



ANNA CHOMICZ-KOWALSKA

Politechnika Świętokrzyska
akowalska@tu.kielce.pl



WŁADYSŁAW GARDZIEJCZYK

Politechnika Białostocka
w.gardziejczyk@pb.edu.pl



MATEUSZ M. IWAŃSKI

Politechnika Świętokrzyska
matiwanski@tu.kielce.pl

Właściwości betonu asfaltowego AC 8S wytwarzanego w obniżonej temperaturze w technologii asfaltu spienionego, w świetle wymagań WT-2 2010 i WT-2 2014

Jednym z istotniejszych podejmowanych obecnie środków ochrony środowiska w przemyśle jest ograniczenie energochłonności procesów technologicznych oraz redukcja związanych z nimi emisji m.in. szkodliwych substancji i gazów cieplarnianych. W drogownictwie do najbardziej energochłonnych procesów można zaliczyć produkcję mieszanek mineralno-asfaltowych w technologii „na gorąco” (HMA – *Hot Mix Asphalt*). Produkcja taka odbywa się w temperaturach dochodzących do około 160–180°C, w zależności od rodzaju zastosowanego asfaltu i typu mieszanki. Dotychczas w Polsce wdrożono do produkcji mieszanki mineralno-asfaltowe (mma) w technologii „na ciepło” (WMA – *Warm Mix Asphalt*), których temperatura wytwarzania względem technologii „na gorąco” jest niższa o około 20–30°C. Jednak dopiero zastosowanie technologii „na

lepszcza tworzącej się na powierzchni ziaren kruszywa [3, 5, 10, 19]. W przypadku trwałości nawierzchni istotne znaczenie ma również struktura wykonanej konstrukcyjnej warstwy asfaltowej charakteryzowana przez zawartość wolnych przestrzeni [7], która uzależniona jest głównie od urabialności mieszanki mineralno-asfaltowej w trakcie zagęszczania. Znaczące obniżenie temperatury wytwarzania i wbudowania mma w technologii HWMA oraz szczególne właściwości asfaltu w postaci spienionej skutkują tym, że nie jest możliwe całkowite wysuszenie kruszywa, ale pozostająca na powierzchni ziaren związana woda błonkowa odgrywa korzystną rolę, wpływając na polepszenie urabialności mieszanki [13]. W związku z tym, uzyskuje się znaczące ograniczenie energii w procesie suszenia kruszywa, które odbywa się w niższej temperaturze niż w procesie produkcji mma metodą HMA czy WMA. Jednakże taka modyfikacja procesu produkcji może wpłynąć negatywnie na formowanie się błonki asfaltowej na powierzchni ziaren kruszywa. Wbudowywanie mma w znacznie obniżonej temperaturze może ponadto skutkować niedostatecznym zagęszczeniem warstwy asfaltowej, w efekcie czego może podlegać przyspieszonym procesom destrukcji na skutek braku wymaganej odporności na oddziaływanie wody czy na powstawanie w niej deformacji trwałych. Jednym ze sposobów przeciwdziałania ewentualnym negatywnym skutkom jest stosowanie asfaltu spienionego o wysokich parametrach jakościowych, tj. o odpowiednio dużym wskaźniku ekspansji (WE) oraz długim okresie półtrwania piany asfaltowej (HL), który otrzymać można np. w wyniku modyfikacji asfaltu przed spienieniem za pomocą dodatku niskowiskozowego – wosku syntetycznego Fischera-Tropscha (FT) [8]. Zastosowanie tego typu modyfikatora pozwala nie tylko na poprawę urabialności i zagęszczalności mma, ale jego korzystny wpływ obserwowany jest również w warunkach eksploatacyjnych, dzięki poprawie charakterystyk reologicznych lepszycza, co bezpośrednio przekłada się na poprawę właściwości warstwy asfaltowej.

Odnosząc się do krajowych dokumentów technicznych, Wymagania Techniczne z 2014 r. dopuszczają stosowanie asfaltu spienionego w celu ograniczenia ilości emisji gazów cieplarnianych oraz obniżenia temperatury mieszania składników mieszanki mineralno-asfaltowej i poprawienia jej urabialności [23]. Wspomniany dokument zaleca, aby w pierwszej kolejności lepszycza w postaci asfaltu spienionego stosować do wykonania dolnych warstw asfaltowych (podbudowy i wiążącej), nie wykluczając jednak możliwości

półciepło” (HWMA – *Half Warm Mix Asphalt*) wytwarzania betonu asfaltowego z asfaltem spienionym pozwala znacząco obniżyć temperatury technologiczne (wytwarzania, zagęszczania) nawet o około 60°C. W związku z redukcją temperatur technologicznych, nawierzchnie asfaltowe wykonane z tego rodzaju betonu asfaltowego mogą charakteryzować się zmniejszoną trwałością i odpornością na czynniki klimatyczne (np. wodę i niską temperaturę). Mechanizm oddziaływania wody na mieszankę mineralno-asfaltową (nawierzchnię asfaltową) jest bardzo złożony i uzależniony od wielu czynników, do których należy zaliczyć: rodzaj i pochodzenie kruszywa [1, 17], rodzaj asfaltu [3, 15], obecność dodatków wpływających korzystnie na warunki adhezji i spowalniających starzenie asfaltu (również w istotny sposób wpływających na grubość błonki

użycia go również do warstwy ścieralnej. Prace badawcze realizowane od kilku lat w Politechnice Świętokrzyskiej wskazują na możliwość stosowania tej technologii przy produkcji mma do warstwy ścieralnej.

W artykule przedstawiono m.in. wyniki oceny wrażliwości na działanie wody z jednym cyklem zamrażania mma produkowanej w technologii HWMA z asfaltem spienionym oraz referencyjnej wytworzonej w technologii HMA na podstawie wskaźnika *ITSR* wyznaczonego zgodnie z krajowymi dokumentami technicznymi [22, 23]. W ramach opisywanych prac dokonana została również analiza wpływu zawartości wolnej przestrzeni na wybrane parametry wytrzymałościowe. Ponadto przedstawiono wyniki analizy wrażliwości mieszanek niskotemperaturowych poddawanych obciążeniom dynamicznym na zmiany temperatury, która może być wykorzystana do porównawczej oceny jakości uzyskanej mieszanki względem technologii tradycyjnej.

Obecnie przedsiębiorstwa drogowe na terenie kraju wyposażone są już w specjalistyczny sprzęt, tj. w przystawki do spieniania asfaltu a nawet w otaczarnie o pracy ciągłej z modułem do spieniania asfaltu, pozwalające wdrażać innowacyjne a nawet pionierskie rozwiązania w zakresie produkcji mma. Wprowadzenie w Polsce do wykonawstwa drogowego technologii HWMA z asfaltem spienionym pozwoli na ochronę środowiska poprzez wyraźną redukcję emisji do atmosfery szkodliwych substancji powstających w tradycyjnej technologii HMA oraz ograniczy zużycie nieodnawialnych źródeł energii podczas wytwarzania mieszanki mineralno-asfaltowej [6, 20, 21].

Cel i zakres badań

Celem badań laboratoryjnych było porównanie mieszanek betonu asfaltowego wytwarzanego w technologii HWMA z asfaltem spienionym z mieszanką produkowaną w technologii „na gorąco” na podstawie wybranych właściwości. Analizy wpływu technologii wytwarzania („na gorąco”, „na półciepło”) mieszanek AC 8S dokonano na podstawie oznaczeń następujących parametrów, zgodnie z procedurami badawczymi przedstawionymi w Wymaganiach Technicznych WT-2 2010 i WT-2 2014:

- zawartość wolnych przestrzeni (V_m) wg PN-EN 12697-8:2005 [24],
- odporność na działanie wody (z jednym cyklem zamrażania) zgodnie z *Instrukcjami badawczymi* stanowiącymi Załącznik 1 do WT-2 2010 [22] oraz WT-2 2014 [23] oraz wg PN-EN 12697-12:2008 [25], na podstawie oceny:
 - wytrzymałości na pośrednie rozciąganie dla grupy próbek z „zestawu mokrego” ($ITS_{w(2010/2014)}$) oraz z „zestawu suchego” ($ITS_{d(2010/2014)}$),
 - wskaźnika wytrzymałości na rozciąganie pośrednie ($ITSR_{(2010/2014)} = ITS_w / ITS_d \cdot 100$),

oraz na podstawie wrażliwości temperaturowej, tj. dynamiki zmian modułów sztywności (S_m), badanych w schemacie pośredniego rozciągania (IT-CY) w szerokim zakresie temperatur (-10°C , 0°C , 10°C , 25°C) oznaczanych na próbkach z mieszanek betonu asfaltowego zgodnie z normą PN-EN 12697-26:2012 (załącznik C) [26].

Projekt mieszanki AC 8S

Ze względu na niskie temperatury technologiczne, mieszanki produkowane w technologii HWMA narażone są na niedogęszczenie, dlatego do badań wytypowano mieszankę AC 8S, która zgodnie z [22, 23] klasyfikowana jest jako mieszanka drobnoziarnista. Pod względem uziarnienia, rodzaju użytych kruszyw oraz rodzaju i ilości lepiszcza asfaltowego, skład mieszanki referencyjnej zaprojektowany został na podstawie krajowych Wymagań Technicznych WT-2 2010 i WT-2 2014 stawianych mieszankom betonu asfaltowego do warstwy ścieralnej nawierzchni obciążonej ruchem KR1–KR2.

