwierdzono, że wyznaczona linia regresji jest na tyle ścisła, aby w skrajnie skondensowanej formie przedstawić charakterystykę hałasu dla dużej liczby opon lub nawierzchni dróg, lub ich kombinacji.



Rysunek 13. Rysunek Ogólna zależność między współczynnikami prędkości A i B.

Każdy symbol koła (wokół krzywej regresji) jest jednym takim punktem (A, B); białe litery A, B, C i D oznaczają opony o specjalnych właściwościach; strzałki mają za zadanie wyjaśnić charakterystykę położenia punktu na schemacie

Na Rysunek 13 przyjmuje się, że linia jest linią regresji A w porównaniu z B dla dużej liczby pomiarów. Każdy punkt reprezentuje współrzędne A i B opisujące równanie hałasu opony w funkcji prędkości. Punkt odchylający się prostopadłe do linii reprezentuje inny poziom hałasu dla tej opony w stosunku do "przeciętnej" opony. Odchylenie w kierunku lewego dolnego oznacza, że opona jest "cichsza"; odchylenie w kierunku górnym prawym oznacza, że opona jest "głośniejsza". Im dalej w lewo jest punkt, tym niższe jest jego nachylenie; co oznacza, że ta opona jest bardziej korzystna przy wyższych prędkościach i

mniej korzystna przy niższych prędkościach. Inaczej jest w przypadku, gdy punkt znajduje się bardziej w prawo.

Przedstawiony wykres może być przydatny przy wyborze opon lub nawierzchni dróg. Punkty A, B, C i D są przykładami opon (lub nawierzchni dróg), które wykazują różne cechy pod względem poziomu hałasu przy niskich i wysokich prędkościach. Oponę lub nawierzchnię drogi, która daje punkt w pobliżu C, należy wybrać dla małych prędkości (w takim przypadku należy unikać opony w pobliżu punktu B), podczas gdy oponę lub nawierzchnię drogi w pobliżu punktu A należy wybrać dla wysokich prędkości ruchu (i unikać punktu D opony).

W publikacji przedstawiono wyniki badań zależności hałasu komunikacyjnego od prędkości pojazdów i rodzaju nawierzchni (W. Gardziejczyk, 2015). Zastosowano w tym celu metodę SPB. Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów wyznaczono zależności regresyjne, zgodnie ze wzorem:

$$LpA(1, 2A, 2B)(V) = A_i + B_i \cdot \log(V/V_0)$$

gdzie:

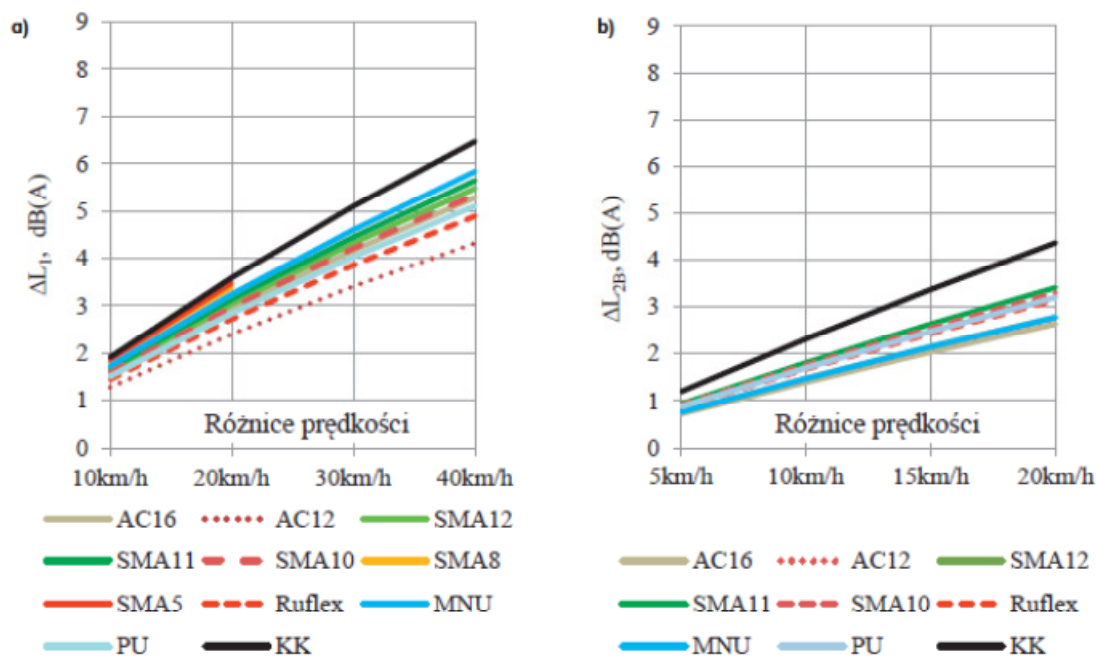
$LpA(1, 2A, 2B)$ – maksymalny poziom dźwięku od przejazdu statystycznego pojazdu kategorii 1, 2A i 2B (dB),

A_i, B_i – współczynniki regresyjne,

V – prędkość przejazdu,

V_0 – 1 km/h.

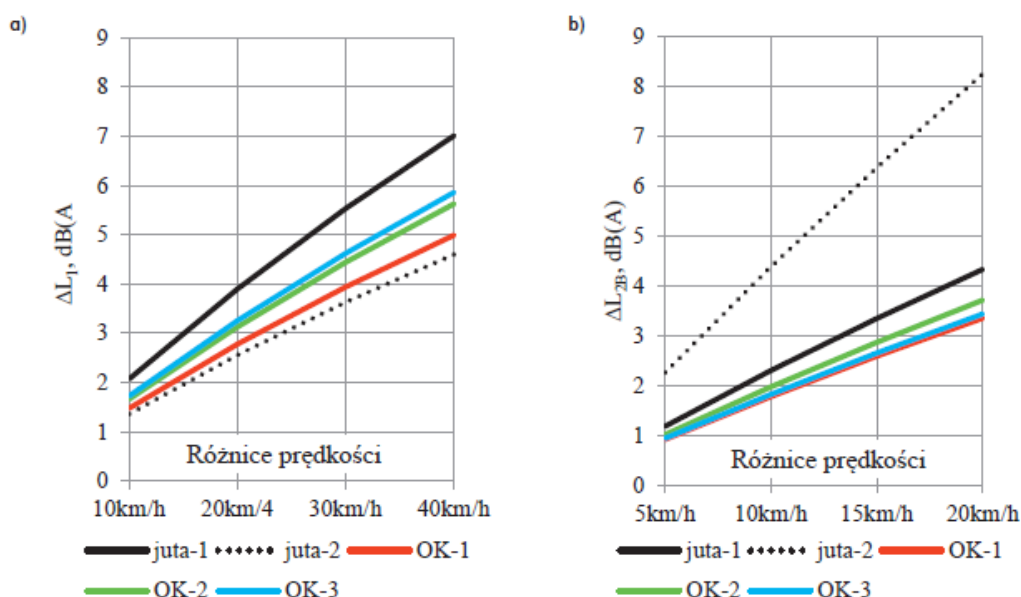
Wyniki analiz zależności wzrostu hałaśliwości nawierzchni od wzrostu prędkości ruchu



Rys. 5. Wpływ wzrostu prędkości na maksymalny poziom dźwięku od przejazdu statystycznego pojazdu w zależności od rodzaju nawierzchni: a) pojazd osobowy, b) pojazd ciężarowy kat. 2B

pojazdów zostały przedstawione na wykresach poniżej (Rysunek 14).

Rysunek 14. Wpływ wzrostu prędkości na maksymalny poziom dźwięku od przejazdu statystycznego pojazdu w zależności od nawierzchni (Gardziejczyk, 2015)



Rys. 6. Wpływ wzrostu prędkości na maksymalny poziom dźwięku od przejazdu statystycznego pojazdu na nawierzchniach betonowych: a) pojazd osobowy, b) pojazd ciężarowy kat. 2B

Rysunek 15. Wpływ wzrostu prędkości na maksymalny poziom dźwięku od przejazdu statystycznego na nawierzchniach betonowych (Gardziejczyk, 2015)

Wykonane badania wskazują, że na nawierzchniach asfaltowych oraz betonowych (Rysunek 15) z odkrytym kruszywem tempo wzrostu hałaśliwości przy wzroście prędkości ruchu pojazdów jest podobne. Przy zwiększeniu prędkości o 10 km/h maksymalny poziom dźwięku wzrasta o ok. 1,6 dB, a przy wzroście o 20 km/h o ok. 3 dB. Nawierzchnie betonowe teksturowane jutą są szczególnie niekorzystnym rozwiązaniem w odniesieniu do pojazdów ciężarowych poruszających się z prędkością ponad 80 km/h. Wzrost prędkości o 20 km/h (do 90 km/h) może powodować wzrost poziomu hałasu o ponad 8 dB.

2.3. Metoda OBSI

2.3.1. Parametry urządzenia

Precyzja pomiarów hałaśliwości niewątpliwie zależy od parametrów urządzenia takich jak:

- prędkość akwizycji danych: Sprzęt do zapisu dźwięku powinien być zgodny z wymaganiami Klasy 1 specyfikacji ANSI S1.9. Ponadto sprzęt używany do badań powinien raportować natężenie dźwięku w pojedynczych pasmach o szerokości 1/3 oktawy.
- zapis danych (co jest zapisywane i z jaką częstotliwością): zapisywane jest natężenie dźwięku w każdym 1/3 pasmie oktawy z centralną częstotliwością pomiędzy 400 and 5000 Hz. Zgodność odczytów ciśnienia dźwięku pomiędzy 2 mikrofonami z każdej sondy powinna być równa lub większa od 0.8 (w zaokrągleniu do najbliższej dziesiątki) w każdym pasmie o szerokości 1/3 oktawy z centralną częstotliwością będącą pomiędzy 400 a 4000 Hz (nie ma wymagania zgodności przy 5000 Hz w pasmie jednej trzeciej oktawy).

- rodzaj i parametry czujników: dla każdego miernika natężenia dźwięku, dwa 12.7 mm (0.5 in) mikrofony powinny być wybrane tak aby odpowiadały wymaganiom ANSI S1.9. Jeżeli pomiary z mikrofonami zainstalowanymi na styku przednim i tylnym opony z nawierzchnią (przodo-kontakt i tyło-kontakt opony z nawierzchnia) są wykonywane jeden po drugim, wówczas potrzebne są dwa mierniki spełniające powyższy wymóg. Po zainstalowaniu obu mierników natężenia dźwięku w piaście tylnego koła, musi być zachowana należyta staranność w celu uniknięcia dodatkowych turbulencji oraz ich wpływu szczególnie na tylni miernik.
- kalibracja czujników: zgodnie z wytycznymi urządzenie do kalibracji dźwięku powinno spełniać wymagania według ANSI S1.40. (uwaga, niektóre urządzenia do kalibracji muszą być skorygowane o warunki/dane środowiskowe, zgodnie z wymaganiami/wytycznymi producenta). Mikrofony oraz kalibrator powinny być dostrojone/skalibrowane zgodnie z zaleceniami producenta oraz ANSI S1.9 jak i S1.40.

2.3.2. Parametry opon

Parametry opon mają również wpływ na pomiary hałaśliwości szczególnie dla pomiarów dokonywanych dla prędkości powyżej 40 km/h (Sandberg et al., 2011), do nich należą między innymi wiek, bieżnik, ciśnienie, twardość, rozmiar oraz temperatura powietrza.

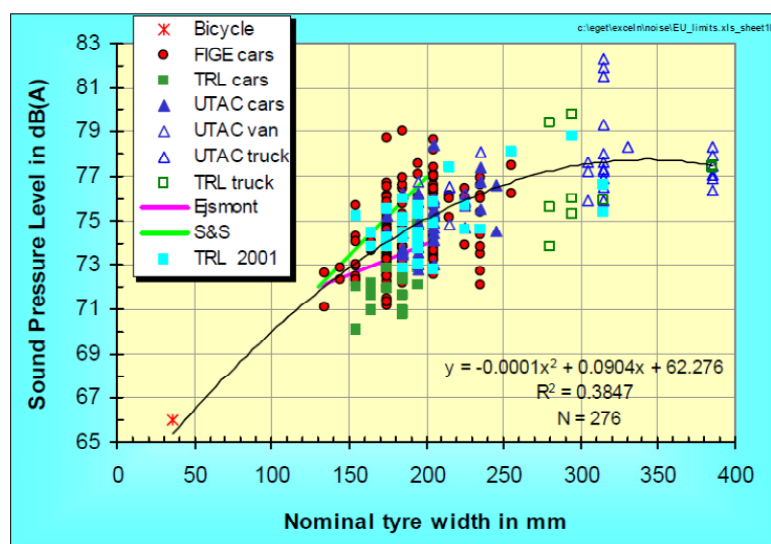
Przy prędkości powyżej 40 km/h najbardziej dominująca jest hałaśliwość wytwarzana na styku opony i nawierzchni. W badaniach wykonanych przez badaczy z Uniwersytetu z Twente (Holandia) w 2016 roku wzięto pod uwagę korelacje pomiędzy parametrami nawierzchni a opona dla różnych częstotliwości (500, 1000 and 2000 Hz) w 1/3 zakresu oktawy (Bezemer-Krijnen, et al 2016). Badania te wykazały że zarówno parametry opony jak i parametry nawierzchni (takie jak porowatość) mają wpływ na pochłanianie dźwięku przez nawierzchnie. Ponadto wykazano iż, wpływ porowatości nawierzchni oraz jej zdolność do pochłaniania emitowanego dźwięku ma większe znaczenie przy częstotliwości 2000Hz niż wpływ typu/rodzaju bieżnika opony na emitowany dźwięk. Jednakże przy częstotliwości równej 1000Hz mierzonej w 1/3 pasma oktawy wpływ parametrów bieżnika opony ma większe znaczenie na emitowany dźwięk niż parametry nawierzchni. Dodatkowo znaleziono korelacje pomiędzy emitowanym dźwiękiem a maksymalnym uziarnieniem nawierzchni asfaltowej. Większe uziarnienie przyczynia się do niższej emisji dźwięku przy wyższych częstotliwościach (pow. 2000 Hz) ale nie ma dużego wpływu na hałaśliwość przy niskich częstotliwościach takich jak 500Hz. W tym samym opracowaniu zaobserwowano również, że przy wzrastającym współczynniku pochłaniania dźwięku emisja dźwięku spada co w praktyce oznacza, iż nawierzchnie bardziej pochłaniające dźwięk są cichsze. Dodatkowo wykazano, że całkowita emisja dźwięku spada podczas gdy pochłanianie dźwięku wzrasta przy wysokich częstotliwościach.

Do cech sprzyjających cichobieżności opony zalicza się bieżnik kierunkowy bez przestrzeni zamkniętych, klocki bieżnika o zróżnicowanym kształcie ułożone asymetrycznie i nieregularnie, poprzeczne rowki ukształtowane w taki sposób, aby ich wejścia i wyjścia nie pokrywały się z krawędzią styczną bieżnika, dużą miękkość mieszanki, z której wykonano bieżnik, ale sztywny szkielet opony.

Jeżeli chodzi o parametry opon i bieżnika to wykazano, iż znaczenie ma ciągłość bieżnika opony. Bieżnik o dużej ciągłości (bez zamkniętych przestrzeni) powoduje mniejszą emisję dźwięku (Bezemer-Krijnen, et al 2016).

Zgodnie z podręcznikiem pt.: „Hałaśliwość na styku opony i nawierzchni” (en. Tyre/road noise reference book) (Sandberg, Ejsmond, 2002), rozdział 10 parametr ciągłości bieżnika opony jest uzależniony od geometrii bieżnika. Autorzy uważają, że kształt i profil bieżnika jest bardzo ważny, jeżeli profil bieżnika pokrywa się z profilem/zarysem śladu opony wówczas będzie wytwarzany hałas. Z tych powodów zarówno ciągłość wzoru bieżnika jak i zastosowany wzór (rowkowanie) wpływają na różnice ciśnienia gdy klocki bieżnika stykają się z nawierzchnią.

W ostatnim stuleciu panuje niemal ciągły trend w zakresie stopniowego powiększania szerokości opon zwłaszcza w samochodach osobowych. Ogólnie przyjmuje się, że jest to jeden z głównych powodów, dla których hałas na styku nawierzchni i opony nie został z czasem ograniczony a odwrotnie raczej zwiększony. Badania wpływu szerokości opon na hałaśliwość nawierzchni zostały przedstawione przez (Sandberg, Ejsmond, 2002), z których wynika że istnieje zależność pomiędzy szerokością opon a hałaśliwością w przedziale od 72 do 74 db fioletowa linia na poniższym wykresie (Rysunek 16).



Rysunek 16. Zależność pomiędzy hałaśliwością a różnymi typami opon (Sandberg 2001)

Mechanizm generowania dźwięku przez opony związany z wypompowywaniem i zasysaniem powietrza polega głównie na jego sprężaniu i rozprężaniu w zamkniętych rowkach bieżnika tworzących tzw. „zamknięte kieszenie”, bądź też w zamkniętych przez bieżnik wolnych przestrzeniach w nawierzchni. Bieżnik wraz z rowkami na styku opony tworzy sieć kanałów, w których zachodzi rezonans związany z drganiem słupów powietrza, które są wywołane drganiem opony (Olszacki, 2008).

Uważa się jednak że dużą część wpływu szerokość opony na hałaśliwość ma tzw. efekt rogu/tuby (horn effect) powstający na styku opony z nawierzchnią dla opon wąskich (bez znaczenia dla opon poniżej 50 mm szerokości) jest on niski natomiast dla szerokich opon osiąga szczyt (200 mm szerokości). Efekt rogu jest swego rodzaju zakrzywieniem fali dźwiękowej między stykiem i śladem krawędzi opony z nawierzchnią któremu towarzyszy efekt rozszerzenia i podwójnego wzmocnienia poziomu dźwięku.

Na podstawie badań przeprowadzonych przez (Bert Peeters, et al., 2010) pokazano, że efekt rogu powoduje wzrost emisji dźwięku szczególnie w środkowym zakresie

częstotliwości (około 1kHz). Większy rozmiar opony powoduje wzrost efektu rogu w dolnym zakresie/pasmie częstotliwości (315 do 800 Hz).

2.3.3. Parametry fizyczne pojazdu

Na podstawie badań wykonanych przez Mn/DOT na instrumencie OBSI (NCHRP 630) wykazano że obciążenie pojazdu miało mały wpływ na nawierzchnie typu AC (przy użyciu opony SRTT) niż dla nawierzchni PCC (przy użyciu opony Dunlop). Wykazano wzrost o 0.2 dB przy obciążeniu 100 lbs dla AC w porównaniu do wzrostu od 0.3 do 0.4 dB dla PCC. Wzrosty hałaśliwości związane z obciążeniem pojazdu pojawiły się przy częstotliwościach poniżej 1,000 Hz pomimo że małe wzrosty w środkowych i wysokich częstotliwościach pojawiły się na nawierzchniach AC.

Dane z tego samego studium nie wskazują na wyraźną korelację między poziomami mierzonymi OBSI i położeniem mierników w kierunku przednim/tylnym. Wystąpiła niewielka tendencja spadkowa poziomu hałasu gdy miernik został przesunięty dalej od ściany bocznej opony (ok 0.2 dB na ½ cala przesunięcia). Zmiany poziomu hałasu spowodowane zmianami odległości miernika od ściany bocznej opony mieszczą się ogólnie w granicach odchylenia standardowego dla kolejnych prędkości bazowych. Charakterystyki spektrów każdej z nawierzchni zostały zachowane.

2.3.4. Parametry otoczenia

Zgodnie z wynikami przedstawionymi w raporcie (NCHRP Report 630, 1-44 Project) gdzie oceniano wpływ różnych czynników na pomiary OBSI, wykazano, że istnieje tendencja spadkowa hałaśliwości wraz ze wzrostem temperatury powietrza oraz nawierzchni przy niskim wskaźniku determinacji (korelacji) od 0 do 0.4. Badania przeprowadzane w ramach tego raportu wykazały spadek hałaśliwości o 1 dB przy wzroście temperatury o 10°C. Rekomendowane korekty dotyczące temperatury zaproponowane przez ten projekt wynoszą - 0.04 dB/°F dla danych natężenia dźwięku pozyskanych przy temperaturze 20°C i ciśnienia atmosferycznego 101.3 kPa w celu znormalizowania raportowanych poziomów (Donavan, et al. 2011). Takie korekty były używane w przez National Center for Asphalt Technology (NCAT) w 2009 roku podczas testów OBSI pod kątem normalizacji danych mierzonych przez różne ekipy w różnych warunkach pogodowych (Mogrovejo, Flintsch, de Leon i zeppi, & McGhee, 2012).

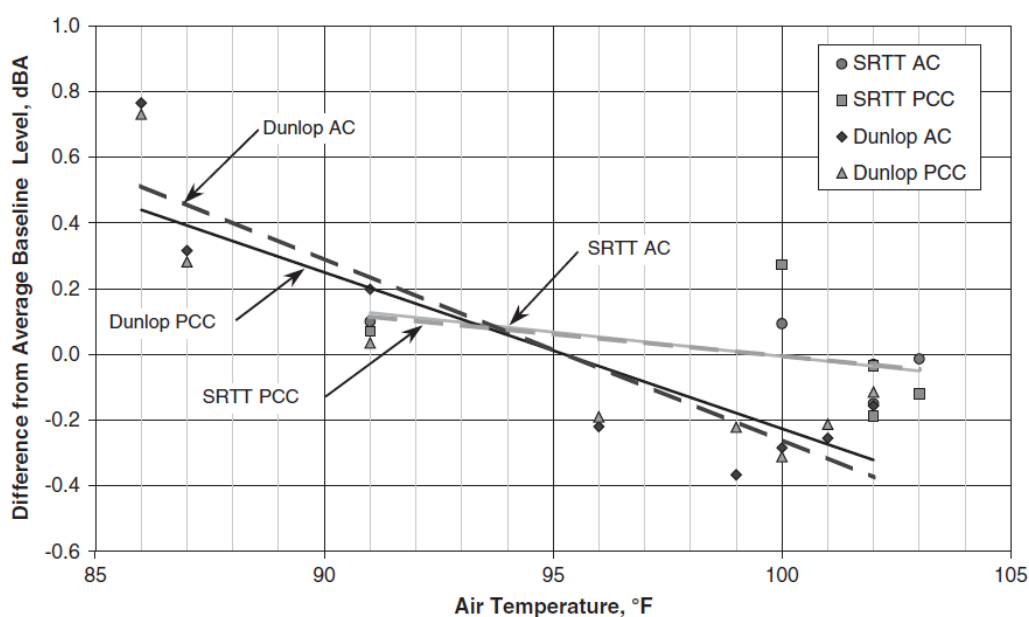
Badania przeprowadzone w Hiszpanii (Bueno, M., J. Luong, U. Vinuela, F. Terán, S.E. Paje. Pavement temperature influence on close proximity tire/road noise, Ciudad Real, Spain. Applied Acoustics, Vol. 72, 2011, pp. 829-835.) przedstawiają ten sam trend wpływu temperatury na pomiary hałaśliwości. W przypadku badań w Hiszpanii testy były przeprowadzane za pomocą przyczepy CPX Tiresonic Mk4-LA2IC z prędkością 50 km/h. Analiza wyników wykazała, iż wzrost temperatury nawierzchni prowadzi do spadku poziomów dźwięku szacowanych za pomocą CPX o 0.06 dBA/°C.

