



Fot. 18. Porowata powierzchnia nawierzchni betonowej (fot. St. Rewiński)

- nieregularne mycie maszyn,
- zbyt wczesne lub zbyt późne wykonanie wymięcenia szczotkami mechanicznymi niezwiązanej zaprawy cementowo-piaskowej znajdującej się pomiędzy górnymi powierzchniami ziaren grubego kruszywa.

Przykładowe wady i usterki zauważone na budowie (fotografie 15., 16., 17., 18.).

## Podsumowanie

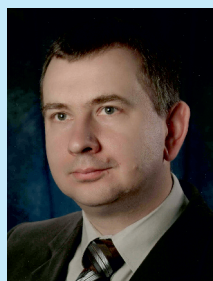
Nawierzchnie betonowe o odstąpiętym kruszywie są w tej chwili najnowocześniejszym rozwiązaniem w technologii budowy nawierzchni betonowych, gdyż pozwalają na uzyskanie bardziej komfortowych warunków ruchu dla użytkowników dróg i mogą zmniejszyć emisję hałasu do środowiska. Wymagają jednak od wykonawców dużego doświadczenia oraz ścisłego przestrzegania reżimu technologicznego zarówno na etapie wytwarzania mieszanki betonowej, jak i wbudowywania betonu w nawierzchnię, a także zapewnienia doskonałej logistyki wszystkich środków produkcji.

Jakiegokolwiek odstępstwa od wymagań skutkują powstawaniem wad trudnych do usunięcia.

Naprawa powstałych uszkodzeń nawierzchni betonowej na omawianym odcinku będzie przedmiotem części 2 artykułu.

## Bibliografia

- [1] PPPortal.pl FOTO – [www.autostrada-a2.p](http://www.autostrada-a2.p)
- [2] [http://www.nbi.com.pl/assets/NBI-pdf/2012/1\\_40\\_2012/pd](http://www.nbi.com.pl/assets/NBI-pdf/2012/1_40_2012/pd)
- [3] W. Zawadzka – Odcinek A2 Nowy Tomyśl – Świecko w technologii waschbeton. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne Styczeń, Luty 2012 ■



PIOTR ZIELŃSKI

Politechnika Krakowska  
pzielin@pk.edu.pl

## Badania wpływu wybranych czynników na koleinowanie mieszanek mineralno-asfaltowych

Odporność mieszanek mineralno-asfaltowych (mma) na powstawanie deformacji trwałych jest jednym z podstawowych warunków prawidłowej eksploatacji nawierzchni asfaltowych, rzutującym na zachowanie bezpieczeństwa i komfortu jazdy. Istnieją dwie podstawowe grupy metod badań kumulacji deformacji trwałych w mieszankach mineralno-asfaltowych, tj. oparte na badaniach pełzania (statyczne i dynamiczne) oraz metody symulacyjne, wykorzystujące laboratoryjne urządzenia do badania koleinowania. W latach poprzednich normy dotyczące nawierzchni asfaltowych przewidywały oznaczenie modułu sztywności lepkiej w warunkach pełzania statycznego, w temperaturze 40°C. Obecnie w Polsce powszechnie wykorzystuje się do tego celu badanie w małym aparacie do koleinowania (tzw. brytyjskim) wg PN-EN 12967-22 [9], co wynika z zapisów WT-2 [11]. Badanie wpływu składu mma na jej odporność na deformacje trwałe było już tematem szeregu publikacji, np. [1], [4], [5], [6], [7], [8]. Celem niniejszej publikacji jest

przedstawienie wyników badań odporności na koleinowanie wybranych mieszanek mineralno-asfaltowych, w których określono m.in. wpływ rodzaju i ilości asfaltu a także rodzaju mączki wapiennej i krzywej uziarnienia mieszanki mineralnej na parametry koleinowania, tj. proporcjonalną głębokość koleiny (PRD) oraz szybkość przyrostu koleiny (WTS).