W badaniach laboratoryjnych do mieszanki betonu asfaltowego wytwarzanej w tradycyjnej technologii „na gorąco” (AC_{HMA}) zastosowano asfalt drogowy rodzaju 50/70. Do mieszanek produkowanych w technologii HWMA (AC_{HWMA}) dozowano pianę asfaltową otrzymaną z lepiszcza 50/70 oraz 50/70 zmodyfikowanego przed procesem spieniania woskiem syntetycznym *FT* w ilości 2,5% w stosunku do masy lepiszcza ($AC_{HWMA+FT}$), który pozwala na wytwarzanie betonu asfaltowego w obniżonej temperaturze oraz wpływa on na poprawę odporności na powstawanie deformacji trwałych, odporności na oddziaływanie wody oraz poprawia warunki adhezji lepiszcza do kruszywa w mieszankach produkowanych w technologii WMA [4, 14]. Optymalna zawartość wody spieniającej wynosiła 2,5% w przypadku asfaltu 50/70 oraz 2,0% w przypadku asfaltu z dodatkiem wosku syntetycznego. Zastosowanie środka obniżającego lepkość lepiszcza przed procesem spienienia umożliwiło ograniczenie dozowania wody spieniającej przy zachowaniu korzystnych parametrów spieniania (ekspansji i okresu półtrwania). Zbyt duża ilość wody aplikowanej do lepiszcza wpływa negatywnie na obniżenie temperatury powstałej piany asfaltowej i szybką utratę jej stabilności (tj. skrócenie okresu półtrwania). Korzystny wpływ wosku syntetycznego na wyniki podstawowych badań asfaltu 50/70 oraz na właściwości fizyczne piany asfaltowej szczegółowo opisano w publikacjach [8, 9]. Badania próbek z mieszanek z asfaltem spienionym drogowym zwykłym oraz zmodyfikowanym woskiem *FT*, formowanych w niższej temperaturze (95°C) miały na celu określenie zasadności stosowania tego typu środka niskowiskozowego. Nadrzędnym celem było zbadanie możliwości uzyskania referencyjnego zagęszczenia przez mieszanki produkowane w technologii HWMA.

Wyniki badań wybranych podstawowych właściwości oraz cech fizycznych piany asfaltowej w przypadku asfaltu 50/70 oraz asfaltu 50/70 zmodyfikowanego woskiem syntetycznym *FT* zestawiono w tabeli 1.

Skład ramowy mieszanki mineralnej (mm) i mieszanki mineralno-asfaltowej zestawiono w tabeli 2. Krzywą uziarnienia zaprojektowanej mieszanki mineralnej betonu asfaltowego przedstawiono na rysunku 1, natomiast tabela 3 zawiera wymagania w zakresie wybranych cech fizycznych i właściwości mieszanek AC 8S w świetle stosowanych dokumentów odniesienia wraz z uzyskanymi rezultatami badań.

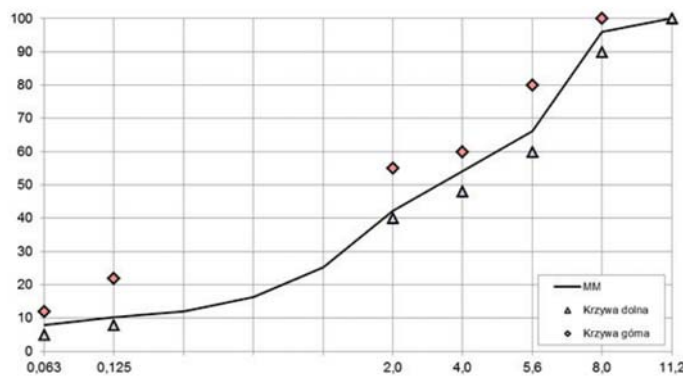
Tabela 1. Właściwości asfaltu 50/70 oraz asfaltu 50/70 z zawartością 2,5% wosku FT

Właściwość	Jedn.	Metoda badania	Lepiszczce	
			50/70	50/70+2,5FT
Przed procesem spieniania				
Penetracja w 25°C	0,1 mm	PN-EN 1426	65,9	44,3
Temperatura mięknięcia wg PiK	°C	PN-EN 1427	50,4	63,3
Temperatura tężliwości wg Fraassa	°C	PN-EN 12593	-15,1	-12,8
Zakres plastyczności	°C	-	65,5	76,1
Indeks penetracji	-	PN-EN 12591	-0,6	1,4
Lepkość dynamiczna w 60°C	Pa·s	PN-EN 13702-2	372,9	613,7
Lepkość dynamiczna w 90°C	Pa·s	PN-EN 13702-2	14,0	16,9
Lepkość dynamiczna w 135°C	Pa·s	PN-EN 13702-2	0,649	0,522
Po procesie spieniania				
Wskaźnik ekspansji	-	[8]	11	18
Czas połowicznego rozpadu	s	[8]	10	18
Optymalna zawartość wody spieniającej	%	[8]	2,5	2,0

Tabela 2. Skład mieszanki betonu asfaltowego AC 8S

Materiały	mm [% m/m]	mma [% m/m]
Kruszywo wypełniające (wapienne)	7,0	6,6
Kruszywo drobne łamane o ciągłym uziarnieniu 0/2 mm (wapienne)	37,0	34,8
Kruszywo grube 2/5 mm (gabro)	16,0	15,1
Kruszywo grube 4/8 mm (gabro)	40,0	37,7
Asfalt drogowy 50/70 ¹⁾ / asfalt drogowy 50/70 modyfikowany woskiem FT ²⁾	-	5,8
Suma	100	100

¹⁾ lepiszcze stosowane w mieszance AC_{HMA} i AC_{HWMA}
²⁾ lepiszcze stosowane w mieszance AC_{HWMA+FT}



Rys. 1. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej AC 8S wraz z punktami granicznymi spełniająca wymagania wg WT-2 2010 i WT-2 2014

Tabela 3. Wyniki oraz wymagania wobec mieszanki AC 8S wg WT-2 2010 i WT-2 2014 dla KR1-KR2

Właściwość	Wymagania		Rodzaj mma		
	WT-2 2010	WT-2 2014	AC _{HMA}	AC _{HWMA}	AC _{HWMA+FT}
Zawartość asfaltu, [%]	$B_{\min} = 5,8$ $B_{\min(\text{korekt.})} = (B_{\min} \cdot \alpha) + 0,3 = 5,7$	$B_{\min} = 6,0$ $B_{\min(\text{korekt.})} = (B_{\min} \cdot \alpha) = 5,6$	5,8		
Wolne przestrzenie wypełnione lepiszczem, [%]	$VFB_{\min 75}$ $VFB_{\max 93}$	$VFB_{\min 75}$ $VFB_{\max 93}$	84,4	78,8	83,8
Zawartość wolnych przestrzeni w mieszance mineralnej, [%]	$VMA_{\min 14}$	$VMA_{\min 14}$	16,9	17,9	17,0

B_{\min} – minimalna zawartość asfaltu, $B_{\min(\text{korekt.})}$ – minimalna zawartość asfaltu po korekcie, ρ_a – gęstość mieszanki mineralnej, $\rho_a = 2,844 \text{ Mg/m}^3$, α – współczynnik korekcyjny, $\alpha = 2,650/\rho_a = 0,932$

Próbki wykonane z mieszanki referencyjnej (AC_{HMA}) zagęszczano w temperaturze 140°C, natomiast próbki z mieszanek AC_{HWMA} i AC_{HWMA+FT} w temperaturze 95°C. Temperatura produkcji mma była wyższa od temperatury ich zagęszczania o 10°C i 20°C odpowiednio w przypadku technologii HWMA i HMA – w celu odzwierciedlenia rzeczywistych warunków ich produkcji i wbudowywania. W technologii „na półciepło” dynamika spadku temperatury mieszanki względem technologii „na gorąco” jest niższa,

co jest spowodowane mniejszą różnicą temperatur między mieszanką mineralno-asfaltową a otoczeniem [16]. Dlatego też, przyjęta w badaniach różnica między temperaturami wytwarzania i zagęszczania mieszanek z asfaltem spienionym była mniejsza.

Próbki do badań wykonano zgodnie z normą PN-EN 12697-30:2012 stosując metodę zagęszczania przez ubijanie. Do oznaczenia parametrów V_m i S_m zagęszczanie prowadzono w ubijaku Marshalla stosując 50 uderzeń na

stronę, natomiast do badań wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, a następnie obliczenia wskaźników *ITSR* próbki zagęszczano stosując 35 uderzeń na stronę. Wszystkie parametry oznaczano na 9 próbkach spełniających założone wymagania w zakresie cech fizycznych i geometrycznych.

Wyniki badań i ich analiza

Właściwości fizyczne i mechaniczne

• Zawartość wolnych przestrzeni

Miarą zagęszczenia próbek z mma jest zawartość wolnych przestrzeni. Odpowiedni poziom tego parametru w próbkach laboratoryjnych oraz w wykonanej warstwie asfaltowej odgrywa znaczącą rolę w zapewnieniu odporności na działanie czynników ruchowych i klimatycznych. W technologii HWMA z asfaltem spienionym, z uwagi na znacząco niższe temperatury technologiczne należy dążyć do uzyskania optymalnego zagęszczenia w celu zabezpieczenia warstwy asfaltowej przed destrukcyjnym wnikaniem wody.