Sandberg (Sandberg, Ejsmond, 2002) także potwierdza, że badania przeprowadzone przez Liedever w 1999 r oraz Landsberger w 2001 wykazały spadek hałaśliwości (wyrażanej ciśnieniem dźwięku) przy wzroście temperatury powietrza i nawierzchni. Na tej podstawie można stwierdzić, że badania hałaśliwości zarówno instrumentem OBSI jak i CPX wykazuje

ta sama negatywna zależność pomiędzy temperaturą a hałaśliwością generowaną na styku opony i nawierzchni.

Przegląd literatury sugeruje, że efekt temperatury jest inny na różnych typach nawierzchni. Biorąc pod uwagę związek między temperaturą powietrza, nawierzchni i temperaturami opon z hałaśliwością, badania wykazują, że związek między hałaśliwością a temperaturą nawierzchni oraz hałaśliwością i temperaturą powietrza jest silniejszy niż związek między hałaśliwością i temperaturą opon.

Gradient hałasu do temperatury w wysokości -0.05 dBA/°F został zaobserwowany dla testowanych nawierzchni, co wskazuje na mały wpływ temperatury powietrza na poziom hałasu na styku opony i nawierzchni (NCHRP 630). Z tego powodu wskazane jest użycie korekcji temperatury szczególnie kiedy pomiary dokonywane są dla relatywnie dużego zakresu temperatur, jak to ma miejsce dla pomiarów dokonywanych podczas różnych pór roku. Zgodnie z wynikami otrzymanymi w projekcie (NCHRP 630, 2009) na odcinkach testowych w Minnesocie (Mn/Road) oraz w Arizonie (DPG) na nawierzchniach AC i PCC przy użyciu opony standardowej SRTT i prędkości referencyjnej 60 mph (97km/h) wpływ temperatury na hałaśliwość jest statystycznie mała (odchylenie standardowe od 0 do 0.4). Ponadto rozstęp w ogólnych poziomach dla opony SRTT był tylko nieco wyższy niż odchylenie standardowe dla prędkości bazowej dla nawierzchni AC w wysokości 0.5 i 0.3 dB oraz dla nawierzchni typu PCC w wysokości 0.6 i 0.5 dB dla odcinków testowych w Mn/Road i DPG (Rysunek 17 poniżej).



Rysunek 17. Poziomy OBSI względem temperatury powietrza dla odcinków testowych DPG

2.3.5. Parametry drogi

Parametry takie jak nachylenie, ilość zakrętów, obecność powierzchni odbijających, obecność innych pojazdów w bliskiej odległości od mierników może mieć wpływ na pomiary ale nie została dotąd nigdzie udokumentowana. Przestrzeganie wytycznych dotyczących pomiarów musi być zachowane aby akwizycja danych przebiegała sprawnie i bezbłędnie a generowane dane były wysokiej jakości (2009_Measuring Tire-Pavement Noise at the Source, NCHRP 630).

2.3.6. Parametry nawierzchni

Jeśli chodzi o wybrane ciche typy nawierzchni, najbardziej charakterystyczne wśród mieszanek asfaltowych to nawierzchnie o otwartym uziarnieniu (open graded) stosowane w warstwach wierzchnich dróg. Asfalty typu open graded oznaczają brak drobnego kruszywa w ogólnej mieszance mineralno-asfaltowej co w rezultacie sprawia że tworzą się wolne przestrzenie. Powstałe w ten sposób pustki powietrzne redukują i rozpraszają dźwięk o wysokich częstotliwościach poprzez pochłanianie dźwięku w głąb struktury.

Badania prowadzone w Kalifornii w latach 2008-2009 (Kohler, 2011) wskazują, że obecność gumy w nawierzchni asfaltowej zaledwie pomaga redukować hałas dla początkowych poziomów, jednakże w długim okresie czasu jest zauważalna różnica, ponieważ stopa wzrostu hałaśliwości jest dość niska. Dla nawierzchni od 1-10 lat typowe poziomy hałasu dla nawierzchni typu open graded wynoszą od 99.0 do 105.0 dBA. Dla nawierzchni z mieszanką gumową te parametry wynoszą od 99.5 do 102.0 dBA. Dla porównania mieszanki zagęszczone charakteryzują się hałaśliwością na poziomie od 100.0 and 106.0 dBA.

Dla nawierzchni betonowych, wykazano, że podłużne grawerowanie/rowkowanie w kształcie diamentu daje największy efekt pod kątem cichości tych nawierzchni.

W przeciwieństwie do nawierzchni asfaltowych gdzie porowatość pomaga w pochłanianiu dźwięku, w przypadku nawierzchni betonowych tekstura nawierzchni jest czynnikiem kontrolującym OBSI ponieważ nie ma efektu pochłaniania dźwięku (Kohler, 2011). Duże rozproszenie zostało zidentyfikowane w poziomach OBSI mierzonych na nawierzchniach betonowych. Poziomy od 102.0 do 103.0 dBA są uznawane za ciche dla nawierzchni betonowych. W ramach eksperymentalnych nawierzchni typu Next Generation Concrete Surface mogą być wytwarzane tekstury dzięki którym, można otrzymywać poziomy OBSI poniżej 100 dBA.

Nawierzchnie porowate są szeroko stosowane w Europie i są coraz częściej stosowane w Stanach Zjednoczonych w celu zmniejszenia hałasu powodowanego przez nawierzchnię i w celu poprawienia bezpieczeństwa. Przypuszczalnie porowatość powierzchni nawierzchni umożliwia rozpraszanie energii akustycznej u źródła przez płynne tarcie, gdy dźwięk przechodzi przez kręte kanały w nawierzchni jak przedstawiono na Rysunek 18. Ten efekt absorpcji akustycznej zmniejsza działanie wszystkich akustycznych mechanizmów wzmacniających takich jak efekt rogu czy rezonatorów Helmholtza. Porowatość powierzchni zmniejsza również powierzchnię styku opony i nawierzchni, powodując zmniejszenie efektu stick-slip i stick-snap (Bernhard, R., et al., 2005).



Rysunek 18. Możliwe mechanizmy ograniczania hałasu na nawierzchniach porowatych

Jeżeli chodzi o teksturę nawierzchni to można ją scharakteryzować mierząc profil powierzchni. Profil można analizować pod względem jego amplitudy lub wysokości powyżej lub poniżej pewnej płaszczyzny odniesienia. Tekstura nawierzchni może być również analizowana pod względem poziomej odległości między nierównościami w teksturze. Typowa odległość między nierównościami w nawierzchni nazywana jest teksturą długości fali lub długością charakterystyczną. W wyniku pomiaru stwierdzono, że tekstura o charakterystycznych długościach większych niż 20 mm ma tendencję do zwiększania dźwięku, a tekstura o charakterystycznych długościach mniejszych niż 10 mm ma tendencję do zmniejszania dźwięku (Sandberg, et al., 2002). Uważa się, że większe rozmiary tekstur wchodzi w interakcje z blokami bieżnika opony, gdzie uwidacznia się wpływ mechanizmów stick-slip i stick-snap (Bernhard, R., et al., 2005).

Na bazie danych uzyskanych bazujących na teksturze nawierzchni betonowych w USA, dla pomiarów metoda OBSI otrzymano hałaśliwości od 100 dBA do 113 dBA (na bazie średnich pomiarów OBSI w decybelach). Zaobserwowano również, że wzrost hałaśliwości o 10 dBA może reprezentować podwojenie siły postrzeganego dźwięku.

2.3.7. Prędkość, tolerancja prędkości

Przy ocenie wpływu prędkości na pomiary można posłużyć się poniższym wzorem.

$$IL \propto \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^x \Rightarrow \Delta dBA = x10 \log_{10} \left(\frac{v_1}{v_2}\right)$$

Wzór na ocenę wpływu prędkości na natężenie dźwięku (ILs) (Rasmusen, et al, 2007)

Badania podsumowujące testy metodą OBSI w raporcie NCHRP 630 wykazały, że poziom dźwięku wzrasta wraz z prędkością. To zjawisko jest podobne dla różnych typów pojazdów i różnych opon referencyjnych. Istnieje duża rozbieżność w poziomach dźwięków generowanych na styku opony i nawierzchni mierzonych przy różnych prędkościach. Zmiana w poziomach natężenia dla każdego wzrostu o 16 km/h (10 mph) znajduje się w zakresie, który może być wykryty przez ludzkie ucho (ludzkie ucho może wykryć zmianę o 3 dB). Ogólny poziom dźwięku wzrasta o średnio 2.5 dBA na każdy wzrost prędkości o 16 km/h (10mph) dla danej nawierzchni.

2.3.8. Inne, np. przejazdy “rozbiegowe”, ilość przejazdów

Powtarzalność przejazdów rozbiegowych została udokumentowana w raporcie „NCHRP Project 1-44” (NCHRP Project 1-44 Appendix C, 2009), gdzie przejazdy testowe były dokonywane na odcinkach testowych Mn/Road w stanie Minnesota. Około dziesięciu przejazdów rozbiegowych było wykonywanych na oponie SRTT przy prędkości bazowej 60 mph (97km/h). przejazdy były wykonywane przez okres około 50 min z rozstępem (range) równym 1°C, temperatura powietrza wynosiła od 87 do 107°F (30-41°C). Tabela 3 poniżej przedstawia rozstęp w pomiarach OBSI dla przejazdów rozbiegowych dla opony SRTT.

	SRTT-AC		SRTT-PCC	
	A-Ważone	1/3 Zakresu Oktawy	A-Ważone	1/3 Zakresu Oktawy

Rozstęp (range)	0.8 dB	0.5 do 2.5 dB	0.8 dB	0.7 do 1.8 dB
Odchylenie Standardowe	0.3	0.2 do 0.9	0.3	0.2 do 0.6

Tabela 3. Rozstęp przy użyciu SRTT dla pomiarów OBSI

Tam gdzie poziomy OBSI przy uwzględnieniu różnych wartości parametrów mieszczą się w odchyleniu standardowym dla kolejnych wartości bazowych, zmiany poziomów hałasu nie można racjonalnie przypisać zmianom w danym parametrze, niewielkie wahania parametrów w konfiguracji testowej nie powinny wpłynąć negatywnie na wyniki OBSI (zakładając, że badania odbywają się zgodnie z wytycznymi).

Tabela 4 pochodząca z tego samego opracowania zawiera podsumowanie parametrów testowych mających wpływ na wyniki pomiarów hałaśliwości metodą OBSI (dla opony SRTT), uwzględniając takie parametry jak: lokalizacja mierników OBSI, odległość od krawędzi opony, prędkość pojazdu testowego, obciążenie pojazdu, ciśnienie w oponie.

Parameter	Difference from Baseline Value, dBA				
	SRTT AC	SRTT PCC	Dunlap AC	Dunlap PCC	
Probe Location, Vertical	Baseline	0.0	0.0	0.0	0.0
	Height +1/4"	-0.3	-0.8	-0.2	-0.3
	Height +1/2"	-0.5	-1.1	-0.6	-0.7
	Height -1/4"	0.8	-0.1	0.4	0.4
	Baseline	0.5	-0.3	0.1	0.1
	Slope (dBA/ ¼ inch)	-0.4	-0.4	-0.3	-0.4
r^2	0.87	0.83	0.99	0.99	
Distance from Tire Sidewall	Baseline	0.0	0.0	0.0	0.0
	Inboard 1/2"	0.1	0.1	*	*
	Inboard 1"	0.3	0.5	0.0	0.2
	Outboard 1/2"	-0.3	0.1	*	*
	Baseline	-0.5	-0.3	-0.4	-0.4
	Slope (dBA/ ½ inch)	-0.2	-0.2	-0.1	-0.2
r^2	0.71	0.48	0.26	0.59	
Vehicle Test Speed	Baseline	0.0	0.0	0.0	0.0
	62 mph	0.9	0.8	0.4	0.5
	64 mph	1.3	1.1	0.7	0.6
	58 mph	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6
	56 mph	-0.8	-0.9	-1.3	-1.2
	Baseline	0.1	0.1	-0.4	-0.2
Slope (dBA/mph)	0.3	0.3	0.3	0.2	
r^2	0.97	0.97	0.96	0.97	
Vehicle Load	Baseline	0.0	0.0	0.0	0.0
	+100 lbs	0.2	0.3	0.2	0.3
	+200 lbs	0.3	0.6	0.5	0.8
	Baseline	0.0	0.1	0.1	-0.1
	Slope (dBA/100lbs)	0.1	0.3	0.2	0.4
r^2	1.00	0.99	0.97	0.99	
Tire Inflation Pressure (Cold)	Baseline (34 psi)	0.0	0.0	0.0	0.0
	42 psi	0.3	0.1	0.1	-0.1
	38 psi	0.2	0.0	0.1	0.0
	30 psi	-0.3	-0.3	0.1	0.1
	26 psi	-0.4	-0.3	-0.2	0.0
	Slope (dBA/4 psi)	0.2	0.1	0.1	0.0
r^2	0.99	0.87	0.53	0.61	
Probe Location, Fore/Aft, LE	Baseline	0.0	0.0	0.0	0.0
	Forward 1/2"	0.6	0.4	0.1	0.0
	Forward 1"	0.7	0.7	0.2	0.1
	Back 1/2"	0.6	0.6	-0.2	-0.1
	Back 1"	0.6	0.0	-0.5	-0.3
	Baseline	0.4	0.5	-0.1	-0.2
Slope (dBA/inch)	0.0	0.2	0.3	0.2	
r^2	0.04	0.34	0.95	0.80	
Probe Location, Fore/Aft, TE	Baseline	0.0	0.0	0.0	0.0
	Back 1/2"	0.1	0.3	0.0	-0.2
	Back 1"	0.3	0.5	0.1	-0.3
	Forward 1/2"	0.4	0.8	0.0	0.0
	Forward 1"	0.5	0.3	0.0	0.1
	Baseline	0.2	0.6	-0.1	-0.3
	Slope (dBA/inch)	0.0	0.0	0.0	0.2
r^2	0.04	0.00	0.12	0.72	

*Not measured.

Tabela 4. Podsumowanie z przejazdów wykonanych w ramach projektu NCHRP 1-44 z uwzględnieniem parametrów zewnętrznych.

3. KONTROLA JAKOŚCI DANYCH

W raporcie (NCHRP 1-44, 2009) przedstawiono ewaluację parametrów testowych oraz wzięto pod uwagę niepewność pomiarów w celu ustalenia wytycznych, w tym wartości granicznych potrzebnych do praktycznego wdrożenia procedury OBSI. Na podstawie dotychczasowych doświadczeń użytkowników OBSI oraz normy ISO dla CPX zidentyfikowano kilka zmiennych, które mogą mieć wpływ na rezultaty pomiarów. Czułość wyników OBSI dla zmian w konfiguracji urządzenia pomiarowego OBSI, ciśnienie w oponach, typ pojazdu pomiarowego, prędkość pomiarów, oraz obciążenie były mierzone systematycznie. Zmierzono temperaturę nawierzchni i przeanalizowano jej wpływ na poziomy OBSI dla zakresów określonych w badaniach. Pomiary przeprowadzono w celu oceny wpływu zmiennych testowych na wyniki pomiarów OBSI. W Tabeli 5 poniżej przedstawiono wyniki badania parametrów testowych i zalecenia dotyczące ich limitów i kontroli.

Parametr	Wartość parametru/zmiennej	Opona
Powtarzalność (dla przejazdów)	10 kolejnych przejazdów	SRTT
Powtarzalność (dzienna)	warunki nominalne każdego dnia	SRTT
Konfiguracja miernika	pojedynczy/podwójny miernik	SRTT
Lokalizacja miernika, pionowa	±63 mm, +12.7 mm, pionowo	SRTT
Lokalizacja miernika, przód/tył	±12.7 mm, ±25.4 mm, przód/tył	SRTT
Lokalizacja miernika, odległ. od opony	±12.7 mm, -25.4 mm, od opony	SRTT
Prędkość testowa pojazdu	±3.2 km, ± 6.4 km	SRTT
Cienienie opony	±4, ± 8 psi	SRTT
Obciążenie	±45.5 kg, ± 90.7 kg	SRTT
Pojazd pomiarowy	3 dodatkowe pojazdy	SRTT
Temperatura	16-24oC (MN) 30-41 oC (AZ)	SRTT

Tabela 5. Parametry/Zmienne Testowe dla metody OBSI, (opracowano na podstawie NCHRP 1-44, Appendix C, 2009)

Jak przedstawiono w raporcie (NCHRP 630, 2009) podczas akwizycji danych, mierzono spójność (coherencję) pomiędzy sygnałami z mikrofonów (na każdym z mierników) a różnica między ciśnieniem dźwięku a poziomem natężenia dźwięku (PI Index) dla każdego przedziału 1/3 oktawy. Spójność jest miarą liniowej zależności dwóch sygnałów, gdzie wartość 0 oznacza brak zależności, a wartość 1 oznacza pełną liniową zależność (Beranek, et al., 1992). Matematycznie oznacza to wielkość widma poprzecznego (cross-spectrum) pomiędzy dwoma sygnałami podniesioną do kwadratu oraz podzieloną przez iloczyn auto-widm z obu sygnałów. Dla pomiarów OBSI zakłada się generalnie, że dane są zakłócone gdy spójność (koherencja) wynosi poniżej 0.8 (Donavan, 2006.) Poza kilkoma wyjątkami we wspomnianym raporcie uzyskano spójność na poziomie większym od 0.8 dla wszystkich zakresów 1/3 oktawy dla częstotliwości od 400 do 4000 Hz w trakcie pomiarów parametrów. W zakresach od 400 do 4000 Hz pojawiły się cząstkowe spadki spójności dla odcinków testowych DPG w Arizonie (4 na 578 przejazdów) z powodu wysokich temperatur, przeładowania systemu i przegrzania instrumentu OBSI. Dla zakresów powyżej 4000 Hz spójność jest zazwyczaj niższa z powodu ograniczeń w metodzie różnic skończonych (finite

difference approximation) używanej w algorytmie służącym do określenia intensywności dźwięku (Donavan, 2006). Dla zakresu powyżej 5000 Hz spójność niższa niż 0.8 została odnotowana dla 38% przejazdów. Dodatkowym wskaźnikiem informującym o spójności jest tzw. PI Index. Jeżeli PI Index jest powyżej 5 dB to pomiary obarczone są „zanieczyszczeniem” (Ejsmont, 2005).

Dla potrzeb testowania parametrów, PI Index dla krawędzi tylnej opony sporadycznie przekraczał 5 dB przy częstotliwości 400 Hz (ok 3% przejazdów). Tabela 6 poniżej przedstawia podsumowanie wartości granicznych parametrów na podstawie badań wykonanych w Minnesocie i Arizonie na odcinkach testowych Mn/Road oraz DPG przy prędkości referencyjnej 60 mph (97 km).

Parametr	Rekomendowany limit
Powtarzalność przejazdów, dla A-ważonego poziomu OBSI	Do 1 dB
Powtarzalność przejazdów, dla 1/3 zakresu oktawy	Do 2 dB
Lokalizacja miernika, pionowa	76.2 mm ± 6.35 mm
Prędkość testowa pojazdu	97 ± 1.6 km/h
Cienienie opony (na zimno)	30 ± 2 psi
Obciążenie pojazdu	45.3 kg
Lokalizacja miernika, przód/tył	Krawędź przednia/tylna opony (wodząca/tocząca) ± 12.7 mm
Odległość od krawędzi opony	101.6 mm ± 12.7 mm
Spójność	>0.8 dla częstotliwości poniżej 4000 Hz
PI Index	<5dB dla danych z ważnych przejazdów

Tabela 6. Rekomendowane wartości graniczne parametrów (opracowano na podstawie NCHRP 630, 2009)

4. INTERPRETACJA WYNIKÓW, UŚREDNIANIE, POPRAWKI, NORMALIZOWANIE

4.1. SPB

Temperatura powietrza i temperatura nawierzchni znacząco wpływa na wyniki pomiaru hałaśliwości nawierzchni. W (PN-EN ISO 11819-1) nie została opisana procedura uwzględniania poprawki ze względu na temperaturę. Wartość temperatury referencyjnej wynosi 20 °C (PN-EN ISO 11819-1). W (Fabianne Anfosso-Ledee, et al., 2007) wskazuje na bezpośrednie korelacje pomiędzy temperaturą powietrza i temperaturą badanej nawierzchni i ich wpływie na wartości poziomu hałasu drogowego. Autorzy zastosowali wzory uwzględniające poprawkę ze względu na temperaturę powietrza, opony i nawierzchni.

Wzór uwzględniający temperaturę powietrza ma postać (F. Anfosso-Lede, et al., 2007)

$$L_A(T) = a_{air}(T_{air} - 20) + L_A$$

gdzie:

$L_A(T)$ - wartość poziomu hałasu po uwzględnieniu poprawki,
 L_A - wartość pomierzona poziomu hałasu,
 T_{air} - temperatura powietrza,
 a_{air} - współczynnik uwzględniający różnice temperatury powietrza względem temperatury referencyjnej.

Wzór uwzględniający temperaturę opony ma postać **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**

$$L_A(T) = a_{tyre}(T_{tyre} - 20) + L_A$$

gdzie:

$L_A(T)$ - wartość poziomu hałasu po uwzględnieniu poprawki,
 L_A - wartość pomierzona poziomu hałasu,
 T_{tyre} - temperatura opony,
 a_{tyre} - współczynnik uwzględniający różnice temperatury opony względem temperatury referencyjnej.

Wzór uwzględniający temperaturę nawierzchni ma postać:

$$L_A(T) = a_{road}(T_{road} - 20) + L_A$$

gdzie:

$L_A(T)$ - wartość poziomu hałasu po uwzględnieniu poprawki,
 L_A - wartość pomierzona poziomu hałasu,
 T_{road} - temperatura nawierzchni,
 a_{road} - współczynnik uwzględniający różnice temperatury nawierzchni względem temperatury referencyjnej.

Powyższe wzory uwzględniają wpływ temperatury w przypadku jej pomiaru w różnych miejscach. Wartości współczynnika poprawkowego dla poszczególnych przypadków zamieszczono w Tabeli 7 poniżej (F. Anfosso-Lede, et al., 2007).

Miejsce pomiaru temperatury	Nawierzchnia bitumiczna [dB/°C]	Asfalt porowaty [dB/°C]	Nawierzchnia betonowa [dB/°C]
Powietrze	-0,1	-0,06	-0,03
Nawierzchnia	-0,06	-0,04	-0,02
Opona	-0,09	-0,05	-0,03

Tabela 7. Współczynniki poprawkowe ze względu na temperaturę (F. Anfosso-Lede, et al., 2007).

