

Przegląd wybranych rezultatów badań hałasowych dla konwencjonalnych nawierzchni betonowych PCC

Review of selected noise test results for conventional PCC concrete pavements



Eryk Mączka

Dr inż.

Politechnika Wrocławska, Wydział
Budownictwa Lądowego i
Wodnego, Katedra Dróg, Mostów,
Kolei i Lotnisk

eryk.maczka@pwr.edu.pl
ORCID: 0000-0002-5420-5242

Streszczenie: Hałas drogowy jest jednym z negatywnych zjawisk wywołanych przejazdem pojazdu, które może być skutecznie ograniczane poprzez nadanie odpowiedniej tekstury powierzchni w konwencjonalnych nawierzchniach betonowych PCC (Portland Cement Concrete). Aby jednak rozróżnić wpływ różnych dostępnych na rynku metod teksturowania przeprowadza się w tym celu badania hałasowe - np. OBSI. W niniejszym artykule o charakterze przeglądowym przedstawiono wybrane (ważniejsze) wyniki i obserwacje związane z hałaśliwością tekstur konwencjonalnych nawierzchni betonowych PCC w okresie 2006-2025r. Tematyka niniejszego przeglądu pozwala przybliżyć doświadczenia badaczy z nawierzchniami PCC ze względu na teksturę i hałas.

Słowa kluczowe: Hałas drogowy; Metody teksturowania w nawierzchniach betonowych PCC; Ciche nawierzchnie betonowe

Abstract: Road noise is one of the negative phenomena caused by vehicle traffic, which can be effectively reduced by applying appropriate surface texture to conventional PCC (Portland Cement Concrete) concrete surfaces. However, to distinguish the impact of various commercially available texturing methods, noise studies based on available methods must be provided. This review article presents selected (most important) results and observations related to the noise level of conventional PCC concrete surface textures from 2006 to 2025. The subject of this review provides insight into researchers' experiences with PCC surfaces in terms of texture and noise.

Keywords: Pavement noise; PCC concrete pavement texturing methods; Quiet concrete pavements

Wstęp

Hałas drogowy generowany poprzez ruch pojazdów jest jednym z zjawisk negatywnie wpływających na zdrowie i kondycję człowieka [1–4]. Zjawisko to jest odczuwalne zarówno na obszarach zurbanizowanych jak i poza nimi.

Do jednych ze znanych metod obniżania poziomu hałasu drogowego można zaliczyć np. te związane z budową i wykończeniem (nadaniem tekstury) powierzchni konstrukcji nawierzchni drogowej [5–7]. W zależności od zastosowanego rozwiązania betonowe nawierzchnie drogowe mogą stawać się cichsze, umożliwiając tym samym naturalnie ograniczać emisję hałasu polepszając jednocześnie komfort. Aby jednak ocenić, który sposób teksturowania jest lepszy akustycznie, niezbędne jest wykonanie badań hałasowych

np. korzystając z metody On-Board Sound Intensity (OBSI). Dzięki przeprowadzeniu badań hałasowych, można nie tylko analizować techniki teksturowania nawierzchni betonowych, ale przede wszystkim można lepiej zrozumieć zagadnienie powstawania hałasu, które jest problemem złożonym [5–11]. Łącząc wszystkie te doświadczenia, łatwiej jest projektować, budować i utrzymać cichsze nawierzchnie betonowe, które poza niższą emisyjnością akustyczną muszą zapewniać też trwałość i bezpieczeństwo użytkownika.

W niniejszym artykule o charakterze przeglądowym przedstawiono wybrane (najważniejsze) wyniki i obserwacje związane z hałaśliwością tekstur konwencjonalnych nawierzchni betonowych PCC (Portland Cement Concrete) przy wykorzystaniu badania hałasowego OBSI. Tematyka niniejsze-

go przeglądu pozwala lepiej przybliżyć doświadczenia badaczy w zakresie konwencjonalnych nawierzchni PCC ze względu na teksturę i hałas.

Przegląd literatury

Techniki teksturowania konwencjonalnych nawierzchni betonowych PCC

Na podstawie [12–17] można wyróżnić następujące metody teksturowania w konwencjonalnych nawierzchniach betonowych PCC, które są przedmiotem zainteresowania w niniejszym artykule ze względu na hałas:

- ciągnięcie maty jutowej - (eng. burlap dragging lub eng. texture dragging),
- ciągnięcie maty jutowej + grabkowanie (frezowanie grabiami) - (eng.

ting),

- śrutowanie - (eng. shot blasting lub eng. wheel blasting),
- szczotkowanie - (eng. brooming),
- rowkowanie - (eng. diamond grooving lub skrótowo eng. grooving lub też DG),
- mikrofrezowanie - (eng. diamond grinding lub też CDG),
- odkryte kruszywo - (eng. exposed aggregate lub też EA),
- metody hybrydowe - konwencjonalny grinding + grooving (eng. conventional grinding + grooving), [nie mylić z grinding + grooving nawierzchnie NGCS],
- beton porowaty (właściwość materiału - objętość zamkniętych pustek powietrznych) - (eng. porous concrete).

W artykule starano uwzględnić kierunek wykonania tekstury: transverse - poprzecznie lub longitudinal - podłużnie, diagonal - ukośnie względem kierunku jazdy. Starano się również zwrócić uwagę na konfigurację tekstury (np. rozstaw, głębokość, szerokość elementów nadających teksturę), wiek badanej konstrukcji (czas eksploatacji).

Publikacje dotyczące pomiarów hałasu nawierzchni betonowych metodą OBSI zwracając uwagę na metody i kierunki tekstury sięgają 2006 roku [15,18,19], pomimo iż właściwe ustandaryzowanie tej metody nastąpiło dopiero w 2009 roku wraz z określeniem poziomów hałasu charakteryzujących nawierzchnie ciche (standaryzacja wykonana w USA) [20,21].

W poniższym przeglądzie zastosowano dla uproszczenia i krystalizacji pojęć nazewnictwo angielskie w odniesieniu do tekstury.