W tabeli 4 przedstawiono średnie zawartości wolnych przestrzeni w badanych próbkach betonu asfaltowego zagęszczanego w temperaturze 140°C i 95°C wraz podstawowymi wielkościami statystycznymi.

Analizując powyższe dane można stwierdzić, że największą średnią zawartością wolnych przestrzeni ($V_m=3,8\%$) charakteryzowała się mieszanka betonu asfaltowego wytworzona w technologii HWMA z asfaltem spienionym zawierającym lepiszcze 50/70. Natomiast zawartość wolnych przestrzeni w betonie asfaltowym wytwarzanym w technologii HWMA z asfaltem spienionym zmodyfikowanym woskiem syntetycznym FT była porównywalna do mieszanki referencyjnej produkowanej w klasycznej technologii HMA, a różnica wyniosła zaledwie 0,1%. Znacząca poprawa urabialności i zagęszczalności mieszanki z asfaltem spienionym była efektem zastosowania wosku FT jako modyfikatora lepiszcza, co umożliwiło uzyskanie zagęszczenia na poziomie mieszanki referencyjnej, mimo znacznie obniżonej temperatury formowania próbek. Wyniki te są szczególnie interesujące, ponieważ lepiszcze modyfikowane dodatkiem wosku FT i asfalt bazowy w temperaturze, w której zagęszczane były mieszanki niskotemperaturowe, charakteryzują się zbliżonymi lepkościami dynamicznymi. Nie można zatem wytłumaczyć poprawy urabialności mieszanki obniżeniem lepkości lepiszcza. Na problem ten zwracali uwagę inni badacze [2]. Odnosząc się do wymagań [22, 23], jedynie w mieszance AC_{HWMA} z asfaltem spienionym bez użycia modyfikatora FT zawartość wolnych przestrzeni w próbkach nie mieściła się w dopuszczalnych granicach, tj. od 1% do 3%.

Tabela 4. Podstawowe wielkości statystyczne wyznaczone dla cechy V_m

Zmienna	Rodzaj mma	Średnia	N	Min	Max	Odch. Std.	Wsp. zmienności
V_m [%]	AC _{HMA}	2,54	9	0,17401	2,8	0,174005	6,838629
	AC _{HWMA}	3,79	9	0,21474	4,0	0,214735	5,667492
	AC _{HWMA+FT}	2,66	9	0,18105	2,9	0,181046	6,817645

• Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie oraz wskaźniki *ITSR* mieszanek AC 8S

Odporność na działanie wody mieszanek betonu asfaltowego stanowi bardzo ważny parametr w zapewnieniu trwałości warstw asfaltowych w warunkach klimatycznych występujących w Polsce, gdzie nawierzchnia poddawana jest nasączeniu wodą oraz wielokrotnym cyklem zamrażania i rozmrażania. Ocenę wrażliwości na działanie wody przeprowadzono zgodnie z dokumentami technicznymi [22, 23] stosowanymi obecnie w naszym kraju, aby dodatkowo oszacować wpływ stosowanej procedury badawczej na uzyskiwane wartości badanych parametrów mechanicznych.

Wykorzystywane w Polsce metody badań odporności na oddziaływanie wody bazują na amerykańskiej procedurze AASHTO T 283-89: *Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage*. Przed przyjęciem do stosowania Norm Europejskich wykorzystywano procedurę badawczą oznaczania wrażliwości mma na działanie wody zgodną z ww. normą, która nie różniła się znacząco od tej opisaną później w WT-2 2010. W pierwszym wydaniu Wymagań Technicznych, tj. w WT-2 2008 *Nawierzchnie Asfaltowe*, występował jedynie zapis o konieczności stosowania cyklu zamrażania, bez sprecyzowania procedury kondycjonowania próbek. Również norma PN-EN 12697-12:2004 nie zawierała opisu procedury i wymagań co do procesu zamrażania i przechowywania próbek, a jedynie dopuszczała jej przeprowadzenie. Następnie w Instytucie Badań Dróg i Mostów opracowano metodę badania zgodną z wymaganiami normy EN 12697-12:2004 (w późniejszym czasie również zgodną z EN 12697-12:2008) z zastosowaniem ujednoliconego cyklu zamrażania, który był zaadoptowany bezpośrednio z normy AASHTO (tj. cykl zamrażania z tzw. rozmrażaniem szokowym, gdzie szok termiczny następuje w momencie, gdy próbki o temperaturze -18°C umieszczone są w łaźni wodnej o temperaturze 60°C). Szczegółowa procedura badawcza oznaczenia wrażliwości na oddziaływanie wody przedstawiona została w formie załącznika do WT-2 2010 a następnie WT-2 2014. Stwierdzono, iż procedura badawcza opisana w WT-2 2010 jest najbardziej wymagającą z dotychczas stosowanych w naszym kraju. Postępowanie według zapisów WT-2 2010 opiera się na zastosowaniu najbardziej niekorzystnych warunków kondycjonowania próbek według PN-EN 12697-12:2008 oraz AASHTO T 283-89. W metodzie amerykańskiej próbki po nasączeniu próżniowym wkładane są bezpośrednio do zamrażarki, a następnie są rozmrażane przez 24 godziny w 60°C. W przypadku metody europejskiej z cyklem mrożenia wg WT-2 2010 dodano cykl kondycjonowania w wodzie w 40°C przed procedurą mrożenia i rozmrażania w ciepłej wodzie. Z tego względu wyniki oznaczeń wykonywanych przy zastosowaniu metody wg WT-2 2010 są niższe aniżeli w przypadku oryginalnej metody AASHTO [18]. Procedura badania wodoodporności z jednym cyklem zamrażania wprowadzona w WT-2 2010 była w związku z tym niejednokrotnie krytykowana

jako zbyt rygorystyczna. Stosowane wcześniej mieszanki o znanej odporności na oddziaływanie wody nie spełniały wymagań nowej procedury badawczej wg WT 2010. Zebrane doświadczenia spowodowały wprowadzenie w 2014 roku zmian, dotyczących obniżenia temperatury na ostatnim etapie kondycjonowania z 60°C do 25°C, ograniczając tym samym szok termiczny jakiemu były poddawane próbki z mma w czasie procedury przenoszenia ich z komory klimatycznej o temperaturze $-18\pm 3^{\circ}\text{C}$ do łaźni wodnej o temperaturze dodatniej.

W Polsce, odpowiednio wysoka wartość wskaźnika *ITSR* jest wymaganiem stawianym wobec mma typu: AC, AC-WMS, SMA, PA oraz BBTM, które zaprojektowano i wytworzono zgodnie z normami europejskimi. W krajowych dokumentach aplikacyjnych opracowanych w oparciu o te normy, wymagania wobec kategorii *ITSR* zróżnicowane są w zależności od warstwy konstrukcyjnej nawierzchni na jaką dana mma jest przeznaczona. W przypadku warstwy podbudowy, wartość tego parametru wynosić powinna co najmniej 70%, a warstwy wiążącej 80%. Natomiast w przypadku warstwy ścieralnej 90%.

Spośród krajów regionu europejskiego takich jak Belgia, Finlandia, Francja, Hiszpania, Holandia, Niemcy, Norwegia, Słowacja Słowenia, Szwecja czy Turcja, Polska ma jedno z najbardziej rygorystycznych wymagań co do wskaźników *ITSR* dotyczących poszczególnych warstw asfaltowych, a ponadto stosuje bardzo ostrą procedurę badania wrażliwości mma na oddziaływanie wody z jednym cyklem zamrażania [18]. Poza Polską, tylko w Turcji (AASHTO T283) i Finlandii (10 cykli zamrażania/rozmarzania) w tej procedurze stosowane są cykle zamrażania. W innych krajach, nawet o zbliżonym klimacie do tego występującego w Polsce (jak np. Słowacja, Niemcy), przy wyznaczaniu wskaźnika *ITSR* nie stosuje się cyklu zamrażania [18]. Wobec braku innych odgórnych zaleceń w sprawie procedury badań wrażliwości mma na działanie wody oraz pierwszorzędowego znaczenia tej charakterystyki mma dla trwałości nawierzchni, zdaniem szeregu naukowców zasadne jest zwiększenie liczby cykli zamrażania/rozmarzania [11, 12] w jej ocenie w przypadku polskich warunków klimatycznych.

W badaniach przedstawionych w niniejszym artykule zastosowano procedury badawcze wykorzystywane w Polsce, które zawarte są w Załączniku 1 do dokumentów aplikacyjnych wykonawstwa nawierzchni asfaltowych: WT-2 2010 pt.

Określenie odporności próbek mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody i mrozu, oraz w WT-2 2014 pt. Określenie wrażliwości próbek mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody i mrozu.