4.2. CPX

(Mioduszewski, Taryma, & Wozniak, 2016) bada wpływ temperatury na hałas nawierzchni w jednej trzeciej oktawy pasma widma częstotliwości równoważonej krzywą typu A analizując współczynnik korekty temperatury. Zgodnie z ISO/CD TS 11819-3 poziom korekty w badaniach CPX jest następujący:

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

gdzie:

$C_{T,t}$ - poziom korekty CPX dla temperatury T i opony t (w dB)

γ_t - współczynnik temperatury dla opony t (w dB/°C)

T- temperatura powietrza w trakcie pomiaru

T_{ref} - temperatura referencyjna powietrza (20°C)

Autorzy stwierdzają, że w świetle dostępnej literatury współczynniki temperatury opon P1 i H1 (zgodnie z normą) są podobne i mogą być pogrupowane w trzech kategoriach zależnych od rodzaju nawierzchni:

asfalt zagęszczony

$$\gamma_{P1} = \gamma_{H1} = -0,14 + 0,006 v$$

z betonu cementowego

$$\gamma_{P1} = \gamma_{H1} = -0,10 + 0,004 v$$

asfalt porowaty

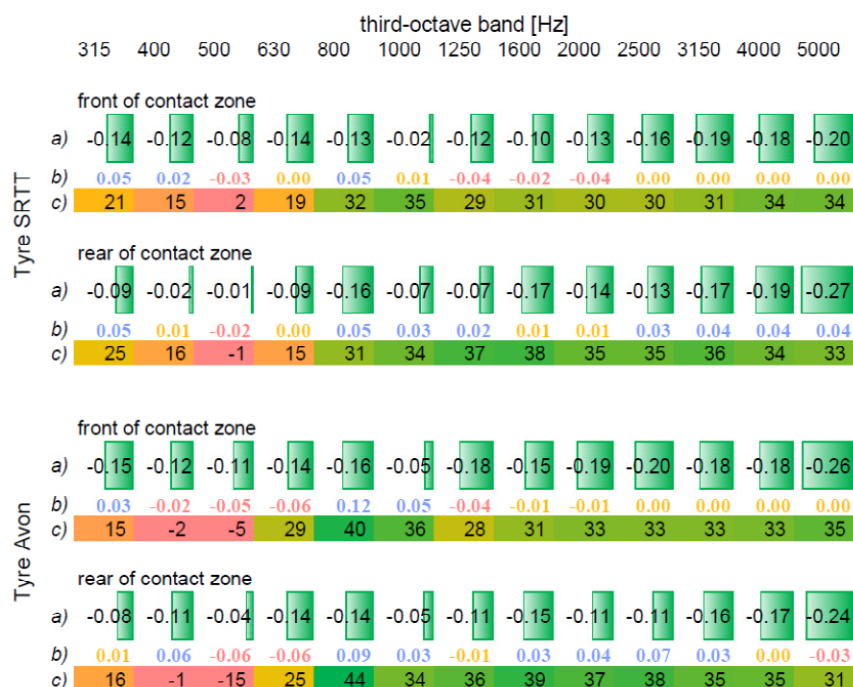
$$\gamma_{P1} = \gamma_{H1} = -0,08 + 0,006 v$$

jednocześnie stwierdzają, że procedura korekcji temperatury jest neutralna w stosunku do częstotliwości, gdyż odnosi się do całkowitego ciśnienia akustycznego równoważonego krzywą typu A, natomiast zgodnie z dostępną literaturą największy wpływ temperatury rejestruje się przy wysokich częstotliwościach, nieco mniejszy przy niskich i najmniejszy przy częstotliwości w okolicach 1kHz.

Uzyskane dane eksperymentalne potwierdziły wpływ temperatury na widmo częstotliwości hałasu w zależności od kombinacji opony testowej i typu nawierzchni. Obserwowane rozkłady współczynników korekcyjnych funkcji częstotliwości istotnie różniły się w trzech badanych grupach nawierzchni. W przypadku opon P1 i H1 zaobserwowano znaczne różnice w określonym pasmie trzeciej oktawy.

(Mioduszewski, Taryma, & Wozniak, 2014) stwierdza, że istnieje dobra korelacja między temperaturą powietrza a poziomem dźwięku. Dla opon ISO współczynnik korekcji temperatury mieścił się w przedziale $-0.067 \text{ dB/}^\circ\text{C}$ - $0.122 \text{ dB/}^\circ\text{C}$ przy średniej $0.088 \text{ dB/}^\circ\text{C}$.

(Bühlmann, Sandberg, & Mioduszewski, 2015) w pracy analizowano wpływ temperatury na hałas w zależności od prędkości (praca przeglądowa bez badań własnych). Autorzy wykorzystali w analizie model emisji hałasu CNNOSSOS. Na Rysunek 19 przedstawiono wpływ temperatury na spektrum hałasu, jego zmiany wraz z prędkością oraz wykładnik prędkości uzyskany dla każdej jednej trzeciej częstotliwości oktawy.



Rysunek 19. Analiza wrażliwości temperaturowej dla widm w 1/3 zakresu oktawy

W korektach „prędkościowych” wykorzystywano zależność (Stahlfest & Skov, 2016):

$$L_{veh} = a + b \cdot \log_{10}(v/v_{ref})$$

Gdzie:

v – średnia prędkość rejestrowanych pojazdów,

W wyniku dyskusji w gronie uczestników ROSANNE postanowiono przeliczać wyniki uzyskane w wyższych prędkościach (powyżej 80 km/h) do prędkości 80 km/h.

W wyniku analizy uzyskanych danych pomiarowych sformułowano następujące wnioski:

- 1) Istnieje związek korelacyjny między poziomami hałasu CPX mierzonymi oponą P1 i poziomami hałasu SPB z samochodów osobowych, o ile oba typy poziomu hałasu są mierzone z tą samą prędkością odniesienia. Średnia wartość relacji z danych zebranych w projekcie ROSANNE, dla położenia mikrofonu (w metodzie SPB) wynoszącego 1,2 m nad poziomem jezdni:
$$L_{AFmax} = 0,95CPXP - 15,6 \text{ Db}$$
- 2) Powyższe równanie daje średnią różnicę 20,5 dB między dwiema zmierzonymi wielkościami i prawie 90% wszystkich danych znajduje się w obszarze ± 1 dB wokół tej linii trendu.
- 3) Wyniki pomiarów, w których poziomy hałasu CPX zostały zmierzone przy prędkości odniesienia wynoszącej 80 km/h, podczas gdy poziomy hałasu uzyskane metodą SPB zostały zmierzone przy prędkościach odniesienia 110-120 km/h, nie wykazały takiego samego wyraźnego wzorca. Przyczyny tego nie są znane. Po skorygowaniu o różnicę prędkości za pomocą współczynników prędkości podanych w Tabeli 1, prawie połowa tych danych odbiega o 2 dB lub więcej od średniej relacji (2).
- 4) Na nawierzchniach „zamkniętych” stwierdzono różnicę 9,5 dB między poziomem hałasu CPX mierzonym dla opony referencyjnej H1 a poziomem hałasu w metodzie SPB wieloosiowych samochodów ciężarowych, mierzonym na wysokości 1,2 m. Oznacza to średnią różnicę między CPXH80 i L_{AFmax} wynoszącą 12 dB dla dwuosiowych samochodów ciężarowych, wyznaczoną na podstawie obserwowanych średnich różnic pomiędzy poziomami przejazdu dla dwuosiowych i wieloosiowych samochodów ciężarowych. Zależność między poziomami hałasu CPX mierzonymi oponą referencyjną P1 i poziomem hałasu metodą SPB nie były tak dobre. Średnią zależność między poziomami hałasu w obu metodach, dla wieloosiowych pojazdów ciężarowych określa funkcja:
$$L_{AFmax} = 0,65CPXH_{80} - 24,0 \text{ dB}$$
- 5) Gdy stosowane są wyższe pozycje mikrofonu w metodzie SPB (od nominalnej 1,2 m), średni poziom szumów zmniejsza się o około 0,5 dB na metr, wraz ze zwiększaniem się wysokości usytuowania mikrofonu. Porównanie nawierzchni, a tym samym ich klasyfikacja, może zależeć od wysokości mikrofonu stosowanej do pomiarów hałasu przejazdu. Istotne jest zatem, aby takie pomiary do celów klasyfikacji hałasu nawierzchni były podejmowane na wysokości, która jest reprezentatywna dla narażenia na hałas ludzi żyjących lub pracujących w pobliżu drogi.

4.3. OBSI

Normalizacja i poprawki dotyczące temperatury powietrza przy której prowadzone są badania metodą OBSI zostały zaproponowane w wytycznych OBSI.

Linijowe korekty temperatury powietrza o 0.072 dB/°C (0.040 dB/°F) powinny być użyte w celu znormalizowania mierzonych poziomów dźwięku (IL) do temperatury referencyjnej wynoszącej 20°C (68°F) używając poniższych równań:

$$IL \text{ Znormalizowany (dBA)} = IL \text{ Mierzony (dBA)} + 0.072 \times (\text{Temp Powietrza w } ^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})$$

$$IL \text{ Znormalizowany (dBA)} = IL \text{ Mierzony (dBA)} + 0.040 \times (\text{Temp Powietrza w } ^\circ\text{F} - 68^\circ\text{F})$$

gdzie:

IL mierzone=natężenie poziomów dźwięku (IL) mierzonego przez system podczas konfiguracji początkowej, oraz
 IL znormalizowane=poziom natężenia dźwięku (IL) zanotowane podczas znormalizowanego poziomu temperatury.

5. ZASTOSOWANIE WYNIKÓW

5.1. Porównania między metodami

Konieczność walki z zanieczyszczeniem środowiska hałasem drogowym wprowadziła szereg rozwiązań. Jednym z nich są nawierzchnie o obniżonej hałaśliwości. Hałaśliwość nawierzchni można mierzyć za pomocą różnych metod:

- Statistical pass by - SPB,
- Controlled pass by - CPB,
- Close proximity – CPX,
- Close proximity - OBSI.

W poniższej Tabeli 8 przedstawiono zalety i wady poszczególnych metod (M. Buret et al., 2014) (Gardziejczyk et al.,2014), (Sybilski et al., 2005).

Metoda	Opis	Zalety	Wady
SPB	Metoda SPB polega na pomiarze maksymalnego poziomu dźwięku dla pojazdów przejeżdżających pojedynczo. Badana próba musi posiadać odpowiednią liczebność, aby wyniki były statystycznie istotne.	-możliwość ustalenia rzeczywistej hałaśliwości poszczególnych kategorii pojazdów -możliwość określenia hałaśliwości nawierzchni drogowej - możliwość określenia poziomu hałasu drogowego w otoczeniu drogi na podstawie wyników z pomiarów SPB	-brak możliwości uwzględnienia wpływu opony -brak możliwości pomiaru przy bardzo dużych natężeniach ruchu lub przy braku ruchu drogowego - problem z uzyskaniem odpowiedniej liczebności badanej próby
CPB	Metoda kontrolowanego przejazdu polega na pomiarze przejazdu pojedynczego pojazdu z różnymi prędkościami na różnych rodzajach opon.	-możliwość ustalenia rzeczywistej hałaśliwości poszczególnych kategorii pojazdów -możliwość określenia hałaśliwości nawierzchni drogowej - możliwość określenia hałaśliwości nawierzchni drogi przed jej oddaniem do eksploatacji	-brak możliwości uwzględnienia wpływu opony -brak możliwości pomiaru przy bardzo dużych natężeniach ruchu -problem z przygotowaniem odcinka pomiarowego - kosztowne i często niemożliwe zamknięcie ruchu na badanym odcinku
CPX	Metoda CPX polega na pomiarze poziomu hałasu toczenia za pomocą dwóch mikrofonów zainstalowanych	-możliwość pomiaru hałaśliwości nawierzchni z uwzględnieniem rodzaju opony	-brak możliwości uwzględnienia struktury rodzajowej na hałaśliwość nawierzchni - bardzo

	w pobliżu opony. Mikrofony umieszczone są w specjalnie skonstruowanej przyczepie lub bezpośrednio przy oponie samochodu. Do badania wykorzystuje się cztery opony referencyjne, letnie i zimowe.	-krótki czas pomiaru - jednolity i czytelny sposób określenia współczynnika CPXI	kosztowna aparatura badawcza -brak możliwości odniesienia wartości uzyskanych z pomiarów bezpośrednio do oceny klimatu akustycznego terenu położonego przy drodze
OBSI	Metoda OBSI polega na pomiarze poziomu hałasu toczenia za pomocą dwóch par mikrofonów zainstalowanych w pobliżu opony. Mikrofony umieszczone są bezpośrednio przy oponie samochodu. Do badania wykorzystuje się jedną oponę referencyjną.	-możliwość pomiaru hałaśliwości nawierzchni z uwzględnieniem rodzaju opony -krótki czas pomiaru - łatwy transport i możliwość pomiarów w odległych miejscach i ciężko dostępnych miejscach	-brak możliwości uwzględnienia struktury rodzajowej na hałaśliwość nawierzchni -brak możliwości odniesienia wartości uzyskanych z pomiarów bezpośrednio do oceny klimatu akustycznego terenu położonego przy drodze

Tabela 8. Porównanie metod pomiaru hałaśliwości nawierzchni (Gardziejczyk et al., 20015), (Gardziejczyk et al.,2014)

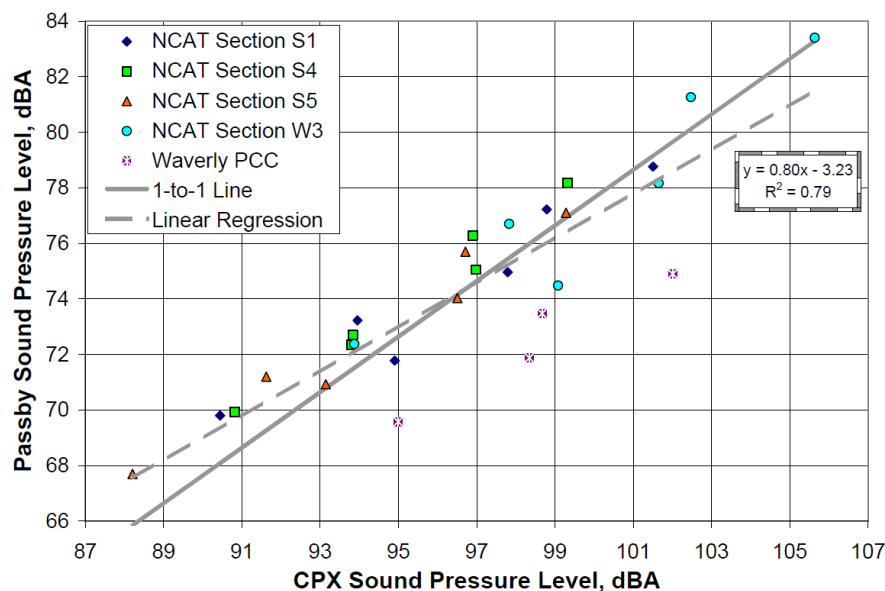
5.1.1. CPX, OBSI, SPB

W opracowaniu (Buret, Mcintosh, & Simpson, 2014) przedstawiono wyniki badań akustycznych przeprowadzonych na siedmiu różnych nawierzchniach na trasie Mornington Peninsula Freeway, w pobliżu Melbourne. Testy zostały przeprowadzone w pierwszym roku po wykonaniu nawierzchni i są częścią programu, w który badania będą powtarzane przez kolejne pięć lat.

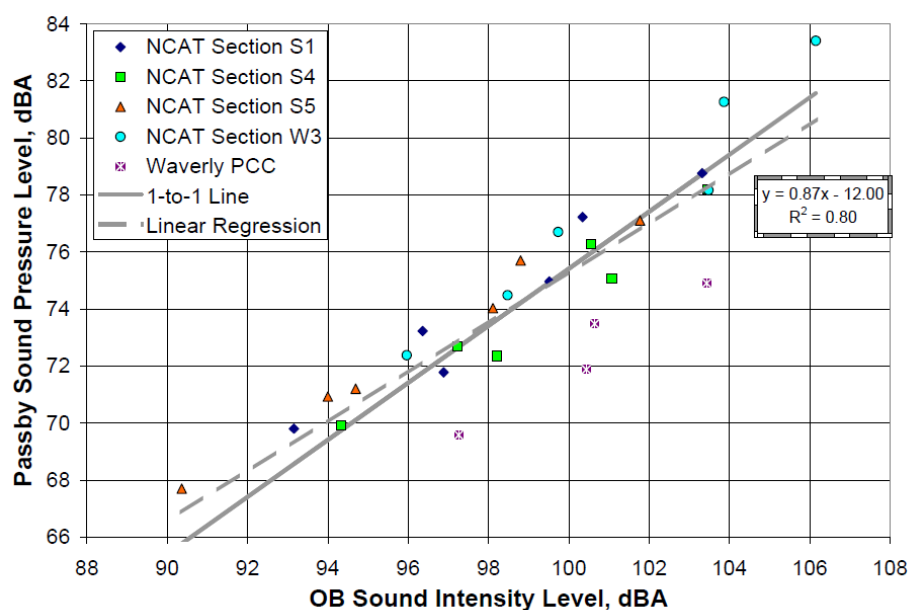
Badane nawierzchnie asfaltowe składały się z czterech różnych nawierzchni wykonanych w technologii OGA (open graded asphalt), jednego SMA i dwóch technologii zastrzeżonych. Przeprowadzono testy akustyczne za pomocą trzech różnych metod: SPB, CPX i OBSI. Dwa ostatnie zostały przeprowadzone przy użyciu opon referencyjnych SRTT i AV4. Metoda CPX wykazała lepszą korelację z pomiarami OBSI ($R^2=0,8068$) niż metodą SPB ($R^2=0,4099$). Wyższą korelację uzyskano dla opony AV4 ($R^2=0,88205$).

Podczas gdy odcinek SMA okazał się najgłośniejszą badaną nawierzchnią, najcichszą powierzchnią było OGA poddane obróbce polegającej na zmieleniu 1-2 mm jego powierzchni w celu uzyskania negatywnej tekstury. W stosunku do SMA, dla OGA stwierdzono obniżenie poziomów CPX do 5 dB (A) dla SRTT i około 3 dB (A) dla AV4. Zgodnie z wcześniejszymi pracami stwierdzono, że dwuwarstwowa OGA działa lepiej niż pojedyncza warstwa OGA, wykazując poprawę w zakresie redukcji szumów, ale także mniejszą utratę skuteczności w czasie.

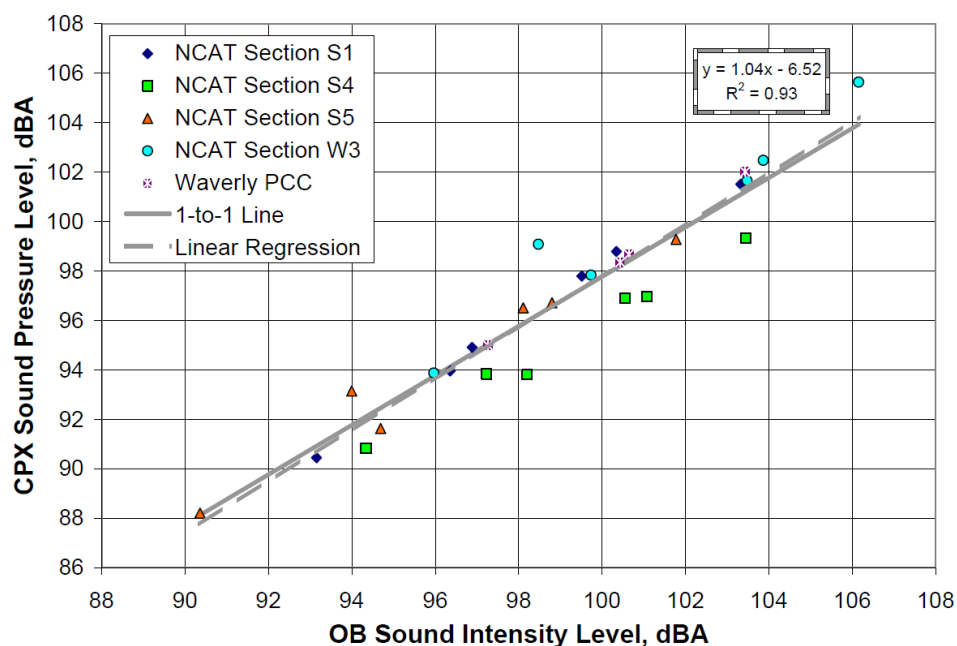
(Paul R. Donovan, 2009b) w artykule przedstawiono wyniki badań porównawczych przeprowadzonych między CPX, OBSI i SPB na pięciu odcinkach testowych w prędkościach 35,45 i 60 mph z wykorzystaniem opon SRTT i M3 Dunlop winter sport (Rysunek 20, Rysunek 21, Rysunek 22 poniżej kolejno CPX/SPB, OBSI/SPB i OBSI/CPX).



Rysunek 20. Porównanie wyników otrzymanych metodą CPX i SPB (Ronavan, 2009b)



Rysunek 21. Porównanie wyników otrzymanych metodą OBSI i SPB (Ronavan, 2009b)



Rysunek 22. Porównanie wyników otrzymanych metodą CPX i OBSI (Ronavan, 2009b)

W artykule (Manfred Haider, Conter, Green, Schmidt, & Sandberg, 2016) przedstawiono zakres i wyniki badań przeprowadzonych w ramach projektu ROSANNE (zrealizowany w FP7, PG uczestniczyło w projekcie), którego celem była harmonizacja istniejących metod pomiaru współczynnika tarcia, hałasu i oporów toczenia oraz przygotowanie zharmonizowanych metod pomiarowych do procesu standaryzacji.

