



MARCIN STIENSS

Politechnika Gdańska  
marcin.stienss@pg.gda.pl



JÓZEF JUDYCKI

Politechnika Gdańska  
jojudyck@pg.gda.pl

## Badania laboratoryjne i terenowe mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze produkcji

Od kilku lat w budowie dróg znajduje zastosowanie tzw. mieszanki mineralno-asfaltowe o obniżonej temperaturze produkcji. Jest to stosunkowo nowy typ mieszanek, których temperatura wytwarzania i wbudowywania na drodze może być obniżona o ok. 20–30°C w stosunku do tradycyjnych mieszanek „na gorąco” (ang. *hot mix asphalt*). Z tego powodu określane są one jako mieszanki mineralno-asfaltowe „na ciepło” (ang. *warm mix asphalt*) i oznaczane jako mieszanki WMA. Obniżenie temperatury produkcji

można osiągnąć poprzez następujące działania:

- dodanie do składu mieszanki specjalnych środków w postaci stałej lub płynnej, które wpływają na zachowanie się asfaltu w trakcie otaczania kruszywa (np. środków modyfikujących lepkość asfaltu lub działających powierzchniowo czynnie i polepszających zwilżanie kruszywa przez asfalt). Środki te określane są jako dodatki WMA (ang. *warm mix asphalt additives*).

- zastosowanie spieniania asfaltu wodą, które w efekcie zmniejsza lepkość asfaltu i pozwala na otoczenie nim ziaren kruszywa w niższej temperaturze.

Pierwszy sposób produkcji mieszanek o obniżonej temperaturze nie wymaga w zasadzie wprowadzania istotnych modyfikacji istniejących wytwórni mieszanek, konieczne jest zainstalowanie zasobnika i podajnika wprowadzającego dodatki w określone miejsce na linii produkcyjnej – może to być przewód doprowadzający asfalt do mieszalnika, waga asfaltu lub też sam mieszalnik. Istnieje również możliwość podawania dodatków WMA wprost do zbiorników asfaltu.

Drugi sposób produkcji mieszanek o obniżonej temperaturze, tj. z zastosowaniem technologii spieniania, wymaga głębszych ingerencji w konstrukcję wytwórni. Konieczny jest bowiem montaż komory lub dyszy spieniającej, która umożliwi wtrysk wody w strumień asfaltu i tym samym jego spienienie. Z drugiej strony, produkcja mieszanek o obniżonej temperaturze w technologii spieniania wymaga jedynie niewielkich ilości wody (ok. 0,5 kg na jedną tonę mma), której koszt jest nieporównywalnie niższy niż koszt dodatków WMA.

Technologie produkcji o obniżonej temperaturze mogą być wykorzystywane przy produkcji zarówno mieszanek wałowanych (beton asfaltowy, mastyks grysowy SMA), jak i asfaltu lanego.

Mieszanki WMA mają szereg korzyści technologicznych i środowiskowych. Do najważniejszych można zaliczyć:

- zmniejszenie zużycia energii podczas podgrzewania składników mieszanki mineralno-asfaltowej,
- zmniejszenie emisji szkodliwych związków i pyłów,
- możliwość wydłużenia sezonu wykonawczego,
- możliwość wydłużenia czasu transportu z wytwórni do miejsca wbudowania,
- skrócenie czasu niezbędnego do ochłodzenia się nowo ułożonej warstwy bitumicznej.

Należy pamiętać, że nie wszystkie wymienione korzyści są do osiągnięcia jednocześnie. Aby było możliwe wydłużenie czasu transportu mieszanki lub wbudowywanie w niskich temperaturach otoczenia, konieczne jest jej wyprodukowanie przy użyciu technologii WMA, jednakże w temperaturze jak w przypadku mieszanki tradycyjnej.

Godnym odnotowania jest fakt ciągle wzrastającej popularności mieszanek o obniżonej temperaturze. W Stanach Zjednoczonych w roku 2013 mieszanki WMA stanowiły prawie jedną trzecią ogólnej ilości wyprodukowanych mieszanek mineralno-asfaltowych [17].

Wzrost popularności mieszanek WMA przekłada się również na wzrost prac badawczych dotyczących tej technologii. Początek szerokiego zainteresowania mieszankami „na ciepło” miał miejsce ok. 10 lat temu, kiedy opublikowano raporty badawcze Prowella i Hurleya [6,7,8] oraz wyniki studyjnej wizyty przedstawicieli amerykańskiej administracji drogowej w Europie [4]. Oprócz badań dotyczących wybranych aspektów mieszanek WMA, np. zagęszczalności [2,5], odporności na działanie wody [1] czy odporności na spękania niskotemperaturowe [16], realizowane były kompleksowe programy badań dotyczące uwzględnienia technologii WMA w procesie projektowania składu mieszanek mineralno-asfaltowych [3,12]

Również i w Polsce mieszanki mineralno-asfaltowe „na ciepło” cieszą się coraz większym zainteresowaniem. W latach 2010-2012 zespół naukowy z Politechniki Warszawskiej pod kierownictwem prof. Piotra Radziszewskiego, wraz z Instytutem Badawczym Dróg i Mostów oraz firmą Mostostal Warszawa zrealizował program badawczy dotyczący mieszanek WMA, który finansowany był ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. W ramach tego programu oceniano min. efektywność stosowania szeregu dodatków chemicznych umożliwiających obniżenie temperatury produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych [14,15]. Ośrodkiem specjalizującym się w dziedzinie mieszanek WMA jest również zespół prof. Marka Iwańskiego z Politechniki Świętokrzyskiej, którego prace dotyczą nie tylko dodatków obniżających temperaturę produkcji i wbudowania, ale również technologii asfaltu spienionego [9,10,11].