W tabeli 5 przedstawiono średnie wartości wytrzymałości w pośrednim rozciąganiu badanych próbek betonu asfaltowego bez kondycjonowania (ITS_d) oraz po kondycjonowaniu ($ITS_{w(2010)}$, $ITS_{w(2014)}$) oznaczone zgodnie z *Instrukcją badawczą* opisaną w *Załączniku 1* do WT-2 2010 i WT-2 2014 wraz z podstawowymi wielkościami statystycznymi. Dodatkowo wyniki przedstawiono w formie graficznej na rysunku 2, natomiast rysunek 3 prezentuje obliczone wartości wskaźników odporności na działanie wody (*ITSR*).

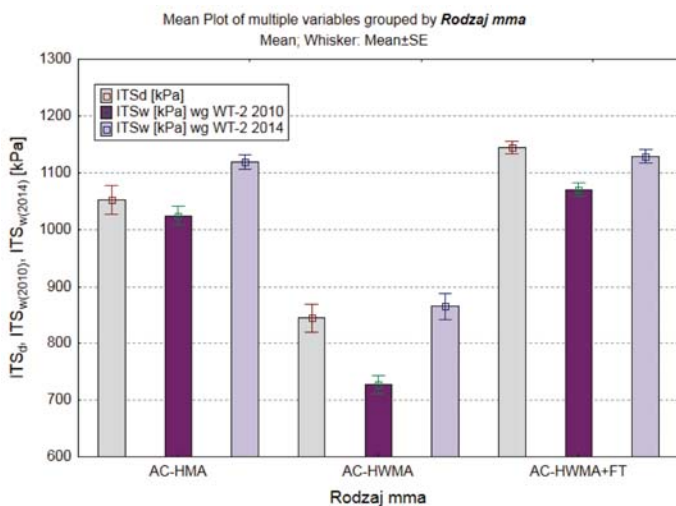
Badania wytrzymałości w schemacie pośredniego rozciągania betonu asfaltowego potwierdziły zależności ujawnione w badaniu zawartości wolnych przestrzeni. Największą wytrzymałością na pośrednie rozciąganie po procesie kondycjonowania w warunkach powietrzno-suchych („zestaw suchy”), a także po kondycjonowaniu symulującym oddziaływanie wody (niezależnie od stosowanej procedury badawczej) charakteryzował się beton asfaltowy wytwarzany w technologii HWMA z asfaltem spienionym modyfikowanym woskiem *FT*. Nieznacznie niższe wartości badanych parametrów mechanicznych średnio o około 6% zanotowano w przypadku mieszanki produkowanej w technologii HMA. Beton asfaltowy zagęszczany w temperaturze 95°C bez dodatku wosku syntetycznego uzyskał wartości wszystkich parametrów (ITS_s , $ITS_{w(2010)}$, $ITS_{w(2014)}$) na najniższym poziomie.

Największą odpornością na oddziaływanie wody (*ITSR*) charakteryzował się beton asfaltowy produkowany z wykorzystaniem klasycznej metody „na gorąco”, zagęszczany w temperaturze 140°C. Porównywalnie korzystne (> 90%) wartości wskaźnika *ITSR* zanotowano w przypadku mieszanki wytwarzanej w obniżonej temperaturze z asfaltem spienionym modyfikowanym woskiem *FT*. Modyfikacja lepiszcza dodatkiem wosku poskutkowała zmniejszeniem zawartości wolnych przestrzeni w próbkach uformowanych z mieszanki $AC_{HWMA+FT}$, co jednocześnie wpłynęło korzystnie na uzyskanie zadowalającego wskaźnika wodoodporności ($ITSR=93,4\%$), którego wartość była wyższa o ok. 7% względem AC_{HWMA} , tj. bez dodatku wosku syntetycznego *FT*. Korzystny wpływ na poprawę urabialności i zagęszczalności, a więc i w efekcie wrażliwości na działanie wody

Tabela 5. Podstawowe wielkości statystyczne wyznaczone dla parametrów: ITS_d , $ITS_{w(2010)}$ i $ITS_{w(2014)}$

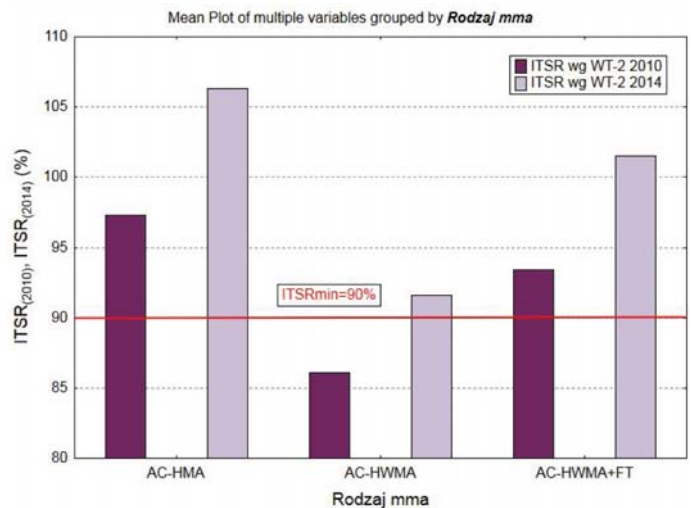
Zmienna	Rodzaj mma	Średnia	N	Min	Max	Odch. std.	Wsp. zmienności
ITS_d [kPa]	AC_{HMA}	1052,350	9	945,76	1169,11	75,57764	7,181794
	AC_{HWMA}	1024,011	9	928,80	1107,90	51,27174	5,006951
	$AC_{HWMA+FT}$	1118,734	9	1055,20	1179,49	38,65593	3,455328
$ITS_{w(2010)}$ [kPa]	AC_{HMA}	844,704	9	759,20	970,80	73,02260	8,644759
	AC_{HWMA}	727,622	9	663,30	827,90	48,98150	6,731721
	$AC_{HWMA+FT}$	774,057	9	736,10	801,22	20,28012	2,657998
$ITS_{w(2014)}$ [kPa]	AC_{HMA}	1144,847	9	1094,88	1187,01	33,26479	2,905610
	AC_{HWMA}	1069,511	9	1013,70	1111,10	36,07965	3,373471
	$AC_{HWMA+FT}$	1161,823	9	1114,50	1198,10	30,88122	2,619977

a)



Rys. 2. Wytrzymałości na rozciąganie pośrednie próbek z „zestawu suchego” (ITS_d) oraz po procesie pielęgnacji wg WT-2 2010 ($ITS_{w(2010)}$) oraz wg WT-2 2014 ($ITS_{w(2014)}$) mieszanek AC 8S w aspekcie technologii ich wytwarzania

b)



Rys. 3. Wskaźniki odporności na działanie wody $ITSR$ wg WT-2 2010 ($ITSR_{w(2010)}$) oraz wg WT-2 2014 ($ITSR_{w(2014)}$) mieszanek AC 8S w aspekcie technologii ich wytwarzania

betonu asfaltowego $AC_{HWMA+FT}$ zapewnił wosk FT , którego zastosowanie do asfaltu obniżyło lepkość w temperaturach technologicznych oraz poprawiło pienistość lepiszcza 50/70 (zwiększona objętość piany i wydłużenie jej okres półtrwania [8, 9]). Natomiast w temperaturach eksploatacyjnych obecność wosku FT powoduje zmiany w strukturze asfaltu wpływając na zwiększenie lepkości i sztywności a w efekcie wpływa na wzrost odporności na powstawanie deformacji trwałych w nawierzchni [8]. W przypadku tej mieszanki zaobserwowano również najmniejsze rozrzuty wyników składowych wskaźników $ITSR$, tj. ITS_d , $ITS_{w(2010)}$ i $ITS_{w(2014)}$, a wartości współczynników zmienności w przypadku wszystkich cech mechanicznych nie przekroczyły 3,5%. Wpływ na wartość badanych składowych $ITSR$ może mieć również interakcja charakterystyki procedury kondycjonowania próbek tj. szczególnie duży gradient temperatury oraz wysoka temperatura $60^\circ C$ w łaźni wodnej, oraz innych czynników, do których zaliczyć można: właściwości kruszywa (m.in. nasiąkliwość, mrozoodporność), rodzaj i zawartość asfaltu, obecność środków adhezyjnych, przyczepność asfaltu do kruszywa, a także typ i właściwości wykonanej warstwy asfaltowej (m.in. gęstość, zawartość wolnych przestrzeni). W opisywanym przypadku identyfikacja czynników mających wpływ na stwierdzone wysokie wartości obliczonych wskaźników $ITSR$ jest zadaniem złożonym. Badania na większej liczbie próbek wykonanych z mma różniących się ilościowo i jakościowo materiałami składowymi mogą wskazywać kierunek w znalezieniu przyczyn występowania tego zjawiska. Z dużą dozą prawdopodobieństwa stwierdzić można, iż przy większej liczbie cykli zamrażania/rozmarzania próbek nie wystąpiłby wzrost wytrzymałości w pośrednim rozciąganiu po oddziaływaniu wody i niskiej temperatury (względem próbek kondycjonowanych w stanie powietrzno-suchym), co miało miejsce po jednym cyklu zamrażania.

Należy zaznaczyć, że mieszanka AC_{HWMA} nie spełniła wymagań w zakresie odporności na działanie wody w od-

niesieniu do zapisów wytycznych WT-2 2010, ponieważ wartość wskaźnika $ITSR$ wyniosła 86% ($< 90\%$), na co wpływ miała wysoka zawartość wolnych przestrzeni. Pozostałe mieszanki w świetle obu krajowych dokumentów technicznych [22, 23] wykazały odporność na analizowane czynniki klimatyczne.

