



DARIUSZ SYBILSKI<sup>1)</sup>  
ROBERT MULARZUK<sup>2)</sup>  
WOJCIECH BAŃKOWSKI<sup>3)</sup>  
DOMINIKA MALISZEWSKA<sup>2)</sup>  
MACIEJ MALISZEWSKI<sup>2)</sup>

## BETON ASFALTOWY O WYSOKIM MODULE SZTYWNOŚCI AC WMS Z KRUSZYWAMI LOKALNYMI

**STRESZCZENIE.** Wdrożenie nowych norm i zaawansowanych metod badań funkcjonalnych mieszanek mineralno-asfaltowych stwarzają możliwość wiarygodnej oceny ich właściwości i prognozowanie trwałości nawierzchni. Otwiera to także możliwości stosowania kruszyw lokalnych lub alternatywnych, których właściwości często są uważane za słabsze lub wątpliwe. W artykule opisano badania betonu asfaltowego o wysokim module sztywności z zastosowaniem różnorodnych kruszyw. Mieszanki poddano badaniom funkcjonalnym: koleinowania, modułu sztywności, zmęczenia, odporności na działanie wody. Stwierdzono przydatność kruszyw uznawanych za słabsze do mieszanek BAWMS.

<sup>1)</sup> prof. dr hab. inż. – Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa

<sup>2)</sup> mgr inż. – Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa

<sup>3)</sup> dr inż. – Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa

## 1. WSTĘP

Okres kilku ostatnich lat i kilkunastu najbliższych w polskim drogownictwie będzie odznaczał się napływem znacznych nakładów finansowych na modernizację i rozbudowę infrastruktury transportowej, a w tym dróg krajowych i samorządowych. Optymistycznym sygnałem o rozmachu robót drogowych towarzyszą obserwacje problemów już nie finansowych (jak dotychczas), lecz materiałowych i logistycznych. Pojawiają się bariery utrudniające realizację ambitnych zamierzeń zarządców dróg w postaci braku kruszyw mineralnych, lepiszczy asfaltowych, cementu i innych materiałów. Inne bariery mają charakter logistyczny i wynikają z licznych przeszkód w transporcie materiałów naszymi drogami wskutek remontów tych dróg. Szczególnego znaczenia nabiera w tej sytuacji racjonalne wykorzystanie materiałów lokalnych i stosowanie technologii budowy i utrzymania dróg najlepiej dostosowanych do lokalnych warunków materiałowych. Życzenie niektórych inwestorów, aby wszystkie warstwy nawierzchni dróg były wykonane z kruszyw o najwyższej jakości i pochodzących z Dolnego Śląska jest nieracjonalne i niewykonalne.

Prace IBDiM nad przystosowaniem betonu asfaltowego o wysokim module sztywności i jego wdrożeniem w Polsce prowadzone są od kilku lat. Technologia ta spotkała się z zainteresowaniem inwestorów, projektantów i wykonawców. Opis i wymagania podano w kolejnych Zeszytach 63 i 70, seria I (Informacje, Instrukcje), IBDiM [1 - 2].

Beton asfaltowy o wysokim module sztywności (BAWMS) w stosunku do zwykłego betonu asfaltowego daje możliwość zwiększenia trwałości zmęczeniowej i odporności na koleinowanie nawierzchni. Stosowany w BAWMS twardy asfalt (często stosowane są polimeroasfalty) zwiększa sztywność i odporność na koleinowanie, a duża zawartość lepiszcza i relatywnie mała zawartość wolnych przestrzeni zwiększa trwałość zmęczeniową mieszanki i nawierzchni.

Technologia ta została opracowana we Francji i jest tam stosowana skutecznie od wielu lat. Jednym z efektów tych doświadczeń jest stosowanie kruszyw niższej jakości co jest rekompensowane stosowaniem twardego asfaltu oraz strukturą i sztywnością mieszanki. Zwiększenie sztywności lepiszcza zmniejsza naprężenie w kruszywie mieszanki.

W niniejszym artykule przedstawiamy rezultaty pracy badawczej wykonanej w IBDiM na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad.

## 2. KRUSZYWA DO MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH WEDŁUG POLSKICH PRZEPISÓW

W tablicy 1 porównano wymagania wobec kruszywa grubego do stosowania według dotychczasowej normy PN-S-96025:2000 [3] do betonu asfaltowego do warstw wiążącej lub podbudowy nawierzchni dróg KR3 – KR6 oraz do betonu asfaltowego o wysokim module sztywności według zeszytów 63 i 70, IBDiM.

Początkowe wymagania wobec materiałów do BA WMS były mniej rygorystyczne niż w normie. W nowszej wersji ZW-WMS 2007 wymagania te zostały jeszcze złagodzone, dopuszczając kruszywo z naturalnie rozdrobnionego surowca skalnego.

Tablica 1. Kruszywo dopuszczone do warstwy wiążącej lub podbudowy nawierzchni dróg KR3-6

Table 1. Aggregates accepted for binder and base course for road pavement of traffic load category KR3-6

Warstwa	Kruszywo według przepisów		
	PN-S-96025	ZW-WMS 2002	ZW-WMS 2007
Wiążąca	<ul style="list-style-type: none"> <li>granulowane z surowca skalnego oraz sztucznego (żuźle pomiedziowe lub stalownicze), kl. I, gat. 1,2</li> <li>grys i żwir kruszony z naturalnie rozdrobnionego surowca skalnego, kl. I, gat. 1, 2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>łamane zwykle i granulowane z surowca skalnego oraz sztucznego (żuźle), kl. I,II, gat. 1,2</li> <li>grys z żuźła stalowniczego</li> <li>grys z żuźła pomiedziowego</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>łamane zwykle i granulowane z surowca skalnego oraz sztucznego (żuźle pomiedziowe lub stalownicze), kl. I,II, gat. 1,2</li> <li>grys i żwir kruszony z naturalnie rozdrobnionego surowca skalnego, kl. I, II, gat. 1, 2</li> </ul>
Podbudowa	<ul style="list-style-type: none"> <li>łamane zwykle i granulowane z surowca skalnego oraz sztucznego (żuźle), kl. I,II, gat. 1,2</li> <li>grys i żwir kruszony z naturalnie rozdrobnionego surowca skalnego, kl. I, II, gat. 1, 2</li> </ul>		

Badania miały na celu sprawdzenie możliwości stosowania w betonie asfaltowym o wysokim module sztywności kruszyw słabszych, bądź wzbudzających wątpliwości ze względu na pochodzenie.

Ważną kwestią są wymagania stawiane poszczególnym rodzajom kruszyw. O ile kruszywa łamane zwykle i granulowane z surowca skalnego, niezależnie z jakiej skały, mają jednakowe wymagania, tak inne wymagania stawiane są żuźlom. W tablicy 2 podano różnice w wymaganiach wobec kruszyw według odpowiednich norm. Z tablicy wynika, że wymagań wobec kruszywa kamiennego pochodzenia naturalnego jest mniej w porównaniu do ilości wymagań wobec żuźła.

Tablica 2. Wymagania wg PN-B-11115:1998 wobec kruszywa z żużła i wg PN-B-11112:1996 wobec grysu ze skał magmowych i przeobrażonych  
 Table 2. PN-B-1115: 1998 requirements for slag aggregates and PN-B-11112: 1996 requirements for aggregates of igneous or metamorphous rocks

Lp.	Właściwości	Klasa <sup>*)</sup>		
		A/I	B/II	C/III
1	Zawartość zanieczyszczeń obcych, nie więcej niż, % m/m	1/0,1	2/0,2	5/0,3
2	Zawartość pyłów mineralnych poniżej 0,063/0,075 mm, nie więcej niż, % m/m	3/(2;1,5)	5/(4;2,5)	8/(5;3,5)
3	Nasiąkliwość, nie więcej niż, % m/m	3/(1,5;2)	5/2	8/3
4	Mrozoodporność metodą krystalizacji, nie więcej niż, % m/m	2/2	5/5	10/10
5	Mrozoodporność metodą bezpośrednią, nie więcej niż, % m/m	10/10	30/30	–/–
6	Zawartość ziaren nieforemnych, nie więcej niż, % m/m	20/25	35/30	50/35
7	Rozpad wapniowy, nie więcej niż, % m/m	1/–	2/–	3/–
8	Rozpad żelazawy, nie więcej niż, % m/m	1/–	2/–	3/–
9	Ścieralność w bębnie Los Angeles, nie więcej niż, % m/m	25/25	35/35	45/45
10	Przyczepność asfaltu do kruszywa	dobra	dobra	–

<sup>\*)</sup> w liczniku podano wymagania wg PN-B-11115:1998, a w mianowniku wg PN-B-11112:1996

W badaniach uwzględniono również nowe wymagania wobec kruszyw do mieszanek mineralno-asfaltowych wprowadzone normą PN-EN 13043:2004 [4]. Norma ta wprowadza klasyfikację kruszyw na podstawie nowych badań, bądź zmienionych w stosunku do obecnie stosowanych w Polsce. Wymagania te uwzględniono w ZW-WMS 2007.