W obszarze oceny hałasu rozpatrywano w zasadzie dwie metody: CPX i SPB. Na podstawie danych pomiarowych (wyniki dostępne w raporcie D.2.3 <http://rosanne-project.eu/> w formie wykresów korelacyjnych) określono zależności korelacyjne dla tych metod. Średnia zależność dla mikrofonu ustawionego na wysokości 1,2m i pojazdu osobowego jest następująca:

$$LAF_{max, 80} = 0.95 * CPXP80 - 15.6 \text{ dB}$$

natomiast dla pojazdów ciężarowych zależność ta przedstawia jak niżej:

$$LAF_{max, 80} = 0.65 * CPXH80 + 24.0 \text{ dB}$$

Drugim ważnym zadaniem projektu ROSANNE w obszarze hałasu była ocena wpływu temperatury na pomiary hałaśliwości. Opracowano zależność pozwalającą skorygować całkowity poziom hałasu mierzonego przez CPX i SPB do temperatury referencyjnej (20°C) przy pomocy tak zwanej krzywej korekcyjnej A:

$$LA_{ref} = LAT - C * (T - T_{ref})$$

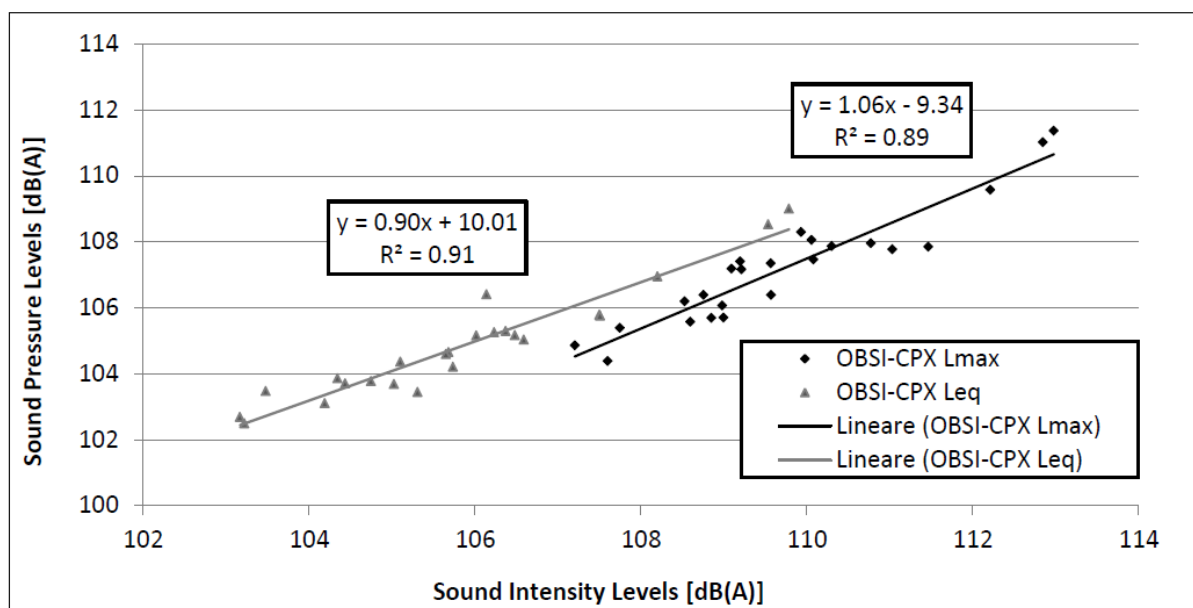
(Manfred Haider, Conter, Wehr, Sandberg, & Anfosso, 2014) w artykule przedstawiono postępowanie prac prowadzonych w ramach projektu ROSANNE (zrealizowany w FP7, PG uczestniczyło w projekcie), którego celem była harmonizacja istniejących metod pomiaru współczynnika tarcia, hałasu i oporów toczenia oraz przygotowanie zharmonizowanych metod pomiarowych do procesu standaryzacji. W artykule przedstawiono krótki opis metod CPX i SPB zwracając jednocześnie uwagę na krytyczne znaczenie temperatury powietrza, powierzchni i opony rejestrowanej.

(Licitra, Cerchiai, Teti, Chetoni, & Bianco, 2016) przedstawiono wyniki badań porównawczych CPB i CPX zrealizowanych w ramach programu LEOPOLD. Metoda CPB (z ang. controlled pass-by method) jest odmianą podstawowej metody SPB, z taką samą konfiguracją mikrofonów. W metodzie tej obserwacji podlega pojazd wyposażony w specjalną oponę i poruszający się ze stałą prędkością (NF S 31-119-2 Acoustics In Situ Characterization Of The Acoustic Qualities Of Road Surfaces - Pass By Acoustic Measurement - Part 2: Controlled Pass-by Method). Pomiary przeprowadzono na kilku rodzajach nawierzchni, a wyniki poddano analizie porównawczej, w której oceniano trzy wskaźniki wyznaczone z pomiarów CPB i wskaźnik normowy CPX. Podstawowy wniosek płynący z publikacji to ten, że nie da się zastosować tego samego prostego filtra propagacji CPX dla danych CPB. Ponadto obie metody inaczej zależą od prędkości, szczególnie gdy do porównania z CPX wykorzystuje się wskaźniki energii SEL.

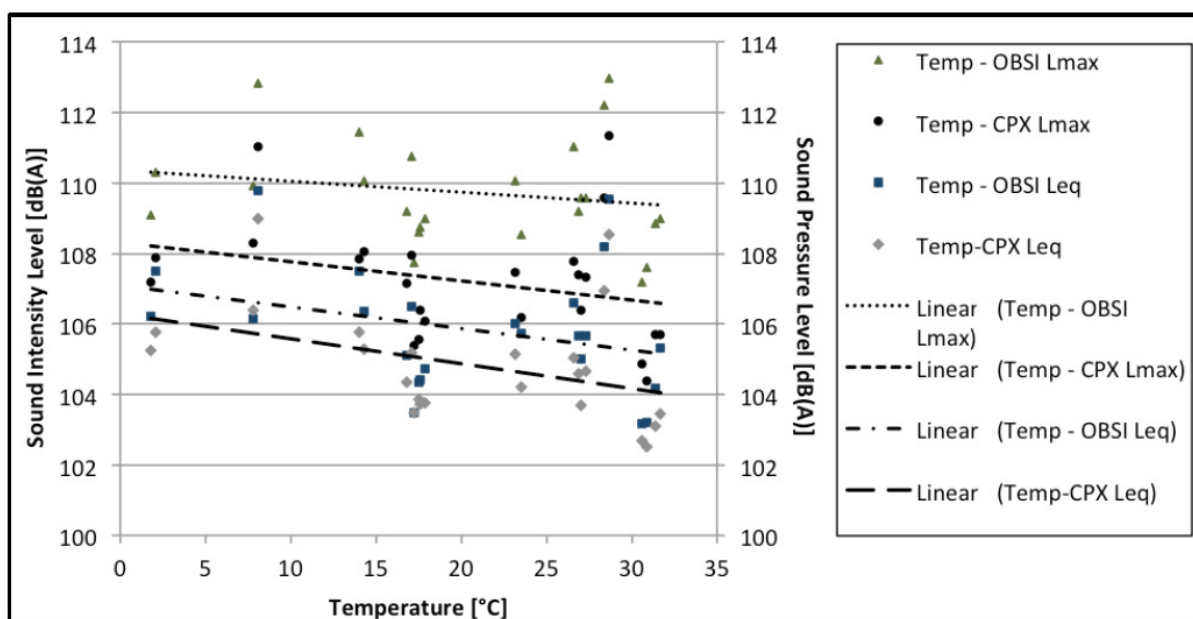
5.1.2. CPX vs OBSI

(Federico Irali, Gonzalez, Tighe, & Simone, 2015) w artykule przedstawiono wyniki oceny emisji hałasu dla kilku dróg w południowym Ontario, w tym zarówno odcinków sztywnych jak i podatnych. Metodologia badania obejmowała ocenę hałasu w różnych temperaturach nawierzchni i otoczenia przy jednoczesnym zastosowaniu metod CPX i OBSI (Rysunek 23). W analizie porównawczej obserwowano dwa parametry, to jest maksymalny poziom hałasu (L_{max}) i równoważny poziom hałasu (L_{equ}). Uzyskane wyniki pomiarów

pozwołyły na wyznaczenie zależności korelacyjnej CPX-OBSI oraz zależności temperaturowej (Rysunek 24).



Rysunek 23. Regresja liniowa pomiędzy wynikami CPX i OBSI



Rysunek 24. Zależność między temperaturą a pomiarami CPX i OBSI

Ogólny trend wyników wskazywał nieco niższe wartości uzyskane późnym popołudniem niż wczesnym rankiem (tj. gdy temperatura nawierzchni była wyższa). Spadek wartości szumu można było również zaobserwować w liniach trendów modeli regresji liniowej CPX i OBSI, jednak analiza ANOVA potwierdziła, że nie ma statystycznej różnicy między porannymi i

popołudniowymi danymi, co sugeruje, że pomiary hałasu można przeprowadzić w dowolnym momencie w ciągu dnia bez znaczącej różnicy wartości.

Uzyskane współczynniki korelacji między danymi OBSI i CPX dla równoważnych poziomów hałasu 0,91 i 0,89 dla maksymalnych poziomów hałasu są wysokie i świadczą zarówno o spójności danych, jak i zależności między natężeniem dźwięku, a poziomem ciśnienia akustycznego, zarówno dla pomiarów impulsywnych (maksymalnych), jak i uśrednionych (równoważnych).

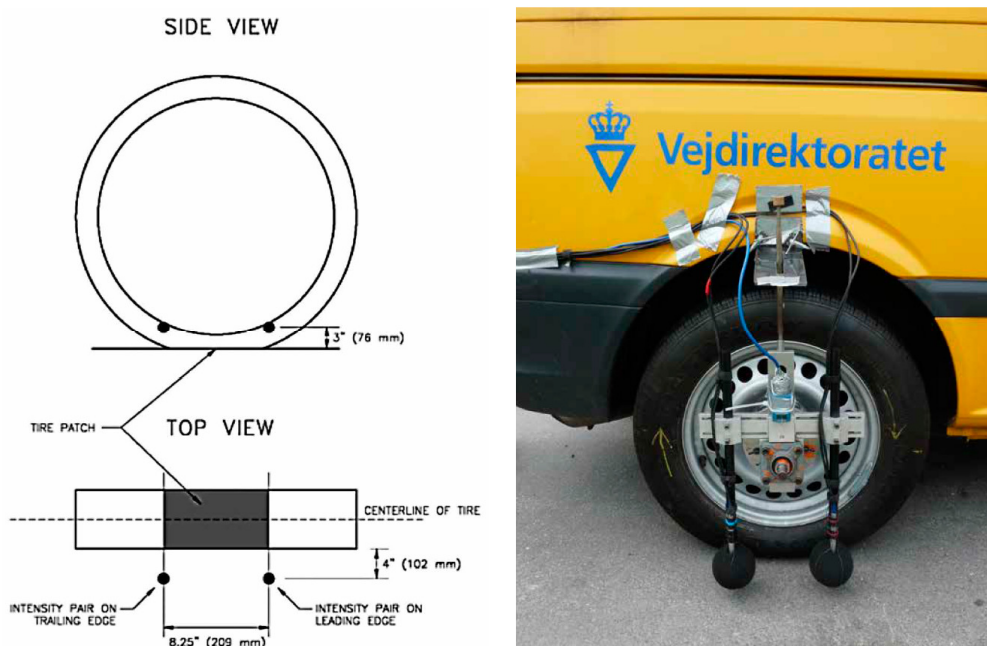
Niektóre z wybranych odcinków zostały przetestowane również w latach 2007-2008, a uzyskane wyniki porównano z bieżącymi danymi. Ich analiza wykazała, że wszystkie odcinki są obecnie głośniejsze niż pięć sześć lat wcześniej. Wzrost poziomu hałasu nie jest jednolity i jest wyższy na sekcji nawierzchni SMA niż na sekcjach z betonu cementowego.

Autor (Oddershede, 2013) opisał badania porównawcze między metodami CPX i OBSI. Pomiary metodą CPX (Rysunek 25) wykonano według projektu normy ISO/CD 11819-2.



Rysunek 25. Widok urządzenia do pomiaru hałaśliwości metodą CPX

Pomiary OBSI zostały przeprowadzone przez Transtec Group Inc. z urządzeniem zamontowanym na pojeździe testowym, jak na Rysunek 26. Pomiary wykonano zgodnie ze standardem AASHTO TP 76-11, z tym, że zamiast prędkości pomiarowych 35 mph, 45 mph lub 60 mph stosowano prędkości 50 km/h i 80 km/h.

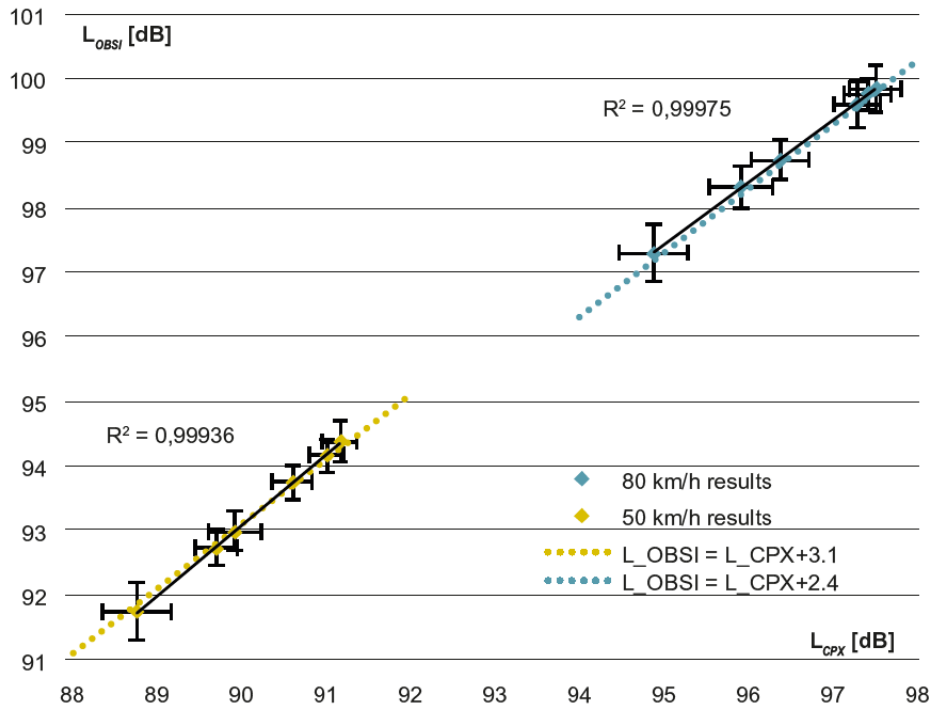


Rysunek 26. Sposób montażu urządzenia OBSI na samochodzie testowym

Badania wykonano na sześciu 400-metrowych odcinkach nawierzchni wykonanych w różnych technologiach. Odcinki były zlokalizowane na torze testowym DRD (Danish Road Directorate) oznaczonym jako Igelsø. Wykonane były ok. 2 lata przed badaniami. Pięć z tych odcinków uważa się za posiadające właściwości redukujące hałas, przy czym najcichsza jest nawierzchnia AC 6, natomiast szósty odcinek (AC 11d) jest nawierzchnią odniesienia (referencyjną).

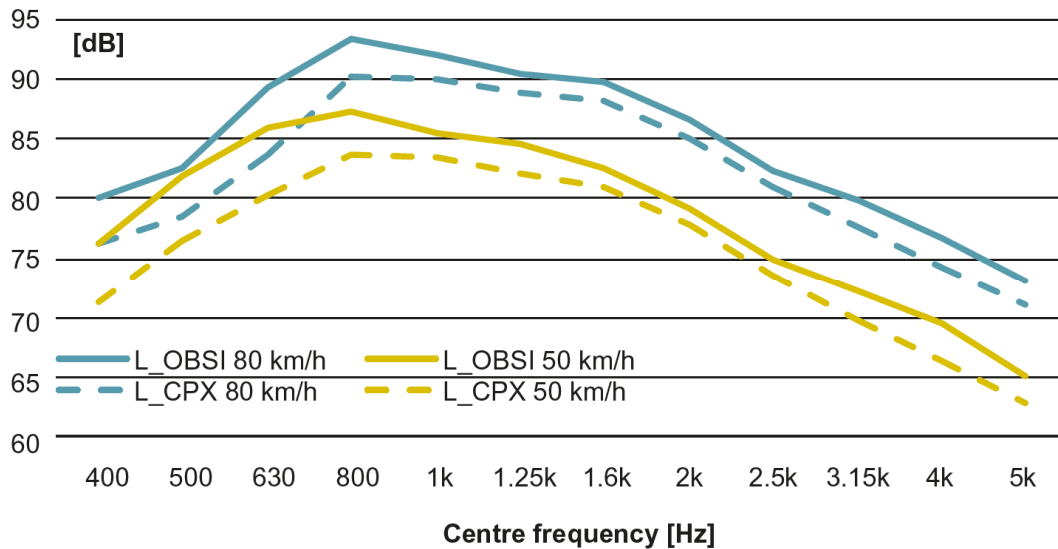
Pomiary przeprowadzono 26 czerwca 2012 r. Temperatura powietrza wahała się od 26,8°C do 27,2°C. Podczas pomiarów zastosowano dwie opony SRTT, wyprodukowane w 46 tygodniu 2008 roku. W czerwcu 2012 r. miały twardość gumy 71 jednostek Shore A zmierzoną w temperaturze 20°C. Obie opony zostały użyte do pomiarów CPX z oponami zamontowanymi na przyczepie mierzącej w obu śladach kół. Pomiary OBSI przeprowadzono tylko na prawym kole, ale oba koła były założone na pojazd pomiarowy. Do dalszych analiz wykorzystywano wyniki średnie z obu opon, bez korekty temperaturowej ponieważ badania prowadzono w podobnych temperaturach.

Najwyższe odchylenie standardowe uzyskano na nawierzchni z AC 6, na której też otrzymywano najniższy poziom emisji hałasu. Zgodnie z oczekiwaniami, w badaniach metodą OBSI uzyskano wyższy poziom niż metodą CPX ze względu na mniejszą odległość pomiaru od opony (165 mm w porównaniu do 300 mm). Zależność między obu metodami pomiarowymi, uzyskana w opisywanych badaniach przedstawia Rysunek 27.



Rysunek 27. Zależność wyników pomiarów metodami CPX i OBSI

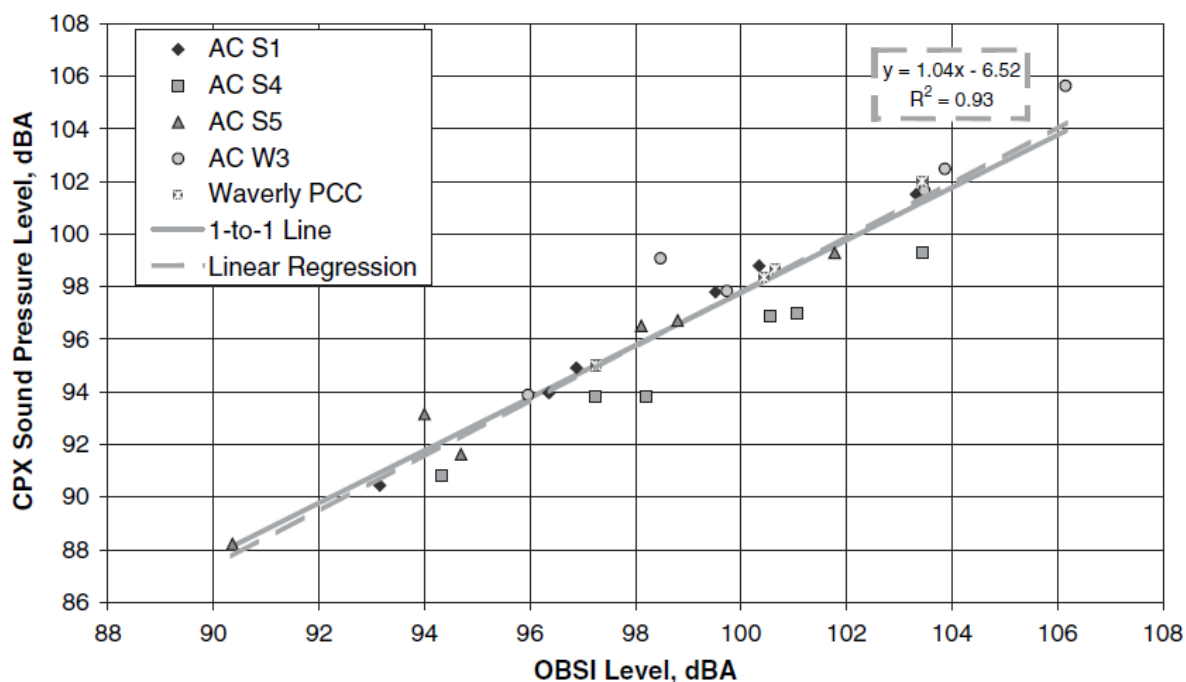
Widma średniej częstotliwości zmierzone dwiema metodami przedstawiono na Rysunek 28. Za wyjątkiem przesunięcia, widma są podobne. Przy częstotliwościach 1000 Hz i wyższych poziomy OBSI są o około 2 dB wyższe niż poziomy CPX. Przy niższych częstotliwościach różnica ta wynosi 4 - 5 dB przy większej rozpiętości.



Rysunek 28. Widma średniej częstotliwości zmierzone dwiema metodami

W raporcie NCHRP 630 przedstawiono współczynniki korelacji i determinacje dla metody OBSI i CPX przy prędkości referencyjnej 97km/h na nawierzchniach AC oraz PPC

wykonanych w USA. Rysunek 29 przedstawia porównanie obu metod przy współczynniku determinacji r^2 równym 0.93.



Rysunek 29. Porównanie poziomów ciśnienia dźwięku uzyskanych metodą CPX z poziomami natężenia dźwięku uzyskanymi metodą OBSI (NCHRP 630, 2009)

Tabela 9 obrazująca parametry dopasowania obu metod na podstawie badań z tego samego raportu jest przedstawiona poniżej.

Metric	Sections S1, S5, W3		Sections S1, S4, S5, W3		All Sites	
	CPX	OBSI	CPX	OBSI	CPX	OBSI
Slope	0.94	0.96	0.87	0.94	0.80	0.87
r^2	0.94	0.95	0.94	0.93	0.79	0.87
Offset, dB	21.9	23.7	21.7	24.0	22.4	24.6
Std Dev, dB	1.2	0.9	1.1	1.1	1.8	1.7
Avg. Dev, dB	1.0	0.7	0.8	0.9	1.4	1.3

Tabela 9. Parametry korelacji i dopasowania dla metody CPX i OBSI (NCHRP 630, 2009)

5.1.3. CPX vs SPB

Kryteria oceny hałaśliwości nawierzchni zostały opracowane przez (Gardziejczyk, 2010) w Tabela 10:

gdzie:

L1–maksymalny poziom dźwięku od przejeżdżającego z prędkością 80 km/h, statystycznego pojazdu osobowego, ustalony zgodnie z metodą SPB

CPXI–wskaźnik ustalony zgodnie z metodą CPX, jako średnia arytmetyczna poziomów dźwięku generowanego w tzw. polu bliskim, przy zastosowaniu zestawu opon testowych

Klasa	Poziom hałasu, dB		Przykłady warstw ścieralnych
	CPXI (80 km/h)	L ₁ (80 km/h)	
NC – ciche nawierzchnie	< 93,5	< 73,0	<ul style="list-style-type: none"> – pojedyncze warstwy porowate o uziarnieniu < 10 mm (np. PA8), – podwójne warstwy porowate, – nawierzchnie poroelastyczne.
ZH – zredukowana hałaśliwość	93,5 ÷ 96,4	73,0 ÷ 75,9	<ul style="list-style-type: none"> – SMA i betony asfaltowe o uziarnieniu < 10 mm (np. SMA5, SMA8, AC5, AC8), – bardzo cienkie naw. asfaltowe typu BBTM o uziarnieniu < 10 (np. BBTM8), – pojedyncze warstwy porowate o uziarnieniu > 10 mm (np. PA11).
NH – normalna hałaśliwość	96,5 ÷ 99,4	76,0 ÷ 78,9	<ul style="list-style-type: none"> – SMA i betony asfaltowe o uziarnieniu 10÷16 mm (np. SMA11, SMA12,8, AC11, AC12,8), – bardzo cienkie naw. asfaltowe typu BBTM o uziarnieniu > 10 (np. BBTM11), – beton cementowy o optymalnym teksturowaniu.
PH – podwyższona hałaśliwość	99,5 ÷ 102,4	79,0 ÷ 81,9	<ul style="list-style-type: none"> – powierzchniowe utrwalenie, – uszorstnione naw. typu SMA, – SMA i beton asfaltowy o uziarnieniu > 16 mm, – klasyczne betony cementowe, – betonowa kostka brukowa o optymalnym układzie połączeń.
NH – nadmierna hałaśliwość	≥ 102,5	≥ 82,0	<ul style="list-style-type: none"> – kostka kamienna, – betonowa kostka brukowa, – betony cementowe poprzecznie rowkowane.