Przegląd literatury - część właściwa

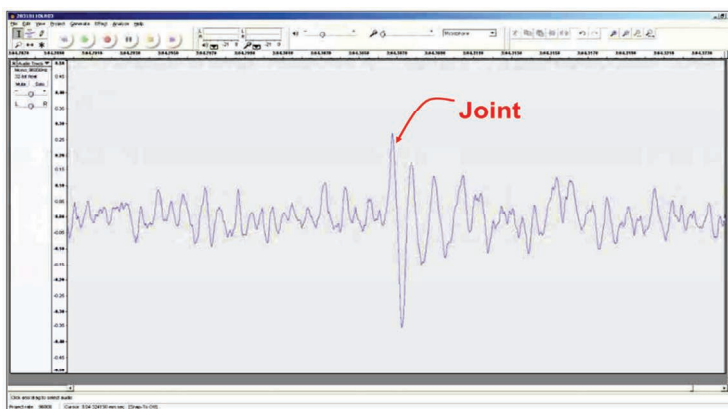
W 2006 roku Cackler i inni [22] opublikowali pierwsze większe opracowanie poświęcone zbadaniu hałaśliwości istniejących nawierzchni betonowych w USA. Z uwagi na to, iż metoda OBSI oficjalnie została ustandaryzowana w 2009 roku pomiary realizowano z wykorzystaniem procedury „FHWA traffic noise model”. Badania hałasowe przeprowadzono na 213 odcinkach betonowych nawierzchni PCC, gdzie koncentrowano się na zbadaniu wpływu metody tekstury na powstający hałas. W raporcie analizowano takie techniki jak (eng.): „burlap dragging”, „transverse tining”, „longitudinal tining”, „diamond grinding”, „exposed aggregate” oraz „previous concrete pavement” (porous concrete). Inne szczegółowe parametry tekstury nawierzchni są opisane w bezpośrednio w artykule (duża liczba kombinacji).

W omawianej pracy autorzy wykazali, iż analizowane techniki tekstury betonowych nawierzchni PCC mogą zostać wykorzystane do wstępnej redukcji hałasu - nawet o 6 dB („diamond grinding” czy „burlap dragging”). Autorzy podkreślili jednak, iż studium musi zostać kontynuowane by sprawdzić czy i jak bardzo czas eksploatacji nawierzchni wpływa zmienność hałasu. W raporcie wskazano również, iż na podstawie przeprowadzonych badań najlepsze nawierzchnie betonowe mogą zostać realizowane za pomocą wykorzystania techniki „exposed aggregate” oraz „previous concrete”.

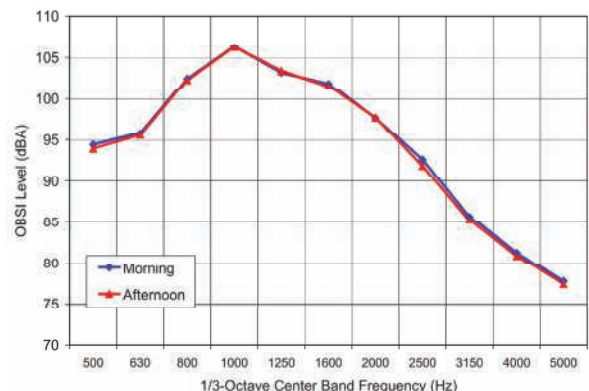
W 2007 roku Ferragut i inni [23] opublikowali raport stanowiący kontynuację pracy Cacklera z 2006 roku [22]. W raporcie rozszerzono zakres odcinków

badawczych ze względu na zastosowaną technikę tekstury do 395 odcinków. Badania prowadzone były kilkakrotnie na tych samych odcinkach celem zweryfikowania wpływu czasu na zmienność parametrów nawierzchni i hałasu. Badania uwzględniały również sytuacje, w których nawierzchnie betonowe tekstury ponownie - inną metodą ze względu na remont. Autorzy nadmienili w pracy, iż na chwilę obecną (2007) nie ma technik tekstury tradycyjnych nawierzchni PCC, które pozwoliłyby osiągnąć poziom hałasu znacznie mniejszy niż 100 dB. Zaobserwowano również, iż „transverse tining” i „transverse grinding” wywołują zwiększony prób odczuwalnego dźwięku (hałas) - nawet powyżej 105 dB i należy ich konsekwentnie unikać w zakresie stosowania do cichych nawierzchni betonowych. W raporcie autorzy przedstawili również obserwacje związane z m.in. wpływem dylatacji płyt nawierzchni betonowych na hałas opona-nawierzchnia. Analizy wykazały, iż przejazd samochodu przez dylatacje pomiędzy płytami powoduje średni wzrost hałasu o 1.5 dB, natomiast lokalnie przy dylatacjach mostowych dochodzi zwiększenia intensywności dźwięku nawet o 5 dB. Przykład obserwacji przedstawiono na Rys. 1.

Dalej w 2008 roku Hall i inni [24] opublikowali raport, w którym zaprezentowali kompleksowy przegląd stanu wiedzy dotyczący hałasu betonowych nawierzchni drogowych (PCC). Omówiono dotychczasową wiedzę w zakresie samego zjawiska oraz przedstawiono metody i urządzenia, które można wykorzystać do jego lepszego zrozumienia - ze względu na teksturę, tarcie, i hałas. Na uwagę zasługuje bar-



1. Ferragut (2007) - obserwacja przejazdu przez szczelinę dylatacyjną - pik rejestrowanego hałasu [23]



2. Rasmussen (2008) - hałas wybranej nawierzchni PCC o różnych porach dnia [25]

dzo dokładne omówienie poszczególnych metod i urządzeń, ich dokładność, stosowalność w warunkach in-situ oraz przedstawiona ocena kosztu samego urządzenia oraz czasu pracy. Kolejną ważną rzeczą w raporcie jest gruntowne omówienie i porównanie istniejących (na 2008r) metod teksturowania. Wskazano wady i zalety ich wzajemnego stosowania. Wewnątrz dalszej części raportu zaprezentowano wyniki pomiarów hałasu. Badania zrealizowano w kilkunastu stanach USA na drogach krajowych. W raporcie uszczegółwiono rodzaje analizowanych tekstur i konfiguracje – „longitudinal diamond grooving” – spacing: 5.59 mm, 6.22 mm; deph: 2.41mm, 3.07mm, „longitudinal turf and burlap dragging” – spacing: 1.91 mm, deph: 1.91mm, 3.18mm, „longitudinal tining” – spacing: 19.1, deph: 4.76mm. W pracy m.in. udowodniono, że stosowanie głębszych rowków przy metodzie diamond grooving, umożliwia obniżenie poziomu hałasu średnio o 4 dB.

Kolejno (2008 r.), Rasmussen [25] prowadził badania hałasu nawierzchni betonowych w stanie Iowa (USA) w ramach prac Federal Highway Administration (FHWA). Jego studium dotyczyło analizy wysokości poziomu hałasu nawierzchni PCC teksturowanych techniką: transverse tining względem porożnia (rano - wieczór). Dokładne parametry teksturowania nie zostały ujawnione. Rasmussen wykazał, iż poziom hałasu dla ocenianej nawierzchni jest o poranku i wieczorem niemal identyczny. Największy zaś hałas rejestruje się dla częstotliwości dźwięku wynoszącej

800, 1000 i 1250 [Hz] - wykres przedstawiono na Rys. 2.

