

WŁADYSŁAW
GARDZIEJCZYK

Politechnika Białostocka
w.gardziejczyk@pb.edu.pl



PAWEŁ GIERASIMIUK

Politechnika Białostocka
p.gierasimiuk@pb.edu.pl



MAREK MOTYLEWICZ

Politechnika Białostocka
m.motylewicz@pb.edu.pl

Hałaśliwość nawierzchni betonowych – przykładowe wyniki badań

Nawierzchnie betonowe charakteryzują się bardzo dobrą odpornością na odkształcenia niezależnie od temperatury, dzięki czemu nie występują na ich powierzchni deformacje w przekroju poprzecznym. Z uwagi na jasny kolor, dobrze rozpoznawalni są na takiej nawierzchni inni użytkownicy dróg, co stanowi, że są one rozwiązaniem bezpiecznym z punktu widzenia ruchu drogowego. Uważa się, że ten typ nawierzchni jest także porównywalnym rozwiązaniem pod względem ekonomicznym, uwzględniając okres eksploatacji, ze standardowymi nawierzchniami asfaltowymi [11].

W niektórych krajach w Europie udział nawierzchni betonowych na drogach szybkiego ruchu, jak również na drogach lokalnych, jest znaczący. Do takich krajów zaliczają się m.in.: Belgia, Austria, Niemcy [7, 8].

Na polskich drogach do niedawna nawierzchnie z betonu cementowego można było spotkać sporadycznie. Były one wykonywane przede wszystkim na lotniskach, drogach

wych jako zespołu „klawiszujących” starych płyt, ze zniszczonymi krawędziami i ubytkami w otoczeniu szczelin. Zdaniem autorów, takie nawierzchnie betonowe, w szczególności na głównych drogach, w większości należą już do przeszłości. Hałas toczenia pojazdów samochodowych na obecnie budowanych nowych nawierzchniach z betonu cementowego zależy głównie od sposobu teksturowania powierzchni. Do podstawowych technik teksturowania [20] zalicza się metody: przeciągania tkaniną jutową, przecierania świeżo ułożonej mieszanki betonowej stalowymi szczotkami, rowkowania poprzecznego widełkami metalowymi, odkrytego kruszywa (opóźnienie hydratacji cementu, a następnie usunięcie niezwiązanej zaprawy cementowej). Ogólne Specyfikacje Techniczne [15] zalecają stosowanie tekstury odkrytego kruszywa na drogach obciążonych ruchem kategorii KR5 - KR7 i ta metoda jest uważana za optymalną z punktu widzenia generowania dźwięku w otoczeniu płaszczyzny kontaktu opon samochodowych z nawierzchnią.

Badania hałaśliwości nawierzchni drogowych są prowadzone od wielu lat, a ich wyniki były i są prezentowane w publikacjach oraz w materiałach konferencyjnych. Jedną z najważniejszych prac w zakresie tego tematu jest monografia Sandberga i Ejsmonta [17]. Podstawową metodą badania poziomu hałasu opona/nawierzchnia jest metoda *CPX* (*Close Proximity method*) [10], nazywana niekiedy metodą przyczepową. Polega ona na pomiarze maksymalnego poziomu dźwięku w tzw. polu bliskim w otoczeniu płaszczyzny kontaktu opon testowych z nawierzchnią, a wynikiem pomiarów jest wskaźnik *CPXI*. Metodą stosowaną do oceny hałasu toczenia pojazdów samochodowych jest metoda *SPB* (*Statistical Pass-By method*) [9], zwana także metodą statystycznego przejazdu pojedynczego pojazdu. Wynikiem badania hałasu toczenia metodą *SPB* są zależności regresyjne ustalone dla 3 kategorii pojazdów w funkcji logarytmu ich prędkości, lub wskaźnik *SPBI*, opracowany z uwzględnieniem kategorii prędkości i struktury rodzajowej ruchu.

Szczegóły dotyczące zasad prowadzenia pomiarów, analizy porównawcze metod oraz wyniki uzyskane na różnych nawierzchniach były przedmiotem wielu publikacji krajowych i zagranicznych [2, 4, 5, 6, 12, 13, 14, 19].

W tabeli 1 podano średnie wartości wskaźnika $CPXI_{sr}$ ustalone metodą *CPX* przez zespół z Politechniki Gdańskiej dla przykładowych rodzajów nawierzchni na drogach w Polsce i w innych krajach Europy [13].

Podane wskaźniki $CPXI_{sr}$ wskazują na istotne zróżnicowanie nawierzchni drogowych w zakresie hałaśliwości. W odniesieniu do przedstawionych technologii budowy nawierzchni, badanych na polskich drogach, najbardziej „głośnymi” okazały się: beton asfaltowy (AC12) i mieszanka SMA11.

zakładowych, placach postojowych i w niewielkim stopniu na drogach lokalnych. W 1995 roku wybudowano 17 kilometrowy odcinek drogi A-18, a w 2003 roku na odcinku drogi krajowej nr 8 wykonano pierwszy odcinek w technologii *whitetopping* (na istniejącej nawierzchni asfaltowej ułożono nawierzchnię betonową) [11, 21]. Obecnie w Polsce nawierzchnie z betonu cementowego ma około 515 km autostrad i 174 km dróg ekspresowych. Przykładami są odcinki na autostradach A2 i A4, drodze ekspresowej S8, drogach krajowych DK18, DK50 i DK94.

Nawierzchnie z betonu cementowego nie mają jednak w naszym kraju ugruntowanej pozycji. Wymienia się krytyczne uwagi na ich temat, mówiące o trudnościach w prawidłowym wykonaniu, dłuższym okresie budowy, problemach z teksturowaniem powierzchni, wyższych kosztach budowy i utrzymania, nadmiernej hałaśliwości, mniejszym komforcie jazdy z uwagi na występujące połączenia płyt, częstych uszkodzeniach szczelin i większej sztywności oraz mniejszej odporności na działanie środków stosowanych w zimowym utrzymaniu.

Krytyczne opinie na temat ich nadmiernej hałaśliwości są między innymi wynikiem postrzegania nawierzchni betono-

Średnie wartości $CPXI_{sr}$, ustalone na nawierzchniach SMA8 są zbliżone do średniej wartości tego wskaźnika na nawierzchniach z betonu cementowego. Najkorzystniejszymi rozwiązaniami są nawierzchnie typu BBTM i nawierzchnie porowate. Podobne wnioski, na podstawie badań metodą SPB, sformułowano w pracy [3] w odniesieniu do nawierzchni porowatej PA8 i nawierzchni BBTM8 na drodze wojewódzkiej nr 780.