Rozpatrując zmienność uzyskanych wyników badań w zależności od procedury badawczej, zaobserwowano większe rozrzuty wyników w przypadku właściwości $ITS_{w(2010)}$ oznaczanej na próbkach poddanych rozmrożeniu szokowemu (z większym gradientem temperatury) niż w przypadku parametru $ITS_{w(2014)}$. Zastosowana metoda badawcza miała również istotny wpływ na wartości otrzymanych wskaźników $ITSR$, a różnica ta wyniosła we wszystkich mieszankach średnio około 10%. Największą różnicę (pomiędzy $ITSR_{w(2014)}$ a $ITSR_{w(2010)}$) zanotowano w przypadku mieszanki HMA, zaś najmniejszą (9,4%) dla mieszanki $AC_{HWMA+FT}$. Wpływ na uzyskane duże różnice miał z pewnością gradient temperatury, na który narażone są próbki, wynoszący dla próbek kondycjonowanych wg WT-2 2010 aż $78^\circ C$ (bezpośrednie przejście z $-18^\circ C$ do $+60^\circ C$) będący bardziej niekorzystnym względem metody AASHTO T 283-89, podczas gdy zgodnie z nowszą Instrukcją badawczą wg WT-2 2014 gradient ten wynosi $43^\circ C$ (przejście z $-18^\circ C$ do $+25^\circ C$).

Analizując uzyskane wyniki należy stwierdzić, że laboratoryjne warunki wytwarzania badanych mieszanek niskotemperaturowych są niezwykle korzystne z punktu widzenia uzyskiwanych wartości wskaźnika $ITSR$ i nie odpowiadają one warunkom produkcji na wytwórni. W warunkach rzeczywistych przebieg procesu suszenia i ogrzewania kruszywa w celu uzyskania temperatury mieszanki rzędu $105-115^\circ C$ może nie gwarantować równomiernego, całkowitego osuszenia wszystkich ziaren mieszanki mineralnej, a tym samym może negatywnie wpływać na warunki adhezji lepiszcza do ziaren, skutkując pogorszoną odpornością na działanie wody i mrozu.

• **Moduł sztywności mieszanek AC 8S produkowanych w technologii „na gorąco” i „na półciepło” z asfaltem spienionym**

Moduł sztywności mieszanek betonu asfaltowego został określony na podstawie badania próbek walcowych w schemacie pośredniego rozciągania IT-CY, wykonanego w oparciu o zapisy normy PN-EN 12697-26:2012 [26]. Badanie to dostarcza wstępnych informacji o właściwościach mechanicznych (sztywności) mma pod obciążeniem dynamicznym i wykonane zostało w uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej UTM-25 w temperaturze -10°C , 0°C , 10°C , 25°C .

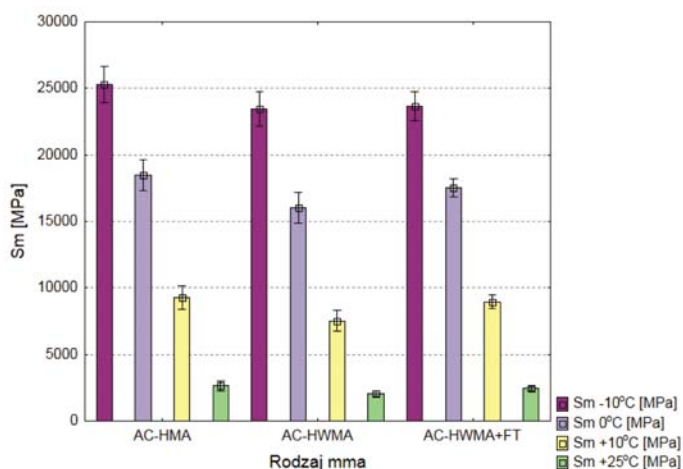
Wyniki pomiaru modułów sztywności w pośrednim rozciąganiu mieszanek AC 8S w aspekcie zastosowanej technologii produkcji oraz temperatury badania wraz z podstawowym opisem statystycznym przedstawiono w tabeli 6, natomiast interpretację graficzną wspomnianych zależności zilustrowano na rysunkach 4 i 5. Dla uzyskanych wyników obliczono średnią arytmetyczną, odchylenie standardowe,

współczynnik zmienności oraz określono wartość minimalną i maksymalną.

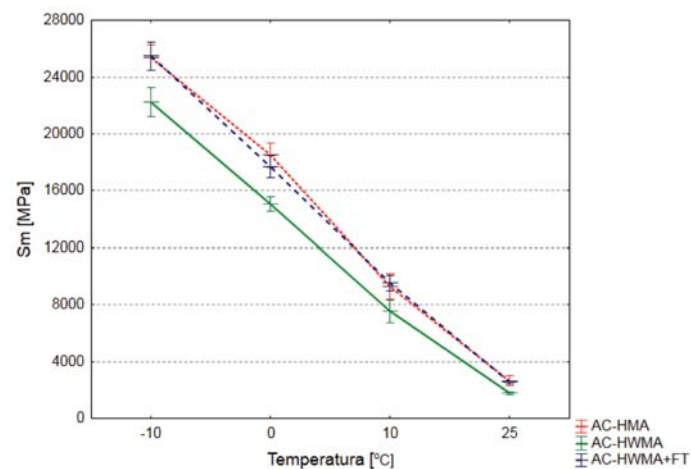
Dokonując analizy wyników z pomiaru cechy S_m można stwierdzić, że sztywności dwóch mieszanek produkowanych w technologii asfaltu spienionego, zagęszczanych w obniżonej temperaturze (95°C) różniły się istotnie w każdej temperaturze badania, a decydujący wpływ na wyniki miała obecność wosku FT. Mieszanka $\text{AC}_{\text{HWMA}+\text{FT}}$ charakteryzowała się istotnie większą sztywnością od mieszanki nie zawierającej w składzie lepiszcza wosku FT, co spowodowane z pewnością było nie tylko zwiększoną sztywnością samego lepiszcza, ale również niższą zawartością wolnych przestrzeni w badanych próbkach. Obecność wosku FT w mieszance $\text{AC}_{\text{HWMA}+\text{FT}}$ pozwoliła, mimo znacznie niższej temperatury zagęszczania (o 45°C), uzyskać zbliżone wartości modułów sztywności do modułów charakteryzujących referencyjną mieszankę AC_{HMA} zagęszczaną w temperaturze wynoszącej 140°C . Za wysokie wartości modułów sztywności mieszanki $\text{AC}_{\text{HWMA}+\text{FT}}$ w pełnym zakresie temperatur pomiaru (od -10°C do $+25^{\circ}\text{C}$) odpowiedzialny

Tabela 6. Podstawowe wielkości statystyczne wyznaczone dla wyników oznaczeń cechy S_m badanych mieszanek AC 8S

Zmienna	Rodzaj mma	Średnia	N	Min	Max	Odch. std.	Wsp. zmienności
$S_{m(-10^{\circ}\text{C})}$ [MPa]	AC_{HMA}	25401,1	9	24813	26006	464,0720	1,826975
	AC_{HWMA}	22241,8	9	21410	22909	554,4634	2,492892
	$\text{AC}_{\text{HWMA}+\text{FT}}$	25484,3	9	24706	26768	950,8758	3,731217
$S_{m(0^{\circ}\text{C})}$ [MPa]	AC_{HMA}	18495,8	9	18001	18909	318,7557	1,723397
	AC_{HWMA}	15043,6	9	14525	15654	396,1698	2,633485
	$\text{AC}_{\text{HWMA}+\text{FT}}$	17708,1	9	17207	18091	314,1618	1,774112
$S_{m(10^{\circ}\text{C})}$ [MPa]	AC_{HMA}	9276,6	9	8775	9926	402,8431	4,342593
	AC_{HWMA}	7537,3	9	6876	8271	552,9338	7,335934
	$\text{AC}_{\text{HWMA}+\text{FT}}$	9538,1	9	9031	9949	320,7201	3,362511
$S_{m(25^{\circ}\text{C})}$ [MPa]	AC_{HMA}	2640,6	9	2467	2792	123,3097	4,669839
	AC_{HWMA}	1774,7	9	1600	1991	136,7708	7,706844
	$\text{AC}_{\text{HWMA}+\text{FT}}$	2545,8	9	2350	2725	137,0874	5,384891



Rys. 4. Wyniki oznaczeń modułów sztywności mieszanek AC 8S w temperaturze pomiaru wynoszącej -10°C , 0°C , 10°C oraz 25°C