Uzasadnienie doboru mma do badań koleinowania

### Uzasadnienie doboru mma do badań koleinowania

Czynniki wpływające na podatność mma na odkształcenia trwałe zostały już opisane w pracach IBDiM w latach 90-tych przez J. Zawadzkiego [12]. Są to czynniki związane z tarcieniem wewnętrznym (tekstura i kształt ziaren kruszywa, uziarnienie mm, ciśnienie między ziarnami, grubość powłoki lepiszcza na ziarnach), kohezją mma (konsystencja i lepkość lepiszcza oraz jej zmiany wraz z temperaturą, adhezja lepiszcza do kruszywa, powierzchnia właściwa mieszanki mineralnej – mm)

oraz warunkami obciążenia (wielkość, czas trwania i częstość nacisków, a także objętość materiału).

W przedstawianej, w niniejszym artykule, pracy autor przyjął do badań wybrane czynniki strukturalne odnoszące się do:

- tarcia wewnętrznego (uziarnienie mma, zawartość asfaltu związana z grubością powłoki lepiscza na ziarnach),
- kohezji (lepiscza asfaltowe o różnej penetracji i lepkości).

Wpływ wymienionych czynników został przebadany w mieszankach takich jak: beton asfaltowy do warstw wiążących i ścieralnych, beton asfaltowy o wysokim module sztywności do warstwy wiążącej i podbudowy oraz mieszanka mastyksowo grysowa SMA do warstwy ścieralnej. Mieszanki SMA i AC WMS charakteryzują się na ogół dobrą odpornością na deformacje trwałe, jednak głębsze wniknięcie w ich strukturę pozwoli w dalszych badaniach na lepszą optymalizację ich składów. Przedstawione poniżej badania są na tym etapie badaniami rozpoznawczymi.

## Charakterystyka mma przyjętych do badań

Do oceny wpływu wybranych czynników na powstawanie i rozwój trwałych deformacji mieszanek mineralno-asfaltowych, w ramach zadania badawczego w pracy [2], w laboratorium drogowym Katedry Budowy Dróg i Inżynierii Ruchu Politechniki Krakowskiej, opracowano recepty następujących mieszanek:

- pięć mieszanek betonu asfaltowego do warstwy wiążącej AC 16 W o tej samej krzywej uziarnienia, różniące się ilością asfaltu (tylko asfaltu 50/70) oraz rodzajem asfaltu (zastosowano ponadto asfalt drogowy 35/50 i PMB 25/55-60);
- cztery mieszanki betonu asfaltowego do warstwy ścieralnej AC 11 S różniące się rodzajem stosowanego kruszywa (2 recepty) oraz asfaltu (50/70 lub PMB 45/80-55);
- sześć mieszanek betonu asfaltowego o wysokim module sztywności AC WMS 16 o trzech różnych krzywych uziarnienia; do mieszanki nr 3 zastosowano dodatkowo 3 rodzaje mączki wapiennej, a do jednego wybranego rodzaju mączki przebadano także wpływ rodzaju asfaltu (zastosowano asfalt 20/30 i PMB 10/40-65);
- dwie mieszanki mastyksowo grysowe 11 S, do warstwy ścieralnej SMA, różniące się rodzajem stosowanego asfaltu (PMB 45/80-55 i PMB 45/80-65).

Do wszystkich zaprojektowanych mieszanek w laboratorium zagęszczono wg [10] po 2 próbki płytowe o wymiarach w planie 305 × 305 mm oraz grubości 40 lub 60 mm, w zależności od uziarnienia, które następnie zostały poddane koleinowaniu wg [9]. Łączna liczba przebadanych próbek wynosiła 34.

## Mieszanka AC 16 W

W tabeli 1. przedstawiono wyjściowy skład przedmiotowej mieszanki, natomiast w tabeli 2. jej uziarnienie. W pierwszym etapie badania wykonano mieszanki z asfaltem 50/70, przy jego trzech ilościach: 4,3%(m/m), 4,6%(m/m) oraz 4,9%(m/m). Następnie przygotowano próbki z asfaltami 35/50 i PMB 25/55-60 w ilości 4,6%(m/m) (jak w receptce wyjściowej).