Tabela 1. Średnie wartości wskaźnika $CPXI_{sr}$ dla przykładowych rodzajów nawierzchni ($V=80$ km/h)

Nawierzchnia	Drogi w Polsce		Drogi w innych krajach w Europie	
	Liczba odcinków	$CPXI_{sr}$ (80 km/h)	Liczba odcinków	$CPXI_{sr}$ (80 km/h)
AC12/AC11	21	99,3	24	99,1
SMA11	9	98,7	23	99,4
SMA8	10	97,7	12	97,8
PA8	5	93,9	14	97,7
BBTM8	23	96,3	6	98,3
CC	10	97,9	21	99,6
PC	–	–	3	94,8
DPAC 8+16	–	–	3	95,1

AC12/AC11 – beton asfaltowy o maksymalnym uziarnieniu kruszywa 12 mm (dotyczy nawierzchni w Polsce)/ 11 mm – dotyczy innych krajów Europy, PA – asfalt porowaty, BBTM – beton asfaltowy do bardzo cienkich warstw, CC – beton cementowy, PC – porowaty beton cementowy, DPAC8+16 – podwójny asfalt porowaty o maksymalnym uziarnieniu kruszywa w warstwie górnej 8 mm i w warstwie dolnej – 16 mm

Podane wyniki w odniesieniu do dróg w innych krajach pokazują, że najbardziej „głośnymi” są nawierzchnie z betonu cementowego i nawierzchnie z betonu asfaltowego (AC11) i z mieszanki SMA11, a do zdecydowanie „najcichszych” zaliczają się nawierzchnie z porowatego betonu cementowego i z podwójnego asfaltu porowatego. W zestawieniu pominięto testowane nawierzchnie poroelastyczne typu PERS [18], które wydają się być przyszłościowym rozwiązaniem w walce z nadmiernym poziomem hałasu od ruchu drogowego.

Z punktu widzenia otoczenia drogi większe znaczenie mają wartości poziomu emitowanego dźwięku od ruchu samochodowego u odbiorcy. Tak ustalone wartości mogą być bezpośrednio porównywane z dopuszczalnym równoważnym poziomem dźwięku (L_{eq}) w zależności od charakterystyki zagospodarowania terenów przyległych do drogi. W pracach [4, 6] są prezentowane wyniki badań hałasu toczenia pojazdów samochodowych określone metodą SPB, zrealizowane przez zespół z Politechniki Białostockiej. W otoczeniu polskich dróg o nawierzchni betonowej takie badania były dotychczas prowadzone bardzo sporadycznie. W związku z powyższym, w artykule zaprezentowano wyniki pomiarów maksymalnego poziomu dźwięku (L_{max}) metodą SPB w przykładowych przekrojach o nawierzchni betonowej (wykonanej w ostatnich latach) i porównano z hałaśliwością przykładowych nawierzchni asfaltowych. Przedstawiono także ustalone wartości równoważnego poziomu dźwięku (L_{eq}) w otoczeniu wybranych odcinków dróg o nawierzchni z betonu cementowego i nawierzchni asfaltowej.

Program i zakres badań

W czerwcu i lipcu 2014 roku przeprowadzono pomiary maksymalnego poziomu dźwięku od przejeżdżających pojazdów (L_{max}) metodą SPB w 8 przekrojach badawczych (5 – o nawierzchni betonowej, 3 – o nawierzchni asfaltowej). Wybór przekrojów badawczych został dokonany przez autorów artykułu i należy podkreślić, że jest to bardzo złożony problem, uwzględniając stosunkowo trudny dostęp do szczegółowej charakterystyki nawierzchni na poszczególnych drogach oraz biorąc pod uwagę założenia metody SPB i warunki bezpiecznego prowadzenia pomiarów. Szczególne podziękowania za pomoc w poszukiwaniach takich przekrojów chcemy skierować do Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych Oddział w Łodzi i Oddział w Białymstoku.

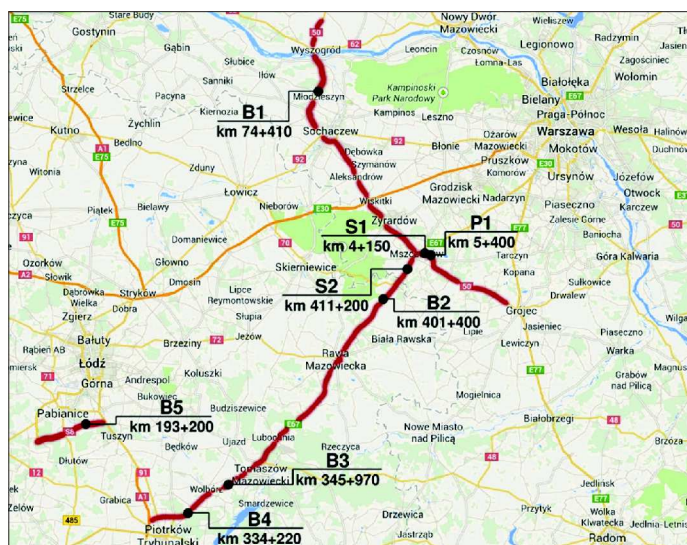
W ramach badań wykonano także pomiary równoważnego poziomu dźwięku (L_{eq}) w 4 przekrojach badawczych w otoczeniu drogi ekspresowej S8 (3 przekroje – o nawierzchni betonowej, 1 przekrój – o nawierzchni asfaltowej), przy zbliżonych obciążeniach ruchem i zbliżonych prędkościach pojazdów. Pomiary L_{eq} wykonano w trzech przekrojach, tych samych, w których prowadzono pomiary metodą SPB oraz w przekroju w km 411+200 o nawierzchni asfaltowej SMA11. Położenie mikrofonu w pomiarach L_{max} i L_{eq} było takie same, tzn. 7,50 m od osi bliższego zewnętrznego pasa ruchu i na wysokości 1,20 m w stosunku do poziomu nawierzchni. Na fotografii 1 pokazano stanowisko do pomiaru maksymalnego poziomu dźwięku od pojedynczo przejeżdżających pojazdów i do pomiaru równoważnego poziomu dźwięku.



Fot. 1. Widok stanowiska do pomiaru maksymalnego poziomu dźwięku od pojedynczych pojazdów i do pomiaru równoważnego poziomu dźwięku (droga S8 – km 401+400)

Pomiary L_{max} wykonano zgodnie z [9], ustalając maksymalne poziomy dźwięku od pojedynczo przejeżdżających pojazdów kategorii 1 (samochody osobowe) i kategorii 2B (wielozłozonowe pojazdy ciężarowe). W pomiarach nie uwzględniano innych kategorii pojazdów z uwagi na niewielki ich udział w potokach ruchu (autobusy, motocykle) oraz bardzo zróżnicowany stan techniczny (lekkie pojazdy ciężarowe w ramach przejazdów lokalnych). Na rysunku 1 pokazano lokalizację przekrojów badawczych na drodze krajowej DK50 i na drodze ekspresowej S8. W analizie dodatkowo uwzględniono wyniki pomiarów maksymalnego poziomu dźwięku od prze-

jeżdżących pojazdów na drodze S8 w km 618+800 w województwie podlaskim (odcinek Jeżewo – Białystok), wykonane w czerwcu 2014 roku.