Kolejno, rok później (2009) Donovan [26] opublikował artykuł, w którym również analizował poziom hałaśliwości konwencjonalnych nawierzchni PCC względem wybranych metod teksturowania. Publikacje zrealizowano w oparciu kilkulatnie pomiary dróg ekspresowych i autostrad w USA (stan California). Uwagę głównie skoncentrowano na technikach tj.:

- longitudinal tining (podłużnie, rozstaw/ głębokość tekstury 2.4-3.2 mm/1.5-8mm),
- longitudinal burlap dragging,
- brooming,
- diamond grooving [rozstaw tarcz: 9.35 - 19.05 mm, głębokość: 3.18 - 6.35 mm]
- diamond grinding [2.67 - 3.05mm rozstaw tarcz]
- metoda hybrydowa (konwencjonalna „grinding + grooving”) [3.05mm rozstaw tarcz - grinding / 19.05mm rozstaw tarcz - grooving + głębokość 9.35 mm]

Poziom hałas nawierzchni sprawdzano przy prędkości 97 km/h. W samochodzie osobowym podczas badania wykorzystano oponę Good Year P205/70R15.

W pracy udowodniono, iż najwyższy poziom hałasu odnotowany jest w częstotliwościach 900 - 1250 [Hz], pik ekstremalny 900 [Hz].

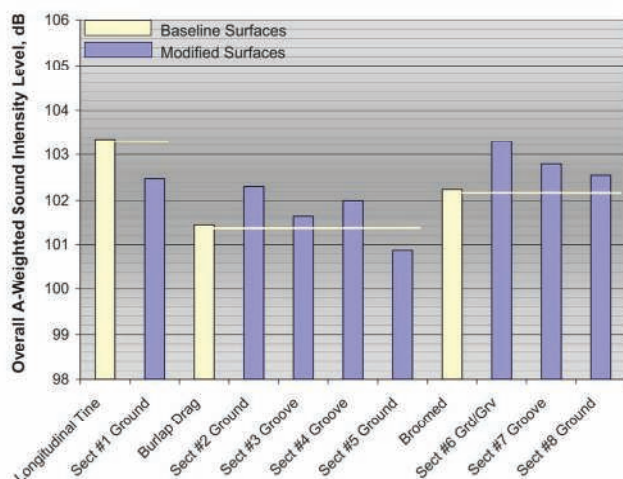
Ponadto wykazano, iż technika teksturowania: burlap dragging jest cichsza od brooming i tining nawet do 2 dB poziomu hałasu mniej. Najniższy

poziom hałas (101 dB,) odnotowano dla nawierzchni posiadającej teksturę burlap dragging, która kolejno została poddana grindingowi (sect #5). Pomiar wykazał, iż ta kombinacja teksturowania pozwoliła obniżyć poziom hałasu nawet o 2.5 dB względem innych technik co ukazano na Rys. 3.

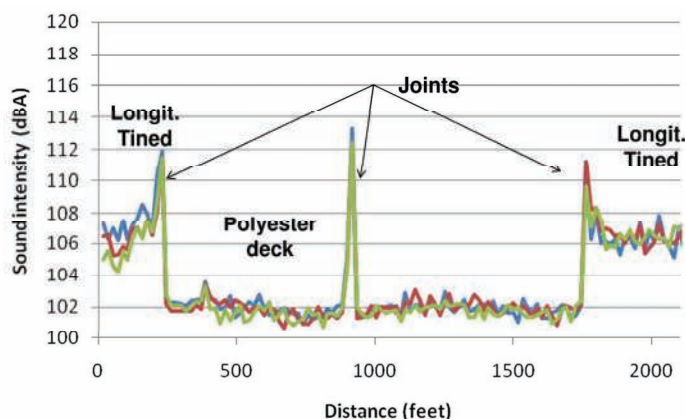
Autor w swojej pracy zajął się również porównaniem wpływu występowania dybli i kotew (uwzględniając szczeliny) na hałas (nawierzchnie teksturowane groovingiem). Potwierdzono, iż nawierzchnie dyblowane i kotwione są nawet do 4 dB głośniejsze w porównaniu do tych bez.

W tym samym roku (2009) Donovan i Lodico [27] opublikowali artykuł, w którym zajmowali się wpływem sylwetki pojazdu (pojazd osobowy, lekki ciężarowy, ciężarowy), opony (Dunlop, SRTT o szerokości opony 25 ft lub 50 ft) i prędkości ruchu (zakres 55-70 mph) na poziom hałasu m.in. w nawierzchniach betonowych PCC o różnym sposobie teksturowania. Analizowano te same techniki teksturowania co w poprzednim artykule - [26], wzbogacając rozważania o odcinki wykonane z nawierzchni asfaltowych. Wykazano, iż poziom hałasu wzrasta wraz przyrostem prędkości. Ponadto ustalono, że opony węższe (25 ft) generują nawet do 15 dB wyższy poziom hałasu w stosunku do opon o szerokości 50 ft. Ustalono, że konstrukcja opony - bieżnik tj. wysokość i kształt wpływa na poziom hałasu. Odnotowane różnice poziomu hałasu pomiędzy oponami dochodziły do 7 dB.

W 2010 roku Kohler [28] opublikował pracę, w której przedstawił wyniki badań dotyczących wpływu przyrostu prędkości na generowany hałas. Testy



3. Donovan (2009) - wyniki badań hałasowych w nawierzchniach PCC ze względu na teksturę [26]



4. Kohler (2010) - skok piku hałasu przy wjeździe na most [28]

zrealizowano na wybranych nawierzchniach betonowych PCC. Nie wskazano danych szczegółowych poza techniką teksturowania na badanych odcinkach. Analizowano przypadki: „burlap dragging”, „diamond grooving”, „longitudinal tining”, „longitudinal booming”. Analizy wykazały, że hałas opona-nawierzchnia wzrasta liniowo wraz z przyrostem prędkości niezależnie od badanej tekstury. Ponadto wykazano, iż łączenie drogi z mostem - dylatacje wywołują lokalne przyrosty hałasu nawet o 12 dB - Rys. 4.