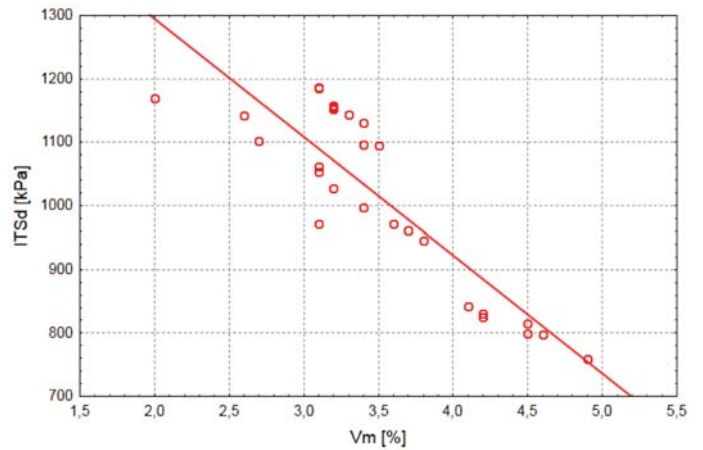
Rys. 5. Zależności między temperaturą badania a cechą S_m mieszanek AC 8S produkowanych w technologii HMA i HWMA z asfaltem spienionym (bez i z dodatkiem wosku FT)

jest wosk syntetyczny, którego zastosowanie [8] w ilości 2,5% w stosunku do lepiszcza 50/70 obniżyło penetrację w 25°C z 65,9 do 44,3 (0,1mm) oraz podniosło temperaturę mięknięcia o około 13°C (z 50,4°C do 63,3°C), przy jednoczesnej poprawie urabialności mieszanki na etapie produkcji i zagęszczania. Wyznaczone przebiegi charakterystyk sztywności (w funkcji temperatury) w przypadku klasycznej mieszanki HMA i zagęszczanej w 95°C z dodatkiem wosku syntetycznego pozwalają wnioskować o zbliżonym zachowaniu obu mieszanek pod obciążeniem przy zmiennych warunkach temperaturowych. Spodziewać się można, iż w wyższych temperaturach eksploatacyjnych (np. podczas badania koleinowania w 60°C) zależność ta utrzyma się z uwagi na właściwości wosku FT. Mieszanka AC_{HWMA}, wyprodukowana w technologii „na półciepło” zawierająca lepiszcze 50/70, uzyskała istotnie mniejsze wartości modułów sztywności w pełnym zakresie temperatury pomiaru. Charakteryzująca tą mieszankę większa zawartość wolnych przestrzeni i zmniejszona sztywność skutkować może podatnością na dogęszczanie pod ruchem, w szczególności w okresie letnim.

Zależności między wybranymi parametrami mieszank AC 8S

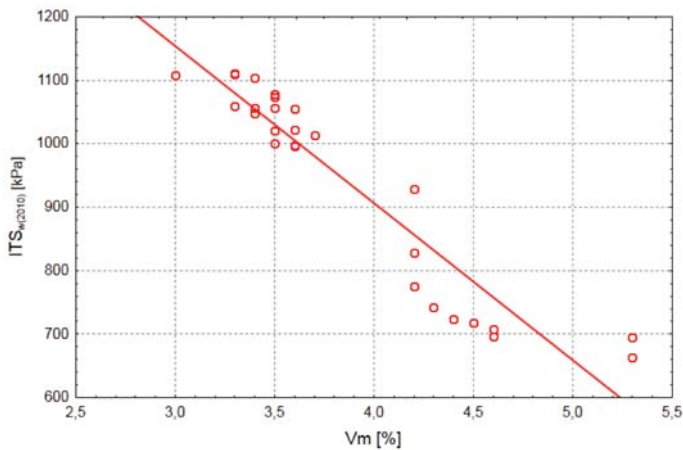
Ostatnim etapem analiz było zweryfikowanie związków korelacyjnych między badanymi właściwościami wytwor-

a)



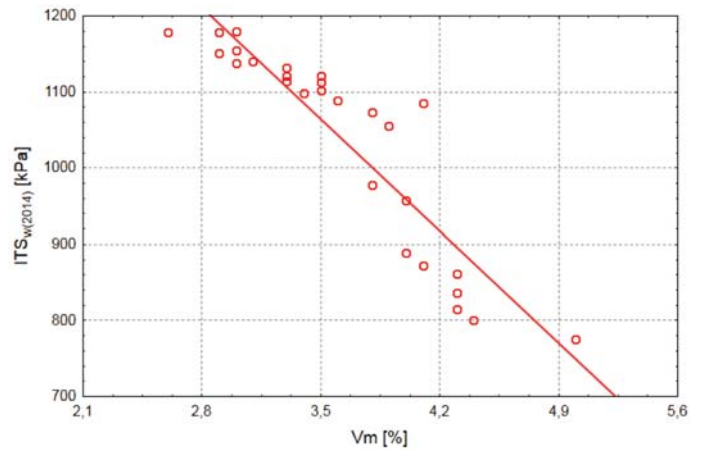
Podsumowanie analizy regresji liniowej dla zmiennej: ITSd R = 0,8766; R ² = 0,7684; zmodyfikowany R ² = 0,7591; Pearson (r) = -0,876557 F (1,25) = 82,923; p < 0,0001; błąd standardowy: 69,579						
N=27	b*	Std.Err. of b*	b	Std.Err. of b	t(25)	p-value
wyraz wolny			1667,062	72,95914	22,84925	< 0,0001
V _m	-0,876557	0,096259	-186,204	20,44810	-9,10620	< 0,0001

b)



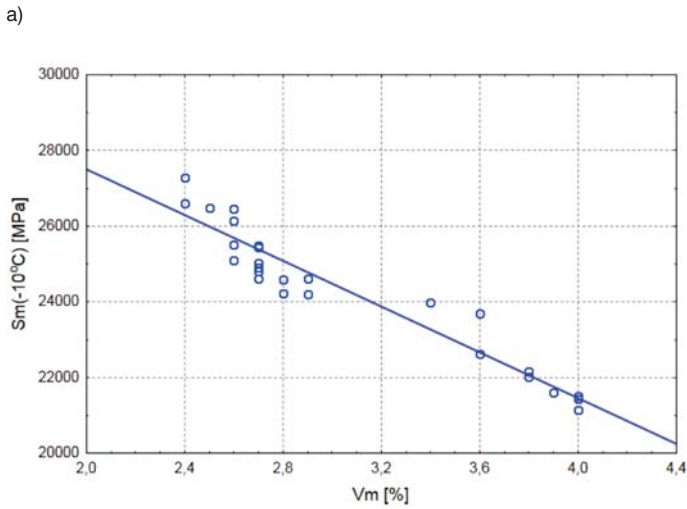
Podsumowanie analizy regresji liniowej dla zmiennej: ITSw wg WT-2 2010 R = 0,9436; R ² = 0,8903; zmodyfikowany R ² = 0,8860; Pearson (r) = -0,943582 F (1,25) = 202,991; p < 0,0001; błąd standardowy: 54,252						
N=27	b*	błąd std. b*	b	błąd std. b	t(25)	p-value
wyraz wolny			1896,99	67,9489	27,918	< 0,0001
V _m	-0,9436	0,0662	-247,645	17,3810	-14,248	< 0,0001

c)



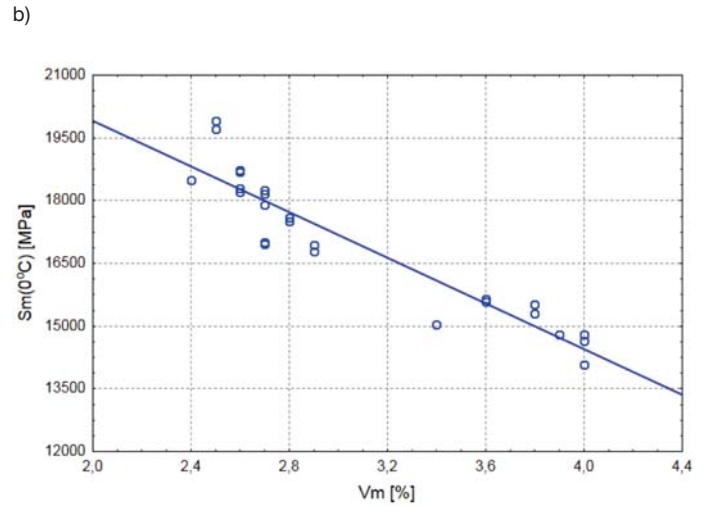
Podsumowanie analizy regresji liniowej dla zmiennej: ITSw wg WT-2 2014 R = 0,9108; R ² = 0,8295; zmodyfikowany R ² = 0,8227; Pearson (r) = -0,910781 F (1,25) = 121,646; p < 0,0001; błąd standardowy: 56,050						
N=27	b*	błąd std. b*	b	błąd std. b	t(25)	p-value
wyraz wolny			1797,79	69,7734	25,766	< 0,0001
V _m	-0,9108	0,0826	-209,69	19,0117	-11,029	< 0,0001

Rys. 6. Korelacje między a) V_m a ITS_d b) V_m a ITS_{w(2010)} c) V_m a ITS_{w(2014)} dla prób zależnych wraz z wynikami analizy regresji liniowej (zagęszczanie 2×35)