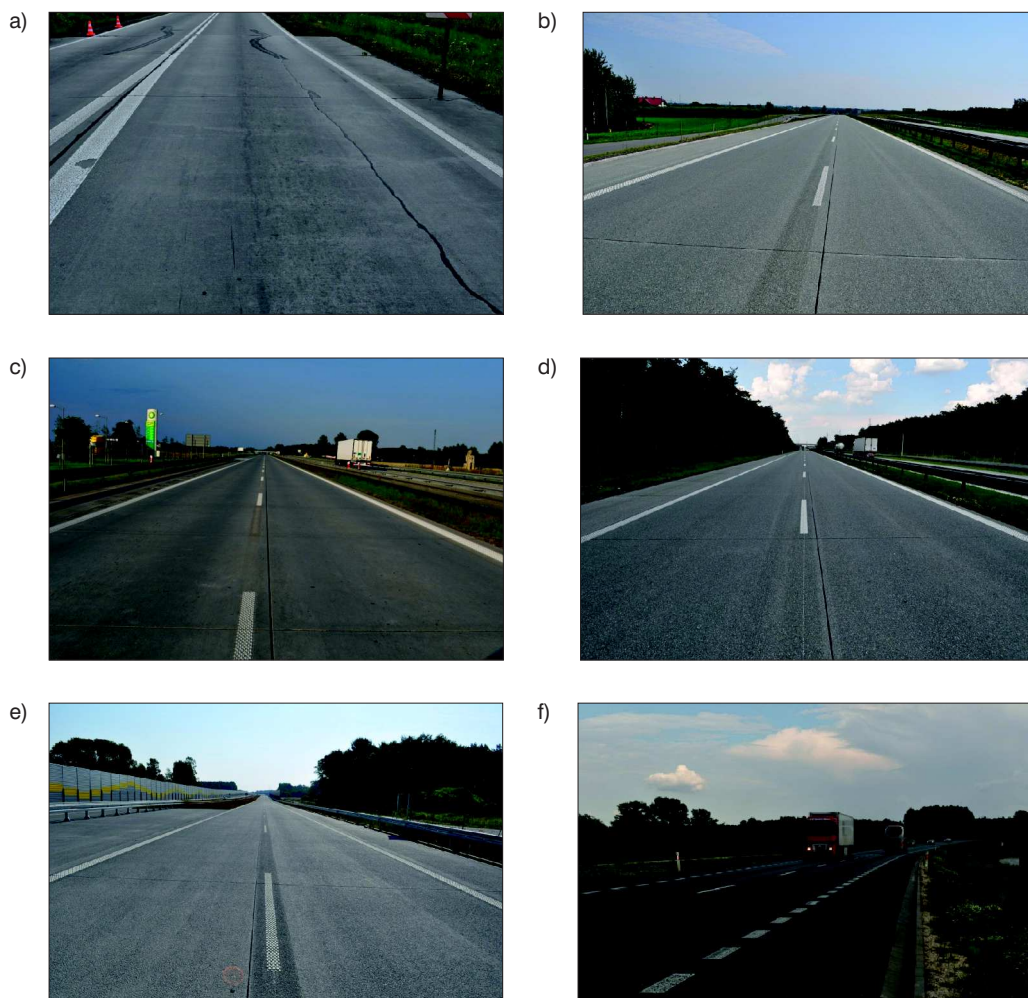
Rys. 1. Lokalizacja przekrojów badawczych (B1 ÷ B5 – odcinki o nawierzchni z betonu cementowego; S1 i S2 – odcinki o nawierzchni z SMA11; P1 – odcinek o nawierzchni z asfaltu porowatego PA11) (na rysunku nie pokazano lokalizacji przekroju JB z uwagi na położenie w dużej odległości od pozostałych przekrojów)

Na fotografii 2 pokazano widok 6 odcinków badawczych w otoczeniu przekrojów, w których prowadzono pomiary maksymalnego poziomu dźwięku metodą SPB.

Na badanych nawierzchniach, oprócz wizualnej oceny stanu technicznego, dokonano oceny tekstury metodą objętościową (kulek szklanych) i/lub przy wykorzystaniu urządzenia *Circular Test Meter (CTM)*. Metodą objętościową ustalono wartości średniej głębokości tekstury *MTD (Mean Texture Depth)* na nawierzchniach z mastyksu grysowego i na nawierzchniach betonowych z odkrytym kruszywem. Przy pomocy urządzenia *CTM* określono wartości średniej głębokości profilu nierówności *MPD (Mean Profile Depth)* na nawierzchniach z mieszanki typu SMA, na nawierzchniach betonowych z odkrytym kruszywem i na nawierzchniach betonowych teksturowanych tkaniną jutową. Do oceny tekstury przyjęto następującą klasyfikację: tekstura bardzo drobna ($MTD \leq 0,2$ mm), drobna ($0,2 < MTD \leq 0,4$ mm), średnia ($0,4 < MTD \leq 0,8$ mm), gruba ($0,8 < MTD \leq 1,2$ mm) i bardzo gruba ($MTD > 1,2$ mm) [16]. W przekrojach B3 i P1 nie wykonano pomiarów tekstury z uwagi na duże natężenie ruchu i trudności w bezpiecznym ich przeprowadzeniu. Teksturę w tych przekrojach oceniono w sposób wizualny.

Poniżej podano ogólną charakterystykę nawierzchni w poszczególnych przekrojach, a w tabeli 2 przedstawiono powierzchnie badanych nawierzchni (poza przekrojem JB):

- przekrój B1 – nawierzchnia betonowa dyblowana w stanie zadawalającym (spękania i zniszczenia przy szczelinach),



Fot. 2. Widok odcinków w otoczeniu przekrojów badawczych: a) B1, b) B2, c) B3, d) B4, e) B5, f) P1

- teksurowana tkaniną jutową; bardzo drobna tekstura ($MPD = 0,17$ mm),
- przekrój B2 – nawierzchnia betonowa dyblowana, teksurowana metodą odkrytego kruszywa, gruba tekstura ($MTD = 0,92$ mm, $MPD = 1,16$ mm), stan dobry, maksymalne uziarnienie kruszywa w górnej warstwie 8 mm,
 - przekrój B3 – nawierzchnia betonowa dyblowana w technologii *whitetopping*, teksurowana tkaniną jutową, bardzo drobna tekstura, stan zadawalający (ubytki na powierzchni, uszkodzenia przy szczelinach),
 - przekrój B4 – nawierzchnia betonowa dyblowana, teksurowana metodą odkrytego kruszywa, bardzo gruba tekstura ($MTD = 1,51$ mm, $MPD = 1,90$ mm), stan dobry, maksymalne uziarnienie kruszywa w górnej warstwie > 8 mm (w opisie nawierzchni przyjęto jako 11 mm),
 - przekrój B5 – nawierzchnia betonowa dyblowana, teksurowana metodą odkrytego kruszywa, gruba tekstura ($MTD = 1,10$ mm, $MPD = 1,19$ mm), maksymalne uziarnienie kruszywa w górnej warstwie 8 mm,
 - przekrój P1 – nawierzchnia z asfaltu porowatego PA11, stan dobry, lecz właściwości akustyczne warstwy ścieralnej uległy istotnemu pogorszeniu, prawdopodobnie w wyniku błędów popełnionych w ramach zimowego utrzymania (zastosowanie piasku z solą zamiast solanki w pierwszym roku eksploatacji),
 - przekrój S1 – nawierzchnia z mieszanki SMA11, stan dobry, gruba tekstura ($MTD = 1,07$ mm),
 - przekrój S2 – nawierzchnia z mieszanki SMA11, stan zadawalający, średnia tekstura ($MTD = 0,51$ mm),
 - przekrój JB (S8 – odcinek Jeżewo – Białystok) – nawierzchnia z mieszanki SMA11, stan dobry, gruba tekstura ($MTD =$

1,00 mm) (oznaczenie nawierzchni w przekroju JB: JB-SMA11-S8 – nawierzchnia z mieszanki SMA11 na drodze S8 na odcinku Jeżewo – Białystok).