W (2011) Kohler i inni [29] opublikowali raport sporządzony dla The California Department of Transportation (Caltrans), w którym to zajmowali się zbadaniem wpływu słyszalnych częstotliwości dźwięku na hałas opona-nawierzchnia w betonowych nawierzchniach PCC o zastosowanej technice teksturowania: longitudinal brooming (LB), diamond grinding (DG), diamond grooving (Gr), burlap dragging (BD) i longitudinal tining (LT). Parametrów tekstury nie podano. W raporcie dodatkowo zwrócono uwagę na trwałość akustyczną teksturowania określoną na przełomie 2 lat – badania poziomu hałasu na tych samych odcinkach w rocznych odstępach czasu. W pracy udowodniono, iż najbardziej słyszalny poziom dźwięku występuje w spektrum fali akustycznej pomiędzy 800-1000 Hz niezależnie od techniki teksturowania, chociaż sama metoda teksturowania nawierzchni PCC wpływa na odbierany poziom hałasu.

W raporcie wykazano również, iż teksturowanie ulega degradacji w czasie wpływając na wzrost poziomu słyszalnego hałasu. W przypadku odnotowanym dla techniki grindingu regres poziomu hałasu wyniósł średnio 8 dB. Najmniejsze fluktuacje (zmianę poziomu hałasu w czasie) zarejestrowano dla techniki burlap dragging – zmiana wyniosła średnio 1.9 dB.

W (2012) Rasmussen i inni [12] opublikowali raport dla National Concrete Pavement Technology Center, w którym przedstawili zalecenia wykonawcze dla cichych nawierzchni betonowych PCC. Autorzy zaobserwowali istotny problem z osiąganiem powtarzalności parametrów teksturowania dla wykonywanych nawierzchni, które przekła-

dają się negatywnie na generowany poziomy hałas (OBSI). Analizowano głównie takie techniki teksturowania dla nawierzchni PCC jak: Diamond Grinding, Burlap Dragging, Longitudinal Tining, Transverse Tining. Nie podano dokładnych parametrów teksturowania ani czasu eksploatacji badanych odcinków. W pracy przedstawiono obserwacje, z których wynika, iż nawierzchnie teksturowane w metodzie transverse tining są najgłośniejsze, a poziomy hałas dochodzą nawet do 111.5 dB. W przeważającej większości najcichszymi metodami teksturowania jest Burlap Dragging, dla których odnotowano poziom hałasu w okolicach 100.5 dB. Kompromisem pomiędzy wszystkimi analizowanymi nawierzchniami wydaje się być technika teksturowania Longitudinal Tining, gdzie osiągnęto poziom hałasu zbliżony do techniki burlap dragging.

Następnie Wang i inni (2012) [30] przeprowadzili eksperymentalne badania poziomu hałasu na nawierzchniach betonowych poddanych technice grinding (szlif 1-2 mm) i grooving (1.6 - 3.2 mm). Pomiary realizowano w North Carolina (USA). Nie podano dokładnych parametrów konstrukcji oraz danych technik teksturowania. Na podstawie badań wykazano, iż w niektórych przypadkach (częstotliwości dźwięku 800 -1000 Hz) nawierzchnie betonowe (PCC) mogą być cichsze nawet o 1.0 dB niż nawierzchnie z porowatego betonu asfaltowego położonych na warstwach niezwiązanych.

Kolejno, Skarabis i inni (2015) [31] przeprowadzili w Niemczech (Monachium) badania poziomu hałasu nawierzchni z betonu cementowego (PCC) wykonanych w technice exposed aggregate. Ze względu na zauważony problem dotyczący wycierania się z czasem makrotekstury nawierzchni, autorzy w artykule zwrócili głównie uwagę na wpływ rozstawu groovingu (rowków) na zmianę poziomu hałasu (grooving wykonano dodatkowo na powierzchni z odkrytym kruszywem). Badania wykonywano przy prędkości 80 km/h. Ustalono, iż mniejszy rozstaw rowków pozwala względnie zmniejszyć poziom hałasu dla badanej nawierzchni nawet o 9 dB.

W 2016r Tonin [32] opublikował pra-

cę, w której zestawiał ostatnie osiągnięcia naukowców w zakresie pomiarów hałasu w nawierzchniach betonowych i asfaltowych. Autor podkreślił, iż niewiele jest prac z wykorzystaniem metody OBSI, a w szczególności tych dotyczących nawierzchni z betonu cementowego. Większość publikacji dotyczy pomiarów metodami statystycznymi SPB ewentualnie CPX (która w pewnym znaczeniu może być alternatywą dla OBSI). W pracy nie wskazywano konkretnego rozwiązania dotyczącego parametrów teksturowania nawierzchni betonowych. Badano nawierzchnie PCC - beton komórkowy/porowaty o zawartości porów 20-25% oraz PCC z wykonanymi zabiegami: transverse tining + grooving. Autorzy wykazali, iż zastosowanie podwójnej techniki teksturowania nawierzchni PCC pozwala zmniejszyć poziom hałasu względem konwencjonalnych nawierzchni bitumicznych nawet o 3 dB.

Kolejno Zhong i inni (2018) [33] dokonali przeglądu doświadczeń różnych regionów - USA, Japonia, Europa, Chiny w zakresie poziomu hałasu dla nawierzchni z betonu cementowego (PCC z betonem porowatym). Na podstawie gruntowniejszych analiz wykonanych wewnętrznie przez Japończyków, ustalono, iż powszechnie stosowane konstrukcje o warstwach jak na Rys. 5, wyczerpują trwałość zmęczeniową po 20-30 latach. Jednak w stosunku do poziomu generowanego hałasu, przez cały okres eksploatacji, potrafią one zapewnić średnio od 6-8 dB niższy poziom hałasu (względem konwencjonalnych nawierzchni asfaltowych) dla nawierzchni suchych (bez wilgoci spowodowanej od deszczu) i od 4-8 dB mniej w stosunku do mokrych (po deszczu) przy prędkościach 40 - 75 km/h - samochody osobowe. W przypadku pojazdów ciężarowych odpowiednio: suche warunki: 4 -8 dB, mokre 2-3 dB.

Następnie Staiano (2018) [34] opublikował pracę, w której zestawiał amerykańskie doświadczenia w zakresie pomiarów hałasu dla różnych konstrukcji betonowych (PCC, beton porowaty 0/7, PCC, exposed aggregate 0/7). Pomiary przeprowadzono dla prędkości 55 oraz 100km/h. Próbowano ocenić hałas nawierzchni przy wyższych prędkościach.