Tabela 1. Skład AC 16 W

l.p.	nazwa składnika mieszanki	zawartość składnika [% (m/m)]	
		w mm	w mma
1	mączka wapienna	4,0	3,8
2	piasek 0/2	10,0	9,5
3	mieszanka wapienna 0/4	28,3	27,0
4	grys wapienny 2/8	25,5	24,3
5	grys wapienny 8/16	32,2	30,8
6	asfalt 50/70, 35/50 lub PMB 25/55-60		4,6
7	środek adhezyjny		0,3 w masie lepiscza

Tabela 2. Uziarnienie AC 16 W

wymiar sита [mm]	przesiew [% (m/m)]	krzywe graniczne [% (m/m)]	
		dolna	górna
22	100	100	100
16	100	90	100
11,2	84,6	70	90
8,0	69,8	–	–
5,6	60,5	–	–
2,0	38,9	25	55
0,5	20,8	–	–
0,125	8,8	5	15
0,063	6,9	3	8

## Mieszanka AC 11 S

W tabeli 3. przedstawiono wyjściowy skład mieszanki AC 11 S z grysem andezytowym, natomiast w tabeli 4. skład mieszanki z kruszywem melafirowym, uziarnienie badanych mieszanek mineralnych (mm) zestawiono w tabeli 5. Z obu mieszanek przygotowano próbki mma z asfaltami 50/70 i PMB 45/80-55 w ilości 5,6%(m/m) (jak w receptce wyjściowej).

Tabela 3. Skład AC 11 S z grysem andezytowym

l.p.	nazwa składnika mieszanki	zawartość składnika [% (m/m)]	
		w mm	w mma
1	mączka wapienna	6,1	5,8
2	piasek 0/2	15,0	14,2
3	mieszanka dolomitowa 0/4	24,9	23,5
4	grys andezytowy 2/4	5,0	4,7
5	grys andezytowy 4/8	22,2	20,9
6	grys andezytowy 8/11	26,8	25,3
7	asfalt 50/70 lub PMB 45/80-55		5,6
8	środek adhezyjny		0,3 w masie lepiscza

Tabela 4. Skład AC 11 S z grysem melafiorowym

l.p.	nazwa składnika mieszanki	zawartość składnika [% (m/m)]	
		w mm	w mma
1	mączka wapienna	7,8	7,4
2	piasek 0/2	10,0	9,4
3	mieszanka melafiorowa 0/4	26,0	24,6
4	grys melafiorowy 4/8	26,5	25,0
5	grys melafiorowy 8/11	29,7	28,0
6	asfalt 50/70 lub PMB 45/80-55		5,6
7	środek adhezyjny		0,3 w masie lepiszcza

Tabela 5. Uziarnienie AC 11 S

wymiar sita [mm]	przesiew [% (m/m)]		krzywe graniczne [% (m/m)]	
	z grysem andezytowym	z kruszywem melafiorowym	dolna	górna
16,0	100	100	100,0	100,0
11,2	97,8	97,6	90,0	100,0
8,0	74,6	73,3	60,0	90,0
5,6	55,2	56,9	48,0	71,0
2,0	37,8	36,5	35,0	50,0
0,125	9,7	10,0	8,0	20,0
0,063	7,8	8,1	5,0	11,0

## Mieszanka AC WMS 16

Do oceny wpływu wybranych czynników na powstawanie i rozwój trwałych deformacji mieszanek mineralno-asfaltowych zaprojektowane zostały wg WT-2 2008 trzy mieszanki AC WMS 16, różniące się krzywymi uziarnienia.

**Mieszanki AC WMS 16 nr 1 i 2** składają się z mączki wapiennej i grysów dolomitowych oraz asfaltu 10/40-65. Pierwsza z mieszanek charakteryzowała się odpyleniem na poziomie 50% (m/m), natomiast WMS2 na poziomie 70% (m/m). Ponadto AC WMS2 charakteryzuje się większym udziałem frakcji grysowej w stosunku do AC WMS1. W tabeli 6. przedstawiono skład AC WMS 16 nr 1 i 2, natomiast w tabeli 7. ich uziarnienie.