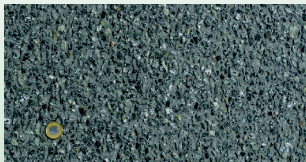




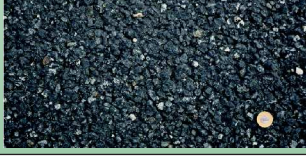

Wyniki badań i ich analiza

Maksymalny poziom dźwięku według metody statystycznego przejazdu

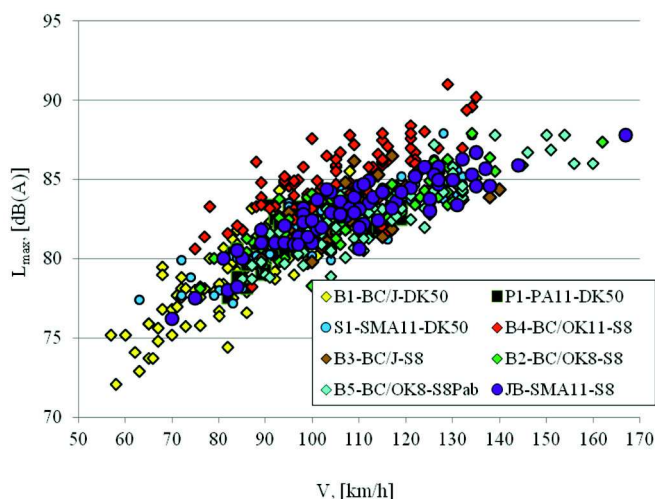
W wytypowanych przekrojach badawczych dokonano pomiarów wartości maksymalnego poziomu dźwięku (L_{max}) od pojedynczo przejeżdżających pojazdów osobowych (rys. 2) i wieloosobowych pojazdów ciężarowych (rys. 3). Równolegle prowadzono pomiary prędkości chwilowej badanych pojazdów. W szczegółowej analizie uwzględniono jedynie pojazdy samochodowe zakwalifikowane jako pojazdy w dobrym stanie technicznym, poruszające się z jednakową prędkością w otoczeniu przekroju badawczego. Z uwagi na zmiany warunków pogodowych w dniach pomiarów oraz pewne utrudnienia na drogach (naprawy bieżące) i zmiany tła akustycznego (prace polowe) nie uzyskano we wszystkich przekrojach wyników dla wymaganej liczby pojazdów. Dotyczy to głównie wieloosobowych pojazdów ciężarowych w przekrojach B1 i B5. Przyjęto, że ustalone wartości w sposób dostateczny reprezentują kategorię pojazdów 2B na tych nawierzchniach.

Zgodnie z założeniami metody SPB dla każdej nawierzchni ustalono zależności regresyjne pomiędzy maksymalnym poziomem dźwięku i logarytmem prędkości (V) badanego pojazdu ($L_{max}(V) = A + B \cdot \log V$).

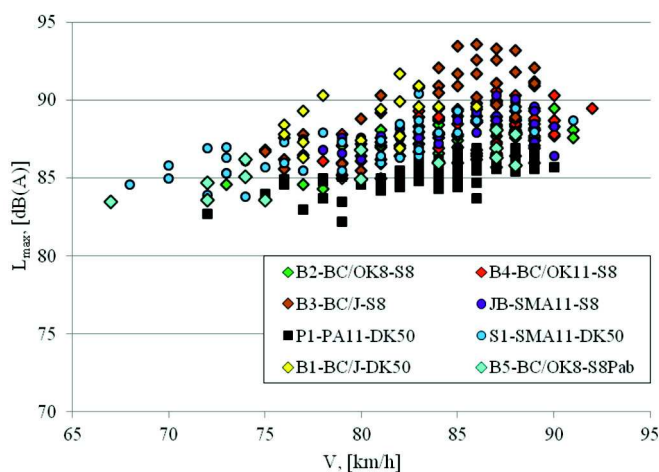
Tabela 2. Widok nawierzchni w przekrojach badawczych

Przekrój/Nawierzchnia	Widok nawierzchni	Przekrój/Nawierzchnia	Widok nawierzchni
B1-BC/J-DK50 km 74+410 (w pobliżu m. Młodzieszyn)		B2-BC/OK8-S8 km 401+400	
B3-BC/J-S8 km 345+970		B4-BC/OK11-S8 km 334+220	
B5-BC/OK8-S8Pab, km 193+200 (odc. Pabianice-Sieradz)		P1-PA11-DK50 – km 5+400 (obwodnica Mszczonowa)	
S1-SMA11-DK50 km 4+150 (obwodnica Mszczonowa)		S2-SMA11-S8 km 411+200	

Wyjaśnienie oznaczeń: B1-B5, P1, S1 i S2 – oznaczenia przekrojów; BC/J – beton cementowy przecierany tkaniną jutową; BC/OK – beton cementowy z odkrytym kruszywem; PA – asfalt porowaty; SMA – mastyks grysowy; 8 (11) – maksymalne uziarnienie kruszywa; S8 (S8Pab, DK50) – oznaczenia dróg



Rys. 2. Wyniki pomiarów maksymalnego poziomu dźwięku od pojedynczo przejeżdżających pojazdów osobowych (wg metody SPB)



Rys. 3. Wyniki pomiarów maksymalnego poziomu dźwięku od pojedynczo przejeżdżających wielozonowych pojazdów ciężarowych (wg metody SPB)

W tabeli 3 przedstawiono zależności regresyjne, współczynniki korelacji (R), średnie prędkości pojazdów (V_{sr}) i odchylenia standardowe prędkości chwilowych (s) ustalone w przekrojach badawczych w odniesieniu do dwóch katego-

Tabela 3. Zestawienie zależności regresyjnych i charakterystyk statystycznych wyników badań poziomu hałasu toczenia pojazdów