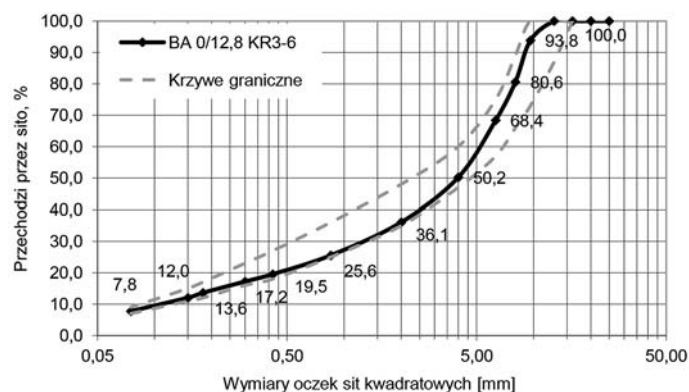
Niniejszy artykuł przedstawia wybrane wyniki badań uzyskane w trakcie realizowania przez Katedrę Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej pod przewodnictwem prof. Józefa Judyckiego programu badawczego „Badania mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze otoczenia”. Program ten zrealizowano na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w latach 2009–2011. Składał się on z etapu prac studialnych, laboratoryjnych oraz terenowych, których celem była ocena wpływu na parametry mieszanek mineralno-asfaltowych istotnych w trakcie ich wytwarzania i eksploatacji nawierzchni z nich wykonanych wybranych środków do obniżania temperatury produkcji i wbudowywania.

## Badania laboratoryjne

Podczas badań laboratoryjnych porównywano właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych wytwarzanych i zagęszczanych w obniżonej temperaturze, dzięki zastosowaniu w ich składzie dodatków WMA z cechami wyjściowych mieszanek wytwarzanych w temperaturach tradycyjnych, bez dodatków WMA. Wykorzystano następujące dwa rodzaje mieszanek mineralno-asfaltowych:

- beton asfaltowy do warstwy ścieralnej z asfaltem 50/70,
- beton asfaltowy do warstwy ścieralnej z asfaltem modyfikowanym 45/80-55.

W przypadku obu rodzajów asfaltów przyjęto ten sam skład mieszanki mineralnej o uziarnieniu 0/12,8 mm, który był zgodny z wymaganiami zawartymi w normie PN-S-96025:2000 [19] dla mieszanek przeznaczonych dla ruchu KR3-6. Do zaprojektowania i wytworzenia mieszanek mineralno-asfaltowych w laboratorium użyto grysów ze skał granitowych pochodzenia skandynawskiego, ze Szwecji i Norwegii. Ponadto zastosowano piasek łamany granitowy z Norwegii oraz wypełniacz wapienny. Wymienione materiały należą do kruszyw powszechnie wykorzystywanych w produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych na Pomorzu. Zawartość lepiszcza przyjęto na poziomie 5,3% w przypadku mieszanek wytwarzanych z asfaltem zwykłym 50/70 oraz 5,4% w przypadku mieszanek wytwarzanych z asfaltem modyfikowanym 45/80-55. Oba asfalty zostały wyprodukowane w firmie LOTOS. Zastosowanym kryterium doboru zawartości asfaltu było uzyskanie zawartości wolnych przestrzeni w próbkach w przedziale od 2,5% do 3,5%.



Rys. 1. Krzywa uziarnienia betonu asfaltowego zastosowanego w badaniach laboratoryjnych

Tabela 1. Uziarnienie mieszanek betonu asfaltowego do warstwy ścieralnej podczas badań laboratoryjnych

Beton asfaltowy:	BA 0/12,8 50/70	BA 0/12,8 45/80-55
<b>Uziarnienie (przesiew)</b>		
#16,0	100,0	
#12,8	100,0	
#9,6	93,8	
#8,0	80,6	
#6,3	68,4	
#4,0	50,2	
#2,0	36,1	
#0,85	25,6	
#0,42	19,5	
#0,30	17,2	
#0,18	13,6	
#0,15	12,0	
#0,075	7,8	
Zawartość asfaltu, %	5,3	5,4

W badaniach zastosowano pięć dodatków obniżających temperaturę produkcji i wbudowania mieszanek mineralno-asfaltowych, które były dostępne na rynku polskim w momencie rozpoczynania programu. Listę wykorzystanych dodatków wraz z ich składem chemicznym, sposobem działania oraz zastosowaną proporcją dozowania przedstawiono w tabeli 2. Przyjęto, że w trakcie całego programu badawczego będzie stosowana jednakowa ilość danego środka w stosunku do asfaltu, podana w tabeli 2, niezależnie od rodzaju badań lub – tylko w przypadku dodatku zeolitu – jednoprotentową zawartość w stosunku do masy mieszanki mineralno-asfaltowej. Zastosowane ilości przyjęto na podstawie wskazań producentów danych środków i studiów literatury.

Tabela 2. Dodatki WMA użyte w badaniach laboratoryjnych

Nazwa dodatku	Skład chemiczny	Sposób działania	Dozowanie
Sasobit	Syntetyczny wosk alifatyczny produkowany metodą Fishera-Tropscha	Modyfikator lepkości	3% w stosunku do asfaltu
Licomont BS100	Mieszanina amidów kwasów tłuszczowych	Modyfikator lepkości	3% w stosunku do asfaltu
Rediset WMX	Nieznany	Modyfikator lepkości i środek adhezyjny	2% w stosunku do asfaltu
Ceca BaseRT	Mieszanina związków działających przez asfalt poprzez redukcję napięcia powierzchniowego	Środek utapiający otoczenie kruszywa przez asfalt poprzez redukcję napięcia powierzchniowego	0,35% w stosunku do asfaltu
Zeolit	Naturalny lub sztucznie skrzystalizowany glinokrzemian sodu	Środek indukujący spienianie asfaltu poprzez skrzystalizowaną w swoich porach wodę	0,3% w stosunku do mieszanki mineralno-asfaltowej

Proces wytwarzania mieszank mineralno-asfaltowych z asfaltami z danym dodatkiem WMA oraz bez niego przebiegał jednakowo, zaś jedyną różnicą była inna temperatura otaczania i zagęszczania. Mieszanki porównawcze z czystym asfaltem drogowym 50/70 oraz asfaltem modyfikowanym 45/80-55 wytwarzano w temperaturze 160°C, natomiast mieszanki z asfaltami zawierającymi dodatki WMA w temperaturze obniżonej o 25°C, tj. w temperaturze 135°C.