Tabela 10. Kryteria oceny hałaśliwości nawierzchni (Gardziejczyk, 2010)

Ruch drogowy jest głównym źródłem hałasu w kontekście miejskim, a nawierzchnia drogi o niskiej emisji jest jednym z najczęściej stosowanych rozwiązań w zakresie

ograniczania hałasu (Licitra, Teti, Cerchiai, Ascari, & Chetoni, 2014). Nawierzchnia drogowa z gumą jest rozwiązaniem często stosowanym na całym świecie i ma ogromne zalety środowiskowe związane z recyklingiem zużytych opon. We Włoszech technologia nawierzchni z gumą została wprowadzona stosunkowo niedawno, a niektóre eksperymentalne wdrożenia zostały poddane badaniom akustycznym w ostatnich latach. Oceniane nawierzchnie zostały wykonane na drogach pozamiejskich i poddane na eksploatacji w wyniku rzeczywistego ruchu, w celu zweryfikowania trwałości akustycznej tej technologii w czasie. W pracy przedstawiono dane uzyskane z dwóch metod pomiarowych CPX i SPB na niektórych nawierzchniach z dodatkiem gumy. Wyniki wyraźnie pokazują, że tego typu rozwiązania mogą skutecznie obniżyć hałas drogowy. W niektórych przypadkach analizowanych w publikacji obniżenie poziomu emisji było niewielkie, a przyczyny należy upatrywać w złej jakości wykonania nawierzchni.

W technologii nawierzchni gumowych wykorzystuje się granulaty gumowy jako modyfikator w mieszankach asfaltowych. Dodatek CRM (Crumb Rubber Modifier) do spoiwa zwiększa jego elastyczność i sprężystość, a także poprawia trwałość i odporność na zmęczenie.

Guma może być dodawana do mieszanki zazwyczaj dwoma metodami, które określa się jako proces mokry i proces suchy. W pierwszym z nich granulaty gumowy miesza się z asfaltem przed dodaniem kruszywa. Natomiast w procesie suchym guma jest najpierw mieszana z kruszywem i jest traktowana jako substytut niewielkiej części drobnego kruszywa (od 1 do 3%) a następnie dodaje się dopiero asfalt.

W badaniach wykorzystano metodologię opartą na metodzie CPX, z mikrofonami zainstalowanymi na pojeździe z własnym napędem. Podczas sesji pomiarowej przejazdu wykonuje się kilkakrotnie zmieniając prędkość pojazdu, zwykle od 35 do 90 km/h. Podczas sesji pomiarowej wykonywano badania na nawierzchniach gumowanych a następnie na nawierzchniach referencyjnych z DAC 12 lub SMA 12, które traktowano jako niezmiennie akustycznie w czasie. Porównywano więc obie powierzchnie w celu oceny właściwości akustycznych odcinka testowanego względem nawierzchni odniesienia (kryterium różnicowe). Ponadto, obliczano znormalizowane widmo pasm trzeciej oktawy w celu porównania kształtu widmowego emisji hałasu między badanymi powierzchniami w różnych kontekstach lub różnych sesjach pomiarowych.

Procedura drugiej metody badawczej łączy zasady określone w normie na metodę SPB z wytycznymi projektu HARMONOISE, wprowadzając drugi mikrofon umieszczony na wysokości 3,0 m. Oba mikrofony są umieszczone w odległości 7,5 m od środka ocenianego pasa ruchu. W publikacji przedstawiono tylko wyniki dla kategorii pojazdów lekkich L1, ponieważ inne kategorie nie były reprezentowane w wystarczającym stopniu.

Badania wykonano na czterech różnych gumowanych nawierzchniach w Toskanii: jedna z nich jest eksperymentalna w ramach projektu LEOPOLDO i monitorowana przez długi czas w celu oceny m.in. właściwości akustycznych w czasie, inne są powierzchniami stosowanymi jako działanie obniżające hałas drogowy w Toskanii. Wszystkie badane warstwy ścieralne mają grubość od 3 do 5 cm i są zlokalizowane na drogach miejskich lub pozamiejskich, narażonych na duże natężenie ruchu. Ponadto znajdują się w różnych rodzajach włoskich warunków pogodowych i klimatycznych (równiny, wzgórza i górskie tereny, słoneczne lub zacienione, z wąskim lub szerokim zakresem temperatur powietrza itp.).

Analizę hałaśliwości powierzchni przeprowadzono w kategoriach wartości różnicy między powierzchnią gumowaną a powierzchnią odniesienia wybraną zgodnie z projektami UE HARMONOISE/IMAGINE. W szczególności powierzchnie referencyjne to wszystkie DAC 0/12 stosowane zwykle we Włoszech (przynajmniej w Toskanii) i starsze niż 4-5 lat,

bez widocznych uszkodzeń i nieciągłości. Zostały one zbadane w tym samym czasie co nawierzchnie „gumowane” w celu zminimalizowania wpływu warunków pomiaru. Niemniej jednak bezwzględne wartości LCPX powierzchni odniesienia nie są porównywalne ze względu na różne zużycie, warunki meteorologiczne i/lub potencjalną różnicę natężenia ruchu oraz ze względu na wpływ warunków pomiaru. W tabeli przedstawiono uśredniony LCPX przy 50 km/h, pod względem różnic wartości z odcinkami referencyjnymi.

Powierzchnie 1 i 2 mają obniżenie emisji dźwięku odpowiednio o 4,7 dB (A) i 6,2 dB (A), a wyniki te są wyraźnie lepsze niż uzyskane dla innych powierzchni, które wykazują wartości różnicowe niższe niż 3 dB (A) (zwykle oczekiwane minimalne obniżenie poziomu hałasu). Te same wnioski można wyciągnąć z wyników uzyskanych przy prędkości 80 km/h (Tabela 11).

Szeroka rozpiętość uzyskanego obniżenia hałasu nie może być całkowicie powiązana z różnymi technikami wykonania „gumowanych” nawierzchni, ponieważ nie można znaleźć wyraźnego wzorca. Najbardziej wiarygodnym wyjaśnieniem jest to, że zmienność wynika również z jakości wykonania nawierzchni, która zależy m.in. od użytych materiałów i od przestrzegania zaleceń technicznych wykonania nawierzchni specjalnej.

Nr odcinka	Technologia i rozmiar kruszywa	Lokalizacja	Obniżenie hałasu, dB
1	na mokro (0/8)	góry	-4,7 ± 0,5 dB (A)
2	na mokro (0/12,8)	równina	-6,2 ± 1,8 dB (A)
3	na sucho (0/6)	wzgórze	-1,2 ± 0,6 dB (A)
4	na mokro (0/12)	równina	-1,8 ± 1,0 dB (A)

Tabela 11. Odcinki badawcze i pomierzone różnice LCPX przy prędkości 50 km/h

Jak widać w Tabeli 12, odcinek doświadczalny w projekcie LEOPOLDO był wykonany z mieszanki modyfikowaną lepiszczem z gumą w technologii na mokro. Metody CPX i SPB zostały zastosowane w kilku sesjach pomiarowych w celu przeprowadzenia czteroletniego monitoringu poziomów akustycznych dla odcinka 1. Dokonano również porównania tego odcinka do sąsiadującej z nią nawierzchni DAC 0/12, ułożonej jeden miesiąc po nawierzchni gumowanej. Wyniki przedstawiono w Tabeli 12.

Sesja	Wartości L _{CPX}		Różnice wartości L _{CPX}
	„gumowa”	DAC	
1	92,3 ± 0,1	91,9 ± 0,1	0,4 ± 0,4
2	91,5 ± 0,1	92,5 ± 0,1	-1,0 ± 0,3
3	91,7 ± 0,1	93,4 ± 0,1	-1,8 ± 0,3
4	91,6 ± 0,1	93,6 ± 0,1	-2,0 ± 0,3
5	92,1 ± 0,1	94,8 ± 0,1	-2,7 ± 0,4
6	91,6 ± 0,1	94,1 ± 0,1	-2,6 ± 0,4

Tabela 12. Wyniki pomiarów metodą CPX na odcinkach: z gumą i DAC

Ocenę zmienności w czasie technologii „gumowanej” wykonano również metodą SPB. Wyniki przedstawiono w Tabeli 13 (prędkość odniesienia 70 km/h).

Sesja	Temperatura, °C	L ₁ (1,2 m), dB (A)	L ₁ (3,0 m), dB (A)
-------	-----------------	--------------------------------	--------------------------------

1	10	75,1 ± 0,1	74,1 ± 0,2
2	21	76,0 ± 0,1	75,6 ± 0,1
3	23	75,8 ± 0,1	76,0 ± 0,1
4	21	75,8 ± 0,1	75,2 ± 0,2
5	15	77,3 ± 0,1	76,5 ± 0,1

Tabela 13. Wyniki badań SPB (1,2 m i 3,0 m nad poziomem jezdni)

Rozkład wyników SPB w czasie nie jest zgodny z wynikami CPX pokazanymi w Tabeli 11. Nawet temperatury podane w Tabeli 13 nie mogą uzasadniać różnicy wyników SPB w stosunku do CPX. Najwyraźniej w metodzie przejazdu występuje zmienność mechanizmów propagacji. Analogiczne wnioski znaleziono w ramach projektu.

(Stahlfest & Skov, 2016)

Publikacja stanowi podsumowanie projektu ROSANNE w części dotyczącej porównania metod oceny hałaśliwości nawierzchni drogowych. Opracowanie bazuje na badaniach prowadzonych w siedmiu europejskich instytutach, dotyczących badań hałaśliwości metodami CPX i SPB.

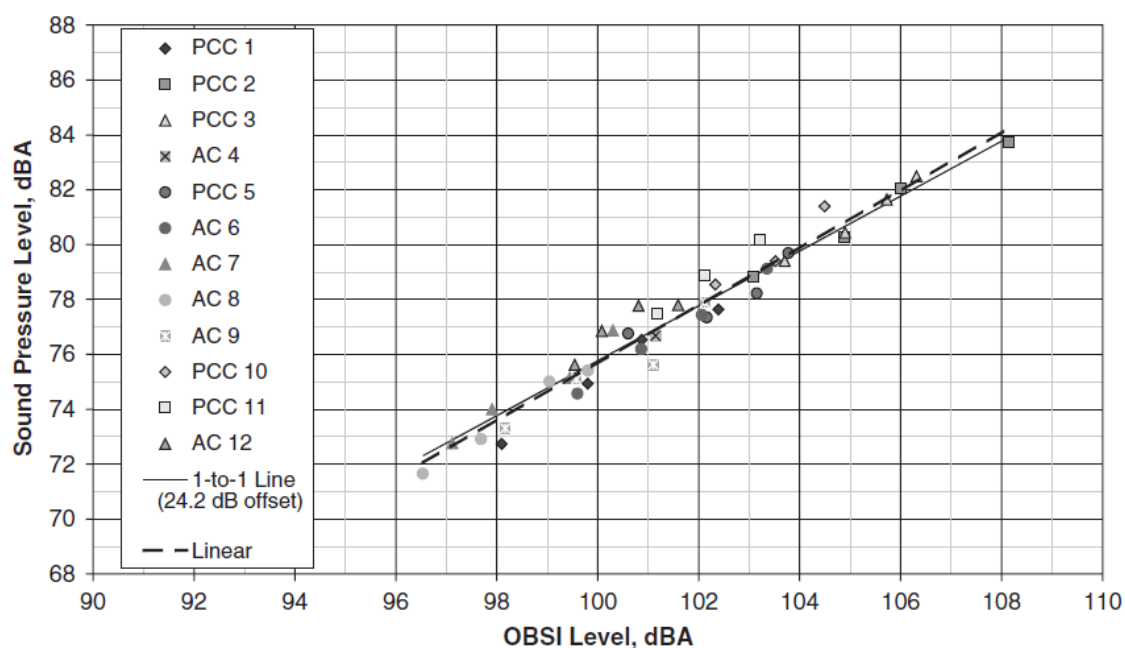
W pierwszym kroku dane otrzymane od współpracujących instytutów unormowano względem temperatury referencyjnej 20°C i skorygowano względem prędkości odniesienia. Niektóre z otrzymanych danych zostały skorygowane temperaturowo przy użyciu różnych współczynników przeliczeniowych. Następnie pogrupowano je pod względem technologii wykonania warstwy ścieralnej ocenianych odcinków testowych. Zastosowane współczynniki temperaturowe przedstawiono w Tabeli 14.

Typ nawierzchni	Współczynnik temperaturowy, dB/°C		Współczynnik prędkości, <i>b</i>	
	osobowe	ciężarowe	osobowe	ciężarowe
asf. zamknięte	- 0,10	- 0,05	30	27
beton cement.	- 0,07	- 0,035		
asf. pół porowate	-	-	28	30
asf. porowate	- 0,05	- 0,025		28

Tabela 14. Współczynniki temperaturowe

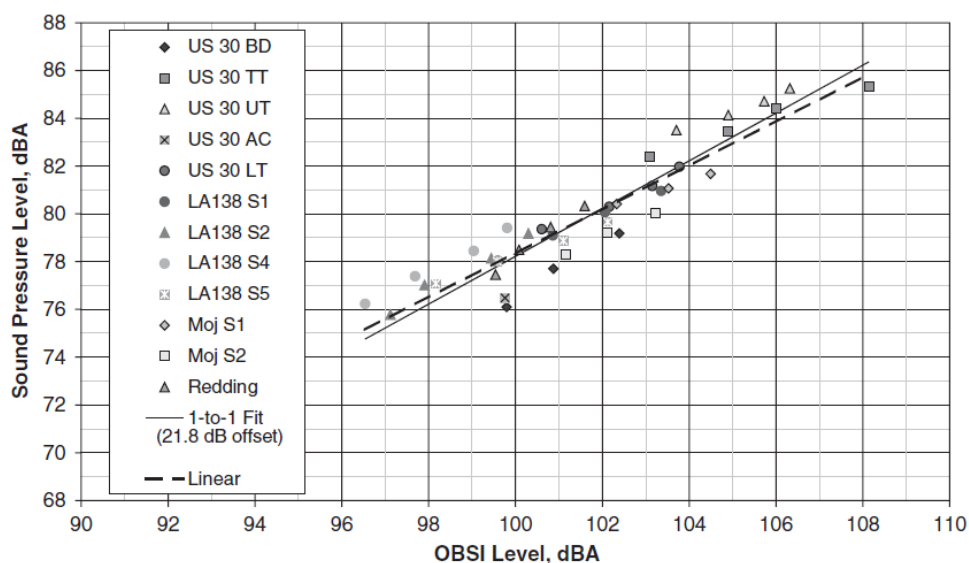
5.1.4. OBSI vs CPB and SPB

W raporcie (NCHRP 660, 2009) przedstawiono procedurę porównawczą metody OBSI oraz CPB (controlled pass-by). Pierwszym krokiem było zdefiniowanie znormalizowanej zależności pomiędzy danymi uzyskanymi z pomiarów metoda OBSI oraz SPB. Efekt znormalizowania jest widoczny na wykresie (Rysunek 30) dla opony SRTT. Po znormalizowaniu nachylenie krzywej regresji spadło z 1.31 (przed normalizacją) do 1.06, a współczynnik determinacji r^2 wzrósł z 0.91 do 0.96. Przesunięcie 1-1 dla częstotliwości dźwięku przed i po normalizacji zostaje praktycznie bez zmian (24.2 dB przed i 24.3 dB po), natomiast zmiana ulega odchylenie standardowe, które w tym przypadku spadło z 1.4 do 0.6.



Rysunek 30. Poziomy ciśnienia dźwięku dla metody CPB w stosunku do poziomów natężenia dźwięku dla metody OBSI (znormalizowane) (NCHRP 630, 2009)

Powyżej przedstawiona procedura potwierdza, iż normalizacja nie ma wpływu na zależność danych wyprodukowanych metodą CPB a OBSI. Normalizacja redukuje rozproszenie przypisane zmienności między lokacjami odcinków pomiarowych, dlatego idąc tą samą logiką przypisano wskaźniki normalizujące także dla danych uzyskanych metodą SPB. Normalizacja danych SPB wykazała podobny efekt co na danych z CPB. Przesunięcie 1-1 dla częstotliwości dźwięku było praktycznie zerowe podczas gdy rozproszenie zmniejszyło się, jak pokazano na Rysunek 31.



Rysunek 31. Poziomy ciśnienia dźwięku dla metody SPB w stosunku do poziomów natężenia dźwięku dla metody OBSI (znormalizowane) (NCHRP 630, 2009)

Na podstawie badań wykonanych w USA w ramach projektu NCHRP 630 przedstawiono parametry dopasowania dla metody CPB versus OBSI oraz SPB i OBSI w tabelach poniżej (Tabela 15, Tabela 16).

Cross-Plot Metrics	25 ft Microphone Distance				50 ft Microphone Distance			
	SRTT		Dunlop		SRTT		Dunlop	
	Raw	Norm	Raw	Norm	Raw	Norm	Raw	Norm
Slope	1.31	1.06	1.17	0.95	1.41	0.97	1.38	0.97
r^2	0.91	0.96	0.85	0.94	0.86	0.96	0.86	0.96
Offset, dB	24.3	24.2	24.8	24.7	31.4	31.0	31.7	31.3
Std Dev, dB	1.4	0.6	1.4	0.6	1.9	0.6	2.0	0.5
Avg Dev, dB	1.1	0.6	1.1	0.5	1.6	0.4	1.6	0.4

Tabela 15. Parametry dopasowania dla metody CPB i OBSI

Cross-Plot Metrics	25 ft Microphone Distance				50 ft Microphone Distance			
	SRTT		Dunlop		SRTT		Dunlop	
	Raw	Norm	Raw	Norm	Raw	Norm	Raw	Norm
Slope	1.31	0.92	1.29	0.93	1.32	0.91	1.32	0.91
r^2	0.95	0.88	0.89	0.87	0.84	0.87	0.84	0.89
Offset, dB	21.9	21.8	23.9	23.8	28.5	28.3	30.5	30.3
Std Dev, dB	1.2	0.9	1.4	0.9	1.7	0.9	1.9	0.9
Avg Dev, dB	1.2	0.8	1.2	0.7	1.5	0.7	1.7	0.6

Tabela 16. Parametry dopasowania dla metody SPB i OBSI

6. ISTNIEJĄCE DOKUMENTY NORMOWE

Dla OBSI:

1. AASHTO TP 76. Measurement of Tire/Pavement Noise Using the On-Board Sound Intensity (OBSI) Method, 2016.
2. AASHTO Designation: T 360-161
3. International standards for sound power determination using sound intensity, ISO 9614-1 and ISO 96142.

Dla SPB:

1. PN-EN ISO 11819-1:2014 Akustyka. Pomiary wpływu nawierzchni dróg na hałas drogowy. Część 1: Metoda statystyczna pomiaru podczas przejazdu
2. Japońska norma JIS D 1024-1:2016 Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles -- Engineering method przywołana w artykule (Mori et al., 2016) , nawiązuje do lub jest kopią normy ISO 362-1:2015
3. AASHTO: Standard Method of Test for Determining the Influence of Road Surfaces on Vehicle Noise Using the Statistical Isolated Pass-By (SIP) Method, Standard Method of Test for Determining the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise Using the Continuous-Flow Traffic Time-Integrated Method (CTIM)

Dla CPX:

1. ISO 11819-2, Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: The close-proximity method, 2017

7. BIBLIOGRAFIA

- ABE, H., Tamai, A., Henry J, J., Wambold, J., Henry, J., & Wambold, J. (2001). Measurement of Pavement Macrotecture with Circular Texture Meter. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1764(1764), 201–209. <https://doi.org/10.3141/1764-21>
- Affenzeller, J. (2007). *CALM II project report, Advanced Noise Reduction Systems*.
- Agnes, P. M., Michel, B., Matthew, M., & Phil, M. (2014). How to consider Electric and Hybrid Electric vehicles in CNOSSOS-EU predicting method? In *Forum Acusticum* (p. 6). Retrieved from <http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&PAGE=reference&D=tspt&NEWS=N&AN=01549748>
- Ågren, A. (2016). Tire Generated Noise (TGN) 2.
- Ågren, A. (2016). Tire Generated Noise (TGN).
- Anderson, G., Ross, J., Menge, C., & Arnold, L. (2003). Absorptive Sound Barriers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1859(1859), 45–52. <https://doi.org/10.3141/1859-06>
- Anderson, K. W., Sexton, T., Uhlmeyer, J. S., Russell, M., & Weston, J. (2013). *Concrete Pavement Noise*.
- Andriejauskas, T., Vaitkus, A., Vorobjovas, V., & Čygas, D. (2016). Low noise pavement development for severe climate conditions. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 6995–7004).
- Anfosso-Ledee, F., Do, M.-T. M.-T., Anfosso-Lédée, F., & Do, M.-T. M.-T. (2002). Geometric Descriptors of Road Surface Texture in Relation to Tire-Road Noise. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1806(1806), 160–167. <https://doi.org/10.3141/1806-18>
- Bailey, K., & Grossardt, T. (2006). Structured Public Involvement in Context-Sensitive Noise Wall Design Using Casewise Visual Evaluation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1984(1984), 112–120. <https://doi.org/10.3141/1984-13>
- Ballesteros, J. A., Sarradj, E., Fernández, M. D., Geyer, T., & Ballesteros, M. J. (2015). Noise source identification with Beamforming in the pass-by of a car. *Applied Acoustics*, 93, 106–119. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.01.019>
- Beranek, L. and Vér, I. (1922), Noise and Vibration Control Engineering: *Principles and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, p. 61
- Baro, S., Corradi, R., & Abom, M. (2016). Tyre cavity noise: Porous materials as a countermeasure. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 2313–2318).
- Bartolomaeus, W., (2013) Wind Influence on SPB-Measurements, *AIA-DAGA 2013 Merano*.
- Bęben, D. (2010). Hałas wokół szlaków transportowych. *Drogownictwo*, 9, 293–304.
- Beckenbauer, T. (2016). Tire / road noise mitigation : A challenge for both acoustical and civil engineers. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 27–44).