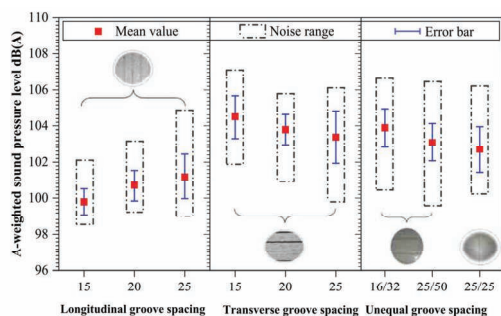
5. Zhong (2018) - typowe ułożenie warstw w nawierzchnia PCC stosowane w Japonii [33]

Niestety zauważono, iż powyżej 100 km/h pomiary są niemiernodajne. Na podstawie zebranych doświadczeń wykazano, iż nawierzchnie PCC z betonem porowatym 0/7 oraz PCC z techniką exposed aggregate mogą być cichsze od tych wykonanych z betonu asfaltowego (asfalt porowaty 0/14) nawet o 4 dB.

Kolejno Zhang i inni (2020) opublikowali artykuł [35], gdzie przedstawiono kontynuację wątku tematycznego dotyczącego poziomu hałasu nawierzchni betonowych (PCC) w tunelach [36] (Chiny). Doświadczenia wzbogacono o pomiary hałasu w innych tunelach, gdzie przed i za tunelem występowała nawierzchnia z mieszanki SMA (mastyk grynowy), natomiast w samym tunelu zastosowano nawierzchnie betonową PCC. W pracy rozszerzono analizy o wpływ kombinacji techniki teksturowania transverse grooving, longitudinal grooving oraz longitudinal + transverse grooving na poziom hałasu. Dokładne zastosowane parametry teksturowania badanych odcinków przedstawiono w pracy. Badanie zrealizowano przy prędkości 60 km/h oraz wykorzystano samochód osobowy z oponą 225/60 16.

W pracy wykazano, iż niezależnie od konstrukcji wewnątrz tunelu (betonowa czy asfaltowa) i sposobu teksturowania, poziom dźwięku rozprzestrzenia się w 4 fazach:

1. przyrost hałasu przed dojazdem do tunelu,
2. ustabilizowanie hałasu przed samym wjazdem w tunel,



6. Zhang (2020) - wyniki wpływu konfiguracji rowkowania [35]

3. przyrost hałasu na początkowym odcinku w tunelu (do 200m),
4. ustabilizowanie poziomu hałasu w tunelu.

Odnutowano, iż względne różnice we wzroście poziomu hałasu wynoszą ok. 20 dB pomiędzy fazą 1-2 oraz ok. 23 dB pomiędzy fazą 3-4.

Autorzy wykazali również, iż spośród porównywanych kombinacji teksturowania w PCC dla tuneli, teksturowanie longitudinal grooving o rozstawie tarcz co 25 mm pozwala uzyskać nawet do 2.5 dB niższy poziom hałasu w stosunku do transverse grooving. W przypadku kombinacji mieszanych (longitudinal + transverse grooving) wskazano, iż poziom hałasu odpowiada wartościom jak dla transverse grooving - przykładowe wyniki Rys. 6.

Fang i inni [37] (2020) kontynuowali badania hałasowe związane z nawierzchniami betonowymi w tunelach Chińskich opisanych w [35]. Rozważania rozszerzono o kilka nowych odcinków w tym z nawierzchniami (PCC) teksturowanymi specjalnymi polimerami oraz z techniką exposed aggregate (oznaczone w pracy jako EACCP). Wszystkie zbadane odcinki o określonych sposobach i parametrach teksturowania przedstawiono na Rys. 7. Autorzy nie wyszczególnili warstw konstrukcji nawierzchni, na których odbywały się badania. Prędkość pomiaru wynosiła 60 km/h.

W artykule główną uwagę skupiono na wpływie teksturowania na poziom hałasu biorąc równocześnie pod uwagę czas eksploatacji konstrukcji. Autorzy wykazali, iż najcichsze okazały się nawierzchnie PCC z polimerem oraz o technice exposed aggregate. Względne różnice poziomu hałasu osiągały nawet do 15 dB (PCC z polimerem vs longitudinal grooving).

W pracy zauważono również, iż nowo oddane do eksploatacji nawierzchnie w tunelach charakteryzowały się niższym poziomem hałasu (ok. 1.5 dB mniej) od odcinków używanych przez 5 lat.

W (2022), Lee i inni [38] analizowali wpływ techniki teksturowania tining oraz grooving nawierzchni betonowych (PCC) na poziom hałasu odcinków autostradowych w Korei Południowej. W pracy nie wyszczególniono dokładnych parametrów teksturowania. Prędkość pomiaru metodą OBSI wynosiła 100 km/h. Na podstawie przeprowadzonych badań ustalono, że technika teksturowania tining pozwoliła obniżyć poziom hałasu nawierzchni średnio o 0.3 dB względem techniki groovingu. Autorzy potwierdzili wcześniejsze doniesienia, iż pomiary metodą OBSI powyżej 100 km/h mogą być niemiernodajne ze względu na duże fluktuacje rejestrowanych parametrów.

W (2024) Donovan i inni [39] opublikowali artykuł kontynuujący rozważania dotyczące hałasu w nawierzchniach betonowych (PCC) i asfaltowych ze względu na technikę teksturowania i rodzaj konstrukcji [26,27]. Do zebranych przez lata danych autorzy włączyli pomiar dla nawierzchni asfaltowych (eng. chip seal pavements). Chip Seal to nawierzchnie asfaltowe, w których zastosowano więcej niż jedną warstwę wykonaną z kruszywa drobnego. W artykule zbadano drogi w stanie Kalifornia i Arizona USA. W pracy nie wyszczególniono dokładnych parametrów teksturowania. Badania zrealizowano dla prędkości pomiaru równej 97 km/h. Autorzy wykorzystując doświadczenia z prac [26,27] wykazali, iż nawierzchnie betonowe PCC o teksturoowaniu longitudinal tining są cichsze od asfaltowych typu Cheap Seal. Różnice w poziomie hałasu dochodziły względnie aż do 4.5 dB. Wyjątek stanowiła konstrukcja PCC

TABLE 1: Details of testing concrete pavement.

No.	Pavement type	Spacing, width, and depth of groove (mm)	Test location	Traffic condition
A	Transverse groove (artificial turf drag)	20, 5, 5	Tunnel 1	Newly built
B	Transverse groove (no drag)	50, 5, 5	Tunnel 2	Newly built
C	Longitudinal grooving	25, 5, 5	Tunnel 1	5 years
D	Longitudinal grooving	25, 5, 5	Tunnel 3	Newly built
E	Transverse groove	25/50, 5, 5	Tunnel 1	3 years
F	Longitudinal grooving	random	Tunnel 4	2 years
G	Transverse groove	23, 5, 1-3	Tunnel 5	Newly built
H	EACCP	—	Tunnel 6	Newly built
I	PCC	—	Tunnel 4	Newly built
J	SMA	SMA-13	Tunnel 7	Newly built
K	HMA	AC-13	Highway pavement	Newly built
L	Transverse groove (no drag)	25, 5, 1-3	Tunnel 8	Newly built
M	Bridge deck pavement	AC-13	A large bridge	Newly built

7. Fang (2020) - zestawienie badanych odcinków w tunelach Chińskich [37]

Table 2

Experiment design of dragged textures.