Ponadto uwzględniono zmiany w projektowaniu betonu asfaltowego wynikające z wprowadzenia nowego zestawu sit i konsekwencji w postaci zmiany krzywych granicznych uziarnienia mieszanek mineralno-asfaltowych [5].

### 3. MATERIAŁY

Do badań wybrano kruszywa klasy II, III lub pozaklasowe:

- wapienne,
- granitowe,
- z przekruszonych otoczków,
- z żużła stalowniczego.

Jako kruszywo porównawcze wybrano kruszywo bazaltowe.

Zastosowano asfalt 20/30 o właściwościach podanych w tabelicy 3. Do asfaltu dodano środek adhezyjny w ilości 0,3 % m/m.

Tablica 3. Podstawowe właściwości asfaltu drogowego 20/30  
Table 3. Basic properties of road bitumen 20/30

Właściwości	Asfalt 20/30
Penetracja w 15 °C, 0,1 mm	10
Penetracja w 25 °C, 0,1 mm	23
Temperatura mięknięcia PiK, °C	62
Temperatura łamliwości, °C	-9
Po RTFOT	
Zmiana masy po RTFOT, %	-0,054
Penetracja w 25 °C, 0,1 mm	19
Temperatura mięknięcia PiK, °C	66
Temperatura łamliwości, °C	-8

Zaprojektowano mieszanki BAWMS16 odrębnie z każdym kruszywem:

- kruszywo bazaltowe: BAWMS16B
- kruszywo wapienne: BAWMS16W
- kruszywo granitowe: BAWMS16G
- kruszywo łamane z otoczków: BAWMS16O
- kruszywo z żużla stalowniczego: BAWMS16Z.

## 4. PROGRAM I METODYKA BADAŃ

Program badań obejmował:

- badania podstawowe kruszyw wg PN-B-11112:1996 i/lub PN-B-11115:1998
  - ścieralność w bębnie Los Angeles wg PN-B-06714-42:1979,
  - nasiąkliwość wg PN-B-06714-18:1977,
  - mrozoodporność wg PN-B-06714-19:1978,
  - mrozoodporność wg PN-B-06714-20:1978,
  - uziarnienie metodą na mokro wg PN-EN 933-1:2000,
  - zawartość zanieczyszczeń obcych wg PN-B-06714-12:1976,
  - zawartość ziaren nieforemnych wg PN-B-06714-16:1976,

- zawartość zanieczyszczeń organicznych wg PN-B-06714-26:1978,
- rozpad krzemianu dwuwapniowego wg PN-EN 1744-1:2000,
- rozpad związków żelaza wg PN-EN 1744-1:2000,
- przyczepność asfaltu wg PN-EN 12697-11:2000 (U);
- badania asfaltu wg PN-EN 12697-11:2000 (U).
  - gęstość objętościowa wg Zeszytu 64/2002 IBDiM,
  - gęstość objętościowa wg EN 12697-5:2002,
  - kąt zsypu piasku, według procedury IBDiM (frakcja 0,18 - 2 mm),
  - zawartość ziaren przekruszonych wg PN-S-96025:2000 [4];
- badania dodatkowe kruszyw wg PN-EN-13043:2004
  - wskaźnik płaskości wg PN-EN 933-3:1999,
  - wskaźnik kształtu wg PN-EN 933-4:2001,
  - zawartość ziaren przekruszonych lub łamanych wg PN-EN 933-5:2000,
  - kanciastość kruszywa drobnego wg PN-EN 933-6:2002,
  - odporność na rozdrabnianie (współczynnik Los Angeles) wg PN-EN 1097-2:2000,
  - odporność na uderzenie wg PN-EN 1097-2:2000,
  - odporność na polerowanie (PSV) wg PN-EN 1097-8:2002,
  - odporność na ścieranie powierzchniowe (AAV) wg PN-EN 1097-8:2002,
  - odporność na ścieranie (mikro-Deval) wg PN-EN 1097-1:2000,
  - gęstość ziaren wg PN-EN 1097-6:2002 i PN-EN 1097-6:2002/AC:2004,
  - nasiąkliwość wg PN-EN 1097-6:2002 i PN-EN 1097-6:2002/AC:2004,
  - mrozoodporność wg PN-EN 1367-1:2001 oraz PN-EN 1367-1:2001/Ap1:2004 lub PN-EN 1367-2:2000,
  - odporność na szok termiczny wg PN-EN 1367-5:2004;
- opracowanie składu BAWMS na podstawie podstawowych właściwości fizycznych i wytrzymałościowych (z korektą przebiegu krzywej uziarnienia, mieszanem różnych kruszyw, zmianą zawartości asfaltu);
- badania BAWMS
  - gęstość objętościowa (dawna gęstość strukturalna lub pozorna) - metoda hydrostatyczna, wg Zeszytu 64/2002 IBDiM, arkusz 05,
  - gęstość (dawna gęstość objętościowa lub ciężar właściwy) oznaczona w piknometrze z użyciem czterochloroetylenu, wg Zeszytu 64/2002 IBDiM, arkusz 04,

- zawartość wolnych przestrzeni  $P_p$  w zagęszczonej mieszance mineralno-asfaltowej oraz wypełnienie jej asfaltem obliczono wg Zeszytu 64/2002 IBDiM, arkusz 09 i 10,
- moduł sztywności pełzania pod obciążeniem statycznym w 40 °C wg Zeszytu 64/2002 IBDiM, arkusz 16,
- moduł sztywności sprężystej metoda rozciągania pośredniego w 0, 10, 20 °C wg PN-EN 12697-26:2005,
- moduł sztywności metodą belki 4PB w 10 °C i 10 Hz (MTS) wg AASHTO TP8-94,
- trwałości zmęczeniowej metodą belki 4PB w 10 °C, 10 Hz i z odkształceniem poziomym  $130 \times 10^{-6}$  (MTS) wg AASHTO TP8-94,
- koleinowanie w dużym aparacie (LCPC) w 60 °C wg PN-EN 12697-22:2004,
- wodoodporność według PN-EN 12697-12:2004.

## 5. WŁAŚCIWOŚCI ZASTOSOWANYCH KRUSZYW

W kolejnych tablicach 4, 5 i 6 przedstawiono właściwości kruszyw zastosowanych w mieszankach betonu asfaltowego o wysokim module, uznawanych za słabe lub wątpliwe. Szerzej omówiono wymagania i właściwości żużla stalowniczego i warunki stosowania kruszyw z niego wyprodukowych.

Tablica 4. Wybrane właściwości kruszywa wapiennego  
Table 4. Chosen properties of lime aggregate

Właściwości	Jednostka	Metoda badania	Wynik
Mrozoodporność bezpośrednia	%	PN-78/B-06714/19	1,0
Nasiąkliwość	%	PN-77/B-06714/18	1,6
Wskaźnik jednorodności ścierania	-		0,25
Ścieralność po 1/5 obrotów	%	PN-79/B-06714/42	8,2
Ścieralność całkowita	%		32,5
Zawartość związków siarki	%	PN-78/B-06714/28	0,4
Zawartość ziaren niekształtnych	%	PN-78/B-06714/16	25
Zawartość zanieczyszczeń organicznych (NaOH)	barwa	PN-78/B-06714/26	nie ciemniejsza niż wzorcowa

Tablica 5. Właściwości kruszywa łamanego granitowego  
Table 5. Properties of crushed granite aggregate