Tabela 6. Skład AC WMS 16 – nr 1 i 2

l.p.	nazwa składnika mieszanki	zawartość składnika w mma [% (m/m)]	
		WMS 1	WMS 2
1	mączka wapienna	3,8	5,1
2	piasek łamany 0/2	25,4	19,0
3	mieszanka dolomitowa 0/4	17,5	19,0
4	grys dolomitowy 4/8	20,6	25,2
5	grys dolomitowy 8/16	27,5	26,6
6	asfalt PMB 10/40-65	5,1	5,1
7	środek adhezyjny		0,3 w masie lepiszcza.

Tabela 7. Uziarnienie AC WMS 16 – nr 1 i 2

wymiar sita [mm]	przesiew [% (m/m)]		krzywe graniczne [% (m/m)]	
	WMS 1	WMS 2	dolna	górna
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0
16,0	97,7	97,7	90,0	100,0
11,2	75,2	76,0	70,0	85,0
8,0	69,6	70,1	–	–
2,0	42,4	38,2	35,0	45,0
0,125	9,2	9,3	7,0	17,0
0,063	7,0	7,0	5,0	9,0

Tabela 8. Skład AC WMS 16 - nr 3

l.p.	nazwa składnika mieszanki	zawartość składnika [% (m/m)]	
		w mm	w mma
1	mączka wapienna Rudniki, Wolica lub Czatkowice	5,0	5,2
2	mieszanka dolomitowa 0/4	40,0	32,2
3	grys dolomitowy 2/8	25,2	11,2
4	grys dolomitowy 8/16	29,8	46,3
5	asfalt: 20/30 lub PMB 10/40-65*		4,9
7	środek adhezyjny		0,3 w masie lepiszcza

\* asfalt PMB 10/40-65 został zastosowany tylko porównawczo w mieszankach z mączką Czatkowice

**W mieszance AC WMS 16 nr 3** zastosowano grysy dolomitowe z Jażwicy oraz wariantowo trzy rodzaje mączki wapiennej, o różnym pochodzeniu (Czatkowice, Wolica i Rudniki). Lepiszczem był asfalt drogowy 20/30, a w wariacie z mączką z Czatkowic także asfalt modyfikowany PMB 10/40-65. Skład mieszanki AC WMS nr 3 przedstawiono w tabeli 8. a jej krzywą uziarnienia w tabeli 9.

Tabela 9. Uziarnienie AC WMS 16 – nr 3

wymiar sita [mm]	przesiew [% (m/m)]	krzywe graniczne [% (m/m)]	
		dolna	górna
22,4	100,0	100,0	100,0
16,0	98,5	90,0	100,0
11,2	74,5	70,0	85,0
8,0	69,1	–	–
5,6	59,8	–	–
2,0	36,4	35,0	45,0
0,5	17,8	–	–
0,125	10,1	7,0	17,0
0,063	7,3	5,0	9,0

## Mieszanka SMA 11 S

W tabeli 10. przedstawiono wyjściowy skład mieszanki SMA 11 S z grysem andezytowym, natomiast uziarnienie badanej mieszanki mineralnej zestawiono w tabeli 11. Z tej mieszanki przygotowano próbki mma z dwoma rodzajami asfaltów modyfikowanych, tj.:

- PMB 45/80-55 (temperatura mięknięcia 55,4°C, nawrót sprężysty 68%);
- PMB 45/80-65 (temperatura mięknięcia 75,0°C, nawrót sprężysty 84%).