Site No.	Method	Width(mm)	Height (mm)	Spacing(mm)
1	longitudinal burlap	0.5 ~ 2.5	0 ~ 1	5 ~ 20
2	drag	0 ~ 1	0 ~ 0.5	1 ~ 5
3		0.5 ~ 1.5	0 ~ 1	3 ~ 10
4		1.5 ~ 4	0 ~ 1	3 ~ 8
5		1 ~ 5	0 ~ 2	5 ~ 10
6		1.5 ~ 2	0 ~ 1.5	2 ~ 8
7		1.5 ~ 2	0 ~ 0.25	2 ~ 15
8		1 ~ 2.5	0 ~ 1	5 ~ 10

8. Yang (2025) - longitudinal burlap dragging - konfiguracja teksturowania [41]

o teksturowaniu transverse tining.

W (2025) Izevbehai [40] podjął pierwsze próby opracowania teoretycznego modelu, pozwalającego przewidzieć poziom hałasu (jako wynik pomiaru OBSI) nawierzchni betonowych PCC dla dwóch metod teksturowania - diamond griding oraz diamond grooving. Nie podano dokładnych parametrów teksturowania odcinków badawczych. Na potrzeby opracowania modelu wykonano badania poziomu hałasu (OBSI) oraz określono współczynnik tarcia DFT, równość podłużną IRI i temperaturę dla pomiaru OBSI. Wyniki próbowano korelować. Autor wykazał, iż istnieje możliwość uzyskania dokładnej formuły pozwalającej przewidywać poziom hałasu (OBSI) projektowanych i wykonywanych nawierzchni betonowych, jednak należy dołożyć starań, aby skorelować ze sobą więcej parametrów niż wskazane wyżej. Duże znaczenie w tym zakresie ma dokładna wiedza o zastosowanej technice teksturowania. Uwzględnienie różnych parametrów przy teksturowaniu (głębokość, rozstaw tarcz i dystansów) byłoby cennym doświadczeniem pozwalającym rozwinąć bieżący model. Obecnie wymaga on wnikliwszej analizy i dalszego rozwoju.

Yang i inni (2025) [41] opublikowali pracę, gdzie przedstawili gruntowne badania wpływu kombinowanej metody teksturowania (transverse grooving + longitudinal burlap dragging) z uwzględnieniem parametrów ich konfiguracji (szerokość, głębokość, przerwa - patrz Rys. 8 i Rys. 9) na generowany poziom hałasu. Prace były wykonane na 8 odcinkach dróg ekspresowych wokół miasta Zhaotong (Chiny), dla których zaplanowano i wykonano ściśle określony projekt nawierzchni względem pożądanej tekstury. Następnie wykonano pomiary w zakresie ustalenia poziomu hałasu (OBSI) oraz sprawdzono

teksturę pomiarem laserowym (Mean Profile Depth - MPD). Badania poziomu hałasu opona-nawierzchnia prowadzono dla dwóch prędkości pomiaru 60 i 80 km/h. Jednocześnie wykonano w tych samych warunkach pogodowych pomiar tekstury (MPD) w celu zbadania wzajemnych korelacji i wpływu tekstury na powstawanie hałasu. Te badania były jednym z pierwszych podejść do uwzględnienia konkretnych parametrów układu teksturowania na hałas w nawierzchniach betonowych. Autorzy w pracy udowodnili ściśle powiązanie i dobrą korelację tekstury o znanych parametrach jej realizacji z rejestrowanym poziomem hałasu. Ponadto zostało wykazane, iż transverse grooving w odstępach (spacing) większych niż 25mm lepiej rozprasza energię akustyczną (hałas), w szczególności zakresu wrażliwości ucha ludzkiego (pasmo 1000 Hz). Wskazano też, iż tekstura i generowany hałas jest ściśle powiązana z częstotliwością generowanego hałasu. Przedstawiono również, iż nadanie zdefiniowanej tekstury nawierzchni (uzyskanie konkretnej tekstury o ściśle ustalonych parametrach) dla wybranych częstotliwości fali akustycznej może skutecznie obniżyć poziom hałasu względem stosowanych nawierzchni PCC (logitudinal burlap dragging i transverse grooving). W pracy wykazano również, iż zwiększenie prędkości ruchu pojazdu o 20 km/h (z 60 do 80) skutkuje przyrostem poziomu generowanego hałasu nawet o ok. 7.1dB (badane kombinacje tekstur).

Podsumowanie i wnioski

Na podstawie wykonanego przeglądu, można stwierdzić, iż hałaśliwość

Table 1

Experiment design of grooved textures.

Site No.	Method	Width (mm)	Depth (mm)	Spacing(mm)
1	Transverse	4.0	2	25
2	Grooves with	3.9	1	25
3	Equal Spacing	4.0	0.75	25
4		3.5	1	19
5		3.7	2.25	25
6		4.0	1.5	13
7	Transverse Grooves with Unequal Spacing	4.0	0.5	28-30-22-31-27-32-28-30-27-33-24-34-29 (375/13 = 28.8)
8		4.0	1	13-17-19-17-13-16-18-20-17-13-24-17-13-17-19-16-15-17-18-20-22-17-16 (390/23 = 17.0)

9. Yang (2025) - transverse grooving - konfiguracja teksturowania [41]

konwencjonalnych nawierzchni betonowych PCC uwzględniając różne sposoby teksturowania jest przez wielu badaczy cały czas gruntownie analizowana. Pomimo, że tematyka w tym wąskim zakresie (nawierzchnie PCC, metoda badania hałasowego - OBSI) jest przedmiotem rozważań od co najmniej 2006 roku obserwuje się jej ciągłą aktualność - w zakresie dalszego rozwoju zrozumienia i oceny zjawisk postawiania hałasu ze względu na teksturę betonowych nawierzchni PCC.