Przekrój	Pojazdy kategorii 1				Pojazdy kategorii 2B			
	Zależność	R	V_{sr}	s	Zależność	R	V_{sr}	s
B1	$L_{max}=10,63+35,72\log V$	0,86	84,6	14,1	$L_{max}=12,77+39,96\log V$	0,44	80,4	3,1
B2	$L_{max}=31,14+25,45\log V$	0,83	111,7	15,8	$L_{max}=28,09+30,68\log V$	0,54	84,3	4,3
B3	$L_{max}=34,97+23,45\log V$	0,68	109,0	12,7	$L_{max}=-55,31+75,48\log V$	0,72	84,2	4,1
B4	$L_{max}=26,78+28,69\log V$	0,68	105,3	13,5	$L_{max}=22,52+34,00\log V$	0,47	86,2	3,2
B5	$L_{max}=21,41+29,87\log V$	0,88	112,6	17,8	$L_{max}=25,96+31,46\log V$	0,82	80,2	7,3
P1	$L_{max}=28,04+27,02\log V$	0,78	101,2	11,6	$L_{max}=17,89+35,10\log V$	0,69	83,8	3,9
S1	$L_{max}=26,89+27,51\log V$	0,85	103,5	15,3	$L_{max}=22,58+33,87\log V$	0,73	79,6	5,5
JB	$L_{max}=25,29+28,36\log V$	0,90	110,1	17,8	$L_{max}=27,69+31,28\log V$	0,52	84,8	3,5

rii pojazdów: kategorii 1 (samochody osobowe) i kategorii 2B (wielozonowe pojazdy ciężarowe).

Przedstawione wyniki wskazują, że w przypadku pojazdów osobowych zdecydowanie wyróżnia się przekrój B1. Wyższa wartość współczynnika regresji B w tym przekroju oznacza bardziej zdecydowany wzrost poziomu hałasu toczenia pojazdów wraz ze wzrostem ich prędkości. Z pewnością ma na to wpływ dłuższy okres użytkowania i nieco gorszy stan powierzchni nawierzchni teksturowanej jutą (oceniony jako zadawalający).

W odniesieniu do pojazdów kategorii 2B stwierdzono zdecydowanie różniący się (praktycznie niespotykany na nawierzchniach asfaltowych) charakter zależności regresyjnej w przypadku przekroju badawczego B3 (nawierzchnia betonowa teksturowana jutą w stanie zadawalającym). W trakcie prowadzenia pomiarów były wyraźnie słyszalne charakterystyczne dźwięki, w zakresie wyższych częstotliwości, pochodzące z otoczenia płaszczyzny kontaktu opon z nawierzchnią. Prawdopodobną przyczyną takiego stanu był sposób teksturowania powierzchni i bardzo drobna tekstura.

W pozostałych przekrojach nie stwierdzono istotnych różnic w porównaniu z zależnościami ustalonymi w ramach badań własnych prowadzonych w poprzednich latach metodą SPB i prezentowanych w literaturze [1, 6]. Potwierdzeniem tego są także ustalone współczynniki korelacji R i wartości współczynników regresji A i B .

Na podstawie zależności regresyjnych podanych w tabeli 3 obliczono wartości maksymalnego poziomu dźwięku L_{max} od statystycznego pojazdu osobowego jadącego z prędkością 80, 100 i 110 km/h, których porównanie pokazano na rysunku 4. Przy prędkości 80 km/h „najcichszymi” nawierzchniami okazały się: nawierzchnia betonowa z odkrytym kruszywem (przekrój B5) i nawierzchnia betonowana teksturowana tkaniną jutową (przekrój B1). Nieznacznie „głośniejszymi” (o około 1 dB(A)) są pozostałe nawierzchnie, poza nawierzchnią betonową z odkrytym kruszywem (przekrój B4), w przypadku której, wartość L_{max} jest większa odpowiednio o 3,1 dB(A) i o 2,8 dB(A) w porównaniu z nawierzchniami w przekrojach B5 i B3 oraz większa o około 2,0 dB(A) niż na nawierzchni z SMA11 (przekroje S1 i JB) i na nawierzchni porowatej PA11 (przekrój P1). Przy prędkościach 100 i 110 km/h wartości różnic pomiędzy hałaśliwością nawierzchni są zbliżone, lecz różnice poza nawierzchnią w przekroju B4, są mniejsze od 1 dB(A). Tak więc, w przypadku pojazdu osobowego, na-

wierzchnia betonowa z odkrytym kruszywem o bardzo grubej teksturze (przekrój B4) charakteryzuje się zdecydowanie wyższą hałaśliwością niż pozostałe badane nawierzchnie.

Powyższe wartości potwierdzają, że badane nawierzchnie na drodze ekspresowej S8 i DK50 są stosunkowo „głośne”. Chociaż zgodnie

z [1] nawierzchnie w przekrojach B5 i B1 należy zaliczyć do nawierzchni o normalnej hałaśliwości, to w pozostałych przekrojach – są to rozwiązania o podwyższonej hałaśliwości. Wprawdzie poziomy dźwięku na badanych nawierzchniach w przekrojach B2, B3, JB, S1 i P1 są bardzo zbliżone do dolnej granicy przedziału określającego nawierzchnie o podwyższonej hałaśliwości, a w przekroju B4 – do górnej granicy tego przedziału, to jednak są to niekorzystne rozwiązania z akustycznego punktu widzenia.

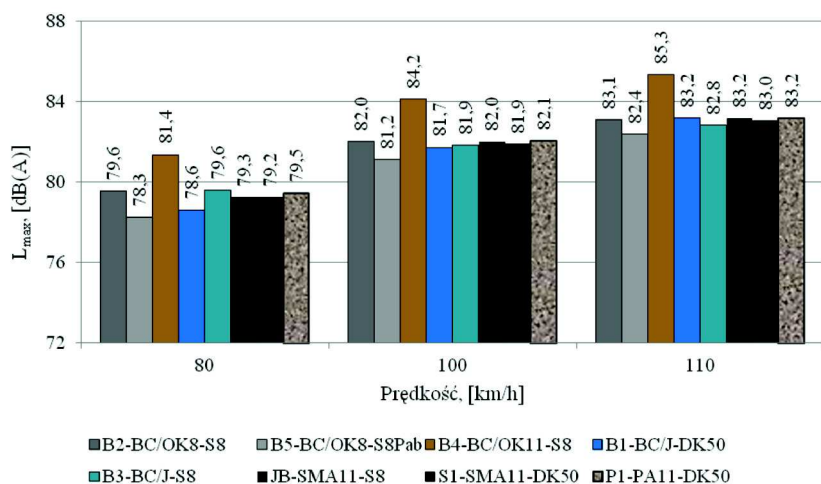
Zdecydowanie większe różnice pomiędzy maksymalnymi poziomami dźwięku stwierdzono w odniesieniu do statystycznego wieloczołowego pojazdu ciężarowego (rys. 5). Najbardziej korzystnym rozwiązaniem pod względem hałaśliwości okazała się nawierzchnia z asfaltu porowatego (przekrój P1). Nawierzchnia betonowa z odkrytym kruszywem o bardzo grubej teksturze (przekrój B4) jest „głośniejsza” średnio o 1,1 dB(A) od nawierzchni betonowej z odkrytym kruszywem o grubej teksturze (przekroje B2 i B5) w zakresie prędkości 70–90 km/h i jest zbliżona pod względem hałaśliwości do nawierzchni z SMA11 (przekroje JB i S1). Należy zwrócić uwagę na bardzo niekorzystny wpływ prędkości