Właściwości		Wynik i kategoria wymiar 0/2		Wynik i kategoria wymiar 2/8		Wynik i kategoria wymiar 8/16			
Uziarnienie wg PN-EN, % (m/m); skład ziarnowy; wymiar oczka # sita kontrolnego w mm	31,5	100	G <sub>F</sub> 85	100	G <sub>F</sub> 90/10	100	G <sub>C</sub> 90/10		
	16							95,23	92,85
	8							31,33	7,59
	4							1,91	1,17
	2							0,09	
	1								
	0,5								
	0,25								
	0,125								
Wymiar ziaren wg PN-EN, d/D		0/2	–	2/8	–	8/16	–		
Gęstość ziaren wg PN-EN, Mg/m									
	$\rho_a$	2,65	–	2,67	–	2,65	–		
	$\rho_{rd}$	2,33		2,58		2,62			
	$\rho_{ssd}$	2,45		2,61		2,63			
Zawartość pyłów wg PN-EN, $f$ %		1,5	$f_3$	0,02	$f_{0,5}$	0,06	$f_{0,5}$		
Wskaźnik kształtu wg PN-EN, $SI$		–	–	14	$SI_{15}$	16	$SI_{20}$		
Wskaźnik piaskowy wg PN-EN, $SE$		94	–	–	–	–	–		
Odporność na rozdrabnianie wg PN-EN, $LA$				32	$LA_{35}$	34	$LA_{40}$		
Odporność na rozdrabnianie, $M_{DE}$		–	–	–	–	8	$M_{DE}10$		
Odporność na polerowanie wg PN-EN, $PSV$		–	–	53	$PSV_{50}$	53	$PSV_{50}$		
Nasiąkliwość wg PN-EN, $W_{24}$ %		3,4	–	0,3	$W_{24}1$	0,3	$W_{24}1$		
Mrozoodporność wg PN-EN, $F$ %				0,15	$F_1$	0,18	$F_1$		
Szok termiczny wg PN-EN, $I$ % $V_{LA}$		–	–	0,2 7,1	–	0,2 7,1	–		
Skurcz przy wysychaniu wg PN-EN, $S$ %		–	–	–	–	0,02	–		
Zanieczyszczenia organiczne wg PN-EN, humus		barwa jaśniejsza	–	barwa jaśniejsza	–	barwa jaśniejsza	–		
Ziarna przekruszone wg PN-EN, % ziarna o pow. przekrusz. i łamanych ziarna o pow. zaokrąglonych ziarna całkowicie przekrusz. i łamane ziarna całkowicie zaokrąglone		–	–	100 0,0 100 0,0	$C_{100/0}$	100 0,0 100 0,0	$C_{100/0}$		



Tablica 6. Właściwości kruszywa łamanego z otoczków  
 Table 6. Properties of crushed pebble aggregate

Właściwości	Wynik i kategoria wymiar 0/2		Wynik i kategoria wymiar 2/6,3		Wynik i kategoria wymiar 6,3/12,5		Wynik i kategoria wymiar 12,5/20	
	Uziarnienie wg PN-EN, % (m/m); skład ziarnowy; wymiar oczka # sita kontrolnego w mm	31,5						
	20				100	100	100	100
	16				98,35	99,00	97,25	97,25
	12,5				64,14	52,27	30,22	30,22
	8				11,37	11,30	13,07	13,07
	6,3	$G_F,85$			3,51	11,30	2,03	2,03
	4					11,30	0,04	0,04
	2					1,66		
	1							
	0,5							
	0,25							
	0,125							
Wymiar ziaren wg PN-EN, d/D	0/2	-	2/6		6/12		12/20	
Gęstość ziaren wg PN-EN, Mg/m	2,68	-	2,69	-	2,68	-	2,65	-
$\rho_a$	2,52	-	2,56	-	2,58	-	2,62	-
$\rho_{rd}$	2,58	-	2,61	-	2,62	-	2,63	-
$\rho_{bsd}$								
Zawartość pyłów wg PN-EN, f %	8,72	$f_{10}$	1,1	$f_2$	0,75	$f_1$	0,91	$f_1$
Wskaźnik kształtu wg PN-EN, SI	-	-	10,6	$SI_{15}$	13,8	$SI_{15}$	5,1	$SI_{15}$
Wskaźnik piaskowy wg PN-EN, SE	76,13	-	-	-	-	-	-	-
Wskaźnik płaskości PN-EN FI	-	-	11,9	$FI_{15}$	8,6	$FI_{10}$	6,8	$FI_{10}$
Błękit metylowy wg PN-EN, $MB_F$	0,7	$MB_F,10$	0,7	$MB_F,10$	0,7	$MB_F,10$	0,7	$MB_F,10$

Tablica 6 (ciąg dalszy). Właściwości kruszywa łamanego z otoczków  
 Table 6 (continuation). Properties of crushed pebble aggregate

Właściwości	Wynik i kategoria wymiar 0/2		Wynik i kategoria wymiar 2/6,3		Wynik i kategoria wymiar 6,3/12,5		Wynik i kategoria wymiar 12,5/20	
Odporność na rozdrabnianie wg PN-EN, $L_A$			18,9	$L_{A_{25}}$	18,4	$L_{A_{25}}$	18,4	$L_{A_{25}}$
Odporność na rozdrabnianie, $M_{DE}$	–	–	14,0	$M_{DE_{15}}$	13,7	$M_{DE_{15}}$	13,7	$M_{DE_{15}}$
Odporność na polerowanie wg PN-EN, $PSV$	–	–	51,0	$PSV_{50}$	51,0	$PSV_{50}$	51,0	$PSV_{50}$
Nasiąkliwość wg PN-EN, $W_{24}$ , %	2,37	–	1,88	$WA_{24,2}$	1,37	$WA_{24,2}$	1,04	$WA_{24,2}$
Mrozoodporność wg PN-EN, $F$ %	–	–	1,13/2,4	$F_2 / F_4$	1,15/2,4	$F_2 / F_4$	0,98/2,1	$F_1 / F_4$
Szok termiczny wg PN-EN, $I$ % $V_{L4}$	–	–	0,53/2,07	–	0,53/2,07	–	0,53/2,07	–
Skurcz przy wysychaniu wg PN-EN, $S$ %	0,033	–	0,033	–	0,033	–	0,033	–
Zanieczyszczenia organiczne wg PN-EN, humus	barwa jaśniejsza	–	barwa jaśniejsza	–	barwa jaśniejsza	–	barwa jaśniejsza	–
Lekkie zanieczyszczenia PN-EN, $m_{LPC}$ %	0,122	$m_{LPC}$ 0,1	0,122	$m_{LPC}$ 0,1	0,122	$m_{LPC}$ 0,1	0,122	$m_{LPC}$ 0,1
Ziarna przekruszone wg PN-EN, %			100	$C_{100/0}$	100	$C_{100/0}$	89,1	$C_{90/100}$
ziarna o pow. przekrusz. i łamanych			0,0		0,0		10,9	
ziarna o pow. zaokrąglonych			100		100		13,9	
ziarna całkowicie przekrusz. i łamane			0,0		0,0		100	
ziarna całkowicie zaokrąglone								

## Kruszywo z żużla stalowniczego

Najbardziej szkodliwe dla kruszywa są pozostałości topnika wapienno-dolomitowego. Jeśli topnik został dodany zbyt późno lub nie został zaabsorbowany, to w żużlu mogą znajdować się fragmenty wolnego niezwiązanego wapna CaO. W żużlu stalowniczym dochodzi także do zmian fazowych, a więc i rozpadów krzemianowych. Jednak rozpady związane z występowaniem wolnego tlenku wapnia mają większe znaczenie. Fragmenty wolnego wapnia w zetknięciu z wilgocią ulegają lasowaniu, co wytwarza temperaturę i prowadzi do powstania uwodnionego tlenku wapnia ze zwiększeniem objętości. Skutkiem tego procesu jest rozpad żużla polegający na pęknięciach pojedynczych ziaren kruszywa [6].

Żużle stalownicze przypominają z wyglądu bazalt, mają dużą gęstość objętościową. Posiadają wysoką wytrzymałość na ściskanie, dużą szorstkość, niską ścieralność i polerowalność. Podstawowy czynnik wpływający na właściwości żużli, a przez to i na ich zastosowania, to skład chemiczny i budowa zależna od szybkości stygnięcia oraz technologii wytwarzania kruszywa.

Żużel stalowniczy pod względem składu chemicznego zbliżony jest do lawy skalnej, z której powstały naturalne materiały kamienne z wyraźną przewagą niektórych tlenków (np. CaO).

Duży wpływ składu chemicznego żużla na cechy produkowanych z nich kruszyw powoduje, że istotna jest stałość proporcji składników. W tablicy 7 przedstawiono przykładowy skład żużla stalowniczego i jego zmienność oraz skład bazaltu. Proporcje składników bazaltu i żużla różnią się między sobą. Wynikają z tego odmienne właściwości mimo pozornego, wizualnego podobieństwa obu kruszyw.

Tablica 7. Porównanie składu chemicznego żużla stalowniczego i bazaltu  
Table 7. Comparison of chemical composition of steel slag and basalt

Skład, %	Żużel stalowniczy	Bazalt
CaO	43,5	12,0
MgO	5,0	0,7
SiO <sub>2</sub>	15,3	54,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,0	27,0
Mn	4,5	–
Fe (całk.)	23,0	2,2
Pozostałe tlenki	–	0,5
S (w przeliczeniu na SO <sub>3</sub> )	0,5	–
Wilgoć (H <sub>2</sub> O)	3,0	–

Cechy fizyko-mechaniczne żużli stalowniczych wynikają z ich składu chemicznego i budowy. Ze względu na wysoką zawartość związków żelaza żużle stalownicze charakteryzują się wysoką gęstością, od 3,1 do 3,5 g/cm<sup>3</sup> (bazalt około 3,0 g/cm<sup>3</sup>, granit około 2,6-2,7 g/cm<sup>3</sup>). Mieszanki mineralno-asfaltowe (MMA) zawierające żużel konwertorowy są prze to cięższe. Zwiększona gęstość sprawia, że ta sama mieszanka o tej samej masie z żużlem stalowniczym ma mniejszą objętość niż mieszanka z kruszywem naturalnym, co sprawia, że można z niej wykonać warstwę nawierzchni o mniejszej powierzchni (przy tej samej grubości).