Program badań obejmował określenie najważniejszych parametrów mieszank mineralno-asfaltowych z dodatkami WMA i porównanie ich z parametrami mieszank porównawczych, wytworzonych w temperaturze tradycyjnej, bez dodatków. Wykonano następujące badania następujących właściwości mieszank:

- stabilność Marshalla,
- zagęszczalność,
- odporność na działanie wody i mrozu,
- odporność na starzenie,
- odporności na deformacje trwałe,
- odporność na spękania niskotemperaturowe.

Z uwagi na ograniczone ramy niniejszego artykułu zostaną przedstawione w nim tylko wyniki badań odporności na działanie wody i mrozu, deformacje trwałe oraz odporności na spękania niskotemperaturowe.

Przeprowadzone badania odporności betonów asfaltowych na działanie wody i mrozu opierały się na procedurach opisanych w normie europejskiej PN-EN 12697-12 oraz wskazaniach zawartych w Wymaganiach Technicznych „Nawierzchnie asfaltowe na drogach publicznych” WT-2 2008, które obowiązywały w momencie realizacji omawianej części programu badawczego. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 3 (mieszanki z asfaltem 50/70) i w tabeli 4 (mieszanki z asfaltem modyfikowanym 45/80-55).

Badania koleinowania mieszank wytworzonych w warunkach laboratoryjnych odbywały się według procedury opisanej w normie PN-EN 12697-22 [19]. Ich wyniki przedstawiono na rysunku 2.

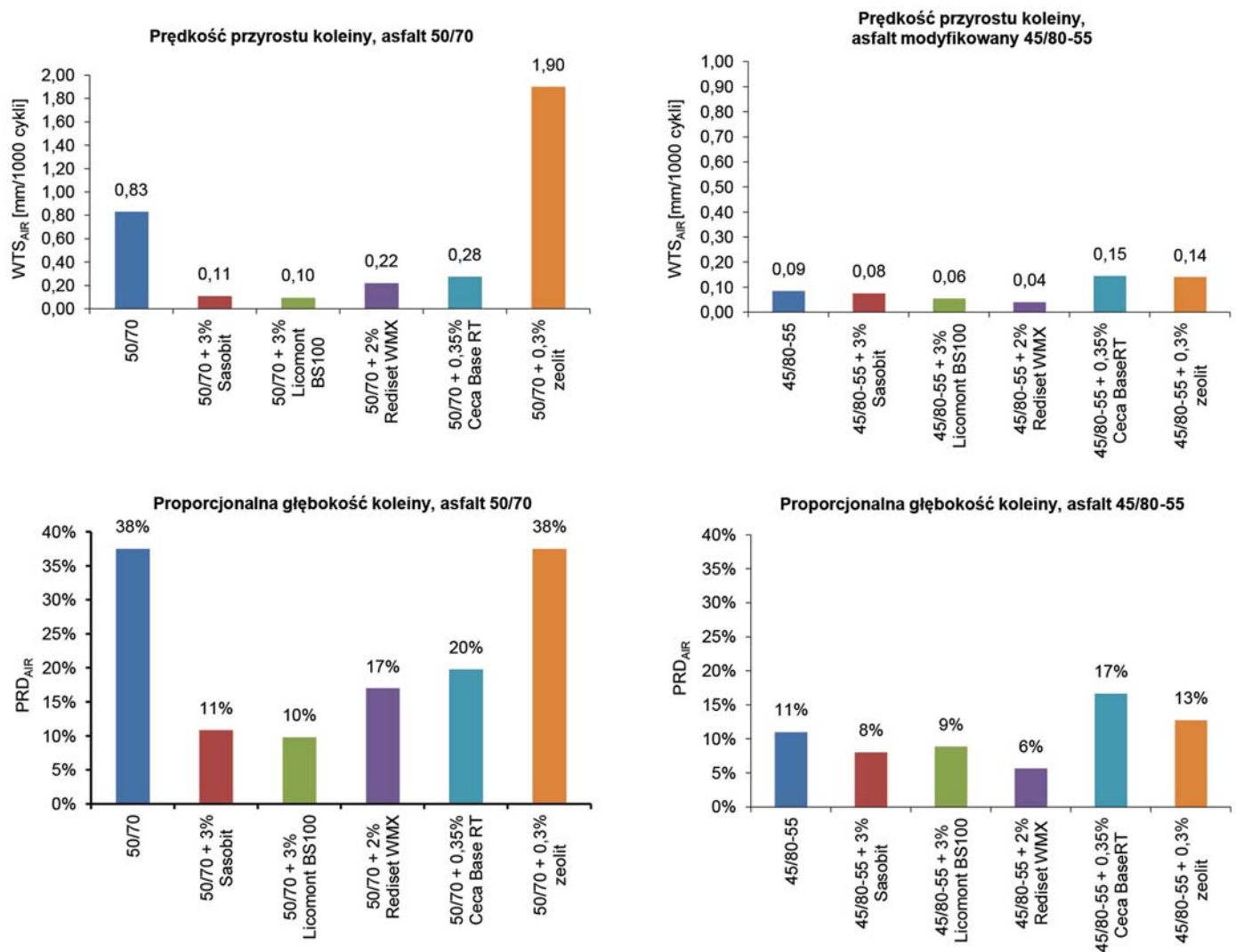
Do porównania zachowań różnych mieszank mineralno-asfaltowych z dodatkami WMA w niskich temperaturach wykorzystano metodę trójpunktowego zginania prostopadłościennych belek ze stałą prędkością deformacji. Metoda ta została oryginalnie opracowana przez Judyckiego i zastosowana w pracy [13] oraz następnie zmodyfikowana przez Pszczołę i Judyckiego w pracy [20]. Polega ona na określeniu siły maksymalnej i odkształcenia granicznego na spodzie próbki podczas zginania wolnopodpartej prostopadłościennej belki obciążonej siłą skupioną ze stałą prędkością deformacji. Zarejestrowana siła służy następnie do obliczenia wy-

Tabela 3. Wytrzymałości na pośrednie rozciąganie oraz wskaźniki ITSR próbek mieszank mineralno-asfaltowych z asfaltem 50/70 czystym i z dodatkami WMA