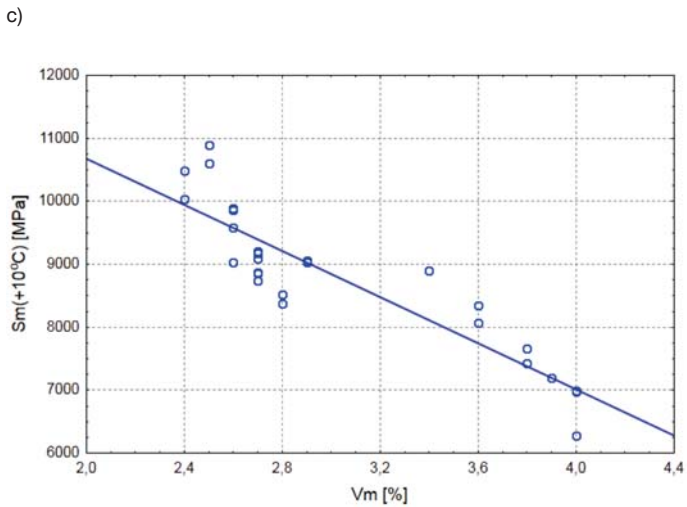
Podsumowanie analizy regresji liniowej dla zmiennej: **Sm w -10°C**
 $R = 0,9570$; $R^2 = 0,9159$; zmodyfikowany $R^2 = 0,9125$; Pearson (r) = $-0,957031$
 $F(1,25) = 272,30$; $p < 0,0001$; błąd standardowy: 532,12

N=27	b*	błąd std. b*	b	błąd std. b	t(25)	p-value
wyraz wolny			33543,80	564,9510	59,375	< 0,0001
V_m	-0,9570	0,0580	-3022,44	183,1622	-16,501	< 0,0001



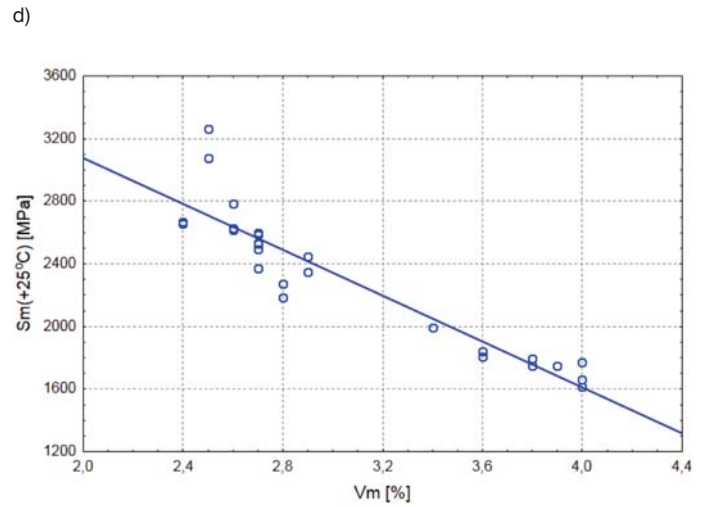
Podsumowanie analizy regresji liniowej dla zmiennej: **Sm w 0°C**
 $R = 0,9380$; $R^2 = 0,8798$; zmodyfikowany $R^2 = 0,8750$; Pearson (r) = $-0,937960$
 $F(1,25) = 182,93$; $p < 0,0001$; błąd standardowy: 586,26

N=27	b*	błąd std. b*	b	błąd std. b	t(25)	p-value
wyraz wolny			25362,16	622,4318	40,747	< 0,0001
V_m	-0,9379	0,0693	-2729,37	201,7981	-13,525	< 0,0001



Podsumowanie analizy regresji liniowej dla zmiennej: **Sm w +10°C**
 $R = 0,8987$; $R^2 = 0,8077$; zmodyfikowany $R^2 = 0,7800$; Pearson (r) = $-0,898694$
 $F(1,25) = 104,97$; $p < 0,0001$; błąd standardowy: 520,57

N=27	b*	błąd std. b*	b	błąd std. b	t(25)	p-value
wyraz wolny			14352,86	552,6927	25,969	< 0,0001
V_m	-0,8987	0,0877	-1835,89	179,1880	-10,246	< 0,0001



Podsumowanie analizy regresji liniowej dla zmiennej: **Sm w +25°C**
 $R = 0,9276$; $R^2 = 0,8605$; zmodyfikowany $R^2 = 0,8549$; Pearson (r) = $-0,927639$
 $F(1,25) = 154,23$; $p < 0,0001$; błąd standardowy: 171,33

N=27	b*	błąd std. b*	b	błąd std. b	t(25)	p-value
wyraz wolny			4541,962	181,9045	24,969	< 0,0001
V_m	-0,9276	0,0747	-732,405	58,9751	-12,419	< 0,0001

Rys. 7. Korelacje między zawartością wolnych przestrzeni a modułami sztywności zmierzonymi w -10°C (a), -0°C (b), $+10^\circ\text{C}$ (c), $+25^\circ\text{C}$ (d) wraz z wynikami analizy regresji liniowej (zagęszczenie 2×50)

rzonych mma. Do tego celu wykorzystano analizę korelacji i regresji liniowej. Korelacja oraz w dalszej kolejności regresja liniowa to narzędzia statystyczne pozwalające na sformalizowane określenie stopnia, w jakim badane cechy są ze sobą powiązane. Siła i kierunek zależności pomiędzy zmierzonymi cechami opisane zostały poprzez wyznaczone współczynniki korelacji liniowej Pearsona (r), które przyjmują wartości z przedziału $<-1; 1>$. Jeżeli wartości r są ujemne, wówczas między badanymi zmiennymi występuje związek odwrotny, natomiast w przypadku gdy wartości r są dodatnie, wtedy między badanymi zmiennymi występuje związek wprost, co oznacza, że wraz ze wzrostem wartości jednej zmiennej, rosną wartości drugiej zmiennej i odwrotnie.

Na każdej próbkę przeznaczoną do badań własności mechanicznych, tj. do oznaczenia wytrzymałości w pośrednim rozciąganiu oraz modułów sztywności, zbadano również zawartości wolnych przestrzeni. W związku z tym, możliwe było oszacowanie korelacji między zawartością wolnych przestrzeni a wytrzymałością w pośrednim rozciąganiu (rys. 6) oraz modułem sztywności (rys. 7).

Zastosowano również metodę regresji liniowej opisującą za pomocą funkcji matematycznych powiązania między wspomnianymi parametrami. W celu przybliżonej oceny dopasowania modelu do danych empirycznych analizowano wartość współczynnika determinacji R^2 . Związki i wzajemny wpływ wybranych zmiennych przedstawiono w postaci obliczonych równań regresji zamieszczonych w tabelach pod każdym z poniższych rysunków. Podano również wartości oszacowanych parametrów funkcji regresji, a następnie zbadano dokładność zaproponowanych modeli matematycznych. Przedstawiona poniżej ocena zależności między wspomnianymi parametrami posłużyć może do oceny wrażliwości na zmiany temperatury mieszanek niskotemperaturowych wytwarzanych w technologii HWMA z asfaltem spienionym pod obciążeniem dynamicznym i może być wykorzystana do porównawczej oceny jakości uzyskanej mieszanki względem klasycznej technologii „na gorąco”, pod względem jej zagęszczalności, wodo- i mrozoodporności oraz sztywności i podatności na koleinowanie.

W przypadku wszystkich zależności istnieje ujemna wyraźna korelacja ($|r| > 0,87$), oznaczająca odwrotną proporcjonalność zawartości wolnych przestrzeni V_m i rozpatrywanych parametrów mechanicznych.

Zmienna V_m najmocniej koreluje ($r=-0,96$) z cechą S_m w temperaturze badania równej -10°C , a najslabiej z parametrem ITS_d ($r=-0,88$). Przedstawione modele matematyczne charakteryzują się wysokim współczynnikiem dopasowania (R^2). Interpretując omawiany parametr można stwierdzić, że obliczone modele pozwalają wyjaśnić ponad 70% (rys. 6) i ponad 80% (rys. 7) zmienności wyników dla badanych mieszanek AC 8S niezależnie od metody ich wytwarzania (HMA, HWMA, HWMA+FT).

Przeciętna różnica między zaobserwowanymi wartościami zmiennej objaśnianej (ITS_d , $ITS_{w(2010)}$, $ITS_{w(2014)}$, S_m) i wartościami teoretycznymi (*standard error of estimate*) wyniosła od 54,252 kPa do 69,579 kPa w przypadku wytrzymałości w pośrednim rozciąganiu oraz od 171,33 MPa do 586,26 MPa w przypadku modułów sztywności.

Na podstawie powyższych wyników można stwierdzić, że w przypadku badanych mieszanek potwierdzono występowanie znanych zależności między zawartością wolnych przestrzeni w mma a właściwościami mechanicznymi (wytrzymałością w pośrednim rozciąganiu, modułem sztywności). Pozwala to stwierdzić, że dominującym czynnikiem wpływającym na zachowanie analizowanych mma miała zawartość wolnych przestrzeni, a zmiana technologii produkcji (wskutek zastosowania asfaltu spienionego, zastosowania modyfikacji asfaltu) nie miała bezpośredniego wpływu na inne właściwości mma, które są pochodną poziomu zagęszczenia.