- Bendtsen, H., Kohler, E., Lu, Q., & Rymer, B. (2010). California-Denmark Study on Acoustic Aging of Road Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2158(2158), 122–128. <https://doi.org/10.3141/2158-15>
- Bendtsen, H., Kragh, J., & Nielsen, E. (2008). *Use of noise reducing pavements - European experience*.
- Bendtsen, H., Lu, Q., & Kohler, E. (2010). *Acoustic Aging of Asphalt Pavements: A Californian/Danish Comparison, Report UCPRC-RP-2010-01*.
- Bendtsen, H., Lu, Q., & Kohler, E. (2009). *Acoustic aging of asphalt pavements. A Californian / Danish comparison*.
- Bendtsen, H., Stahlfest, R., Skov, H., Andersen, B., & Cesbron, J. (2014). Results from first Danish full scale test section with poroelastic road surface. In *Internoise 2014* (pp. 1–10).
- Bennert, T., Fee, F., Sheehy, E., Jumikis, A., & Sauber, R. (2005). Comparison of Thin-Lift Hot-Mix Asphalt Surface Course Mixes in New Jersey. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1929(1929), 59–68. <https://doi.org/10.3141/1929-08>
- BERENGIER C, M., & Anfosso-Ledee, F. (1998). State-of-the-Art Prediction and Control of Road Traffic Noise in France. *Transportation Research Record*, (1626), 71–77. <https://doi.org/10.3141/1626-09>
- Berengier, M. C., Droste, B., Gauvreau, B., Duhamel, D., & Auerbach, M. (2008). DEUFRABASE: A German-French acoustic database on road pavements. In *Acoustics 08 Paris*. <https://doi.org/10.1121/1.2934060>
- Bérenghier, M., Cesbron, J., & Gusia, P. J. (2016). ODSURF project: modelling and experimental optimization of low noise pavements. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 6973–6984).
- Berge, T. (2012). *NordTyre – Tyre/road noise testing on various road surfaces - State-of-the-Art*.
- Berge, T. (2013). Noise performance of the SRTT tyre compared to normal passenger car tyres. In *Internoise 2013*.
- Bergiers, A., & Maeck, J. (2016). Validation of reference tyres and temperature correction for Close-ProXimity (CPX) method. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 4935–4944).
- Bergiers, A., Visscher, J. D. E., Denolf, K., Destree, A., & Vuye, C. (2014). Test sections to study the acoustical quality and durability of thin noise reducing asphalt layers. In *Internoise 2014* (pp. 1–10).
- Bernhard J, R., McDaniel S, R., Bernhard, R., & McDaniel, R. (2005). Basics of Noise Generation for Pavement Engineers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1941(1941), 161–166. <https://doi.org/10.3141/1941-21>
- Bernhard, R., & Wayson, R. (2005). *An introduction to tire/pavement noise of asphalt pavement*. Retrieved from ftp://ftp.crab.wa.gov/DesignSystems/RDC_2008/Presentations/WAPA_presentation_files/AnIntroductiontoTire-PavementNoiseofAsphaltPavement.pdf
- Bezemer-Krijnen, M., Wijnant, Y., & De Boer, A. (2016). Tyre-road noise measurements: Influence of tyre tread and road characteristics. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 2242–2253).

- Biligiri, K. P. (2013). Effect of pavement materials' damping properties on tyre/road noise characteristics. *Construction and Building Materials*, 49, 223–232. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.016>
- Billera, D., Parsons, R., & Hetrick, S. (1997). Good Fences Make Good Neighbors: Highway Noise Barriers and the Built Environment. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1601(1601), 55–63. <https://doi.org/10.3141/1601-09>
- Billera, D., Schmidt, B., & Miller, W. (1997). Stop the Whine!: Narrow-Band Noise Level Measurements of Three Highway Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1601, 71–76. <https://doi.org/10.3141/1601-11>
- Black, J., Samuels, S., Vandebona, U., Masters, E., Trinder, J., Morrison, B., & Tudge, R. (1997). Road Traffic Noise Prediction Using Object-Oriented and Geographic Information System Technologies. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1601(1601), 77–83. <https://doi.org/10.3141/1601-12>
- Blokland, G. V. A. N., Stahlfest, R., & Skov, H. (2016). Uncertainty in the CPX method (ISO 11819-2 / 3) and its implications for pavement evaluation. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 4975–4984).
- Blokland, G. Van. (2011). Stimulation of low noise road vehicles in the Netherlands. *InterNoise 2011*. Retrieved from [http://leo.mech.pg.gda.pl/sites/leo.mech.pg.gda.pl/files/files/Stimulation of low noise road vehicles - in11_vanBlokland_NL.pdf](http://leo.mech.pg.gda.pl/sites/leo.mech.pg.gda.pl/files/files/Stimulation_of_low_noise_road_vehicles_-_in11_vanBlokland_NL.pdf)
- Blokland, G. Van, & Schwanen, W. (2012). Requirements and testing methods for ISO 10844 : 2011 test tracks. In *Internoise 2012*.
- Bohatkiewicz, J. (2005). *Wytyczne wykonywania pomiarów hałasu przy drogach krajowych prowadzonych w trakcie generalnego pomiaru ruchu*.
- Bruel & Kjaer. (1993). *Sound Intensity*.
- Bühlmann, E., Sandberg, U., & Mioduszewski, P. (2015). Speed dependency of temperature effects on road traffic noise. In *Internoise 2015* (p. 14).
- Bühlmann, E., Schulze, S., & Ziegler, T. (2013). Ageing of the new CPX reference tyres during a measurement season. *Proc. Internoise Innsbruck, Austria*, 1–8.
- Buret, M., Mcintosh, J., & Simpson, C. (2014). Comparative assessment for low-noise pavements by means of the ISO 11819 and the OBSI. In *Internoise 2014* (pp. 1–9).
- Buytaert, A. (2014). Differences in rolling noise level between the left and the right tire of a CPX-trailer. In *Proceedings of Forum Acusticum*.
- Cackler, E. T. (2006). *Evaluation of U . S . and European Concrete Pavement Noise Reduction Methods, FHWA DTFH61-01-X-00042*.
- CadnaA. (2000). *CadnaA – zarys możliwości*.
- Cao, R., & Bolton, J. S. (2016). Loading effect on tire noise radiation. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 2169–2178).
- Carpenter Paul, S., Burns, J., & Tomaszewski, E. (2007). Deviation from Standard State Noise Wall Policy. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2011), pp 165-174. <https://doi.org/10.3141/2011-18>
- Čelko, J., Kováč, M., & Kotek, P. (2016). Analysis of the Pavement Surface Texture by 3D Scanner. *Transportation Research Procedia*, 14, 2994–3003. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.434>
- Center, N. C. P. T. (2008). *Concrete Pavement Surface Characteristics Program; Site Evaluation Report*.

- Chapter, P. (2000). *Practical Spectral Analysis*.
- Chen, J.-S., Hsieh, W., & Liao, M.-C. (2013). Evaluation of Functional Properties of Porous Asphalt Pavements Subjected to Clogging and Densification of Air Voids. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2369), pp 68–76. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3141/2369-08>
- Cho, D. S., & Mun, S. (2008). Study to analyze the effects of vehicles and pavement surface types on noise. *Applied Acoustics*, 69(9), 833–843. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2007.04.006>
- Cik, M., Fallast, K., & Fellendorf, M. (2012). Annoyance of Traffic Noise on Roads and Rail. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2270(2270), 16–22. <https://doi.org/10.3141/2270-03>
- Concrete Pavement Technology Center. (2006). *Strategic Plan for Improved Concrete Pavement Surface Characteristics, FHWA DTFH61-01-X-00042*.
- Cong, L., Swiertz, D., & Bahia, H. (2013). Mix Design Factors to Reduce Noise in Hot-Mix Asphalt. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2372(2372), 17–24. <https://doi.org/10.3141/2372-03>
- Conter, M., Wehr, R., Aichinger, C., Sandberg, U., Goubert, L., Mioduszewski, P., ... Morgan, P. (2016). ROSANNE project: New procedure for noise characterization of road surfaces in Europe. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 4997–5005).
- Coulson, R. (1996). Method for Measuring Vehicle Noise Source Heights and Subsource Spectra. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1559(1559), 8–13. <https://doi.org/10.3141/1559-02>
- Crocker, M. J., & Li, Z. (2005). Measurements of Tyre / Road Noise and of Acoustical Properties of Porous Road Surfaces. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 10(2), 52–60.
- Czuka, M., Pallas, M. A., Morgan, P., & Conter, M. (2016). Impact of Potential and Dedicated Tyres of Electric Vehicles on the Tyre-road Noise and Connection to the EU Noise Label. *Transportation Research Procedia*, 14, 2678–2687. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.443>
- Dare, T., McDaniel, R., & Shah, A. (2015). Modeling Tire-Pavement Noise Using MnROAD Data. In *Transportation Research Board 94th Annual Meeting*.
- Dare, T., McDaniel, R., Shah, A., & Bernhard, R. (2014). *Hot Mix Asphalt Surface Characteristics Related to Ride, Texture, Friction, Noise and Durability*.
- Dare, T., Woldemariam, W., McDaniel S, R., Olek, J., & Bernhard, R. (2012). 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*, (2270), pp 1–8. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3141/2270-01>
- Deaconu, M. (2014). COMPARATIVE ANALYSIS OF TRANSFER FUNCTION AND STANDING WAVE METHODS IN DETERMINATION OF ACOUSTIC ABSORPTION COEFFICIENT. In *SISOM & ACOUSTICS 2014, Bucharest 22-23 May*.
- Donavan R, P., & Donavan, P. (2011). Tire Noise Generation and Propagation over Porous and Nonporous Asphalt Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2233(2233), pp 135-144. <https://doi.org/10.3141/2233-16>

- Donavan R, P., & Donavan, P. (2014). Effect of Porous Pavement on Wayside Traffic Noise Levels. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 405(2403), pp 28–36. <https://doi.org/10.3141/2403-04>
- Donavan, P. R. (2007). *Comparative Measurements of Tire/Pavement Noise in Europe and the United States: Noise Intensity Testing in Europe (NITE) Study*.
- Donavan, P. (2010). Acoustic Radiation from Pavement Joint Grooves Between Concrete Slabs. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2158(2158), 129–137. <https://doi.org/10.3141/2158-16>
- Donavan, P. (2014). Reduction of vehicle noise at lower speeds due to a porous open-graded asphalt pavement. In *Internoise 2014* (pp. 1–12).
- Donavan, P. R. (2014). *Comparative OBSI Testing in Northern California: The Davis Rodeo, Report UCPRC-RP-2014-01*.
- Donavan, P. R. (2010). *Use of the ASTM SRTT for Standardized OBSI Measurement*.
- Donavan, P. R. (2009). NCHRP1-44: Measuring Tire-Pavement Noise at the Source APPENDIX B Test Evaluation of Candidate Methods and Recommendation for Test Procedure Development.
- Donavan, P. R. (2015). Correlation of Noise Measurement Types in the Arizona Quiet Pavement Pilot Program. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2502, 12–20. <https://doi.org/10.3141/2502-02>
- Donavan, P. R. (2009). NCHRP1-44: Measuring Tire-Pavement Noise at the Source APPENDIX A Measuring Tire-Pavement Noise at the Source : Review of Literature.
- Donavan, P. R. (2009). NCHRP1-44: Measuring Tire-Pavement Noise at the Source APPENDIX C Results of Test Parameter Evaluation.
- Donavan, P. R. (2009). NCHRP1-44: Measuring Tire-Pavement Noise at the Source APPENDIX D Demonstration Testing of OBSI Procedure.
- Donavan, P. R., & Lodico, D. M. (2012). Evaluation of on-board sound intensity measurement parameters using a tire noise chassis dynamometer. In *Internoise 2012* (Vol. 3, pp. 2555–2569).
- Donavan, P. R., & Lodico, D. M. (2011). *Measuring Tire-Pavement Noise at the Source : Precision and Bias Statement, NCHRP 1-44* (Vol. 44).
- Donavan, P., & Janello, C. (2014). Vehicle noise functional performance indicators using tire sound intensity. In *Internoise 2014* (pp. 1–13).
- Donavan, P., & Lodico, D. (2009). Estimation of Vehicle Pass-By Noise Emission Levels from Onboard Sound Intensity Levels of Tire-Pavement Noise. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2123(2123), 137–144. <https://doi.org/10.3141/2123-15>
- Donavan, P., & Lodico, D. (2013). Influence of Quieter Pavement and Absorptive Barriers on US-101 in Marin County, California. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2362(2362), 25–34. <https://doi.org/10.3141/2362-04>
- Donavan, P., & Rymer, B. (2009). Measurement of Vertical Distribution of Truck Noise Sources During Highway Cruise Pass-Bys by Acoustic Beam Forming. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2123(2123), 145–152. <https://doi.org/10.3141/2123-16>
- Donavan, P., & Rymer, B. (2011). Effects of Aging on Tire-Pavement Noise Generation for Concrete Pavements of Different Textures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2233(2233), 152–160. <https://doi.org/10.3141/2233-18>

- Donovan, P. R., & Lodico, D. M. (2009). *Measuring Tire-Pavement Noise at the Source, NCHRP 630*.
- Donovan, P. (2006). Further Development of the Sound Intensity Method of Measuring Tire Noise Performance of In-Situ Pavements, *California Department of Transportation, Division of Environmental Analysis, Sacramento, CA, prepared by Illingworth & Rodkin, Inc., Petaluma, CA*.
- Ejsmont, J. A. (2008). Wpływ nawierzchni jezdni na hałas drogowy - część 2. *Polski Drogi, Dodatek PSWNA*, 9, 14–16.
- Ejsmont, J. A. (2003). Mechanizmy generowania hałasu opon. *Archiwum Motoryzacji*, 1, 3–21.
- Ejsmont, J. A., & Cwikła Duda, M. (2000). Wybrane aspekty oddziaływania opon samochodowych na środowisko. *Elastomery*, 2–3.
- Ejsmont, J. A., Świczko-Żurek, B., & Ronowski, G. (2014). MnRoad Facility. *Autostrady*, 1.
- Ejsmont, J. A., & Woźniak, R. (2000). Pojazdy do badania hałasu opon metodą CPX. *Elastomery*, 2–3, 22–27.
- Ejsmont, J., & Ronowski, G. (2010). SYMULACJA HAŁASU POJAZDÓW W TRAKCIE MANEWROWANIA. *Drogi I Mosty*, (1), 45–56.
- Ejsmont, J., Sandberg, U., Świczko-Żurek, B., & Mioduszeński, P. (2014). Tyre / road noise reduction by a poroelastic road surface. In *Internoise 2014* (pp. 1–12).
- Ejsmont, J., Świczko-Żurek, B., & Taryma, S. (2014). LOW NOISE TIRES FOR HYBRID AND ELECTRIC VEHICLES. In *21 st International Congress on Sound and Vibration*.
- Ejsmont, J., Świczko-Żurek, B., & Taryma, S. (2013). PERS - QUIET ROAD SURFACE FOR URBAN AREAS. In *20th International Congress on Sound and Vibration* (pp. 7–11).
- Ejsmont, J. (2005). Development of Procedures for Certifying Noise Testing Equipment, University of Technology Publishers, *Wydawnictwo Politechniki Gdanskiej*, Gdansk, Poland.
- El-Aassar, A., Wayson, R., & MacDonald, J. (2005). Comparison of Traffic Noise Model 2.5 with 2.1 and Measured Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1941(1941), 149–154. <https://doi.org/10.3141/1941-19>
- ETRM. (2014). *ETRM Annual Report 2013/2014*.
- European Commission. (1996). *Future Noise Policy*.
- European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise (WG-AEN). (2006). *Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure - Position Paper*.
- European Environmental Agency. (2014). *Noise in Europe 2014*. <https://doi.org/10.2800/763331>
- Eurovia. (2000). *Cichy mikrobeton asfaltowy*.
- Faller, R., Polivka, K., Humphries, E., Kurz, K., Sicking, D., & Hascall, J. (2006). Test Level 4 Noise Wall for Attachment to Concrete Traffic Barriers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1984(1984), 56–68. <https://doi.org/10.3141/1984-08>
- Farina, A., & Torelli, A. (1997). Measurement of the sound absorption coefficient of materials with a new sound intensity technique. In *Proceedings of the AES*.
- Farrell, D. (2013). *Using Acoustic Beamforming for Pass-By Noise Source Detection*. Retrieved from <http://ni.com/nvh>
- FEHRL. (2006). *FEHRL Report: SI2.408210 TYRE/ROAD NOISE VOLUME 2: Appendices*.

- FEHRL. (2001). *FEHRL STUDY SI2.408210 TYRE/ROAD NOISE VOLUME 1: FINAL REPORT*.
- Ferragut, T., Rasmussen, R. O., Wiegand, P., Mun, E., & Cackler, E. T. (2007). *ISU-FHWA-ACPA Concrete Pavement Surface Characteristics Program Part 2 : Preliminary Field*.
- FHWA. (2013). *Noise Barrier Acceptance Criteria : Evaluation Tools*.
- FHWA-LTPP. (2012). *Classification of Features of Pavement Profiles Using Empirical Mode Decomposition, FHWA-HRT-13-093*.
- G.R.A.S. (2000). *Sound-intensity Microphone Pairs Types 40AI and 40AK*.
- Gardziejczyk, W. (2015). Hałas od przejeżdżającego pojazdu w zależności od jego prędkości i charakterystyki nawierzchni drogowej. *Autostrady*, 7, 22–27.
- Gardziejczyk, W. (2014). „Cicha” nawierzchnia drogowa jako sposób na ograniczenie poziomu hałasu od ruchu samochodowego. *Inżynieria Ekologiczna*, 40, 65–73. <https://doi.org/10.12912/2081139X.70>
- Gardziejczyk, W. (2010). METODY POMIARU I OCENY HAŁAŚLIWOŚCI NAWIERZCHNI DROGOWYCH - wybrane aspekty. In *Seminarium szkoleniowe*.
- Gardziejczyk, W. (2014). „CICHA” NAWIERZCHNIA DROGOWA JAKO SPOSÓB NA OGRANICZENIE POZIOMU HAŁASU OD RUCHU SAMOCHODOWEGO. *Inżynieria Ekologiczna*, 40, 65–73. <https://doi.org/10.12912/2081139X.70>
- Gardziejczyk, W. (2015). SELECTED PROBLEMS OF PROTECTION AGAINST ROAD TRAFFIC NOISE. *Inżynieria Ekologiczna*, 45(45), 82–88. <https://doi.org/10.12912/23920629/60598>
- Gardziejczyk, W. (2008). Hałaśliwość nawierzchni drogowych - propozycja klasyfikacji. *Drogownictwo*, 12, 426–431.
- Gardziejczyk, W. (2011). Przegląd i analiza porównawcza metod badania hałaśliwości nawierzchni drogowych. *Autostrady*, 1–2, 24–31.
- Gardziejczyk, W., & Ejsmont, J. A. (2000). Wpływ nawierzchni ulic na hałas toczenia pojazdów. *Archiwum Ochrony Środowiska*, 26(4), 141–157.
- Gardziejczyk, W., Gierasimiuk, P., & MotyleWicz, M. (2014). Hałaśliwość nawierzchni betonowych – przykładowe wyniki badań. *Drogownictwo*, 10, 319–326.
- González Suárez, J., Machimbarrena Gutiérrez, M., Tarrero Fernández, A., Lorenzana Lorenzana, T., & Moreno Arranz, A. (2002). Comparative Analysis of Several Acoustic Impedance Measurements. In *Forum Acusticum Sevilla*.
- Goubert, L. (2005). The contribution of road surfacing. In *ERF INFRASTRUCTURE SAFETY FORUM*.
- Goubert, L., Debroux, P., Gail, A., & Zöller, M. (2014). Assessing the acoustic properties of audio-tactile road markings. In *Internoise 2014* (pp. 1–10).
- Hag-Elsafi, O., Elwell J, D., Glath, G., & Hiris, M. (1999). NOISE BARRIERS USING RECYCLED-PLASTIC LUMBER. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1670), 49–58. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3141/1670-07>
- Haider, M., & Descornet, G. (2006). *Silence project. NOISE CLASSIFICATION METHODS FOR URBAN ROAD SURFACES*.
- Haider, M. (2010). *Project TYROSAFE Report: Tyre and Road Surface Optimisation for Skid Resistance and Further Effects*.
- Haider, M., Conter, M., Green, M., Schmidt, B., & Sandberg, U. (2016). Status of the EU-project ROSANNE. *Transportation Research Procedia*, 14, 2946–2955. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.415>

- Haider, M., Conter, M., Wehr, R., Sandberg, U., & Anfosso, F. (2014). Project ROSANNE : Rolling resistance , Skid resistance , and Noise Emission measurement standards for road surfaces. In *Internoise 2014* (pp. 1–6).
- Hajek, J., Blaney, C., & Hein, D. (2008). Framework for Environmental Assessment of Tire-Pavement Noise. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2058(2058), 140–146. <https://doi.org/10.3141/2058-17>
- Hall, A., & Samuels, S. (2005). The Queensland Department of Main Roads Pavement Surface Noise Resource Manual. In *ACOUSTICS 2005* (Vol. 259, pp. 259–263).
- Han, J., Herrin, D. W., & Seybert, A. F. (2007). Accurate Measurement of Small Absorption Coefficients. In *SAE Technical Paper* (pp. 1–5). <https://doi.org/10.4271/2007-01-2224>
- Hansen, C. H. (2003). *FUNDAMENTALS OF ACOUSTICS*.
- Hanson, D. I., James, R. S., & Nesmith, C. (2004). *Tire / Pavement Noise Study. Technology*.
- Harvey, J. T. (2016). Preservation and Quality of Life, Framework and Examples. In *National Pavement Preservation Conference*.
- Harvey, J. T., & Kohler, E. (2011). *Quieter Pavement Research: Concrete Pavement Tire Noise*.
- Hastings, A., Scarpone, C., Samiljan, B., Garay-Vega, L., Pollard, J., & Pollard K, J. (2011). Acoustic Characteristics of Hybrid Electric Vehicles and Safety of Blind Pedestrians. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2248(2248), 61–67. <https://doi.org/10.3141/2248-08>
- Hauswirth, I. (2013). *FFT - Octave analysis - Wavelet. HEAD acoustics*.
- Hearn, G., Abu-Hejleh, N., & Koucherik, J. (2004). Inventory System for Retaining Walls and Sound Barriers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1866(1866), 85–91. <https://doi.org/10.3141/1866-11>
- Hencken, J., Haas, E., Tulanowski, M., & Bennert, T. (2014). Evaluation of Noise Related to Pavement Preservation Surfaces in NJ. In *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting* (Vol. 1).
- Herman, L. (1998). Analysis of Strategies To Control Traffic Noise at the Source: Implications for Policy Makers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1626(1626), 41–48. <https://doi.org/10.3141/1626-05>
- Herman, L., Ambroziak, M., & Pinckney, E. (2000). Investigation of Tire-Road Noise Levels for Ohio Pavement Types. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1702(1702), 57–62. <https://doi.org/10.3141/1702-07>
- Herman, L., Finney, M., Clum, C., & Pinckney, E. (1997). Perception of Traffic Noise Barrier Effectiveness: Public Opinion Survey of Residents Living near I-71. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1601(1601), 49–54. <https://doi.org/10.3141/1601-08>
- Herman, L., & Nadella, S. (2005). Accuracy of a Traffic Noise Model Using Data from Machine Vision Technology. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1941(1941), 155–160. <https://doi.org/10.3141/1941-20>
- Herman, L., Seshadri, S., & Pinckney, E. (1999). Placement of Sound-Absorbing Materials To Control Traffic Noise Reflections at a Highway Underpass. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1670(1670), 69–75. <https://doi.org/10.3141/1670-09>
- Herman, L., Withers, J., & Pinckney, E. (2006). Surface Retexturing to Reduce Tire–Road Noise for Existing Concrete Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1983), pp 51-58. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3141/1983-08>