Rodzaj mieszanki	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek referencyjnych [MPa]	Wyniki dla próbek kondycjonowanych			
		Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek bez cyklu zamrażania [MPa]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek z cyklem zamrażania [MPa]	Wskaźnik wytrzymałości ITSR dla próbek bez cyklu zamrażania	Wskaźnik wytrzymałości ITSR dla próbek z cyklem zamrażania
50/70	1,81	1,63	1,56	90,0%	86,1%
50/70 + 3% Sasobit	1,81	1,79	1,58	98,6%	87,1%
50/70 + 3% Licomont BS100	1,63	1,52	1,46	93,3%	89,2%
50/70 + 2% Rediset WMX	1,79	1,67	1,76	93,1%	98,4%
50/70 + 0,35% Ceca Base RT	1,86	1,75	1,66	93,9%	89,3%
50/70 + 0,3% zeolit w stosunku do masy m.m.a.	1,74	1,68	1,59	96,8%	91,5%

Tabela 4. Wytrzymałości na pośrednie rozciąganie oraz wskaźniki ITSR próbek mieszank mineralno-asfaltowych z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami WMA

Rodzaj mieszanki	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie świadków [MPa]	Wyniki dla próbek kondycjonowanych			
		Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek bez cyklu zamrażania [MPa]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek z cyklem zamrażania [MPa]	Wskaźnik wytrzymałości ITSR dla próbek bez cyklu zamrażania	Wskaźnik wytrzymałości ITSR dla próbek z cyklem zamrażania
45/80-55	1,67	1,59	1,50	95,0%	89,9%
45/80-55 + 3% Sasobit	2,03	1,87	1,96	92,3%	96,5%
45/80-55 + 3% Licomont BS100	1,71	1,74	1,71	101,9%	100,1%
45/80-55 + 2% Rediset WMX	1,87	1,74	1,83	92,8%	101,1%
45/80-55 + 0,35% Ceca Base RT	1,74	1,79	1,78	103,2%	102,7%
45/80-55 + 0,3% zeolit w stosunku do masy m.m.a.	1,66	1,49	1,58	89,6%	95,0%



Rys. 2. Wyniki badań prędkości przyrostu oraz procentowej głębokości koleiny, z europejskiego koleinomierza kołowego, betonów asfaltowych z dodatkami WMA i bez temperatura 60°C, wg PN-EN12697-22, metoda B

trzymałości materiału na rozciąganie przy zginaniu oraz modułu sztywności. Uzyskane wyniki pokazano na rysunku 3.

Przeprowadzony cykl badań laboratoryjnych wykazał, że testowane środki dodawane do asfaltu, mające służyć do obniżania temperatury produkcji i wbudowania nie powodują negatywnych efektów w gotowym produkcie, jakim jest mieszanka mineralno-asfaltowa.

Dodatki należące do grupy środków organicznych, takie jak Sasobit (parafiny) lub Licomont BS 100 (amidy kwasów tłuszczowych) pozytywnie wpłynęły na parametry, np. stabilność lub koleinowanie.

W przeprowadzonych laboratoryjnych badaniach zagęszczalności nie zaobserwowano jednoznacznego pozytywnego wpływu dodatków WMA na zagęszczalność mieszanek mineralno-asfaltowych.

Wszystkie natomiast dodatki pozytywnie wpłynęły na odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody i mrozu. Łatwiejsze otaczanie ziaren kruszywa przez asfalt w trakcie produkcji mieszanek „na ciepło” skutkuje lepszym zachowaniem się takich mieszanek w dłuższym

okresie czasowym, bez stosowania oddzielnych środków adhezyjnych.

Nie zaobserwowano negatywnego wpływu dodatków WMA na proces starzenia mieszanek mineralno-asfaltowych. Wprowadzenie do składu mieszanek środków obniżających temperaturę produkcji nie powodowało – z wyjątkiem pojedynczych przypadków – usztywnienia próbek w stopniu większym, niż w przypadku mieszanek referencyjnych.

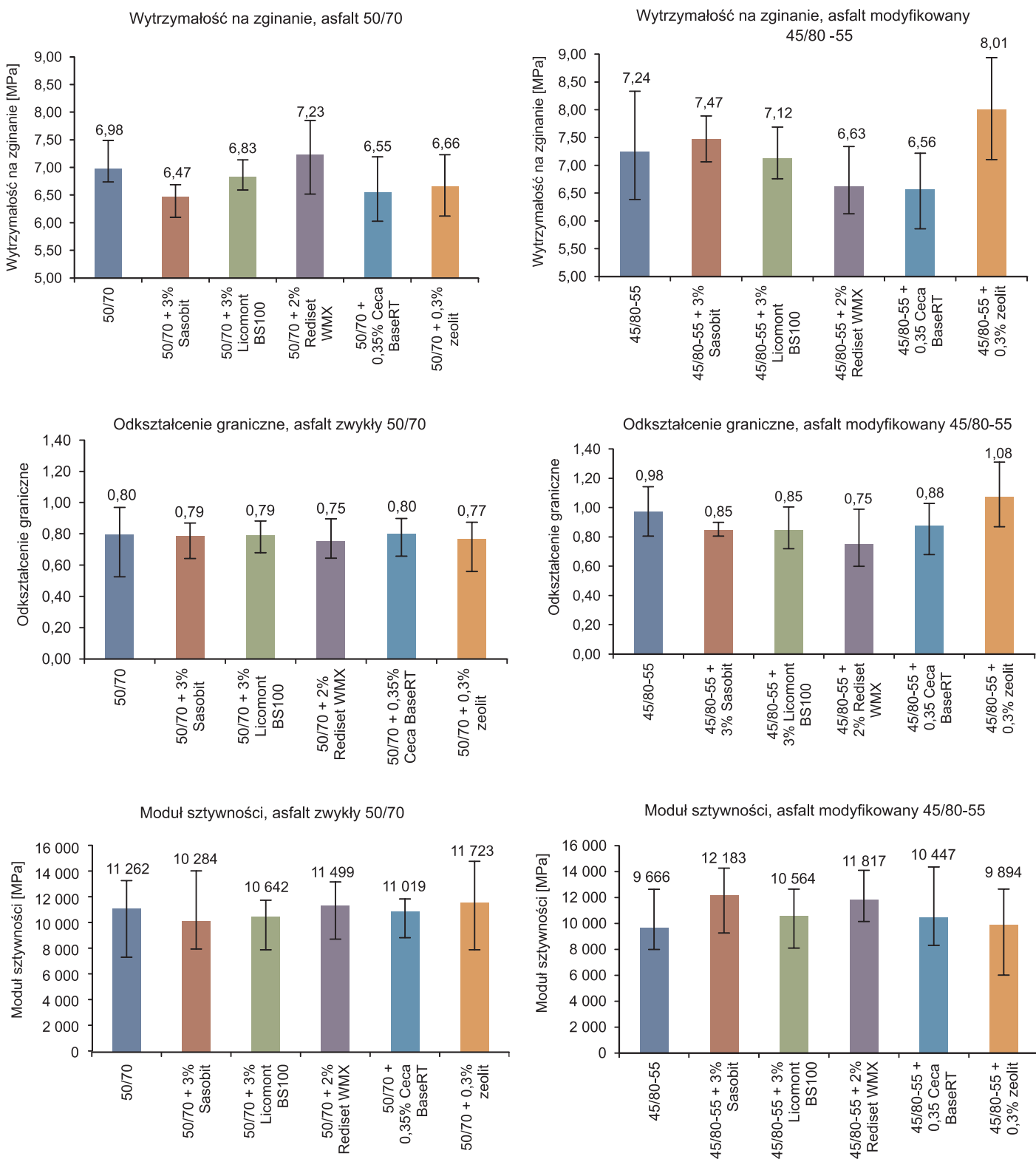
Przeprowadzone badania odporności na spękania niskotemperaturowe nie wykazały pogorszenia właściwości niskotemperaturowych, ale nie pozwoliły także na jednoznaczne wykluczenie ryzyka powstania takich uszkodzeń. Zagadnienie to wymaga dalszych badań i zweryfikowania w warunkach rzeczywistych.