Żużel stalowniczy ze względu na większą porowatość charakteryzuje się też zwiększoną nasiąkliwością (około 3 % w zależności od uziarnienia i wieku, dla porównania granit od 0,0 do 2,3 %). Nie powoduje to jednak obniżenia mrozoodporności w porównaniu do kruszyw naturalnych. W przypadku stosowania żużli w MMA zwiększona porowatość nie powoduje pogorszenia właściwości: występuje zwiększona chłonność asfaltu, co nie pogarsza odporności MMA na deformacje trwałe, a polepsza jej trwałość (odporność na mróz i wodę, zmęczenie).

Dopuszczenie kruszywa z żużla stalowniczego do budowy dróg wymaga spełnienia dodatkowych wymagań. Tablica 8 zawiera wymagania normy PN-B-11115:1998 oraz średnie parametry kruszywa żużlowego.

Tablica 8. Wymagania i właściwości fizyko-mechaniczne grysów z żużla stalowniczego

Table 8. Requirements and physical and mechanical properties of steel slag grits

Właściwości	Wymagania dla klasy wg PN-B-11115:1998			Grysy żużlowe
	A	B	C	
Ścieralność w bębnie Los Angeles, całkowita po pełnej liczbie obrotów w %, nie więcej niż	25	35	45	16,0
Nasiąkliwość w %, nie więcej niż	3	5	8	3,2
Mrozoodporność w %, nie więcej niż	2	5	10	1,1
Mrozoodporność wg metody zmodyfikowanej w % (+ 2 % NaCl), nie więcej niż	10	20	–	< 5,0
Zawartość ziaren mniejszych niż 0,063 mm w %, nie więcej niż	3	5	8	< 3,0
Zawartość zanieczyszczeń obcych w %, nie więcej niż	1	2	5	< 0,3
Zawartość ziaren nieforemnych w %, nie więcej niż	20	35	50	< 20
Rozpad wapniowy w %, nie więcej niż	1	2	3	0,3
Rozpad żelazawy w %, nie więcej niż	1	2	3	0,5
Przyczepność asfaltu	dobra	dobra	–	bardzo dobra

Kruszywo z żużla stalowniczego spełnia wymagania normy w większości klasy A (oprócz nasiąkliwości). Charakteryzuje się małą ścieralnością. Spełnia także wymagania wobec mrozoodporności.

Ważną cechą ze względu na odporność nawierzchni na działanie czynników atmosferycznych jest przyczepność asfaltu do kruszywa. W przypadku żużli stalowniczych jest ona bardzo dobra, lepsza niż np. w przypadku bazaltu. Wynika to z mniejszej niż w bazalcie zawartości  $\text{SiO}_2$ , około 15,5 % (m/m), i wynikającego z tego zasadowego charakteru żużla. Żużel stalowniczy ma odczyn 10,5 pH i pod względem kwasowości zbliżony jest do wapienia i dolomitu, a więc skał, z którymi asfalt wykazuje bardzo dobre powinowactwo i zwykle stosowanie środka adhezyjnego nie jest potrzebne

W przypadku, gdy mieszanka mineralna składa się z żużla i kruszywa bogatego w krzemionkę, stosowanie środka adhezyjnego może być potrzebne. Należy to ustalić laboratoryjnie. Jednocześnie należy sprawdzić, czy dobierany środek nie pogorszy przyczepności asfaltu do żużla.

Poza właściwościami normowymi bardzo przydatne przy ocenie przydatności kruszyw do np. MMA są cechy pozanormowe. Tablica 9 przedstawia niektóre z tych cech żużla i bazaltu [7].

Tablica 9. Właściwości pozanormowe grysów z żużla stalowniczego i bazaltu  
Table 9. Non-standard properties of steel slag and basalt grits

Właściwości	Rodzaj kruszywa	
	Żużel stalowniczy	Bazalt
Wskaźnik rozkruszenia, % (m/m)		
Fracja:		
16 - 31,5	19,2	14,5
11 - 16	13,7	8,9
8 - 11	6,7	3,8
4 - 8	5,0	3,2
Wskaźnik rozkruszenia po szoku termicznym (dla frakcji 8-11), % (m/m)	7,1	3,8
Wzrost rozkruszenia po szoku termicznym, % (procedura IBDiM)	0,4	0,0
Wskaźnik polerowalności PSV	74	47
Kąt zsypania dla frakcji 0,18-2, stopnie (procedura IBDiM)		
pochylenie bazowe 45°	34	39
pochylenie bazowe 90°	33	36

Żużel stalowniczy ma nieco mniejszą od bazaltu odporność na rozkruszenie. Charakteryzuje się również wysoką wytrzymałością na ściskanie. Wartość kąta zsypania naturalnego żużla stalowniczego jest mniejsza. Świadczy to o mniejszym tarciu wewnętrznym między najgrubszymi ziarnami badanej frakcji.

Bardzo ważną i decydującą o niektórych zastosowaniach cechą żużli stalowniczych jest wysoka szorstkość, znacznie wyższa od bazaltu. Szorstkość nawierzchni z żużlem stalowniczym jest trwała ze względu na małą polerowalność (wysoki wskaźnik PSV 74). Przewyższa on nie tylko wartość PSV dla skał wylewnych (najniższego wśród skał) np. bazaltu 47, ale także dla skał głębinowych o strukturze gruboziarnistej i metamorficznych o największym wśród skał naturalnych PSV około 57. Dzięki temu żużle z powodzeniem używane są do poprawy szorstkości nawierzchni drogowych (także w zimowym utrzymaniu).

Ze względu na zwiększoną porowatość żużle stalownicze wykazują odmienne od kruszyw naturalnych właściwości termiczne. Porównanie przewodnictwa cieplnego żużli i granitu podaje tablica 10 [8].

Tabela 10. Porównanie przewodnictwa cieplnego żużli i granitu  
(1 – próbka sezonowana 1 rok, 2 – próbka sezonowana 2 lata)  
Table 10. Comparison of thermal conductivity of slags and granite  
(1 – one year seasoned sample, 2 – two years seasoned sample)

Właściwości	Żużel stalowniczy 1	Żużel stalowniczy 2	Żużel wielkopiecowy	Granit
Przewodnictwo cieplne, W/mK				
stan suchy, 22 °C	0,29	0,13	0,35	1,0
stan nasycony wodą, -10 °C	1,16	2,09	0,8 - 1,3	2,3

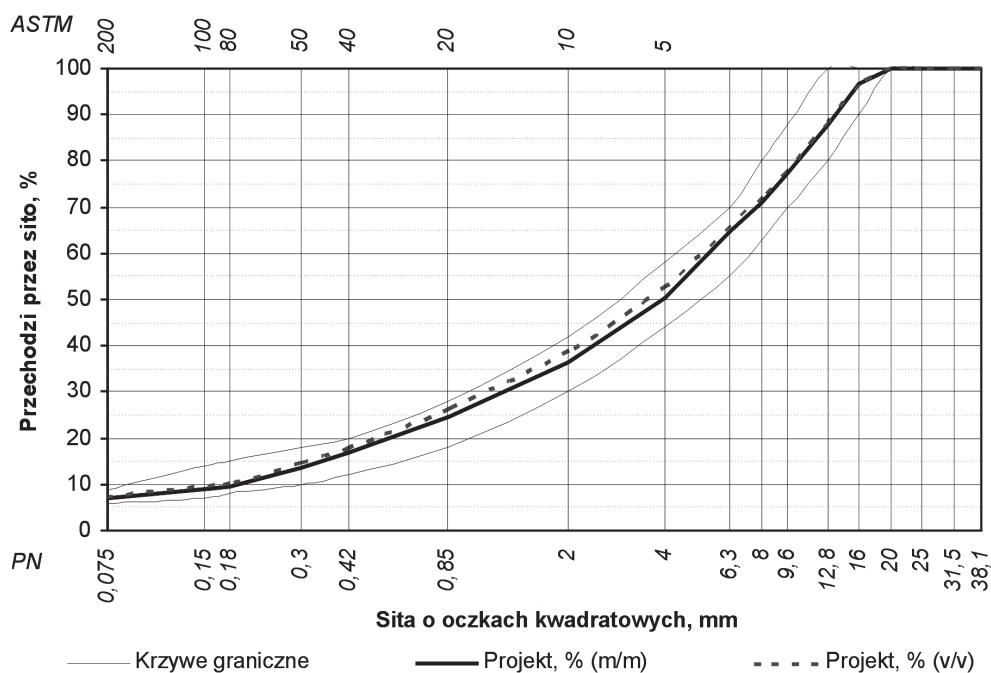
Przewodnictwo cieplne żużla stalowniczego jest mniejsze niż żużla wielkopiecowego lub granitu zarówno w stanie suchym w dodatniej temperaturze, jak i w stanie nasyconym wodą w temperaturze ujemnej.