Istotniejszymi obserwacjami jakie można wyszczególnić to:

- konfiguracja parametrów i kierunku teksturowania (np. nacięć w technice groovingu) istotnie wpływa na obniżanie poziomu hałasu - wymaga to jednak głębszych analiz,
- zastosowanie metody teksturowania: burlap dragging lub diamond grinding umożliwia uzyskanie niższych wartości poziomu hałasu względem tining, brooming czy grooving nawet o kilka dB,
- hałas wzrasta liniowo wraz ze wzrostem prędkości samochodu niezależnie od techniki teksturowania,
- łączenia płyt lokalnie (szczeliny/dylatacje) w sposób istotny wpływają na wzrost hałasu - od 5 dB nawet do 12 dB.

Pomimo, iż w artykule wykazano różne doświadczenia badaczy – badania w świecie realizowane m.in. w USA, Korei, Chinach, Azji (Irak), Europie (np. Belgia), na podstawie wykonanego przeglądu dostrzeżono m.in., iż:

- istnieje niewiele lub jest brak doświadczeń hałasowych w zakresie techniki śrutowania,
- istnieje niewiele kompleksowych

analiz różnych konfiguracji teksturowania i wpływu na generowany poziom hałasu (publikacje większości pomijały wyszczególnienie tych informacji lub nie poświęcano temu należytej uwagi),

- istnieje niewiele artykułów dotyczących zbadania wpływu teksturowania: odkryte kruszywo, grinding, na hałas z wykorzystaniem metody OBSI. Podobnie wyszczególnia się niewielką liczbę badań wykonanych dla nawierzchni betonowych z betonu porowatego,
- nie dostrzega się doświadczeń badań hałasowych przy niższej standardyzowanej prędkości pomiaru np. 50 km/h,
- Istnieje stosunkowo niewiele publikacji, które dotyczyłyby pomiarów poziomu dźwięku w powiązaniu z parametrami i techniki teksturowania dla częstotliwości dźwięku z zakresu 800-1150 [Hz],
- chociaż poziom hałaśliwości badano dla pory dziennej i wieczornej, to jednak nie dostrzeżono analiz poziomu hałasu w nawierzchniach betonowych PCC przy zmiennych warunkach pogodowych z jednoczesnym ich uwzględnieniem (wilgoć, temperatura, inne).

W związku z powyższym pożądanym jest dalej zgłębiać zjawisko powstawania hałasu w celu jego lepszego zrozumienia dla konwencjonalnych nawierzchniach betonowych PCC - zwłaszcza dla ściśle ustalonych konfiguracji teksturowania pośród znanych technik dostępnych w wykonawstwie. Zgłębienie tej tematyki z pewnością pomoże w przyszłości opracować lepsze rozwiązania wykonawcze w tematyce cichych nawierzchni betonowych.

Artykuł powstał w ramach realizacji grantu badawczego „Innowacyjne metody redukcji hałasu drogowego i zasady ich stosowania” realizowanego w ramach programu RID II – Rozwój Innowacji Drogowych. Nr umowy 01RD/0001/23. Projekt realizowany w ramach wspólnego przedsięwzięcia RID, finansowany ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad”. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Singh, D.; Kumari, N.; Sharma, P. A Review of Adverse Effects of Road Traffic Noise on Human Health. *Fluct. Noise Lett.* 2018, 17, 1830001, doi:10.1142/S021947751830001X.
- [2] Wrótny, M.; Bohatkiewicz, J. Traffic Noise and Inhabitant Health—A Comparison of Road and Rail Noise. *Sustainability* 2021, 13, 7340, doi:10.3390/su13137340.
- [3] Montes González, D.; Barrigón Morillas, J.M.; Rey-Gozalo, G. Effects of noise on pedestrians in urban environments where road traffic is the main source of sound. *Sci. Total Environ.* 2023, 857, 159406, doi:10.1016/j.scitotenv.2022.159406.
- [4] Arregi, A.; Vegas, O.; Lertxundi, A.; Silva, A.; Ferreira, I.; Bereziartua, A.; Cruz, M.T.; Lertxundi, N. Road traffic noise exposure and its impact on health: evidence from animal and human studies-chronic stress, inflammation, and oxidative stress as key components of the complex downstream pathway underlying noise-induced non-auditory health effects. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2024, 31, 46820–46839, doi:10.1007/s11356-024-33973-9.
- [5] P. G. Abbott; P. A. Morgan; B. McKell. A review of current research on road surface noise reduction techniques PPR443, Scotland, United Kingdom, 2010. Available online: https://www.researchgate.net/profile/Phil-Abbott-3/publication/369182337_A-REVIEW_OF_CURRENT_RESEARCH_ON_ROAD_SURFACE_NOISE_REDUCTION_TECHNIQUES/links/640e29b0315dfb4cce7255ef/A-REVIEW-OF-CURRENT-RESEARCH-ON-ROAD-SURFACE-NOISE-REDUCTION-TECHNIQUES.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFhZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwiaWF0IjoxNjU0MDAwMDAwfQ== (dostęp: 2025).
- [6] Ohiduzzaman, M.D.; Sirin, O.; Kassem, E.; Rochat, J. State-of-the-Art Review on Sustainable Design and Construction of Quieter Pavements—Part 1: Traffic Noise Measurement and Abatement Techniques. *Sustainability* 2016, 8, 742, doi:10.3390/su8080742.
- [7] Sirin, O. State-of-the-Art Review on Sustainable Design and Construction of Quieter Pavements—Part 2: Factors Affecting Tire-Pavement Noise and Prediction Models. *Sustainability* 2016, 8, 692, doi:10.3390/su8070692.
- [8] National Research Council. Hearing Loss: Determining Eligibility for Social Security Benefits; The National Academies Press: Washington, DC, 2005, ISBN 978-0-309-09296-8.
- [9] Bendtsen, H.; Kohler, E.; Lu, Q.; Rymmer, B. Temperature influence on noise measurements No. 175, Edinburgh, 2009 (dostęp: 2025).
- [10] Pardo-Jadue, J.; Dragicevic, C.D.; Bowen, M.; Delano, P.H. On the Origin of the 1,000 Hz Peak in the Spectrum of the Human Tympanic Electrical Noise. *Front. Neurosci.* 2017, 11, 395, doi:10.3389/fnins.2017.00395.
- [11] Zofka, A.; Mechowski, T.; Graczyk, M.; Sudyka, J.; Harasim, P. Przegląd literatury na temat metod pomiaru hałaśliwości nawierzchni, Warszawa, 2018 (dostęp: 2025).
- [12] Rasmussen, R.; Wiegand, P.; Fick, G.; Harrington, D. How to Reduce Tire-Pavement Noise: Better Practices for Constructing and Texturing Concrete Pavement Surfaces DTFH61-06-H-00011, USA, 2012. Available online: https://www.intrans.iastate.edu/wp-content/uploads/2018/08/How_to_Reduce_Tire-Pavement_Noise_final.pdf (dostęp: 2025).
- [13] Michałek Andrzej. Uszorstnienie nawierzchni w technologii śrutowania, Warszawa, 2021. Available online: <https://nbi.com.pl/archiwum-nbi/uszorstnienie-nawierzchni-w-technologie-srutowania/> (dostęp: 2025).
- [14] Wegarten. Nawierzchnie betonowe nowej generacji. Available online: https://www.wegartenconstruction.com/media/broszura_ngcs.pdf (dostęp: 2025).
- [15] Federal Highway Administration. Concrete Pavement Texturing - Tech Brief, Washington D.C., 2019. Available online: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/hif17011.pdf> (dostęp: 2024).