Wnioski

Na podstawie wykonanego zakresu badań laboratoryjnych i przedstawionej w artykule analizy ich wyników sformułowano następujące wnioski:

- zastosowanie asfaltu drogowego rodzaju 50/70 modyfikowanego woskiem syntetycznym *FT* przy wytwarzaniu mieszanki betonu asfaltowego AC 8S w technologii HWMA z asfaltem spienionym wywołało znaczącą poprawę urabialności i zagęszczalności mma na skutek obniżenia lepkości i poprawy pienistości lepiszcza, wpływając korzystnie na obniżenie zawartości wolnych przestrzeni w próbkach i podniesienie odporności mma na działanie wody (*ITSR*);
- modyfikacja lepiszcza 50/70 woskiem *FT* w ilości 2,5% spowodowała korzystne zmiany w stwierdzonych parametrach fizycznych piany asfaltowej: objętość piany (wskaznik ekspansji) uległa zwiększeniu a czas połowicznego rozpadu wydłużył się znacząco, dzięki temu poprawie uległy warunki otaczania ziaren mieszanki mineralnej lepiszczem;
- mieszanka AC 8S wytwarzana w technologii „na półciepło” bez dodatku środka niskowiskozowego (wosku *FT*) cechowała się niedostateczną urabialnością i zagęszczalnością, w wyniku czego nie osiągnięto wymaganej odporności na działanie wody w świetle procedury badawczej wg WT-2 2010 oraz najwyższą zawartość wolnych przestrzeni w zagęszczonych próbkach spośród badanych mieszanek;
- potwierdzona została efektywność działania wosku syntetycznego w poprawie zagęszczalności mma wytwarzanych w obniżonych temperaturach, prowadząca do uzyskania prawidłowego zagęszczenia w 95°C , porównywalnego do mieszanki zagęszczanej w temperaturze 140°C ;
- stosowanie wprowadzonej w Polsce w 2010 r. procedury badawczej oznaczania odporności na wodę z jednym cyklem zamrażania łączącej najbardziej niekorzystne warunki kondycjonowania próbek według PN-EN 12697-12:2008 oraz normy AASHTO T 283-89 uznawanej za najsurowszą metodę badawczą wodoodporności mma w Europie, również w przypadku mieszanek wytwarzanych i zagęszczanych w obniżonych temperaturach z asfaltem spienionym, skutkowało uzyskiwaniem niższych

wskaźników *ITSR* niż przy stosowaniu metodyki wprowadzonej przez WT-2 2014;

- analiza korelacji Pearsona potwierdziła istnienie silnego odwrotnego związku ($|r| > 0,7$) pomiędzy poziomem zagęszczenia (V_m) mieszanek AC 8S wytwarzanych w obniżonych temperaturach a uzyskanymi modułami sztywności (S_m) i wytrzymałościami w pośrednim rozciąganiu (ITS_d , $ITS_{w(2010)}$, $ITS_{w(2014)}$) co świadczy, że podobnie jak w przypadku mieszanek tradycyjnych, zapewnienie odpowiedniego poziomu zawartości wolnych przestrzeni w mieszance jest pierwszym i najważniejszym elementem projektowania empirycznego mma pozwalającym zapewnić odpowiednio wysoką wodoodporność i odporność na powstawanie deformacji trwałych mieszanek niskotemperaturowych.

Bibliografia

- [1] Airey G.D., Collop A.C., Zoorob S.E., Elliott R.C.: The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage. *CDM*, Vol. 22, pp. 2015-2024, 2007, doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.07.09
- [2] Geisler F., Kapsa P., Laurence L.: Tribological and wettability study of non foaming warm mix asphalt additives at mixing and compaction temperatures. 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Prague, Czech Republic 2016, dx.doi.org/10.14311/EE.2016.186
- [3] Gorkem C., Sengoz B.: Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime. *CBM*. Vol. 23, pp. 2227-2236, 2009, doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.12.001
- [4] Hasan M. R. M., You Z., Porter D., Goh S. W.: Laboratory moisture susceptibility evaluation of WMA under possible field conditions. *Constriction and Buildings Materials* 101 (2015) pp. 57-64.
- [5] Hesami S., Roshani H., Hamed H. G., Azarhoosh A.: Evaluation the mechanism of the effect of hydrated lime on moisture damage of warm mix asphalt. *CBM*. Vol. 47, pp. 935-941, 2013, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.07
- [6] Hugo M.R.D. Silva; Joel R.M. Oliveira; Peralta, J. a, Salah E. Zoorob b. Optimization of warm mix asphalt using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents, *Construction and Building Materials* 24(9) (2010) 1621-1631, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2010.02.030
- [7] Iwański M., Chomicz-Kowalska A.: Evaluation of the pavement performance. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. Vol. 63, Issue. 1, pp. 97-105, 2015, doi:10.1515/bpasts-2015-0011
- [8] Iwański M., Chomicz-Kowalska A., Maciejewski K.: Application of synthetic wax for improvement of foamed bitumen parameters. *CBM*, Vol. 83, pp. 62-69, May 15, 2015, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.060
- [9] Iwański M., Chomicz-Kowalska A., Mrugała J.: Application of the synthetic wax to improve the foamed bitumen parameters used in half-warm bituminous mixtures. 9th International Conference Environmental Engineering. *Procedia Engineering*, Vilnius, Lithuania, 2014.
- [10] Iwański M., Mazurek G.: Hydrated lime as the anti-aging bitumen agent.. 11th International Scientific Conference of Modern Building Materials, Structures and Techniques (MBMST). Vol. 53, pp. 424-432, Vilnius, Lithuania, 2013, doi:10.1016/j.proeng.2013.04.055
- [11] Jaskula P., Judycki J.: Verification of the criteria for evaluation of water and frost resistance of asphalt concrete". *Road Mater. Pavement Des.*, 9(1), 135-162.
- [12] Jaskula P., Judycki J., Durability of Asphalt Concrete Subjected to Deteriorating Effects of Water and Frost , *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 30, Issue 1, 2016. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.000064512.
- [13] Jenkins K., J.: Mix Design Considerations for Cold and Half-Warm Bituminous Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen. PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Stellenbosch, Stellenbosch, South Africa, 2000.
- [14] Król J., Kowalski K., Radziszewski P.: Rheologica behavior of n-alkane modified bitumen in aspect of Warm Mix Asphalt technology. *CBM*, Vol. 93, pp. 703-710, 2015, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.03314.
- [15] Kok B. V., Yilmaz M.: The effect of using lime and styrene-butadiene-styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt. *CBM*. Vol. 23, pp. 1999-2006, 2009, doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.08.01915.
- [16] Mieczkowski P.: The effect of weather and climatic factors on temperature drops in built-in asphalt mixtures. *Foundations of civil and environmental engineering*, No 9, p. 95-104, 2007. 16.
- [17] Remišová, E. Theory and measurements of bitumen binders adhesion to aggregate. *Komunikacie*, Volume 6, Issue 1, 2004, Pages 58-63.
- [18] Sybilski D. i inni: Sprawozdanie końcowe z pracy: Weryfikacja i uaktualnienie metody badawczej wodoodporności z cyklem zamrażania mieszanek mineralno-asfaltowych. Temat TN-255. Etap III – Zadanie 7.8. IBDiM, Warszawa, 2013.
- [19] Sengoz B., Agar E.: Effect of asphalt film thickness on the moisture sensitivity characteristics of hot-mix asphalt. *Building and Environmental*, Vol. 42, pp. 3621-3628, 2007, doi:10.1016/j.buildenv.2006.10.006
- [20] Van De Ven MFC., Jenkins KJ., Voskuilen JLM., Van Den Beemt R. Development of (half-) warm foamed bitumen mixes: State of the art. *International Journal of Pavement Engineering* 8(2) (2007) 163-175. DOI: 10.1080/10298430601149635
- [21] Yu, X., Wang, Y., Luo, Y. Impacts of water content on rheological properties and performance-related behaviours of foamed war-mix asphalt. *Construction and Building Materials* 48 (2013) 203-209. DOI: DOI:10.1016/j.conbuildmat.2013.06.018
- [22] WT-2. Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych. Część I. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania Techniczne. Warszawa 2010.
- [23] WT-2. Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych. Część I. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania Techniczne. Warszawa 2014.
- [24] PN-EN 12697-8:2005. Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 8: Oznaczanie zawartości wolnej przestrzeni.
- [25] PN-EN 12697-12:2008. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco. Część 12. Określenie wrażliwości na wodę.
- [26] PN-EN 12697-26:2012. Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 26: Sztywność.

Z serwisu GDDKiA

Badania pod próbnym obciążeniem estakady na S1 w Sosnowcu

Przy udziale pracowników jednostki naukowej Politechniki Śląskiej przeprowadzane są aktualnie próby obciążeniowe przebudowywanej estakady w ciągu drogi ekspresowej S1 w Sosnowcu.

Próby składają się z badań dynamicznych i statycznych. Zrealizowano trzy schematy obciążeń statycznych. Do badań statycznych wykorzystane zostały samochody ciężarowe o łącznej całkowitej masie 160 ton.

Badania dynamiczne realizowane były przy wykorzystaniu przejazdów 5 pojazdów ciężarowych, o masie całkowitej 32 tony każdy. Pojazdy w trakcie badania poruszały się z różnymi prędkościami – od 10 km/h do 70 km/h. Jednym z elementów tych badań był przejazd pojazdów przez sztuczny próg.

Badania potwierdziły poprawność przyjętych rozwiązań projektowych i wykonawczych. W trakcie prób nie ujawniły się również niepożądane właściwości dynamiczne, a przeprowadzony przegląd obiektu przed i po próbnym obciążeniu nie wykazał żadnych zmian mogących wskazywać na jakiegokolwiek nieprawidłowości.

23-06-2017