## 6. SKŁAD I UZIARNIENIE MIESZANEK BAWMS16

W kolejnych tablicach 11 – 15 i na rysunkach 1 – 5 przedstawiono skład mieszanki mineralnej i mineralno-asfaltowej oraz krzywe uziarnienia.

Tablica 11. Skład BAWMS16B  
Table 11. Composition of BAWMS16B

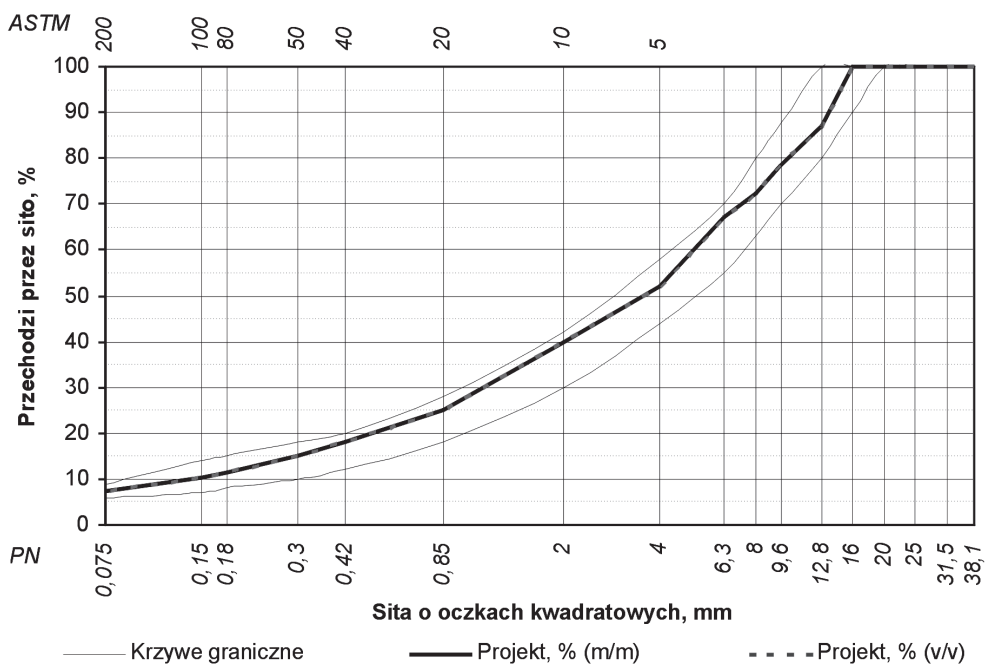
Składniki	Udział w MM, % m/m	Udział w MMA, % m/m
11/16 Bazalt	19,0	18,0
8/11 Bazalt	10,0	9,5
5/8 Bazalt	19,0	18,0
2/5 Bazalt	12,0	11,4
0/2 Granit	33,0	31,4
Mączka wapienna	7,0	6,6
Asfalt 20/30	–	5,1



Rys.1. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej BAWMS16B  
Fig.1. Grading curve of mixture BAWMS16B

Tablica 12. Skład BAWMS16W  
Table 12. Composition of BAWMS16W

Składniki	Udział w MM, % m/m	Udział w MMA, % m/m
4/16 Wapień	40,7	38,4
0/4 Wapień	55,0	52,0
Mączka wapienna	4,3	4,1
Asfalt 20/30	–	5,5

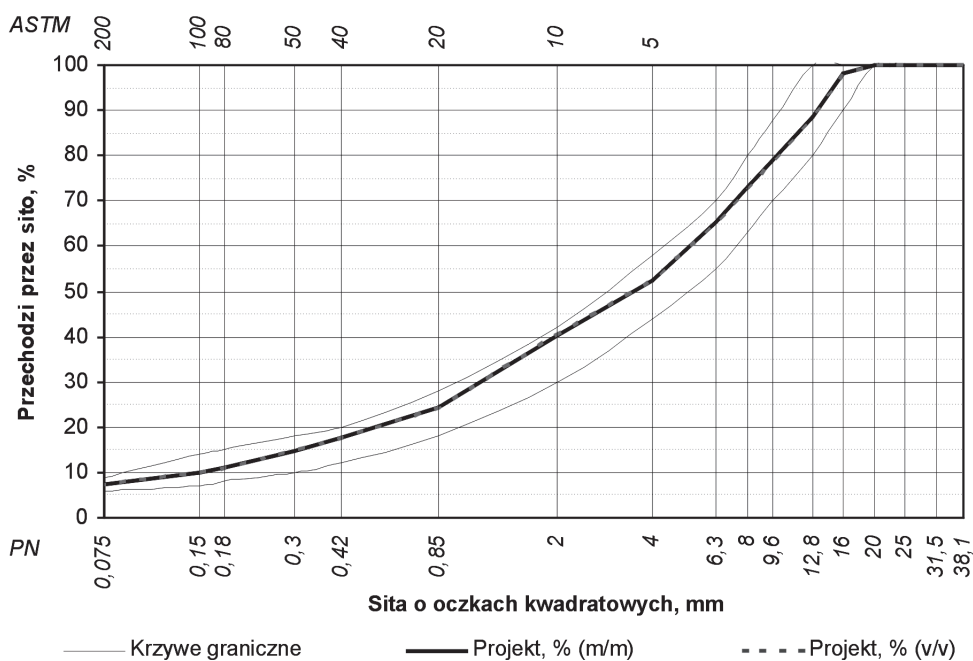


Rys.2. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej BAWMS16W  
Fig.2. Grading curve of mixture BAWMS16W



Tablica 13. Skład BAWMS16G  
Table 13. Composition of BAWMS16G

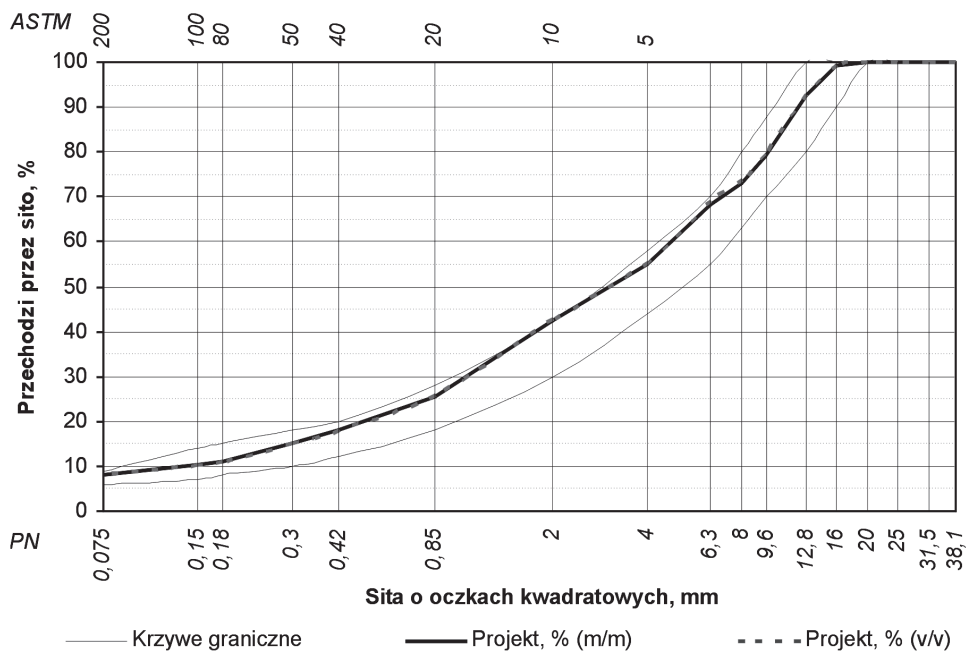
Składniki	Udział w MM, % m/m	Udział w MMA, % m/m
8/16 Granit	30,0	28,4
2/8 Granit	32,0	30,2
0/2 Granit	32,0	30,2
Mączka wapienna	6,0	5,7
Asfalt 20/30	–	5,5



Rys.3. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej BAWMS16G  
Fig.3. Grading curve of mixture BAWMS16G