kości na poziom emitowanych dźwięków od pojazdu ciężarowego na nawierzchniach betonowych teksturowanych tkaniną jutową. Stwierdzono to w szczególności w przekroju B3, w którym przy prędkości 70 km/h maksymalny poziom dźwięku od przejazdu statystycznego wieloczołowego pojazdu ciężarowego był taki sam jak na nawierzchni w przekroju B5, a przy prędkości 90 km/h różnica poziomami na tych nawierzchniach osiągnęła wartość aż 4,8 dB(A). Przyczyną takiego stanu jest wpływ, przy wyższych prędkościach, bardzo drobnej tekstury powierzchni, decydującej o generowaniu dźwięków na styku opon z nawierzchnią w zakresie wyższych częstotliwości. Potwierdzają to wyniki badań metodą CPX dla opony o blokowym układzie bieżnika na gładkich nawierzchniach [6, 17].

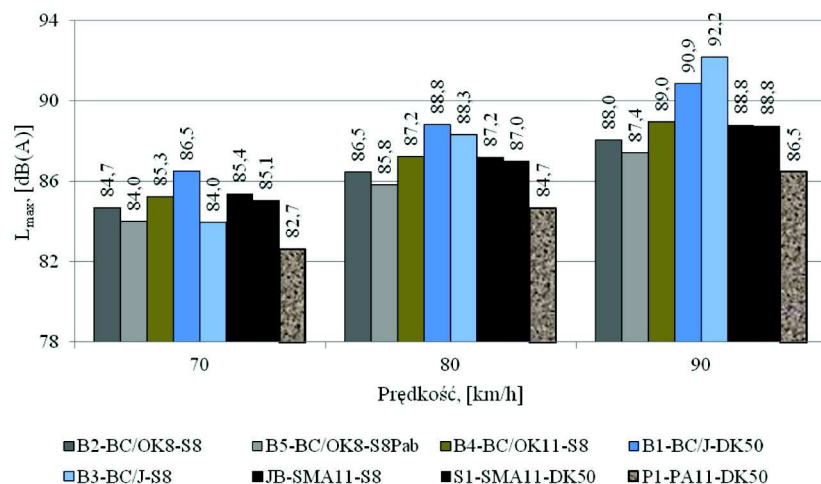
Na rys. 6 przedstawiono ranking nawierzchni pod względem hałaśliwości w odniesieniu do tzw. wysokiej kategorii prędkości (pojazdy osobowe – prędkość 110 km/h; wieloczołowe pojazdy ciężarowe – prędkość 85 km/h), zgodnie z założeniami metody SPB [9]. W przypadku pojazdu osobowego praktycznie wszystkie badane nawierzchnie, poza nawierzchnią betonową o bardzo grubej teksturze (przekrój B4), charakteryzują się zbliżoną hałaśliwością (różnice do 1,1 dB(A)). Zdecydowanie większe różnice stwierdzono w odniesieniu do wieloczołowego pojazdu ciężarowego, a najbardziej niekorzystnym rozwiązaniem są nawierzchnie betonowe teksturowane tkaniną jutową. Nawierzchnia betonowa z odkrytym kruszywem o bardzo grubej teksturze (przekrój B4) okazała się porównywalna pod względem hałaśliwości z nawierzchnią typu SMA11 (przekroje JB i S1). Na tle innych technologii korzystnie prezentuje się nawierzchnia z asfaltu porowatego PA11 oraz nawierzchnie betonowe z odkrytym kruszywem, przy maksymalnym jego uziarnieniu 8 mm (w górnej warstwie). Wyjaśnienia takich wyników należy poszukiwać w mechanizmach generowania dźwięku w otoczeniu opon samochodowych. W przypadku pojazdu ciężarowego korzystnie wpływa gruba tekstura nawierzchni i obniżenie poziomu dźwięku w zakresie wyższych częstotliwości, co nie występuje w sytuacji nawierzchni teksturowanych jutą o bardzo drobnej teksturze.

Równoważny poziom dźwięku w otoczeniu drogi S8

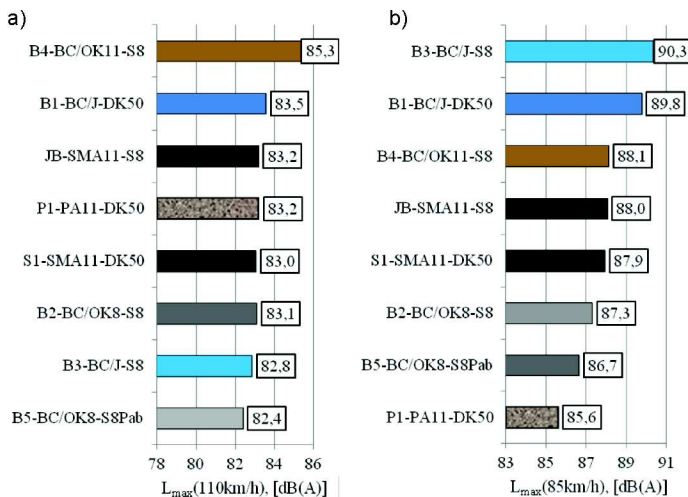
Przeprowadzone powyżej analizy potwierdzają wpływ rodzaju nawierzchni, rodzaju pojazdu i jego prędkości na maksymalny poziom dźwięku ustalony w odległości 7,5 m od przejeżdżającego pojazdu. Z punktu widzenia odbiorcy bardziej istotna jest jednak wartość równoważnego poziomu dźwięku od pojazdów uczestniczących w ruchu samochodowym. W związku z tym w otoczeniu 4 przekrojów badawczych przeprowadzono pomiary równoważnego poziomu dźwięku w odległości 7,5 m od osi zewnętrznego pasa ruchu (w takiej odległości prowadzono



Rys. 4. Porównanie maksymalnych poziomów dźwięku od statystycznego pojedynczo przejeżdżającego pojazdu osobowego w zależności od rodzaju nawierzchni i prędkości



Rys. 5. Porównanie maksymalnych poziomów dźwięku od statystycznego pojedynczo przejeżdżającego wieloczołowego pojazdu ciężarowego w zależności od rodzaju nawierzchni i prędkości



Rys. 6. Ranking nawierzchni pod względem hałaśliwości: a) statystyczny pojazd osobowy, $V = 110$ km/h; b) statystyczny wielocznony pojazd ciężarowy, $V = 85$ km/h

pomiary L_{max} według metody SPB). Wyniki badań zestawiono w tabeli 4.