## Badania terenowe

Celem wykonania odcinka doświadczalnego oraz badań terenowych było zweryfikowanie dotychczas zdobytych do-

świadczeń z mieszankami zawierającymi dodatki obniżające temperaturę produkcji, które były badane w poprzednim etapie w warunkach laboratoryjnych. Odcinek doświadczalny wykonano we współpracy z gdańskim oddziałem Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad, dzięki czemu było moż-

liwe jego wykonanie na zarządzanej sieci drogowej będącej w gestii GDDKiA. Harmonogram realizacji i charakter inwestycji prowadzonych przez gdański oddział GDDKiA określił lokalizację odcinka, tj. w obszarze łącznic Węzła Auchan, który stanowił część rozbudowywanego w tamtym okresie



Rys. 3. Wyniki badań wytrzymałości na zginanie, odkształcenia granicznego oraz modułu sztywności metodą zginania belki trójpunktowej w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$  betonów asfaltowych z dodatkami WMA i bez nich

Węzła Karczemki będącego skrzyżowaniem Obwodnicy Trójmiasta (droga ekspresowa S6) z ul. Kartuską (droga krajowa nr 7). Konstrukcja nawierzchni łącznic Węzła Auchan została zaprojektowana dla średniej kategorii ruchu KR3. Narzuciło to również rodzaj mieszanki mineralno-asfaltowej, która miała zostać wykorzystana do badań, tj. mieszankę mastyksu grysowego SMA o uziarnieniu 0/11 mm, opartą na asfalcie modyfikowanym 45/80-55, która występowała w projekcie konstrukcji nawierzchni jezdni Węzła Karczemki.

W trakcie przygotowań do realizacji badań terenowych uznano, że z powodu wielkości powierzchni przydzielonego obszaru jezdni na odcinek doświadczalny, spodziewane trudności przy dozowaniu niektórych dodatków obniżających temperaturę oraz zbliżające się niekorzystne warunki atmosferyczne (późna jesień), nie będzie możliwe wyprodukowanie i wbudowanie mieszanki ze wszystkimi dodatkami sprawdzanymi na etapie badań laboratoryjnych. W związku z tym, do wyprodukowania mieszanki mineralno-asfaltowej na odcinek doświadczalny wybrano trzy następujące środki z pięciu badanych w laboratorium:

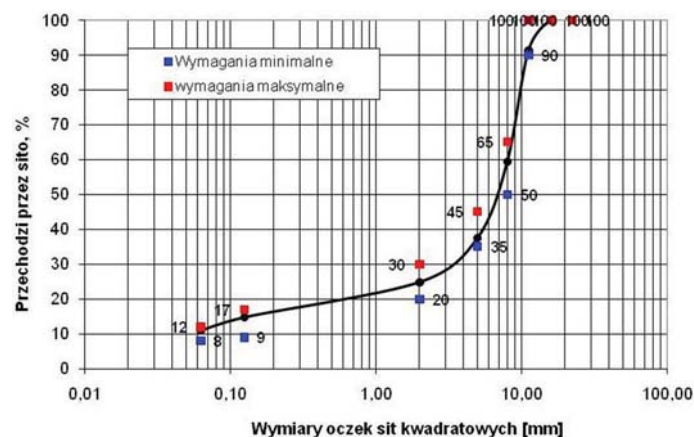
- odpowiednik środka Sasobit, dodawany automatycznie do mieszalnika otaczarni w formie połączonej z włóknem celulozowym – stabilizatorem mastyksu (nazwa handlowa produktu ViaTop Plus CT 40), przy czym na etapie badań laboratoryjnych stosowano czysty Sasobit dodawany w proporcji 3% w stosunku do masy asfaltu. Dodanie 0,5% ViaTopu Plus CT 40 do mieszanki mineralno-asfaltowej o zawartości 6,6% asfaltu jest praktycznie równoważne dodaniu 3% procent Sasobitu do masy asfaltu,
- Rediset WMX w postaci stałych granulek, dodawany w ilości 2% w stosunku do masy asfaltu, który planowano zadozować kilkanaście godzin przed rozpoczęciem produkcji wprost do zbiornika asfaltu na wytwórni,
- Ceca Base RT w postaci płynnej, dodawany ręcznie do wagi asfaltu w postaci płynnej w stosunku 0,35% do masy asfaltu.