Tablica 14. Skład BAWMS16O  
Table 14. Composition of BAWMS16O

Składniki	Udział w MM, % m/m	Udział w MMA, % m/m
8/16 Dolomit	12,5	11,9
6,3/12,8 grys z otoczek	18,0	17,1
2/6,3 grys z otoczek	25,0	23,8
0/2 piasek łamany	38,0	36,1
Mączka wapienna	6,5	6,2
Asfalt 20/30	-	4,9

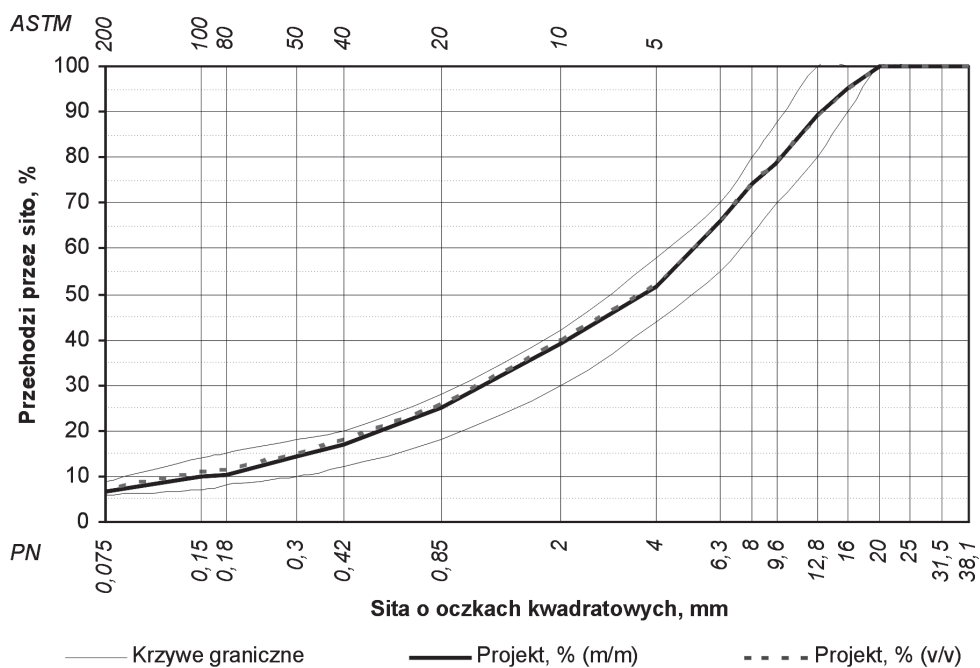


Rys.4. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej BAWMS16O

Fig.4. Grading curve of mixture BAWMS16O

Tablica 15. Skład BAWMS16Z  
Table 15. Composition of BAWMS16Z

Składniki	Udział w MM, % m/m	Udział w MMA, % m/m
12/20 Żużel	12,5	11,8
8/12 Żużel	15,0	14,2
4/8 Żużel	18,0	17,1
0/4 Żużel	51,5	48,8
Mączka wapienna	3,0	2,8
Asfalt 20/30	-	5,3



Rys.5. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej BAWMS16Z  
Fig.5. Grading curve of mixture BAWMS16Z

## 7. WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK BAWMS16

W tablicach od 16 do 21 zestawiono wyniki badań właściwości poszczególnych wariantów mieszanek mineralno-asfaltowych BAWMS16 z różnymi kruszywami.

Tablica 16. Właściwości BAWMS16B o zawartości asfaltu  $A_m = 4,6\%$  (m/m)  
Table 16. Properties of mixture BAWMS16B with bitumen content  $A_m = 4,6\%$  (m/m)

Właściwości	Wynik	Wymaganie
Gęstość mieszanki mineralnej, g/cm <sup>3</sup>	2,850	–
Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm <sup>3</sup>	2,636	–
Gęstość strukturalna mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm <sup>3</sup>	2,550	–
Wolna przestrzeń w próbkach Marshalla, 2 × 75 uderzeń, % (v/v)	3,3	od 3,0 do 5,0
Moduł sztywności pełzania pod obciąż. statycznym, 40 °C, MPa	45,1	≥ 22,0
Koleinowanie w dużym aparacie, 60 °C, 30 000 cykli, %	2,7	≤ 5
Moduł sztywności rozciągania pośredniego, 10 °C, MPa	21 118	–
Zespolony moduł sztywności, belka 4-punktowo zginana, MPa	19 756	≥ 14 000
Szkoda zmęczeniowa $D$ po 10 <sup>6</sup> cykli, przy odkształceniu równym 130 μm/m, %	> 50	≤ 50
Wodoodporność, %	114,9	≥ 80

Tablica 17. Właściwości BAWMS16B o zawartości asfaltu  $A_m = 5,1\%$  (m/m)  
Table 17. Properties of mixture BAWMS16B with bitumen content  $A_m = 5,1\%$  (m/m)

Właściwości	Wynik	Wymaganie
Gęstość mieszanki mineralnej, g/cm <sup>3</sup>	2,850	–
Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm <sup>3</sup>	2,617	–
Gęstość strukturalna mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm <sup>3</sup>	2,568	–
Wolna przestrzeń w próbkach Marshalla, 2 × 75 uderzeń, % (v/v)	1,9	od 3,0 do 5,0
Moduł sztywności pełzania pod obciąż. statycznym, 40 °C, MPa	39	≥ 22
Koleinowanie w dużym aparacie, 60 °C, 30 000 cykli, %	6,3	≤ 5
Moduł sztywności rozciągania pośredniego, 10 °C, MPa	19 272	–
Zespolony moduł sztywności, belka 4-punktowo zginana, MPa	17 950	≥ 14 000
Szkoda zmęczeniowa $D$ po 10 <sup>6</sup> cykli, przy odkształceniu równym 130 μm/m, %	49	≤ 50
Wodoodporność, %	118,7	≥ 80

Tablica 18. Właściwości BAWMS16W o zawartości asfaltu  $A_m = 5,5$  % (m/m)  
 Table 18. Properties of mixture BAWMS16W with bitumen content  $A_m = 5,5$  % (m/m)

Właściwości	Wynik	Wymaganie
Gęstość mieszanki mineralnej, g/cm <sup>3</sup>	2,698	–
Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm <sup>3</sup>	2,479	–
Gęstość strukturalna mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm <sup>3</sup>	2,403	–
Wolna przestrzeń w próbkach Marshalla, 2 × 75 uderzeń, % (v/v)	3,1	od 3,0 do 5,0
Moduł sztywności pełzania pod obciąż. statycznym, 40 °C, MPa	51,9	≥ 22,0
Koleinowanie w dużym aparacie, 60 °C, 30 000 cykli, %	3,7	≤ 5
Moduł sztywności rozciągania pośredniego, 10 °C, MPa	23 511	–
Zespolony moduł sztywności, belka 4-punktowo zginana, MPa	19 837	≥ 14 000
Szkoda zmęczeniowa $D$ po 10 <sup>6</sup> cykli, przy odkształceniu równym 130 μm/m, %	31,7	≤ 50
Wodoodporność, %	95,3	≥ 80

Tablica 19. Właściwości BAWMS16G o zawartości asfaltu  $A_m = 5,5$  % (m/m)  
 Table 19. Properties of mixture BAWMS16G with bitumen content  $A_m = 5,5$  % (m/m)

Właściwości	Wynik	Wymaganie
Gęstość mieszanki mineralnej, g/cm <sup>3</sup>	2,662	–
Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm <sup>3</sup>	2,448	–
Gęstość strukturalna mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm <sup>3</sup>	2,375	–
Wolna przestrzeń w próbkach Marshalla, 2 × 75 uderzeń, % (v/v)	3,0	od 3,0 do 5,0
Moduł sztywności pełzania pod obciąż. statycznym, 40 °C, MPa	42,7	≥ 22,0
Koleinowanie w dużym aparacie, 60 °C, 30 000 cykli, %	2,6	≤ 5
Moduł sztywności rozciągania pośredniego, 10 °C, MPa	17 241	–
Zespolony moduł sztywności, belka 4-punktowo zginana, MPa	17 291	≥ 14 000
Szkoda zmęczeniowa $D$ po 10 <sup>6</sup> cykli, przy odkształceniu równym 130 μm/m, %	> 50	≤ 50
Wodoodporność, %	107,8	≥ 80

Tablica 20. Właściwości BAWMS16O o zawartości asfaltu  $A_m = 4,9 \%$  (m/m)  
 Table 20. Properties of mixture BAWMS16O with bitumen content  $A_m = 4,9 \%$  (m/m)