- Herman, L., Withers, J., & Pinckney, E. (2006). Surface Retexturing to Reduce Tire-Road Noise for Existing Concrete Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1983(1983), 51–58. <https://doi.org/10.3141/1983-08>
- HMMH. (2010). *Tire-Pavement Noise Evaluation Using On-Board Sound Intensity (OBSI) Measurements*.
- Hoerner, T., Smith, K., Larson, R., & Swanlund, M. (2003). Current Practice of Portland Cement Concrete Pavement Texturing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1860(1860), 178–186. <https://doi.org/10.3141/1860-20>
- Hoever, C., & Kropp, W. (2016). The simulation of tyre/road interaction and exterior rolling noise for road surfaces with transversal discontinuities. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 2265–2276).
- Hojer, M., & Nilsson, N.-A. (2008). A single wheel trailer for tire/road noise measurements enabling both the CPX- and pass-by methods. In *Proceedings - European Conference on Noise Control* (pp. 4913–4917). <https://doi.org/10.1121/1.2935061>
- Hua, X., & Herrin, D. W. (2013). Practical Considerations when using the Two-Load Method to Determine the Transmission Loss of Mufflers and Silencers. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, 6(2), 2013-01–1881. <https://doi.org/10.4271/2013-01-1881>
- Intensity, P., Pair, M., Dyn, I. E. C., The, P., Instrumentation, S., & Intensity, L. S. (2015). G . R . A . S . 40AI 1 / 2 " Ext . Polarized Intensity Microphone, 1–5.
- Irali, F., Kivi, A., Tighe, S. L., & Sangiorgi, C. (2015). Tire–pavement noise and wearing course surface characteristics of experimental Canadian road pavement sections. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42(10), 818–825. <https://doi.org/10.1139/cjce-2014-0424>
- Irali, F., Gonzalez, M., Tighe, S. L., & Simone, A. (2015). Temperature and Aging Effects on Tire / Pavement Noise Generation in Ontarian Road Pavements. In *TRB meeting*.
- Ishihama, M., Komagamine, Y., Matsumoto, K., & Miyoshi, K. (2016). Modeling of excitation stress distribution and its propagation measurement on a tire tread caused by road surface shingles. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 2219–2229).
- Ishihama, M., Matsumoto, K., Miyoshi, K., Yoshii, K., & Kanda, M. (2016). Tire cavity sound measurement for identifying characters of road surfaces and tire structures. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 7017–7027).
- ISO. (2010). Acoustics — Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ — Part 2: Spot method for reflective surfaces ISO 13472-2:2010(E). *ISO*. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2007.4288250>
- ISO. (2014). *ISO 10844 Acoustics — Specification of test tracks for measuring noise emitted by road vehicles and their tyres*.
- ISO. (1994). *Acoustics - Specification of test tracks for the purpose of measuring noise emitted by road vehicles, ISO 10844*.
- ISO/DIS 11819-2. (2012). *ISO/DIS 11819-2 ISO/TC Acoustics — Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise — Part 2 : Close-proximity method*.
- Iversen, L. M., Marbjerg, G., & Bendtsen, H. (2013). Noise from electric vehicles – “ state - of-the- art ” literature survey. In *Internoise 2013* (pp. 1–5). Retrieved from

- http://www.compett.org/documents/Conferencepapers/Noise_from_electric_vehicles_state_of_the_art_literature_survey.pdf
- Izevbekhai, B. (2014). *Hot Mix Asphalt Surface Characteristics*.
- Jacobsen, F. (1997). An overview of the sources of error in sound power determination using the intensity technique. *Applied Acoustics*, 50(2), 155–166. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(96\)00047-3](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(96)00047-3)
- Jacobsen, F., & de Bree, H.-E. (2000). *Measurement of sound intensity: p-u probes versus p-p probes*.
- Jacobsen, F. (2001). *State of the art of sound intensity and its measurement and applications*. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:State+of+the+Art+of+Sound+Intensity+and+Its+Measurement+and+Applications#0>
- Jacobsen, F., & de Bree, H.-E. (2005). A comparison of two different sound intensity measurement principles. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(3), 1510–1517. <https://doi.org/10.1121/1.1984860>
- Jaeckel, J., Kuemmel, D., Becker, Y., Satanovsky, A., Sonntag, R., Jaeckel R, J., ... Sonntag C, R. (2000). Noise Issues of Concrete-Pavement Texturing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1702(1702), 69–79. <https://doi.org/10.3141/1702-09>
- Janello, C., & Donavan, P. (2015). Conclusion of the long-term evaluation of open-grade asphalt for the reduction of traffic noise: Interstate 80 (I-80) davis project. *Internoise 2015*, 80(July 1998), ADC 40; Institute of Noise Control Engineering of.
- Jaskula, P. (2000). *Halas notes*.
- Jeziarska, D., & Sybilski, D. (2005). *Ocena wpływu typu i technologii wykonania nawierzchni drogowej na hałaśliwość ruchu drogowego i jego uciążliwość dla środowiska, Raport dla GDDKiA*.
- Johnson, G., Holdhusen, B., & Izevbekhai, B. (2014). Optimizing Asphalt Pavement Surfaces to be Safer , Quieter , Longer Lasting TECHNICAL, (August).
- Kaliski, K. (2012). Sound emissions from a plug-in electric vehicle. In *Internoise 2012*.
- Kameyama, Y., Nakamura, H., Nakajima, R., & Yamazaki, T. (2016). Correlation between tire noise level and CLF of experimental SEA. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 2468–2476).
- Kassem, E., Awed, A., Masad, E., & Little, D. (2013). Development of Predictive Model for Skid Loss of Asphalt Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2372(1), 83–96. <https://doi.org/10.3141/2372-10>
- Kephalopoulos, S., Paviotti, M., & Anfosso-Lédée, F. (2012). *Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU)*. <https://doi.org/10.2788/31776>
- Kindt, P., Vercammen, S., & Bianciardi, F. (2016). Tire/road noise – Characterization and potential further reductions of road traffic noise. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 2254–2264).
- Klein, P., Beckenbauer, T., Hamet, J.-F., & Kropp, W. (2008). Tyre/road noise prediction: A comparison between the SPERoN and HyRoNE models - Part 1. In *Acoustics 08 Paris*. <https://doi.org/10.1121/1.2934049>
- Klein, P., & Cesbron, J. (2016). A 3D envelopment procedure for tyre belt radiated noise level prediction. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International*

- Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 2230–2241).
- Kneib, G., Belcher, D., Beckenbauer, T., & Beyeler, H.-P. (2016). Continuous road traffic noise monitoring and aging of asphalt surfaces. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 5018–5029).
- Kocak, S., & Kutay, M. (2012). Relationship Between Material Characteristics of Asphalt Mixtures and Highway Noise. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2295(2295), 35–43. <https://doi.org/10.3141/2295-05>
- Kohler, E. (2010). OBSI Testing. In *Pavement Evaluation 2010*.
- Kohler, E. (2011). TIRE-PAVEMENT NOISE MEASUREMENT WITH THE ON-BOARD SOUND INTENSITY (OBSI) METHOD. In *8th International Conference on Managing Pavement Assets, ICMIPA*.
- Kohler, E., Harvey, J., & Motumah, L. (2012). Assessment of Tire Noise on Concrete Pavement in California Highways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2306(2306), 113–121. <https://doi.org/10.3141/2306-13>
- Kosaka, F., Mizuno, H., Inoue, T., & Takagi, K. (2014). Road noise sensitivity analysis with respect to suspension geometry. In *Internoise 2014* (pp. 1–10).
- Kowalski, K. J., Dare, T., Mcdaniel, R. S., Olek, J., & Bernhard, R. (2013). Research on a laboratory technique for tire-pavement noise assessment of asphalt mixes. *Archives of Civil Engineering*, 59(4), 561–577. <https://doi.org/10.2478/ace-2013-0031>
- Kowalski, K. J., Bańkowski, W., Król, J. B., Gajewski, M., Horodecka, R., & Świeżewski, P. (2016). Selection of Quiet Pavement Technology for Polish Climate Conditions on the Example of CiDRO Project. *Transportation Research Procedia*, 14, 2724–2733. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.453>
- Kowalski, K., McDaniel, R., Shah, A., & Olek, J. (2009). Long-Term Monitoring of Noise and Frictional Properties of Three Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2127(2127), 12–19. <https://doi.org/10.3141/2127-02>
- Kozynacka, M. (2010). *Projekt cichych nawierzchni na drogach wojewódzkich w Małopolsce*.
- Kucharski, R. (2011). *Wytyczne opracowywania map akustycznych*.
- Kuemmel A, D., Jaeckel R, J., Satanovsky, A., Shober F, S., Dobersek M, M., Kuemmel, D., ... Dobersek, M. (1996). Noise Characteristics of Pavement Surface Texture in Wisconsin. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1544(1544), 24–35. <https://doi.org/10.3141/1544-04>
- Kuemmel, D. A., Sontag, R. C., Crovetto, J. A., Becker, Y., Jaeckel, J. R., & Satanovsky, A. (2000). *NOISE AND TEXTURE ON PCC PAVEMENTS RESULTS OF A MULTI-STATE STUDY*.
- Kuemmel, D., Sonntag, R., Jaeckel, J., Crovetto, J., Becker, Y., & Satanovsky, A. (2000). Using a Road Surface Analyzer to Explain Noise Characteristics of Portland Cement Concrete Pavement Surface Texture. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1716(1716), 144–153. <https://doi.org/10.3141/1716-17>
- Kumar, A., Tandon, A., Paul, S., Singla, A., Kumar, S., Vijay, P., & Bhangale, U. D. (2011). Influence of Tyre's Dimensional Characteristics on Tyre-Pavement Noise Emission. *Physical Review and Research International*, 1(4), 124–137.
- L.Wayson, R., MacDonald, J. M., & Martin, A. (2014). *On-Board Sound Intensity (OBSI) Study*.

- Lapeyronie, V. (2012). The ISO test track: COLAS Group's experience. In *PIARC 7th symposium on pavement surface characteristics*.
- Lee, C., & Fleming, G. G. (1996). *Measurement of Highway-Related Noise, FHWA-PD-96-046*.
- Leeuwen, H. Van. (2008). *Harmonoise: the New European Harmonised Prediction Method*.
- Lelong, J., & Michelet, R. (2001). Passenger cars, power unit and tyre-road noise, driving behaviour: What are the stakes? *Internoise 2001*. Retrieved from <http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&PAGE=reference&D=tspt&NEWS=N&AN=E113252>
- Li, M., Keulen, W. Van, Ceylan, H., Ven, M. F. C. van de, & Molenaar, A. A. A. (2015). Statistical Model of Tyre - Road Noise for Thin Layer Surfacing. In *TRB meeting*.
- Li, T., Feng, J., Burdisso, R., & Sandu, C. (2016). The Effects of Tread Pattern on Tire Pavement Interaction Noise. In *45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future, INTER-NOISE 2016 Hamburg, Germany, August 21-24, 2016* (pp. 2185–2196).
- Li, X., & Lim, V. (2014). Integrated test system for tyre / road noise – ISO / DIS 11819-2 and AASHTO TP76-12 methods. In *Internoise 2014* (pp. 1–7).
- Liao, G., Sakhaeifar, M. S., Heitzman, M., West, R., Waller, B., Wang, S., & Ding, Y. (2014). The effects of pavement surface characteristics on tire/pavement noise. *Applied Acoustics*, 76, 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.07.012>
- Licitra, G., Cerchiai, M., Teti, L., Bianco, F., Chetoni, M., & Ascari, E. (2016). Relationship between Pass By results, CPX ones and roadside long-term measures: some considerations. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 4955–4963).
- Licitra, G., Cerchiai, M., Teti, L., Chetoni, M., & Bianco, F. (2016). THE INFLUENCE OF TYRES ON THE CPX METHOD USED FOR EVALUATING THE EFFICACY OF A NOISE MITIGATION ACTION. In *International Congress on Sound & Vibration* (pp. 1–8).
- Licitra, G., Teti, L., Cerchiai, M., Ascari, E., & Chetoni, M. (2014). SPB and CPX results of rubberized surfaces in the Italian urban and extra-urban context. In *Internoise 2014* (pp. 1–8).
- Lindeman, W. (2002). Defining Reasonable and Feasible Traffic Noise Abatement: Consideration of Quantitative Approach. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1792(1792), 83–88. <https://doi.org/10.3141/1792-11>
- Liu, J., & Herrin, D. W. (2008). A Simplified Two-Load Method for Measuring Source Impedance. In *NOISE-CON 2008*.
- Lodico, D. M. (2010). Beyond the Specifications: Best Practices for OBSI Measurement. In *Transportation Research Board 89th Annual Meeting*.
- Lodico, D. M., Donovan, P. R., & Rochat, J. L. (2015). Evaluating Pavement and Barriers for Noise Mitigation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2502, 30–39. <https://doi.org/10.3141/2502-04>
- Lodico, D. M., & Donovan, P. R. (2008). Evaluation of on-board sound intensity (OBSI) method test parameters. In *Institute of Noise Control Engineering of the USA - 23rd National Conference on Noise Control Engineering, NOISE-CON 08 and Sound Quality Symposium, SQS 08* (Vol. 3, pp. 1136–1147).

- Lodico, D., & Donovan, P. (2013). Using Onboard Sound Intensity Measurements to Interpret Results of Traffic Noise Modeling. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2362(2362), 9–15. <https://doi.org/10.3141/2362-02>
- Lodico, D., & Donovan, P. (2012). Evaluation of Temperature Effects for Onboard Sound Intensity Measurements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2270(2270), 9–15. <https://doi.org/10.3141/2270-02>
- Lodico, D., Donovan, P., Lodico M, D., & Donovan R, P. (2009). Evaluation of Test Variables for Onboard Sound Intensity Measurements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2123(2123), 153–162. <https://doi.org/10.3141/2123-17>
- Losa, M., & Bellucci, P. (2015). *Project CEDR DISTANCE: Developing Innovative Solutions for Traffic Noise Control in Europe*.
- Losa, M., Leandri, P., & Licitra, G. (2013). Mixture Design Optimization of Low-Noise Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2372(2372), 25–33. <https://doi.org/10.3141/2372-04>
- Lu, Q., Fu, P., & Harvey, J. T. (2009). *Laboratory Evaluation of the Noise and Durability Properties of Asphalt Surface Mixes, Report UCD-ITS-RR-09-59*.
- Lu, Q., & Harvey, J. T. (2011). Laboratory Evaluation of Open-Graded Asphalt Mixes with Small Aggregates and Various Binders and Additives. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2209. <https://doi.org/10.3141/2209-08>
- Lu, Q., Harvey, J., Kohler, E., Rymer, B., & Motumah, L. (2011). Comparison of tire-pavement noise characteristics of rubberized and conventional asphalt concrete mixes. *Noise Control Engineering Journal*, 59(3), 219. <https://doi.org/10.3397/1.3573595>
- Lu, Q., Wu, R., & Harvey, J. T. (2012). Calibration of on-Board Sound Intensity Measurements of Tire/Pavement Noise. In *Transportation Research Board 91st Annual Meeting* (pp. 1–18).
- Lundberg, O. E., Lopez Arteaga, I., & Kari, L. (2016). Experimental study of the rolling contact forces between a tyre tread-block and a road. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 2179–2184).
- MacDonald, J., Wayson, R., EI-Aassar, A., & Berrios, M. (2004). Sound Levels and Shadow Zones Behind Barriers in Florida. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1880(1880), 158–164. <https://doi.org/10.3141/1880-19>
- Macdonald, J., & Wayson, R. (1999). Railway Noise Model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1670(1670), 76–80. <https://doi.org/10.3141/1670-10>
- Maeck, J., & Bergiers, A. (2016). Noise Reducing Thin Asphalt Layers in an Urban Environment: a pilot study in Antwerp. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 6931–6941).
- Maennel, M., & Altreuther, B. (2016). Ageing of low noise road surfaces. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 6964–6972).
- Mak, K. L., & Hung, W. T. (2014). Statistical tyre/road noise modeling in Hong Kong on friction course. *Applied Acoustics*, 76, 24–27. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.07.018>
- Makwana, B. (2016). Overview of tyre perspective experimental and virtual tools developed within Silent and Safe Road traffic project. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 -*

- 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future (pp. 2150–2157).
- Manfred, H., & Ulf, S. (2006). *Project SILENCE, Noise Classification Methods for Urban Road Surfaces, User manual: Measurement methods*.
- Marbjerg, G. (2013). *Noise From Electric Vehicles – a Literature survey*. Retrieved from http://www.compett.org/documents/wp_3_report_noise_from_electric_vehicles_a_literature_survey.pdf
- Marolf, A., Neithalath, N., Sell, E., Wegner, K., Weiss, J., & Olek, J. (2004). Influence of Aggregate Size and Gradation on the Acoustic Absorption of Enhanced Porosity Concrete. *Concrete*.
- McDaniel, R. (2014). *Modeling Asphalt Pavement Characteristics to Reduce Noise*.
- McDonald, P., Geraghty, D., Humphreys, I., & Farrell, S. (2008). Assessing Environmental Impact of Transport Noise with Wireless Sensor Networks. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2058(2058), 133–139. <https://doi.org/10.3141/2058-16>
- McGhee K, K., de León Izeppi David, E., Flintsch W, G., & Mogrovejo E, D. (2013). Virginia Quieter Pavement Demonstration Projects: Initial Functional Assessment. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2362), pp 16–24. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3141/2362-03>
- McGhee, K., de León Izeppi, E., Flintsch, G., & Mogrovejo, D. (2013). Virginia Quieter Pavement Demonstration Projects. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2362(2362), 16–24. <https://doi.org/10.3141/2362-03>
- McNerney T, M., Landsberger J, B., Turen, T., Pandelides, A., Mcnerney, M., Landsberger, B., Pandelides, A. (1998). Comparative Field Measurements of Tire Pavement Noise of Selected Texas Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1626(1626), 78–84. <https://doi.org/10.3141/1626-10>
- Mecanum. (2011). *Acoustic Materials: Characterization*.
- Meiarashi, S. (2004). POROUS ELASTIC ROAD SURFACE AS URBAN HIGHWAY NOISE MEASURE. *Transportation Research Record*, (1880), 151–157. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3141/1880-18>
- Menge W, C., & Barrett E, D. (2011). *Reflections from Highway Noise Barriers and Use of Absorptive Materials in the United States: Why Small Increases in Noise Levels May Deserve Serious Consideration*. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3141/2233-19>
http://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Reflections+from+Highway+Noise+Barriers+and+Use+of+Absorptive+Materials+in+the+United+States%3A+Why+Small+Increases+in+Noise+Levels+May+Deserve+Serious+Consideration&author=Menge+W,+C.,+Barrett+E,+D.
- Menge, C., & Barrett, D. (2011). Reflections from Highway Noise Barriers and Use of Absorptive Materials in the United States. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2233(2233), 161–166. <https://doi.org/10.3141/2233-19>
- Merska, O., Mieczkowski, P. P., Żymełka, D. (2016). Low-noise Thin Surface Course – Evaluation of the Effectiveness of Noise Reduction. *Transportation Research Procedia*, 14, 2688–2697. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.445>
- Mioduszewski, P. (2014). Pomiar hałasu drogowego. *Autostrady*, 11–12, 54–60.
- Mioduszewski, P. (2014). Pomiar hałasu drogowego. *Autostrady*, 11–12.
- Mioduszewski, P. (2013). *CORE 2013 Project: Low Emission Optimised tyres and road surfaces for electric and hybrid vehicles*.