- [16] Witczak Sebastian; Konopska-Piechurska Małgorzata; Jackiewicz-Rek Wioletta. Badania właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni betonowych oraz metody poprawy tych właściwości. *Budownictwo Technologie Architektura* 2017, 2017, 48–51.
- [17] Michalski, W. Metody nadawania tekstury nawierzchniom betonowym. *Drogownictwo* 2016, 2016, 126–134.
- [18] Gardziejczyk, W. Mobilne i stacjonarne metody pomiaru i oceny hałaśliwości nawierzchni drogowych. *CONSTRUCTION MATERIALS* 2025, 1, 81–88, doi:10.15199/33.2025.08.10.
- [19] Gardziejczyk, W. Hałaśliwość nawierzchni drogowych; Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej: Białystok, 2018, ISBN 978-83-65596-58-1.
- [20] Measurement of Tire/Pavement Noise using the On-Board Sound 3 Intensity (OBSI) Method: TP 76-09, 2009.
- [21] Transportation Research Board; National Academies of Sciences, Engineering; Medicine. Texturing of Concrete Pavements: National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 634: Texturing of Concrete Pavements; The National Academies Press: Washington, DC, 2009, ISBN 978-0-309-11792-0.
- [22] Cackler, T. Evaluation of U.S. and European Concrete Pavement Noise Reduction Methods, USA, 2006. Available online: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/24417/dot_24417_DS1.pdf-HiZZ0ffU7s0 (dostęp: 2025).
- [23] Ferragut, T.; Cackler, T. ISU-FHWA-ACPA Concrete Pavement Surface Characteristics Program Part 2: Preliminary Field Data Collection, USA, 2007. Available online: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/38927> (dostęp: 2025).
- [24] Hall, J.W.; Smith, K.L.; Littleton, P. Texture of concrete pavements 10-67, USA, 2008. Available online: https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_634appendixes.pdf (dostęp: 2025).
- [25] Rasmussen, R. Measuring and modeling tire-pavement noise on various concrete pavement textures. *Noise Control Eng. J.* 2008, 57, 139, doi:10.3397/1.3081451.
- [26] Donovan, P.R. Noise evaluation of various pavement textures on new Portland cement concrete. *Noise Control Engineering* 2009, 2009, 63–76, doi:10.3397/1.3106563.
- [27] Donovan, P.R.; Lodico, D.M. 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* 2009, 2123, 137–144, doi:10.3141/2123-15.
- [28] Kohler, E. OBSI Testing - Dynatest presentation: Pavement evaluation, Roanoke, Virginia, USA, 2010. Available online: https://www.vtti.vt.edu/PDFs/PE_2010/Kohler%20-%20OBSI%20Testing.pdf (dostęp: 2025).
- [29] Kohler, E.; Harvey, J. Quieter Pavement Research: Concrete Pavement Tire Noise UCPRC-RR-2010-03, USA, 2011. Available online: <https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/research-innovation-system-information/documents/f0016619-2012-05-task-1200a1of5-pavement.pdf> (dostęp: 2025).
- [30] Wang, G.; Smith, G.; Shores, R. Pavement noise investigation on North Carolina highways: an on-board sound intensity approach. *Can. J. Civ. Eng.* 2012, 39, 878–886, doi:10.1139/l2012-076.
- [31] Skarabis, J.; Stöckert, U. Noise emission of concrete pavement surfaces produced by diamond grinding. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 2015, 2, 81–92, doi:10.1016/j.jtte.2015.02.006.
- [32] Tonin, R. Quiet Road Pavements: Design and Measurement—State of the Art. *Acoust Aust* 2016, 44, 235–247, doi:10.1007/s40857-016-0066-3.
- [33] Zhong, R.; Leng, Z.; Poon, C. Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-the-practice review. *Construction and Building Materials* 2018, 183, 544–553, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.06.131.
- [34] Staiano, M.A. Tire-Pavement Noise and Pavement Texture. *J. Transp. Eng., Part B: Pavements* 2018, 144, 4018034, doi:10.1061/JPE-ODX.0000047.
- [35] Zhang, Z.; Luan, B.; Liu, X.; Zhang, M. Effects of surface texture on tire-pavement noise and skid resistance in long freeway tunnels: From field investigation to technical practice. *Applied Acoustics* 2020, 160, 107120, doi:10.1016/j.apacoust.2019.107120.
- [36] Wei, D.; Li, B.; Zhang, Z.; Han, F.; Zhang, X.; Zhang, M.; Li, L.; Wang, Q. Influence of Surface Texture Characteristics on the Noise in Grooving Concrete Pavement. *Applied Sciences* 2018, 8, 2141, doi:10.3390/app8112141.
- [37] Fang, J.; Tu, J.; Wu, K. Analysis of Skid Resistance and Noise Characteristics for Varieties of Concrete Pavement. *Advances in Materials Science and Engineering* 2020, 2020, doi:10.1155/2020/7427314.
- [38] Comparisons of tire-pavement noise characteristics between longitudinal tining and diamond grinding concrete pavement; Lee, W.-Y.; Kim, C.-W., Eds., 2022.
- [39] Donovan, P.R.; Janello, C.J. Noise Performance of Chip Seal Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2024, 2678, 809–815, doi:10.1177/03611981231176548.
- [40] Izevbekhai, B.; Aydin, C. Pervious Concrete Acoustics and Tire-Pavement Interaction Noise Prediction. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2025, 2679, 746–759, doi:10.1177/03611981251353714.
- [41] Yang, S.; Wei, Y.; Ye, Z.; Liu, H.; Yang, B.; Liu, W.; Wang, L. Characterization and modeling of textured cement concrete pavement surfaces for tire-pavement noise prediction. *Applied Acoustics* 2025, 227, doi:10.1016/j.apacoust.2024.110183.