Właściwości	Wynik	Wymaganie
Gęstość mieszanki mineralnej, g/cm <sup>3</sup>	2,691	–
Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm <sup>3</sup>	2,493	–
Gęstość strukturalna mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm <sup>3</sup>	2,419	–
Wolna przestrzeń w próbkach Marshalla, 2 × 75 uderzeń, % (v/v)	3,0	od 3,0 do 5,0
Moduł sztywności pełzania pod obciąż. statycznym, 40 °C, MPa	49,1	≥ 22,0
Koleinowanie w dużym aparacie, 60 °C, 30 000 cykli, %	2,0	≤ 5
Moduł sztywności rozciągania pośredniego, 10 °C, MPa	18 918	–
Zespolony moduł sztywności, belka 4-punktowo zginana, MPa	16 927	≥ 14 000
Szkoda zmęczeniowa $D$ po 10 <sup>6</sup> cykli, przy odkształceniu równym 100 μm/m, %	12,1	≤ 50
Szkoda zmęczeniowa $D$ po 10 <sup>6</sup> cykli, przy odkształceniu równym 130 μm/m, %	19,7	≤ 50
Wodoodporność, %	104,8	≥ 80

Tablica 21. Właściwości BAWMS16Z o zawartości asfaltu  $A_m = 5,3 \%$  (m/m)  
 Table 21. Properties of mixture BAWMS16Z with bitumen content  $A_m = 5,3 \%$  (m/m)

Właściwości	Wynik	Wymaganie
Gęstość mieszanki mineralnej, g/cm <sup>3</sup>	3,645	–
Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm <sup>3</sup>	3,212	–
Gęstość strukturalna mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm <sup>3</sup>	3,115	–
Wolna przestrzeń w próbkach Marshalla, 2 × 75 uderzeń, % (v/v)	3,0	od 3,0 do 5,0
Moduł sztywności pełzania pod obciąż. statycznym, 40 °C, MPa	52,7	≥ 22,0
Koleinowanie w dużym aparacie, 60 °C, 30 000 cykli, %	2,3	≤ 5
Moduł sztywności rozciągania pośredniego, 10 °C, MPa	19 325	–
Zespolony moduł sztywności, belka 4-punktowo zginana, MPa	20 713	≥ 14 000
Szkoda zmęczeniowa $D$ po 10 <sup>6</sup> cykli, przy odkształceniu równym 130 μm/m, %	15,3	≤ 50
Wodoodporność, %	121,3	≥ 80

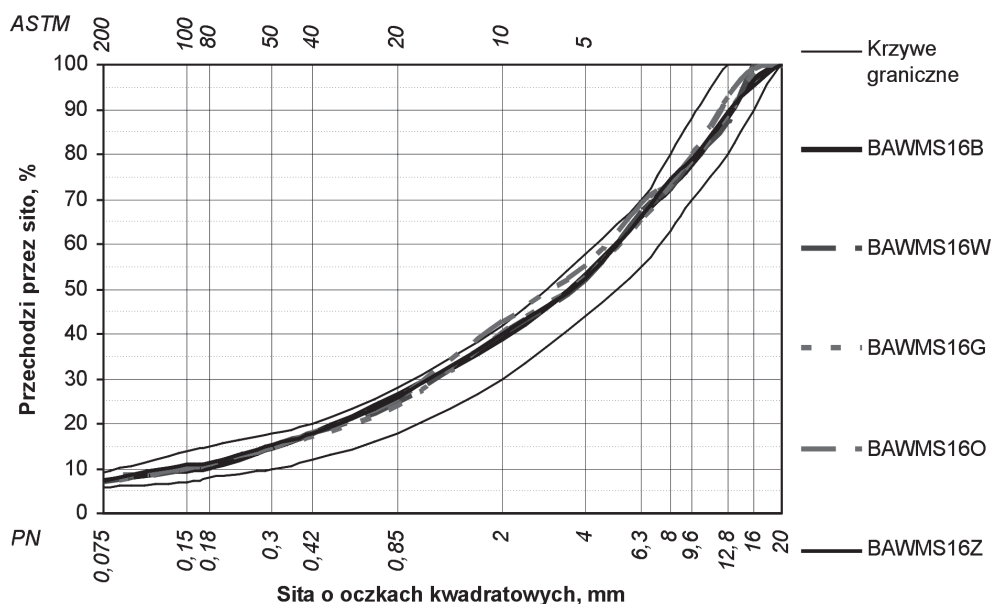
## 8. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

### 8.1. WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE

#### 8.1.1. Uziarnienie

Pierwszą projektowaną mieszanką był BAWMS16B z kruszywem bazaltowym. Uziarnienie według PN-S-96025:2000, jak betonu asfaltowego do warstwy ścieralnej nawierzchni KR5-6. Ta mieszanka stanowiła podstawę do projektowania mieszanek z innych kruszyw. Istotna była również zasada dopasowywania krzywych uziarnienia. Otóż łączono razem kruszywa o różnej gęstości – kruszywo o większej gęstości zajmuje mniejszą objętość niż lżejsze kruszywo. To wpływa na rzeczywisty przebieg krzywej uziarnienia i należało ten efekt kontrolować. Na przedstawionych na rys. 1 wykresach uziarnienia BAWMS16B pokazano dwie zaprojektowane krzywe: „Projekt % (m/m)” i „Projekt % (v/v)”. Druga krzywa, pokazująca proporcje objętościowe, była właściwą. Dopasowanie krzywych uziarnienia poszczególnych BAWMS16 odbywało się więc zgodnie z proporcjami objętościowymi.

Rysunek 6 przedstawia uziarnienie mieszanek w proporcjach objętościowych.



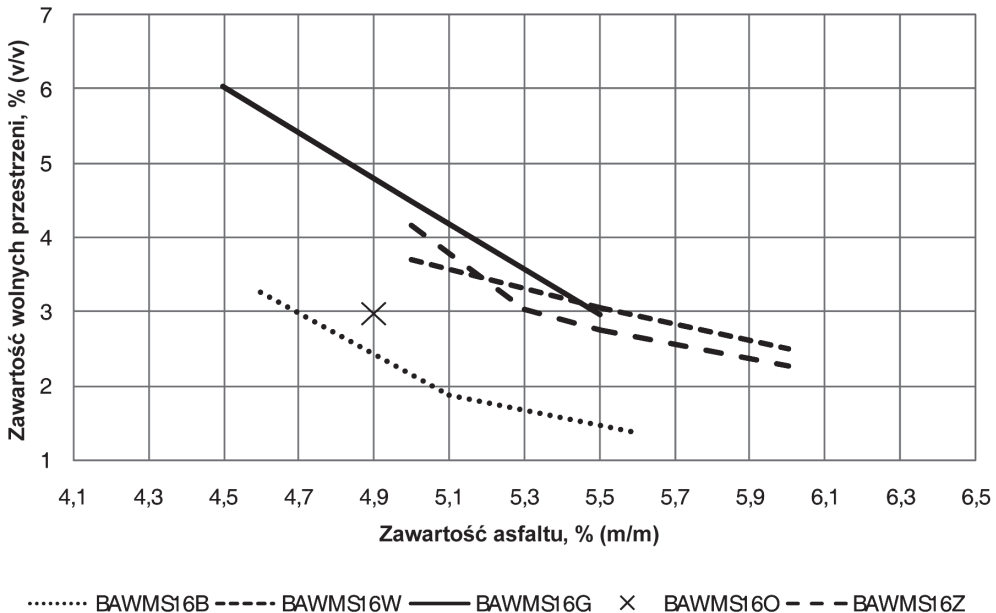
Rys.6. Zbiorcze zestawienie krzywych uziarnienia BAWMS16; udział procentowy objętościowy

Fig.6. Comparison of grading curves of mixtures BAWMS16; composition by volume

Uzyskanie odpowiedniego, w miarę możliwości bliskiego wzorcowi BAWMS16B, przebiegu krzywej uziarnienia nie sprawiało kłopotów. Największe różnice wystąpiły w przypadku kruszywa łamanego z otoczków i nieznacznie wykroczone poza górną krzywą graniczną na sicie 2 mm. W wypadku niektórych badanych kruszyw o szerokich frakcjach konieczne było rozsiewanie ich na drobniejsze.

### 8.1.2. Zawartość asfaltu a zawartość wolnej przestrzeni

W ustalaniu optymalnej zawartości asfaltu w mieszankach BAWMS16 z różnymi kruszywami kierowano się ogólną zasadą, aby otrzymać we wszystkich mieszankach zbliżoną zawartość wolnych przestrzeni. Pierwotna, wzorcowa mieszanka BAWMS16B zawierała 4,6 % (m/m) asfaltu i zawartość wolnych przestrzeni 3,3 % (v/v). Do tej wartości projektowano pozostałe rodzaje BAWMS16. Zależność zawartości wolnych przestrzeni od zawartości asfaltu przedstawiono na rysunkach 7 i 8.