Uwzględniając porównywalną ogólną charakterystykę warunków ruchu w badanych przekrojach stwierdzono różnice w wartościach równoważnego poziomu dźwięku L_{eq} . Zdecydowanie wyższy poziom L_{eq} uzyskano na nawierzchni betonowej z odkrytym kruszywem o bardzo grubej teksturze w stosunku do nawierzchni SMA11 (o 2,8 dB(A)) i w stosunku do nawierzchni betonowej z odkrytym kruszywem o grubej teksturze (o 2,1 dB(A)). Należy jednak zauważyć, że w porównaniu do przekroju badawczego B4, w przekrojach B2 i S2, zanotowano mniejsze o 8% natężenie ruchu w całym przekroju poprzecznym drogi i mniejsze o 12% w przekroju badawczym B3. Również obciążenie jezdni położonej bliżej mikrofonu w przekroju B2 było mniejsze o 16% niż w przekroju B4 i odpowiednio mniejsze w przekroju B3 o 19%, a w przekroju S3 o 24%.

W otoczeniu odcinka drogi o nawierzchni betonowej teksturowanej tkaniną jutową zanotowano wyższy poziom L_{eq} niż w przekrojach B2 i S2 (odpowiednio o 1,5 i 2,2 dB(A)). Równoważne poziomy dźwięku ustalone w przekrojach o nawierzchni SMA11 (przechrój S2) i o nawierzchni betonowej z odkrytym kruszywem o grubej teksturze (przechrój B2) są zbliżone do siebie. W przekroju S2 zanotowano wprawdzie większy udział pojazdów ciężarowych, ale zaobserwowano nieco niższą prędkość pojazdów z uwagi na zlokalizowaną w pobliżu stację paliw.

W ramach pomiarów równoważnego poziomu dźwięku określono widma dźwięku od ruchu samochodowego w pasmach 1/3 oktaowych (rys. 9). Z pokazanych wartości wynika, że w zakresie częstotliwości 160 Hz – 1600 Hz istotny wpływ na poziom dźwięku ma tekstura nawierzchni (przechrój B4 – bardzo gruba tekstura) oraz uszkodzenia na jej powierzchni (przechrój B3). Poziomy dźwięku ustalony na nawierzchni

Tabela 4. Wyniki pomiarów równoważnego poziomu dźwięku w przekrojach badawczych

Przechrój badawczy	Obciążenie ruchem samochodowym				L_{eq} [dB(A)]
	ΣN , [P/h]	% N_h	ΣN_b , [P/h]	% N_{bh}	
B2-BC/OK8-S8-km401+400	1502	23,8	738	26,0	78,3
B3-BC/J-S8-km345+970	1440	31,4	716	31,6	79,8
B4-BC/OK11-S8-km334+220	1638	28,3	882	29,9	80,4
S2-SMA11-S8-km411+200	1508	31,3	668	32,3	77,6

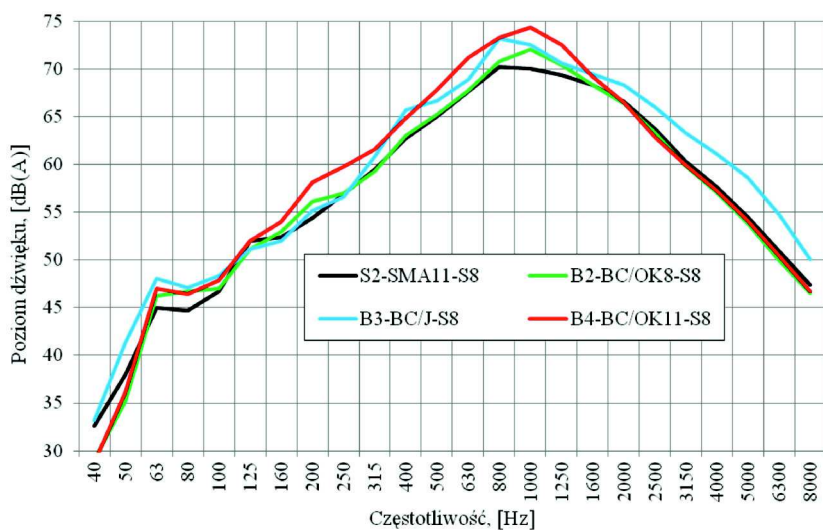
ΣN – liczba pojazdów rzeczywistych w przekroju drogi, % N_h – procentowy udział tzw. pojazdów hałaśliwych (samochody ciężarowe, autobusy, motocykle) w przekroju drogi,

ΣN_b – liczba pojazdów rzeczywistych na jezdni bliższej od punktu pomiaru hałasu, % N_{bh} – procentowy udział tzw. pojazdów hałaśliwych na jezdni bliższej od punktu pomiaru hałasu

SMA11 (przechrój S2) i na nawierzchni betonowej z odkrytym kruszywem o grubej teksturze (przechrój B2) różnią się w dwóch zakresach częstotliwości: 63 Hz – 100 Hz (prawdopodobny wpływ szczelin poprzecznych) i 800 Hz – 1600 Hz. Powyżej częstotliwości 1250 Hz zanotowano zdecydowanie wyższy poziom dźwięku na nawierzchni betonowej teksturowanej tkaniną jutową (przechrój B3). Przyczyną tego jest bardzo drobna tekstura powierzchni i jej wpływ na wzrost poziomu hałasu od przejeżdżających wielocznonych pojazdów ciężarowych.

Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych badań i analiz wykazały, że prawidłowo wykonane nawierzchnie z betonu cementowego, z odpowiednim teksturowaniem ich powierzchni, charakteryzują się maksymalnym poziomem emitowanych dźwięków od przejeżdżających pojazdów zbliżonym do wartości ustalonych na nawierzchni SMA11. Na tle innych rozwiązań korzystnym rozwiązaniem z akustycznego punktu widzenia są nawierzchnie z betonu cementowego z odsłoniętym kruszy-



Rys. 7. Widma dźwięku od przejeżdżających pojazdów w zależności od rodzaju nawierzchni

wem, przy maksymalnym jego uziarnieniu 8 mm w warstwie górnej.

Przyczyną nadmiernej hałaśliwości nawierzchni z betonu cementowego najczęściej są błędy wykonawstwa, a w szczególności zastosowanie nieodpowiedniej techniki lub złego teksturowania. Przy niższych prędkościach maksymalny poziom dźwięku na nawierzchniach betonowych teksturowanych tkaniną jutową jest porównywalny z wartościami na innych nawierzchniach. Przy prędkościach większych od 80 km/h, w przypadku wielocłonowych pojazdów ciężarowych, teksturowanie tkaniną jutową okazało się zdecydowanie najgorszym rozwiązaniem z punktu widzenia poziomu emitowanych dźwięków i przyczyniło się do wzrostu jego maksymalnego poziomu aż o 5 dB(A) przy prędkości 85 km/h w porównaniu z nawierzchnią betonową z odkrytym kruszywem o maksymalnym uziarnieniu 8 mm.