Tabela 10. Skład SMA 11 S

l.p.	nazwa składnika mieszanki	zawartość składnika [% (m/m)]	
		w mm	w mma
1	mączka wapienna	10,0	9,3
2	mieszanka dolomitowa 0/4	21,3	19,9
3	grys andezytowy 4/8	21,8	20,4
4	grys andezytowy 8/11	46,9	43,8
5	asfalt PMB 45/80-65 lub PMB 45/80-65	-	6,6
<b>razem</b>		<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
6	włókna <i>viskoceł</i>	0,7 mm	
8	środek adhezyjny		0,30 w masie lepiszcza

Tabela 11. Uziarnienie SMA 11 S

wymiar sита [mm]	przesiew [% (m/m)]	krzywe graniczne [% (m/m)]	
		dolna	górna
16	100,0	100	100
11,2	96,2	90	100
8,0	58,1	50	65
5,6	40,1	35	45
2,0	25,8	20	30
0,5	16,3	-	-
0,125	12,8	9	17
0,063	10,9	8	12

## Wyniki badań odporności mma na koleinowanie

### Mieszanka AC 16 W

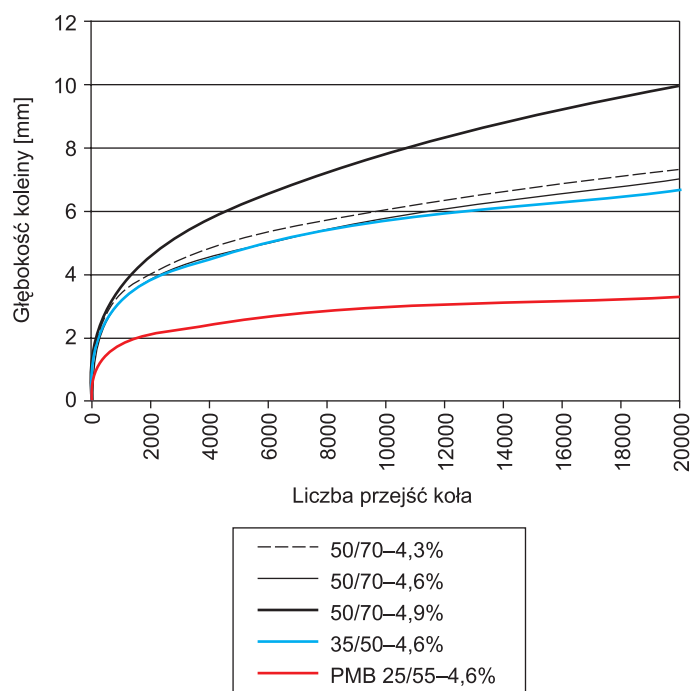
Wyniki badań koleinowania mieszanki AC 16 W zestawiono w tabeli 12. i na rysunku 1.

Uzyskane wyniki pozwoliły ocenić wpływ rodzaju stosowanego asfaltu i jego ilości w mieszance AC 16 W następująco:

(1) stwierdzono poprawę odporności na koleinowanie przy zastosowaniu asfaltu modyfikowanego elastomerem zamiast asfaltu niemodyfikowanego, tj.:

Tabela 12. Wyniki badania koleinowania AC 16 W

rodzaj asfaltu	zawartość asfaltu [% (m/m)]	próbka	głębokość koleiny		WTS [mm/1000 cykli]	zawartość wolnych przestrzeni w mma [% (v/v)]
			RD [mm]	PRD [%]		
50/70	4,3	1	6,9	11,50	0,2124	4,9
		2	7,7	12,83	0,2850	
		średnia		12,2	0,25	
	4,6	1	6,4	10,67	0,2594	3,7
		2	7,7	12,83	0,2359	
		średnia		11,8	0,25	
4,9	1	10,1	16,67	0,4458	3,0	
	2	9,9	16,83	0,4747		
	średnia		17,3	0,46		
35/50	4,6	1	6,1	10,17	0,2132	3,7
		2	7,3	12,17	0,2116	
		średnia		11,2	0,21	
PMB 25/55-60	4,6	1	3,2	5,33	0,0770	3,7
		2	3,4	5,67	0,0815	
		średnia		5,5	0,08	



Rys. 1. Wykresy koleinowania AC 16 W z różnymi ilościami i rodzajami asfaltu

- PRD zmniejszył się ponad dwukrotnie (z 11,8% do 5,5%);
- WTS zmniejszył się ponad trzykrotnie (z 0,25 mm/1000 cykli do 0,08 mm/1000 cykli).