Proporcje, w jakich dozowano poszczególne środki oparto na podstawie zaleceń ich producentów, jak podano w tabeli 2. Krzywą uziarnienia wykorzystanej mieszanki mastyksu grysowego SMA przedstawiono w tabeli 5 i na rysunku 4. Mieszanka ta spełniała wymagania dla ruchu KR3-4 według Wymaganiach Technicznych WT-2:2010. W tabeli 6 przedstawiono uzyskane parametry mieszanki z dodatkami WMA.

Tabela 5. Uziarnienie mieszanki SMA wykorzystanej na odcinku doświadczalnym

Mieszanka mineralno-asfaltowa:	SMA 11 45/80-55
<b>Uziarnienie (przesiew)</b>	
31,5	100,0
22,4	100,0
16,0	100,0
11,2	94,7
8,0	59,5
5,0	37,6
2,0	24,8
0,125	14,7
0,063	11,0
Zawartość asfaltu, %	6,6

Uzyskane na etapie opracowywania składu zawartości wolnych przestrzeni w próbkach Marshalla na poziomie 1,8–1,9% były nieznacznie niższe niż wymagane przez szczegółową specyfikację techniczną  $V_{min2,0}$  dla kategorii ruchu KR5-6.



Rys. 4. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej 0/11 mm do warstwy ścieralnej z mastyksu grysowego SMA zastosowanego na odcinku doświadczalnym

Tabela 6. Porównanie parametrów mieszanki mineralno-asfaltowej SMA przeznaczonej do wbudowania na odcinku doświadczalnym

Cecha	Wartość dla mieszanki z asfaltem i dodatkami:			Wymaganie wg ST D-05.03.05.B dla ruchu KR3-KR4
	45/80-55 + 3% Sasobit	45/80-55 + 2% Rediset WMX	45/80-55 + 0,35% Ceca Base RT	
Gęstość, $\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,435	2,435	2,435	–
Gęstość objętościowa, $\rho_b$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,390	2,391	2,388	–
Zawartość wolnych przestrzeni $V_m$ , [%]	1,9	1,8	1,9	$V_{min1,5} - V_{max3,5}$
Zawartość wolnych przestrzeni wypełnionych asfaltem VFB, [%]	89,2	89,4	88,9	–
Zawartość wolnych przestrzeni w mieszance mineralnej VMA, [%]	17,3	17,3	17,4	–
Odporność na deformację trwałe wg PN-EN 12697-22, metoda B w powietrzu, +60°C, 10 000 cykli				WTS <sub>AIR0,3</sub> PRD <sub>AIRDeKl.</sub>
	0,05 5,5	0,07 10,3	0,06 8,8	
Odporność na działanie wody i mrozu wg PN-EN 12697-12, przechowywania w +40°C, z jednym cyklem zamrażania, badanie w +25°C	90,5	92,8	97,2	ITSR <sub>90</sub>
Splywność lepiscza wg PN-EN 12697-18, p.5	0,1	0,1	0,1	D <sub>0,3</sub>

Na etapie przygotowania recepty zakładano jednakże wykonanie odcinków z dodatkami jedynie na obszarze łącznic, gdzie minimalny wymagany poziom wolnych przestrzeni wynosił 1,5% z uwagi na obowiązującą na ich obszarze kategorię ruchu KR3. Z tego powodu nie korygowano ponownie składu mieszanki w celu osiągnięcia zawartości wolnych przestrzeni 2,0%.

Prace nad odcinkiem doświadczalnym trwały w następujących dniach:

- 22 listopada 2011 r. – wbudowanie mieszanki ze środkiem Ceca Base RT oraz ViaTop Plus CT 40,
- 23 listopada 2011 r. – wbudowanie tradycyjnej mieszanki SMA bez środków (odcinek porównawczy),
- 24 listopada 2011 r. – wbudowanie mieszanki ze środkiem Rediset WMX.

Lokalizację odcinka doświadczalnego na planie orientacyjnym pokazano na rysunku 5, natomiast rozmieszczenie poszczególnych rodzajów mieszanki z danym środkiem pokazano na rysunku 6. Otrzymana mieszanka SMA (z wszystkimi dodatkami) wizualnie niczym nie różniła się od mieszanki z asfaltem bez dodatków, zaś wbudowywanie przebiegało bez jakichkolwiek utrudnień.

W trakcie układania mieszanki panowały następujące, zbliżone do siebie warunki otoczenia:

- 22 listopada (fragment z mieszankami z dodatkami Ceca Base RT oraz ViaTop Plus CT40) – temperatura powietrza 7°C, temperatura podłoża 4°C, brak opadów,
- 23 listopada (fragment z tradycyjną mieszanką referencyjną) – temperatura powietrza 4°C, temperatura podłoża 3°C, brak opadów,
- 24 listopada – temperatura powietrza 2°C, temperatura podłoża 3°C, brak opadów.

Z tego powodu produkcję mieszanki z dodatkami wykonywano – zgodnie z zasadami technologii WMA wymienionymi w pozycji pierwszej powyżej – w temperaturze jak w przypadku mieszanki normalnej, tj. 165 – 170°C.

Po wykonaniu odcinka doświadczalnego przeprowadzono badania na próbkach mieszanki wytworzonych w skali przemysłowej. Program badań na tym etapie obejmował sprawdzenie:

- odporności na działanie wody i mrozu,
- odporności na starzenie,
- odporności na deformacje trwałe,
- odporności na spękania niskotemperaturowe wg metod zastosowanych na etapie badań laboratoryjnych.

Ponadto przeprowadzono badania samej warstwy ścieralnej wykonanej z mieszanki zawierających dodatki WMA w zakresie: uzyskanych wskaźników zagęszczenia, zawartości wolnych przestrzeni oraz koleinowania.