- Mioduszewski, P., Ejsmont, J. A., Grabowski, J., & Karpiński, D. (2011). Noise map validation by continuous noise monitoring. *Applied Acoustics*, 72(8), 582–589. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.01.012>
- Mioduszewski, P., & Gardziejczyk, W. (2016). Inhomogeneity of low-noise wearing courses evaluated by tire/road noise measurements using the close-proximity method. *Applied Acoustics*, 111, 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.04.006>
- Mioduszewski, P., Taryma, S., & Wozniak, R. (2014). Temperature influence on tyre/road noise of selected tyres. In *Internoise 2014*.
- Mioduszewski, P., Taryma, S., & Wozniak, R. (2016). Temperature influence on tyre / road noise frequency spectra. In *Internoise 2014* (pp. 4924–4934).
- Miró, R., Pérez-Jiménez, F., Martínez, A., Reyes-Ortiz, O., Paje, S., & Bueno, M. (2009). Effect of Crumb Rubber Bituminous Mixes on Functional Characteristics of Road Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2126(2126), 83–90. <https://doi.org/10.3141/2126-10>
- Mizgalska, A. (2009). Walka z hałasem. *Polski Drogi, Dodatek PSWNA*, 3, 7–9.
- Mogrovejo E, D., Flintsch W, G., de León Izeppi D, E., McGhee K, K., & Burdisso A, R. (2014). Short-Term Effect of Pavement Surface Aging on Tire–Pavement Noise Measured with Onboard Sound Intensity Methodology. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2403), pp 17–27. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3141/2403-03>
- Mogrovejo, D. E., Flintsch, G. W., de Leon izeppi, E. D., & McGhee, K. K. (2012). Effect of Air Temperature and Vehicle Speed on Tire / Pavement Noise Measured with On-Board Sound Intensity Methodology. *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting. January 12-16, Washington, D.C.*, 250(540), 1–21.
- Mogrovejo, D. E., Flintsch, G. W., de León Izeppi, E., & McGhee, K. K. (2014). Tire-Pavement Noise Evaluation and Equipment Comparison Using On Board Sound Intensity Methodology over Several Pavement Surfaces in Virginia. *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting. January 12-16, Washington, D.C.*, 250(750).
- Morgan, P., Sandberg, U., & van Blokland, G. (2009). The selection of new reference test tyres for use with the CPX method , to be specified in ISO / TS 11819-3. In *Internoise 2009*.
- Morgan, S., & Kay, D. (2001). Selection of Noise Barrier Material. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1756(1756), 63–67. <https://doi.org/10.3141/1756-07>
- Mori, H., Ueta, T., Noguchi, E., Nagaoka, H., Ishikawa, K., Kabashima, S., ... Miyazaki, H. (2016). A study of the tire-road noise and peak level at the side of the road of environmental pavement. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 7037–7043).
- Muehleisen, R. (2007). *Measurement of the acoustic properties of acoustic absorbers*. Retrieved from http://www.inceusa.org/nc07/links/Muehleisen_plenary_acoustic_properties_materials.pdf
- Nagata, S., Furihata, K., Wada, T., Asano, D. K., & Yanagisawa, T. (2005). A three-dimensional sound intensity measurement system for sound source identification and sound power determination by In models. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(6), 3691–3705. <https://doi.org/10.1121/1.2126929>

- Nelson, J., Kohler, E., Öngel, A., & Rymer, B. (2008). Acoustical Absorption of Porous Pavement. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2058(2058), 125–132. <https://doi.org/10.3141/2058-15>
- Newland, D. E. (1993). Harmonic wavelet analysis. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 443, 203–225.
- NN. (2000). *Narrowband versus Broadband Spectrograms*.
- NN. (2000). *Practical Spectra Analysis*.
- NN. (2013). *Conversion: Sound pressure to Sound intensity and vice versa*.
- NN. (2000). *Pomiary akustyczne*.
- Noise, H. S., & Mode, O. (2010). Noise levels, 2–3.
- Nolte, D., & Hoang, N. H. (2016). Guardrails with inbuilt noise barriers are on the way. *Phys.org*, pp. 1–3.
- O'Boy, D. J., & Walsh, S. J. (2016). Automotive tyre cavity noise modelling and reduction. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 2283–2293).
- Oddershede, J. (2013). *CPX - OBSI Relation in Tyre / Road Noise Measurement Results*.
- Ogle, T., Wayson, R., & Lindeman, W. (1996). Effect of Vehicle Speed on Sound Frequency Spectra. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1559(1559), 14–25. <https://doi.org/10.3141/1559-03>
- Olszacki, J. (2008). Hałas ruchu drogowego, część 1. *Drogownictwo*, 3, 80–84.
- Olszacki, J. (2008). Hałas ruchu drogowego, część 2. *Drogownictwo*, 4, 118–122.
- Olszacki, J. (2008). Hałas ruchu drogowego, część 3. *Drogownictwo*, 5, 164–170.
- Ongel, A., Kohler, E., & Nelson, J. (2007). *Acoustical Absorption of Open-Graded, Gap-Graded, and Dense-Graded Asphalt Pavements, Report UCPRC-RR-2007-12*.
- Ongel, A., Kohler, E., Lu, Q., & Harvey, J. (2008). Comparison of Surface Characteristics and Pavement/Tire Noise of Various Thin Asphalt Overlays. *Road Materials and Pavement Design*, 9(2), 333–344. <https://doi.org/10.1080/14680629.2008.9690121>
- Parra, L., Casas, T., Sotomayor, R. Á. de, Cerro, J. del, & Castillo, E. (2012). CPX NOISE MEASUREMENTS IN DIFFERENT ROAD SURFACES. In *SURF5-Parra*.
- Pedersen, F., & Kristensen, B. (2014). The danish national road noise strategy. In *Internoise 2014* (pp. 2–5).
- PIARC. (2013). *Quiet Pavement Technologies. PIARC 2013R10EN*.
- Pierce, L., Mahoney, J., Muench, S., Munden, H., Waters, M., & Uhlmeyer, J. (2009). Quieter Hot-Mix Asphalt Pavements in Washington State. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2095(2095), 84–92. <https://doi.org/10.3141/2095-09>
- Pinnington, R. J. (2016). Tyre contact forces on a particulate road surface. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 2207–2218).
- Protection, S. E. (2016). Measurements on low noise road surfaces. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 3898–3909).
- Raaberg, J., Schmidt, B., & Bendtsen, H. (2001). *Technical Performance and Long-Term Noise Reduction of Porous Asphalt Pavements. Danish Road Institute*.
- Ramussen, R. O., Bernhard, R. J., Sandberg, U., & Mun, E. P. (2007). *The little book of quieter pavements*.
- Rasmussen, R. O., Donovan, P. R., Rochat, J. L., & Lodico, D. M. (2012). *Quieter Pavements: Measurements and Applications*.

- Rasmussen, R. O., Garber, S. I., Fick, G. J., Ferragut, T. R., & Wiegand, P. D. (2008). *How to Reduce Tire-Pavement Noise- Interim Better Practices for Constructing and texturing Concrete Pavement Surfaces, Pooled Fund TPF-5(139)*.
- Rasmussen, R. O., Garber, S., Sohaney, R., Wiegand, P., & Harrington, D. (2010). *What Makes a Quieter Concrete Pavement? Concrete Pavement Surface Characteristics Program Authors*.
- Rasmussen, R. O., Sohaney, R., & Wiegand, P. (2011). *Measuring and Reporting Tire-Pavement Noise Using On-Board Sound Intensity (OBSI), Tech Brief*.
- Reiter, D., & Bowlby, W. (2002). Assessing Noise Reflections off the Underside of Elevated Bridge Structures: Procedures Using the FHWA Traffic Noise Model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1792(1792), 50–56. <https://doi.org/10.3141/1792-07>
- Rezaei, A., & Harvey, J. (2011). *Concrete Pavement Tire Noise : Third-Year Results*.
- Rezaei, A., & Harvey, J. T. (2013). *Investigation of Noise, Ride Quality and Macrotecture Trends for Asphalt Pavement Surfaces: Summary of Four Years of Measurements*.
- Rochat, J. L., Hastings, A. L., Read, D. R., & Lau, M. (2012). *FHWA Traffic Noise Model (TNM) Pavement Effects Implementation Study : Progress Report 1. Report #: FHWA-HEP-12-034*.
- Rochat, J. L., Donovan, P., Seybert, A., & Dare, T. (2012). Pavement sound absorption measurements in the U.S. In *Internoise 2012* (Vol. 3, pp. 2612–2626).
- Rochat, J., & Donovan, P. (2013). Investigations of Effects of Porous Pavement on Traffic Noise and Traffic Noise Prediction. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2362(2362), 42–48. <https://doi.org/10.3141/2362-06>
- Ronowski, G., Ejsmont, J. A., Sommer, S., & Owczarzak, W. (2015). CP2015 - zmodyfikowana metodyka przewidywania hałasu powstającego na parkingach, stacjach paliw, MOP-ach i punktach poboru opłat. *Autostrady*, 7, 18–21.
- Roo, F. De. (2013). New EU and UN / ECE Vehicle noise emission limits and associated measurement methods. In *Internoise 2013* (pp. 1–16).
- Roo, F. De, Telman, J., Blokland, G. Van, Leeuwen, H. Van, Reubsæet, J., & Vliet, W. Van. (2009). *Uncertainty of Close Proximity (CPX) tyre-road noise measurements – Round Robin test results Round Robin test scheme*.
- Roschke, P., & Esche, S. (1999). Construction of a Full-Scale Noise Barrier with Recycled Plastic. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1656(1656), 94–101. <https://doi.org/10.3141/1656-13>
- ROSSANE. (2012). *ROSSANE proposal*.
- Ruttmar, I. (2011). *Ciche Nawierzchnie Asfaltowe*.
- RWS. (2014). *Quiet Road Surfaces*.
- Rymer, B., Donovan R, P., & Donovan, P. (2011). Determining End Limits of Quieter Pavement Projects. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2233(2233), 145–151. <https://doi.org/10.3141/2233-17>
- Sandberg, U. (2010). Asphalt rubber pavements in Sweden – noise and rolling resistance properties. In *Internoise 2010*. Retrieved from http://www.trafikverket.se/TrvSeFiler/Foretag/Bygga_och_underhalla/gummi-asfalt/ref_17_Aspalt_rubber_pavements_in_Sweden.pdf
- Sandberg, U. (2011). *Rolling resistance - Basic information and State-of-the-Art on measurement methods*. Retrieved from http://miriam-co2.net/Publications/MIRIAM_SoA_Report_Final_110601.pdf
- Sandberg, U. (2001). Tyre/ road noise - Myths and realities. In *Internoise 2001*.

- Sandberg, U. (2009). *The global experience in using low-noise road surfaces : A benchmark report*.
- Sandberg, U. (2014). Measurement of functional properties of road surfaces (texture, noise, rolling resistance), 1–25.
- Sandberg, U., Bergiers, A., Ejsmont, J. a., Goubert, L., Karlsson, R., & Zöller, M. (2011). *Road surface influence on tyre/road rolling resistance*. Retrieved from http://miriam-co2.net/Publications/MIRIAM_SP1_Road-Surf-Infl_Report_111231.pdf
- Sandberg, U., Buhlmann, E., Conter, M., Mioduszewski, P., & Wehr, R. (2016). Improving the CPX method by specifying reference tyres and including corrections for rubber hardness and temperature. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 4913–4923).
- Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2000). Noise emission, friction and rolling resistance of car tires - summary of an experimental study. In *Proc. of NOISE-CON 2000, Newport Beach, California*.
- Sandberg, U., & Mioduszewski, P. (2014). The best porous asphalt pavement in Sweden so far. In *Internoise 2014* (pp. 1–12).
- Sandberg, U., Mioduszewski, P., Ejsmont, J., & Vieira, T. (2016). Noise and rolling resistance properties of various types of winter tyres compared to normal car tyres. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 7005–7016).
- Sandberg, U. and Ejsmont, J., (1986). Development of Three Methods for Measurement of Tire/Road Noise Emission: Coast-By, Trailer, and Laboratory Drum, *Noise Control Engineering Journal, Institute of Noise Control Engineering*, Vol. 27, No. 3.
- Schmidt, B. (2010). *Miriam : Models for Rolling Resistance in Road Infrastructure Asset Management*.
- Schubert, S., Mannel, M., Ertsey, M., & Hoever, C. (2016). Influence of the tyre impedance on CPX level used to evaluate tyre/road noise. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 4945–4954).
- Schuhmacher, A., Shirahashi, Y., Fujii, Y., & Sakamoto, Y. (2016). Separation of engine and tyre noise using operational measurement only. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 5390–5399).
- Scofield, L. (2012). Performance of Field Installations of Next-Generation Concrete Surface. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2306(2306), 180–187. <https://doi.org/10.3141/2306-21>
- Scofield, L. (2009). *MnROADS I-94 NGCS , NGCS LITE and CDG OBSI Test Results*.
- Seybert, A. F. (2010). *Notes on Absorption and Impedance Measurements. Spectronics*.
- Seybert, A. F. (1988). Two-sensor Methods for the Measurement of Sound Intensity and Acoustic Properties in Ducts. *Journal Acoustical Society America*, 83(6), 2233–2239.
- Seybert, A. F., & Ross, D. F. (1977). Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 61(5), 1362–1370. <https://doi.org/10.1121/1.381403>
- Seybert, A. F., & Soenarko, B. (1981). Error analysis of spectral estimates with application to the measurement of acoustic parameters using random sound fields in ducts. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 69(4), 1190–1199. <https://doi.org/10.1121/1.385700>

- Seybert, A. F., & Han, J. (2008). Measurement of pavement absorption using ISO 13472-2. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(5), 3686–3686. <https://doi.org/10.1121/1.2935058>
- Shekharan, A. (1998). Effect of Noisy Data on Pavement Performance Prediction by Artificial Neural Networks. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1643(1643), 7–13. <https://doi.org/10.3141/1643-02>
- Shin, S., Hashimoto, T., & Hatano, S. (2014). Effect on car interior sound quality according to the variation of noisy components of tire-pattern noise. In *Internoise 2014* (pp. 1–8).
- Sikora, J. (2011). STANOWISKO DO BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI DŹWIĘKOIZOLACYJNYCH PRZEGRÓD O MAŁYCH WYMIARACH. *Technical Transactions*, 15.
- Sikora, J. (2013). *Katalog nowych materiałów dźwiękochłonnych*.
- Simpson, C., McIntosh, J., Buret, M., & Samuels, S. (2014). ASPHALT TRIALS TO REDUCE TRAFFIC NOISE LEVELS. In *26th ARRB Conference*.
- SINTEF. (2015). Listening to roads before construction.
- Skvortsov, A., & Macgillivray, I. (2014). A simple model of effective elastic properties of materials with inclusions. In *Internoise 2014* (pp. 1–8).
- Sohaney, R. C. (2013). *Pavement Texture Evaluation and Relationships to Rolling Resistance at MnROAD*.
- Sohaney, R., Rasmussen, R., Seybert, a., & Donovan, P. (2012). New ISO Test Track Specification for Measuring Tire and Vehicle Noise. *Sound and Vibration*, (August), 9–14. Retrieved from <http://www.sandv.com/downloads/1208soha.pdf>
- Son, H., An, D., Lee, J., & Kim, Y. (2014). A Study of Traffic Noise Characteristic of Pavement Types Using NCPX Method. *Internoise 2014*, 2–7.
- SoundPLAN. (2000). *SoundPLAN*.
- Southern, A., & Murphy, D. (2016). Comparison of road tyre noise auralisation methods. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 3483–3489).
- Spectronics. (2000). Cutting , Preparation , and Testing of Samples for the ACUPRO Impedance Tube.
- Spectronics. (2013). Best practices: A Guide to Making Effective Measurements of Sound Absorption Coefficient.
- Stahlfest, R., & Skov, H. (2016). Analysis and comparison of methods , CPX and SPB , for measuring noise properties of road surfaces. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 4964–4974).
- Staiano, M. A. (2015). IMPLICATIONS of TIRE-PAVEMENT NOISE & TEXTURE MEASUREMENTS. In *TRB meeting*.
- Stenlund, F. (2012). Functional noise specifications for purchasing green low noise vehicles. In *Internoise 2012*.
- Storey, B., & Godfrey, S. (1996). Highway Noise Barriers: 1994 Survey of Practice. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1523(1523), 107–115. <https://doi.org/10.3141/1523-13>
- Suh, S., Badagnani, V., Mongeau, L., & Bolton, J. (2003). Performance of Noise Barriers with Absorptive Edge Treatments. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1859(1859), 53–64. <https://doi.org/10.3141/1859-07>
- Suh, S., Mongeau, L., & Stuart Bolton, J. (2002). Application of the Boundary Element Method to Prediction of Highway Noise Barrier Performance. *Transportation Research*

- Record: *Journal of the Transportation Research Board*, 1792(1792), 65–74.
<https://doi.org/10.3141/1792-09>
- Świczko-Żurek, B., Ejsmont, J. A., & Ronowski, G. (2014). HOW EFFICIENT IS NOISE LABELING OF TIRES? In *Internoise 2014*.
- Świczko-Żurek, B., Ejsmont, J., Mioduszewski, P., Ronowski, G., & Taryma, S. (2015). The effect of tire aging on acoustic performance of CPX reference tires. *Internoise 2015*, ADC 40; Institute of Noise Control Engineering of.
- Świczko-Żurek, B., Ejsmont, J., & Ronowski, G. (2014). Reduction of Tire Rolling Resistance by Optimization of Road Surfaces and Tires. In *COTUME'2014*.
- Świczko-Żurek, B., Ejsmont, J., Ronowski, G., & Taryma, S. S. (2014). Comparison of road and laboratory measurements of tyre/road noise. In *INTERNOISE 2014* (pp. 1–8).
- Tanaka, Y., Horikawa, S., & Murata, S. (2016). Influence of tire deformation on sound pressure level inside a tire. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 2277–2282).
- Tao, Z., & Seybert, A. F. (2003). A Review of Current Techniques for Measuring Muffler Transmission Loss. In *SAE Technical Paper* (Vol. 03NVC–38).
<https://doi.org/10.4271/2003-01-1653>
- Tao, Z., Herrin, D. W., & Seybert, a F. (2003). Measuring Bulk Properties of Sound-Absorbing Materials Using the Two-Source Method. In *SAE Technical Paper*.
<https://doi.org/10.4271/2003-01-1586>
- Tao, Z., Zhang, B., Herrin, D. W., & Seybert, A. F. (2005). Prediction of Sound-Absorbing Performance of Micro-Perforated Panels Using the Transfer Matrix Method. In *SAE 2005 Noise and Vibration Conference and Exhibition*. <https://doi.org/10.4271/2005-01-2282>
- Tech, V., Flintsch, G. W., Via, C., Mcghee, K. K., Scientist, A. P., Burdisso, R. A., & Consultants, V. E. (2014). Mogrovejo , Flintsch , de León Izeppi , McGhee and Burdisso Short-Term Effect of Pavement Surface Aging on Tire / Pavement Noise Measured with On- Board Sound Intensity Methodology Mogrovejo , Flintsch , de León Izeppi , McGhee and Burdisso. *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting. January 12-16, Washington, D.C., 250*.
- Thompson, D., & Jones, C. J. (2000). Using Theoretical Models to Design Low-Noise Wheels and Track. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1702(1702), 51–56. <https://doi.org/10.3141/1702-06>
- Tonin, R., Chan, D., & Huang, G. (2016). RONDA open frame CPX trailer - Certification in accordance with ISO / CD 11819-2. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 4985–4996).
- Tonin, R., & Szabo, A. (2014). RONDA - CPX Trailer Initial Test Results. In *Internoise 2014* (pp. 2–7).
- Trevino, M., & Dossey, T. (2006). *A Research Plan for Measuring Noise Levels in Highway Pavements in Texas, Report FHWA/TX-07/0-5185-1*.
- Trinh, V. (1994). *Measurement of Sound Intensity and Sound Power*.
- Tsujiuchi, N., Ito, A., Masuda, A., Seki, H., & Takahashi, H. (2016). Developing evaluation model of tire pattern impact noise. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 2969–2979).

- U.S. Department of Transportation. (2004). *FHWA Traffic Noise Model Users Guide (Version 2.5 Addendum)*.
- U.S. Department of Transportation. (1998). *Fhwa Traffic Noise Model (Fhwa TNM) Technical Manual*.
- UCL. (2000). *Lecture 1-10: Spectrograms*.
- Utsuno, H., Tanaka, T., Fujikawa, T., & Seybert, A. F. (1989). Transfer function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous materials. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 86(2), 637–643. Retrieved from <http://scitation.aip.org/content/asa/journal/jasa/86/2/10.1121/1.398241>
- Vaitkus, A., Čygas, D., Vorobjovas, V., & Andriejauskas, T. (2016). Traffic/Road Noise Mitigation under Modified Asphalt Pavements. *Transportation Research Procedia*, 14, 2698–2703. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.446>
- VGTV. (2015). *TEST ROAD OF NOISE- REDUCING PAVEMENTS*.
- Vorlander, M. (2013). Acoustic Measurements. In *Handbook of Engineering Acoustics* (pp. 165–214). <https://doi.org/10.1007/978-3-540-69460-1>
- Vu, T. D., Yin, H. P., Duhamel, D., Gaudin, A., & Abbadi, Z. (2014). Tire / road contact modeling for the in-vehicle noise prediction. In *Internoise 2014* (pp. 1–5).
- Vuye, C. (2011). A future gone silent. *Thinkinghighways.com*.
- Walker, U. (2014). The Swiss way to silent roads. In *Internoise 2014* (pp. 1–8).
- Wang, G., Shores, R., Botts, J., & Hibbett, R. (2011). *On-Board Sound Intensity Tire-Pavement Noise Study in North Carolina, Report for Project: 2010-13*.
- Wang, G., Smith, G., & Shores, R. (2012). Pavement noise investigation on North Carolina highways: an on-board sound intensity approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(8), 878–886. <https://doi.org/10.1139/l2012-076>
- Wasilewska, M., Gardziejczyk, W., Gierasimiuk, P., & Motylewicz, M. (2014). *Analiza porównawcza parametrów opisujących właściwości przeciwpoślizgowe nawierzchni drogowych, ustalonych w oparciu o wyniki pomiarów współczynnika tarcia i makrotekstury przy wykorzystaniu zestawów pomiarowych: SRT-3 (Skid Resistance Tester), TWO (Tract)*.
- Watson, D. (2006). *Evaluation of Benefits and Opportunities for Innovative Noise Barrier Designs*.
- Wayson, R. (1998). *NCHRP 268, Relationship between pavement surface texture and highway traffic noise*.
- Wayson, R., MacDonald, J., Arner, W., Lindeman, W., & Berrios, M. (2002). Comparison of Measured and Modeled Sound Levels in the Vicinity of Traffic Noise Barriers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1792(1792), 57–64. <https://doi.org/10.3141/1792-08>
- Wayson, R., MacDonald, J., El-Assar, A., Lindeman, W., & Berrios, M. (2003). Florida Noise Barrier Evaluation and Computer Model Validation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1859(1859), 72–78. <https://doi.org/10.3141/1859-09>
- Wehr, R., & Fuchs, A. (2016). A combined approach for CPX tyre hardness and temperature correction. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 2986–2991).
- Wei, Y., Feng, X., Xiang, D., & Chen, Y. (2014). A Simulation Methodology for Tire / Road Vibration Noise analysis. In *Internoise 2014* (pp. 14–16).
- Wiegand, P. (2006). *Concrete Solutions for Quieter Pavements on Existing Roadways*.

- Wijnant, Y. H., & Boer, A. De. (1995). *Impedance models for porous asphalt with the focus on oblique incidence Conclusions & Further work*.
- Wilde, W. J., Dvorak, R. P., & Izevbekhai, B. I. (2014). Frequency-Domain Temperature Correction of Tire-Pavement Noise. In *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*.
- Winroth, J., Kropp, W., Hoever, C., Beckenbauer, T., & Mannel, M. (2016). Separating the contributions from air-pumping and tyre vibrations by speed dependency analysis of tyre/road noise. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 2158–2168).
- Wolkesson, M. (2013). Evaluation of impedance tube methods - A two microphone in-situ method for road surfaces and the three microphone transfer function method for porous materials, 69.
- World Health Organization (WHO). (2011). Burden of disease from environmental noise. *World Health*, 1–105.
- WSDOT. (2005). *Quieter Pavements – Options & Challenges for Washington State*.
- Yu X et al. (2014). Structural transfer path analysis of automobile tire/road noise. In *Internoise 2014* (pp. 1–7). Retrieved from http://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/INTERNOISE2014/papers/p399.pdf
- Yu, B., & Lu, Q. (2013). Bayesian model for tyre/asphalt pavement noise. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 166(4), 241–252. <https://doi.org/10.1680/tran.11.00040>
- Zhang, Y.-F., Cesbron, J., Yin, H.-P., & Berengier, M. (2016). Dynamic contact law between a rolling pneumatic tyre and a single asperity. In *Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future* (pp. 2197–2206).
- Zołociński, J., & Ziaja, J. (2012). Nawierzchnie „tecRoad”. *Edroga.pl*.