(2) zastosowanie twardszego asfaltu niemodyfikowanego (35/50) zamiast asfaltu 50/70 nie zmieniło istotnie parametrów koleinowania:

- PRD zmniejszył się o 5 % (z 11,8% do 11,2%),
- WTS zmniejszył się o 20 % (z 0,25 mm/1000 cykli do 0,21 mm/1000 cykli).

(3) zmniejszenie o 0,3%(m/m) ilości asfaltu w stosunku do wyznaczonej laboratoryjnie wartości optymalnej w badanej mieszance AC 16 W z asfaltem 50/70 nie spowodowała istotnych zmian parametrów koleinowania, a tj.:

- PRD zwiększył się o 3 % (z 11,8% do 12,2%),
- WTS pozostał na tym samym poziomie (0,25 mm/1000 cykli).

(4) zwiększenie o 0,3%(m/m) ilości asfaltu w stosunku do wyznaczonej laboratoryjnie wartości optymalnej spowodowało pogorszenie parametrów koleinowania, tj.:

- PRD zwiększył się o prawie 50% (z 11,8% do 17,3%),
- WTS zwiększył się o ponad 80% (z 0,25 mm/1000 cykli do 0,46 mm/1000 cykli).

### Mieszanka AC 11 S

Wyniki badań koleinowania zagęszczonej mieszanki AC 11 S zestawiono w tabeli 13.

Tabela 13. Wyniki badania koleinowania AC 11 S

mie- szanka	rodzaj asfaltu	próbka	głębokość koleiny		WTS [mm/1000 cykli]	zawartość wolnych przestrzeni w mma [%(v/v)]
			RD [mm]	PRD [%]		
z grysem andezytowym	50/70	1	3,2	6,4	0,075	3,0
		2	2,9	5,8	0,090	
		średnia		6,1	0,08	
	PMB 45/80-55	1	2,4	4,8	0,048	3,1
		2	2,3	4,6	0,046	
		średnia		4,7	0,05	
z kruszywem melafirowym	50/70	1	4,1	10,2	0,171	2,6
		2	4,0	10,0	0,203	
		średnia		10,1	0,19	
	PMB 45/80-55	1	3,7	9,3	0,117	2,7
		2	3,4	8,5	0,086	
		średnia		8,9	0,10	

W badanych mieszankach AC 11 S stwierdzono poprawę odporności na koleinowanie przy zastosowaniu asfaltu modyfikowanego elastomerem zamiast asfaltu niemodyfikowanego, tj.:

- PRD zmniejszył się od 13% (z 10,1% do 8,9% dla AC 11 S z kruszywem melafirowym) do 30% (z 6,1% do 4,7% dla AC 11 S z kruszywem andezytowym),
- WTS zmniejszył się od 80 % (z 0,083 mm/1000 cykli do 0,046 mm/1000 cykli dla AC 11 S z kruszywem andezytowym) do 90% (z 0,19 mm/1000 cykli do 0,10 mm/1000 cykli dla AC 11 S z kruszywem melafirowym).

### Mieszanka AC WMS 16

Wyniki badań koleinowania mieszanki AC WMS 16 nr 1 i 2 zestawiono w tabeli 14., natomiast wyniki AC WMS 16 nr 3 w tabeli 15.

Tabela 14. Wyniki badania koleinowania AC WMS 16 nr 1 i 2.

rodzaj mieszanki	próbka	głębokość koleiny		WTS mm/1000 cykli	zawartość wolnych przestrzeni w mma [% (v/v)]
		RD [mm]	PRD [%]		
AC WMS16 - nr 1	1	3,2	3,2	0,062	2,7
	2	3,3	3,3	0,075	
	średnia		3,3	0,07	
AC WMS16 - nr 2	1	2,4	2,4	0,038	3,5
	2	2,6	2,6	0,049	
	średnia		2,5	0,04	