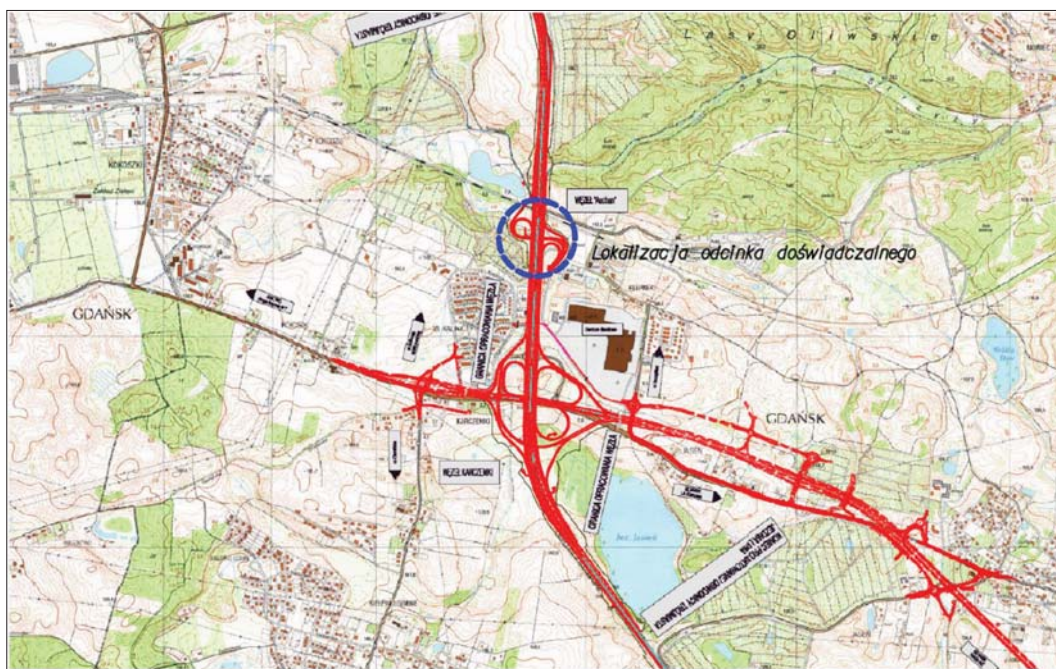
Przeprowadzone próby produkcji mieszanki mineralno-asfaltowych z dodatkami WMA wykazały, że przy obecnym poziomie technicznym produkcja mieszanki w tej technologii możliwa jest w aktualnie wykorzystywanych wytwórniach. Na odcinku doświadczalnym zastosowano mieszankę mastyksu grysowego SMA, która jest wrażliwa na błędy popełnione podczas projektowania jej składu, produkcji i wbudowywania. Dodanie do składu produkowanej mieszanki SMA środków WMA nie spowodowało jednak problemów technologicznych takich jak nadmierna spływność bądź powstawanie plam na wykonanej nawierzchni. Mieszanki SMA wytworzone w skali przemysłowej z dodatkami WMA nie odbiegały pod względem odporności na działanie wody i mrozu, starzenia, odporności na deformacje trwałe oraz odporności na spękania niskotemperaturowe od referencyjnej mieszanki SMA z czystym asfaltem modyfikowanym 45/80-55. Obserwacje wykonywane sukcesywnie na odcinku doświadczalnym pokazują, że nawierzchnia jest w bardzo dobrym stanie.

## Podsumowanie

W artykule przedstawiano wybrane aspekty programu badań mieszanki mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze produkcji, który został

zrealizowany w Katedrze Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej. Zarówno na etapie badań laboratoryjnych, jak i terenowych, uzyskano pozytywne wyniki, świadczące o możliwości zastosowania ocenianych dodatków w warunkach polskich i ich pozytywnym wpływie na niektóre parametry mieszanki mineralno-asfaltowych. Niezbędne jest natomiast prowadzenie dalszych prac naukowych w następujących kierunkach:

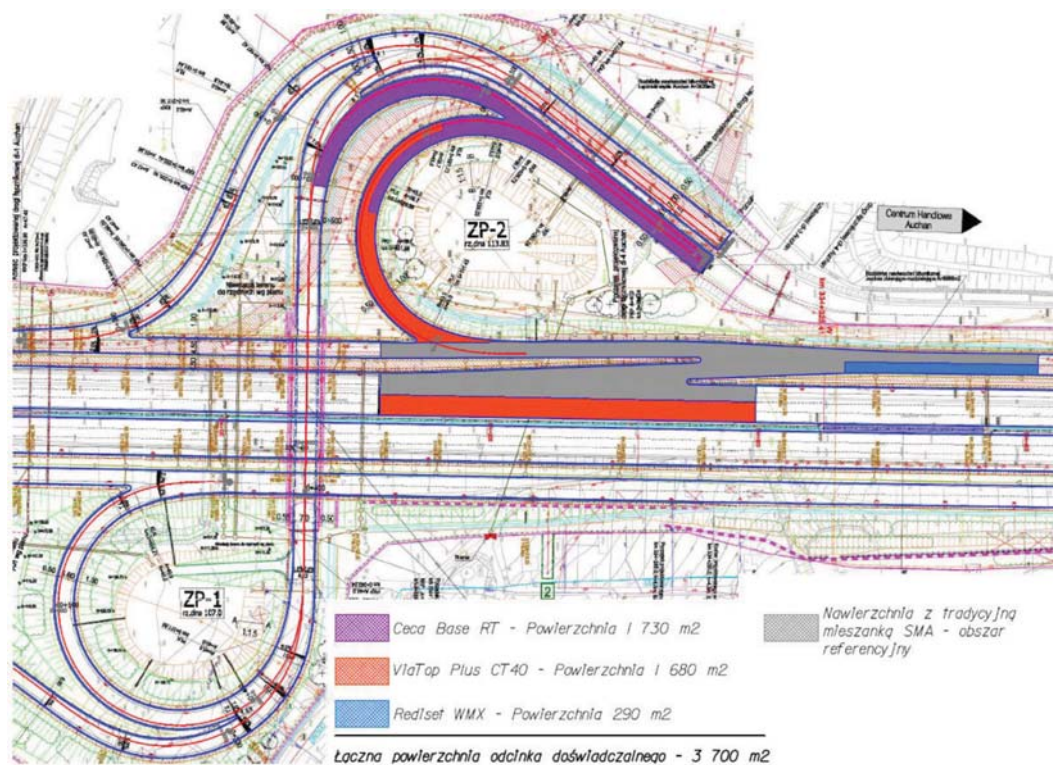
- konieczne jest opracowanie metody pomiarowej pozwalającej jednoznacznie określić w warunkach laboratoryjnych wpływ dodatków WMA na cha-