Tworzenie bardzo grubej tekstury na powierzchni nawierzchni betonowych z odkrytym kruszywem jest również błędnym rozwiązaniem z akustycznego punktu widzenia, gdyż powoduje ona zwiększenie poziomu dźwięku emitowanego przez pojazd osobowy od 2 do 3 dB(A) (w zależności od prędkości pojazdów) w porównaniu z nawierzchnią o grubej teksturze.

Wszelkiego rodzaju uszkodzenia nawierzchni betonowych mogą być przyczyną dodatkowych nadmiernych dźwięków, w szczególności przy wyższych prędkościach pojazdów samochodowych.

W ramach badań równoważnego poziomu dźwięku, przeprowadzonych przy zbliżonych warunkach ruchu, w otoczeniu analizowanych przekrojów badawczych, najwyższą wartość L_{eq} uzyskano w przekroju o nawierzchni betonowej z odkrytym kruszywem o bardzo grubej teksturze (80,4 dB(A)) a najniższą – w przekroju o nawierzchni z SMA11 (77,6 dB(A)). Równoważny poziom dźwięku w otoczeniu odcinka o nawierzchni z betonu cementowego z odkrytym kruszywem i bardzo grubej teksturze był także wyższy o 2,1 dB(A) w porównaniu z przekrojem o nawierzchni betonowej z odkrytym kruszywem, lecz o grubej teksturze (maksymalne uziarnienie kruszywa w górnej warstwie 8 mm). Wartości L_{eq} w otoczeniu odcinka o nawierzchni asfaltowej SMA11 i odcinka o nawierzchni betonowej z odkrytym kruszywem o maksymalnym uziarnieniu 8 mm różniły się od siebie o 0,7 dB(A). Zdaniem autorów na wartość powyższych różnic, oprócz charakterystyki nawierzchni, wpływ mógł mieć także fakt, że w porównaniu do przekroju badawczego B4, w innych przekrojach, zanotowano mniejsze o 8 do 12% natężenie ruchu w całym przekroju poprzecznym drogi i mniejsze o 19 do 24% natężenie ruchu na jezdni położonej bliżej mikrofonu.

Wyniki badań i analiz maksymalnego poziomu dźwięku od przejeżdżających pojazdów pozwalają stwierdzić, że wiele budowanych w naszym kraju dróg charakteryzuje się nadal nawierzchniami o zbyt dużej hałaśliwości. Stosunkowo „głośnymi” okazały się m.in. nawierzchnia betonowa z odstąpionym kruszywem o bardzo grubej teksturze, nawierzchnie betonowe teksturowane jutą, a także badane nawierzchnie asfaltowe z SMA11 i nawierzchnia porowata na obwodnicy Mszczonowa. Testowane są wprawdzie na polskich drogach nawierzchnie o obniżonej hałaśliwości i nawierzchnie ciche, lecz dotyczy to głównie dróg o mniejszym znaczeniu. Potrzebna jest więc zmiana podejścia do tego problemu, gdyż

prawidłowo zaprojektowane górne warstwy nawierzchni drogowych, zarówno betonowych, jak i asfaltowych, pozwolą uniknąć lub ograniczyć stosowanie innych przeciwhałasowych zabezpieczeń.

Bibliografia

- [1] W. Gardziejczyk, *Generowanie hałasu przez samochody osobowe i ciężarowe. Osłony przeciwhałasowe w ruchu drogowym. Studia i materiały – Zeszyt 64*, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa 2011
- [2] W. Gardziejczyk, *Nawierzchnie z betonu cementowego - czy muszą być nawierzchniami „głośnymi”*. Drogownictwo Nr 5/2000
- [3] W. Gardziejczyk, P. Gierasimiuk, M. Motylewicz, *Nawierzchnie o obniżonej hałaśliwości na polskich drogach - wyniki badań hałasu toczenia pojazdów samochodowych*. Drogownictwo Nr 12/2012
- [4] W. Gardziejczyk, *Przegląd i analiza porównawcza metod badania hałaśliwości nawierzchni drogowych*. Magazyn Autostrady Nr 1/2, 2011
- [5] W. Gardziejczyk, *Hałaśliwość nawierzchni drogowych - propozycja klasyfikacji*, Drogownictwo Nr 12/2008
- [6] W. Gardziejczyk, *Wpływ technologii wykonania i tekstury nawierzchni drogowych na hałas pojazdów samochodowych*. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Rozprawy Naukowe Nr 121, 2005
- [7] K. Hall, *Long-Life Concrete Pavements in Europe and Canada*. Publication FHWA-PL-07-027. FHWA, U.S. Department of Transportation, 2007
- [8] S. Höller, *Concrete Pavement Design and Construction in Germany – State of the Art*, XVI Congreso Argentino De Vialidad y Tránsito, 7^{ma} Expovial Argentina 2012
- [9] *ISO 11819-1: Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1: Statistical Pass-By method*, 1997
- [10] *ISO/CD 11819-2: Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: The close-proximity method (CPX)*, 2012
- [11] I. Mikulicki, *Drogi ekspresowe i autostrady - doświadczenia krajowe, seminarium: Beton - wiemy jak i dlaczego!* XIX Międzynarodowe Targi Budownictwa Drogowego „Autostrada – Polska”, Kielce 2013
- [12] P. Mioduszewski, *Low noise pavements in Poland*. Proc. Inter-Noise 2012. New York. USA
- [13] P. Mioduszewski, *Przegląd hałaśliwości nawierzchni drogowych w Polsce i w innych krajach Unii Europejskiej. Metody ochrony przed hałasem. Teoria i praktyka. Zeszyt 1: 159-173*. Zakopane 2013
- [14] R. Nilsson, O. G. Andersson, A. Zborowski, *Innowacyjne metody redukcji hałasu komunikacyjnego*. Zeszyty Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska. Zeszyt 59 (nr 3/2012/I). Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2012
- [15] *Ogólne Specyfikacje Techniczne D – 05.03.04 Nawierzchnia betonowa*. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa 2013
- [16] *Pomiar tekstury nawierzchni przy pomocy piasku kalibrowanego (Projekt zaleceń)*. Centralny Ośrodek Badań i Rozwoju Techniki Drogowej. Zakład Nawierzchni (praca niepublikowana)
- [17] U. Sandberg, J. A. Ejsmont, *Tire/Road Noise Reference Book*. INFORMEX Ejsmont & Sandberg, Handelsbolag, Printed by MODENA, Gdynia 2002
- [18] U. Sandberg, L. Goubert, *Poroelastic Road Surface (PERS): A review of 30 years of R&D work*. Proc. of Inter-Noise 2011, Osaka, Japan
- [19] U. Sandberg i zesp., *Optimization of Thin Asphalt Layers – State-of-the-Art. Review*. ERA-NET ROAD Project “Optimization of thin asphalt layers”, 2011. www.highways.gov.uk
- [20] A. Szydło, *Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego. Teoria, wymiarowanie, realizacja*. Polski Cement, Kraków 2004
- [21] A. Szydło, *Rozwój konstrukcji i technologii nawierzchni betonowych w Polsce*, Budownictwo - Technologie - Architektura, Wydział 4(60)/2012