Tabela 15. Wyniki badania koleinowania AC WMS 16 nr 3

rodzaj asfaltu	pochodzenie mączki	próbka	głębokość koleiny		WTS [mm/1000 cykli]	Zawartość wolnych przestrzeni w mma [% (v/v)]
			RD [mm]	PRD [%]		
20/30	Cemex Rudniki	1	3,1	5,1	0,086	3,0
		2	3,2	5,4	0,090	
		średnia		5,3	0,09	
	Wolica	1	2,3	3,8	0,069	3,0
		2	2,3	3,8	0,052	
		średnia		3,8	0,06	
	Czatko- wice	1	2,9	4,8	0,080	3,0
		2	2,6	4,4	0,082	
średnia		4,6	0,08			
PMB 10/40-65	Czatko- wice	1	2,0	3,3	0,043	3,0
		2	2,0	3,3	0,044	
		średnia		3,3	0,04	

Uzyskane wyniki pozwoliły stwierdzić, że na odporność na deformacje trwałe w badaniu koleinowania mają wpływ następujące czynniki:

(1) po zwiększeniu odpylenia kruszyw z 50%(m/m) do 70%(m/m) oraz niewielkim zwiększeniu zawartości frakcji grysowej (o 5% m/m) odporność na koleinowanie uległa istotnej poprawie, tj.:

- głębokość koleiny zmniejszyła się o około 30 % (z 3,3% do 2,5%),
- prędkość przyrostu koleiny, zmniejszyła się około 70% (z 0,07 mm/1000 cykli do 0,04 mm/1000 cykli).

(2) stosując 3 wybrane mączki wapienne uzyskano znaczne różnice parametrów koleinowania:

- wyniki *PRD* różnią się o 40% (3,8 – 5,3%),
  - wyniki *WTS* się o około 50% (0,06 – 0,09 mm/1000 cykli).
- (3) w badanych mma z mączką Czatkowice stwierdzono poprawę odporności na koleinowanie przy zastosowaniu asfaltu modyfikowanego elastomerem zamiast asfaltu niemodyfikowanego, tj.:
- *PRD* zmniejszył się o 40% (z 4,6% do 3,3%),
  - *WTS* zmniejszył się prawie dwukrotnie (z 0,08 mm/1000 cykli do 0,04 mm/1000 cykli).

## Mieszanka SMA 11

Wyniki badań koleinowania mieszanki SMA 11 S zestawiono w tabeli 16.

Tabela 16. Wyniki badania koleinowania SMA 11 S

rodzaj asfaltu	próbka	głębokość koleiny		WTS [mm/1000 cykli]	zawartość wolnych przestrzeni w mma [% (v/v)]
		RD [mm]	PRD [%]		
PMB 45/80-55	1	3,0	7,1	0,110	2,9
	2	3,2	7,6	0,106	
	średnia		7,4	0,11	
PMB 45/80-65	1	1,9	4,5	0,042	2,6
	2	1,7	4,0	0,027	
	średnia		4,3	0,03	

Stopień modyfikacji asfaltu badany na mieszance SMA 11 S okazał bardzo istotny wpływ na uzyskane wyniki koleinowania; zastosowanie asfaltu wyżej modyfikowanego o wyższej temperaturze mięknięcia (75,0°C zamiast 55,4°C) oraz wyższym poziomie nawrotu sprężystego (84% zamiast 68%) poprawiło wyniki następująco:

- *PRD* zmniejszył się o około 70% (z 7,4% do 4,3%),
- *WTS* zmniejszył się ponad 3-krotnie (z 0,11 mm/1000 cykli do 0,03 mm/1000 cykli).