Rys. 5. Plan orientacyjny z zaznaczoną lokalizacją odcinka z mieszankami SMA z dodatkami WMA

rakterystyki zagęszczalności mieszank o obniżonej temperaturze produkcji i wbudowania oraz porównywać je z mieszankami tradycyjnymi;

- wymagane jest dalsze prowadzenie badań nad zachowaniem się mieszank mineralno-asfaltowych zawierających dodatki WMA w zakresie niskich temperatur. Zagadnienie to jest szczególnie ważne w polskich warunkach klimatycznych;
- konieczne jest prowadzenie badań pozwalających określić charakterystyki zmęczeniowe mieszank mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze produkcji i wbudowania i ewentualne różnice w stosunku do mieszank tradycyjnych.



Rys. 6. Rozmieszczenie poszczególnych rodzajów mieszank z różnymi dodatkami WMA w obrębie odcinka doświadczalnego

Artykuł niniejszy został oparty o wyniki badań wykonanych w ramach pracy doktorskiej Marcina Stienssa, która została zrealizowana na Politechnice Gdańskiej pod kierunkiem prof. Józefa Judyckiego. Autorzy niniejszego artykułu pragną podziękować Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad za pomoc w realizacji programu badawczego, a także wszystkim osobom zaangażowanym w realizację odcinka doświadczalnego z gdańskiego oddziału GDDKiA oraz z firm Budimex i Masfalt.

#### Bibliografia

- [1] T. Bennert, A. Maher, R. Sauber, *Influence of Production Temperature and Aggregate Moisture Content on the Initial Performance of Warm-Mix Asphalt*. Transp Res Rec J Transp Res Board 2011;2208:97–107. doi:10.3141/2208-13
- [2] T. Bennert, G. Reinke, W. Mogawer, K. Mooney, *Assessment of Workability and Compactability of Warm-Mix Asphalt*. Transp Res Rec J Transp Res Board 2011;2180:36–47. doi:10.3141/2180-05
- [3] R. Bonaquist, C.W. Jenks, C.F. Jencks, E.T. Harrigan, E.P. Delaney, E.M. Chafee, *NCHRP Report 691 – Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt*. Washington, D.C.: Transportation Research Board; 2011
- [4] J. D'Angelo, E. Harm, J. Bartoszek, G. Baumgardner, M. Corrigan, J. Cowsert, et al. *Warm-Mix Asphalt: European Practice*. Washington, D.C.: 2008
- [5] A.J. Hanz, A. Faheem, E. Mahmoud, H.U. Bahia, *Measuring Effects of Warm-Mix Additives*. Transp Res Rec J Transp Res Board 2011;2180:85–92. doi:10.3141/2180-10
- [6] G.C. Hurley, B.D. Prowell, *NCAT Report 05-04 – Evaluation of Aspha-Min Zeolite for Use in Warm Mix Asphalt*. Auburn: 2005
- [7] G.C. Hurley, B.D. Prowell, *NCAT Report 05-06 – Evaluation of Sasobit for Use in Warm Mix Asphalt*. Auburn: 2005
- [8] G.C. Hurley, B.D. Prowell, *NCAT Report 06-02 – Evaluation of Evotherm for Use in Warm Mix Asphalt*. Auburn: 2006
- [9] M. Iwański, A. Chomicz-Kowalska, K. Maciejewski, *Application of synthetic wax for improvement of foamed bitumen parameters*. Constr Build Mater 2015;83:62–9
- [10] M. Iwański, G. Mazurek, *Analysis of the effect of aging process on selected F-T wax modified bitumen*. 9<sup>th</sup> International Conference „Environmental Engineering”, Wilno: Vilnius Gediminas Technical University Press; 2014, p. 9
- [11] M. Iwański, G. Mazurek, *Optimization of the Synthetic Wax Content on Example of Bitumen 35/50*. Procedia Engineering 2013;57:414–23. doi:10.1016/j.proeng.2013.04.054
- [12] C.W. Jenks, C.F. Jencks, E.T. Harrigan, M. Adcock, E.P. Delaney, H. Freer, *NCHRP Report 714 – Special Mixture Design Considerations and Methods for Warm Mix Asphalt: A Supplement to NCHRP Report 673: A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary*. Washington, D.C.: Transportation Research Board; 2011
- [13] J. Judycki, *Analiza niektórych właściwości reologicznych drogowego betonu asfaltowego poddanego działaniu obciążeń statycznych*. Praca doktorska. Politechnika Gdańska, 1975
- [14] J. Król, P. Radziszewski, K. Kowalski, P. Świerzewski, *Właściwości niskotemperaturowe lepizszy asfaltowych z dodatkiem parafin nowej generacji*. 58 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Naukowego PZITB, Krynica Zdrój; 2012, p. 265–72
- [15] J. Król, *Efektywność stosowania dodatków parafinowych do asfaltów w technologii „na ciepło”*. Konferencja Asfalty na miarę XXI wieku, Kielce: 2012
- [16] Min-Yong Yoo, Seung-Ho Jeong, Ji-Yong Park, Nam-Ho Kim K-WK. *Low-Temperature Fracture Characteristics of Selected Warm-Mix Asphalt Concretes*. Transp Res Rec J Transp Res Board 2011;2:40–7
- [17] NAPA. 4th Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2009-2013 2014
- [18] PN-EN 12697-22 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszank mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 22: Koleinowanie
- [19] PN-S-96025 Drogi samochodowe i lotniskowe – Nawierzchnie asfaltowe
- [20] Pszczoła M. *Spękania niskotemperaturowe warstw asfaltowych nawierzchni*. Praca doktorska. Politechnika Gdańska, 2006