## Wnioski końcowe

Uzyskane wyniki badań koleinowania wybranych mieszanek mineralno-asfaltowych pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. zastosowanie asfaltów modyfikowanych polimerami we wszystkich badanych przypadkach poprawiło parametry koleinowania mma w stosunku do mieszanek z asfaltami niemodyfikowanymi; stopień poprawy był tutaj różny, co można wytłumaczyć różnym składem badanych mieszanek;
2. efekt zastosowania asfaltu modyfikowanego był wyższy w przypadku parametru opisującego szybkość przyrostu koleiny (*WTS*) niż proporcjonalnej głębokości koleiny (*PRD*);
3. na przykładzie mieszanki SMA stwierdzono, że stosując asfalt o wyższym stopniu modyfikacji, wykazujący wyższą

temperaturę mięknięcia i wyższy nawrót sprężysty, można znacząco poprawić parametry koleinowania;

4. na przykładzie mieszanki betonu asfaltowego do warstwy wiążącej stwierdzono, że zmiana ilości asfaltu w mma, nawet w zakresie odchyłki dopuszczalnej w wytycznych [11], tj. 0.3%(m/m), może znacząco pogorszyć parametry koleinowania;
5. na przykładzie mieszanki betonu asfaltowego o wysokim module sztywności stwierdzono, że poza zapyleniem kruszywa i przebiegiem krzywej uziarnienia także źródło pochodzenia mączki wapiennej ma wpływ na uzyskane parametry koleinowania.

Badania zostały przeprowadzone na ograniczonej liczbie próbek (po dwie do każdej kombinacji mieszanki) co uniemożliwiło szczegółową analizę statystyczną, np. wskazanie istotności różnic parametrów koleinowania poszczególnych serii wyników. Takie analizy były już uprzednio prowadzone przez autora w pracy [3].

Opisane powyżej wyniki potwierdziły korzystny wpływ modyfikacji asfaltu na zmniejszenie odporności mma na koleinowanie, niemniej efekt końcowy powinien być każdorazowo sprawdzony na mieszankach konkretnych materiałów.

## Bibliografia

- [1] K. Błażejowski, J. Olszacki, H. Peciakowski: *Rodzaj asfaltu a odporność nawierzchni na koleinowanie*, Magazyn Autostrady 1-2/2011
- [2] J. Chodur, S. Gaca, M. Tracz i inni: *Uwarunkowania przebudowy sieci drogowej*, praca w ramach działalności statutowej, Politechnika Krakowska, 2011-2012
- [3] W. Grzybowska, P. Zieliński: *Wpływ parametrów materiałowych na trwałość mieszanek mineralno-asfaltowych w nawierzchniach drogowych, w różnych warunkach obciążeń*, Monografia, Wydawnictwo MarGraf, Kraków 2003
- [4] J. Judycki, B. Dołżycki: *Badania wpływu zawartości piasków łamanego i naturalnego na odporność betonu asfaltowego na koleinowanie*, Prace V Międzynarodowej Konferencji: „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, s. 101-111, Kielce 1999
- [5] P. Mackiewicz, A. Szydło: *Wpływ parametrów reologicznych na deformacje mieszanek mineralno-asfaltowych*, Prace VIII Międzynarodowej Konferencji: „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, s. 99-107, Kielce 2002,
- [6] D. Sybilski, R. Horodecka: *Ocena odporności na koleinowanie w zależności od zastosowanego lepiszcza i metody badania*, Prace IV Międzynarodowej Konferencji: „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, s.107-119, Kielce 1999,
- [7] P. Radziszewski, J. Piłat, K. Kowalski, J. Król, M. Sarnowski: *Analiza lepkosprężystych właściwości asfaltów i polimeroasfaltów*, 58 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica, 16-21 września 2012 r. (str. 331-338)
- [8] P. Radziszewski, A. Plewa: *Wpływ pracy odkształcenia lepiszczy modyfikowanych na odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na koleinowanie*, IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna pt. „Nowoczesne technologie w budownictwie drogowym”, Poznań 2009
- [9] PN-EN 12697-22:2007: Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 22: Koleinowanie
- [10] PN-EN 12697-33:2006: Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 33: Przygotowanie próbek zagęszczanych urządzeniem wałującym
- [11] WT-2: Nawierzchnie asfaltowe na drogach publicznych, Wymagania techniczne, Warszawa 2008
- [12] J. Zawadzki: *Zasady projektowania betonu asfaltowego o zwiększonej odporności na odkształcenia trwałe*, zeszyt 48, IBDiM, Warszawa 1995 ■