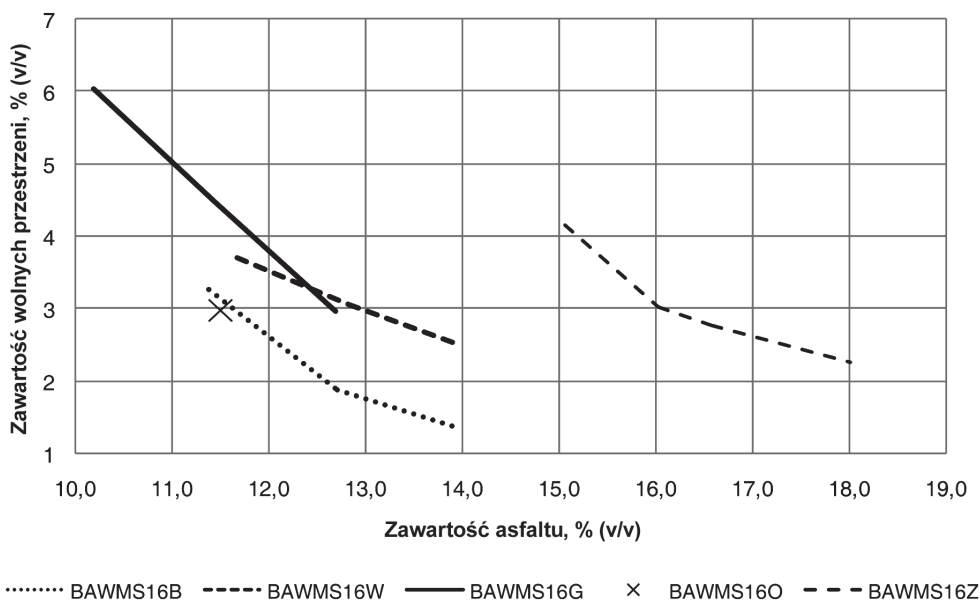


Rys.7. Zależność zawartości wolnych przestrzeni od zawartości asfaltu w % (m/m)

Fig.7. Relationship of air void content and binder content in % (m/m)

Przy założonej zawartości wolnych przestrzeni około 3,0 % (v/v) BAWMS16 z kruszywem bazaltowym miał najmniejszą zawartość asfaltu. Nieco więcej asfaltu należało użyć w mieszance z kruszywem łamanym z otoczków. Najwięcej asfaltu wymagały mieszanki z kruszywami chłonnymi – wapiennym i żuźlowym. Średnio chłonne jest kruszywo granitowe. Większej ilości asfaltu wymagają też mieszanki z lżejszymi kruszywami, tu: wapiennym i granitowym.





Rys.8. Zależność zawartości wolnych przestrzeni od zawartości asfaltu w % (v/v)  
Fig.8. Relationship of air void content and binder content in % (v/v)

Na zależność ilości asfaltu od rodzaju kruszywa wpływają przede wszystkim dwie właściwości kruszywa: powierzchnia właściwa oraz gęstość. Każde kruszywo wchłania nieco asfaltu. Większą chłonność wykazuje kruszywo o rozwiniętej teksturze ziarna, związanej głównie z rodzajem skały (kryształy o charakterze blaszkowym, gąbczastym itp.). Asfalt wchłonięty przez kruszywo nie wypełnia wolnej przestrzeni między ziarnami, ale tworząc swoiste połączenie z kruszywem (w strefie powierzchniowej ziaren) może polepszać właściwości reologiczne i trwałość mieszanki mineralno-asfaltowej.

Gęstość kruszywa wpływa na proporcje objętościowe składników. Im cięższe kruszywo, tym jego objętość jest mniejsza, czyli potrzeba objętościowo, a więc i wagowo, mniej asfaltu. Wypadkowa chłonności kruszyw i ich gęstości stanowi o zawartości asfaltu. Dlatego w każdym z zaprojektowanych mieszankach BAWMS16 inna jest zawartość asfaltu.

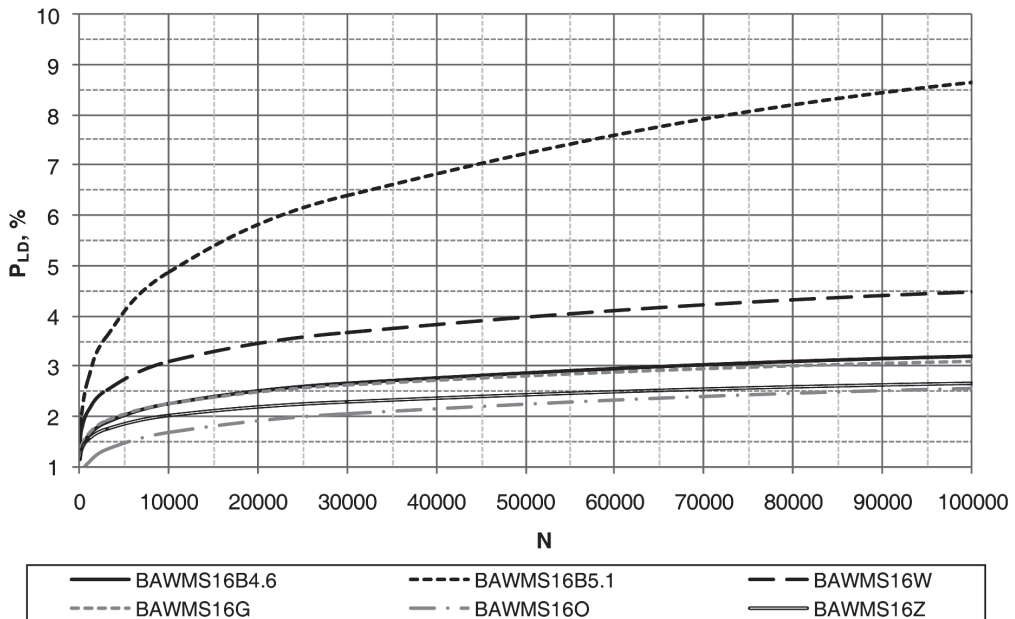
W wypadku BAWMS16B z kruszywem bazaltowym i asfaltem 4,6 % (m/m) wymagała korekty składu. Mimo odpowiedniej zawartości wolnych przestrzeni ok. 3,0 % (v/v) mieszanka ta wykazała zbyt małą trwałość zmęczeniową. Aby poprawić tę cechę należało zwiększyć zawartość asfaltu do 5,1 % (m/m), co z kolei wpłynęło na zmniejszenie zawartości wolnych przestrzeni do ok. 2,0 % (v/v).

Zaskakujące wyniki uzyskano także w badaniach BAWMS16G. Mimo dużej zawartości asfaltu (5,5 % m/m) nie uzyskano odpowiedniej trwałości zmęczeniowej.

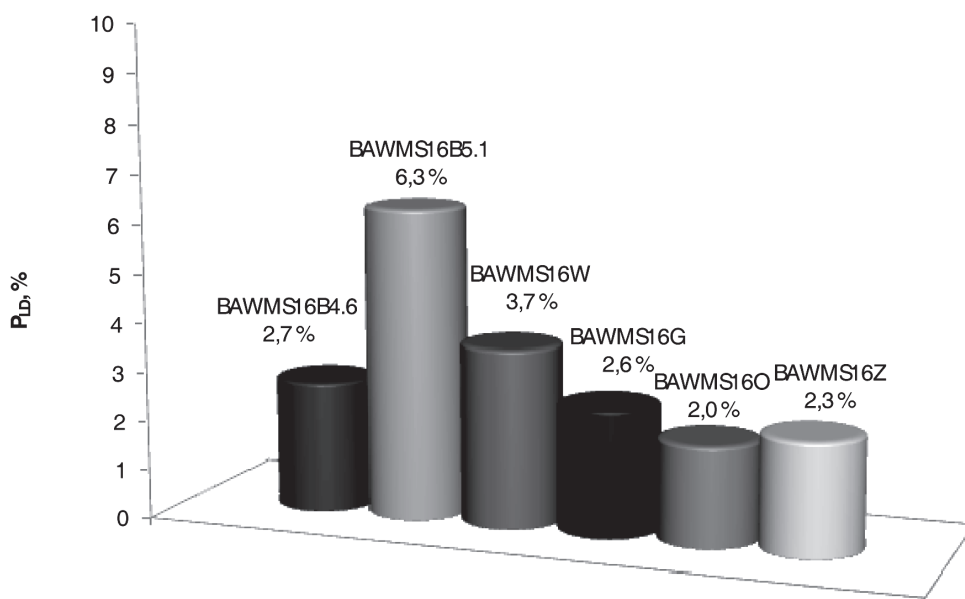
## 8.2. ODPORNOŚĆ NA DEFORMACJE TRWAŁE

Odporność na deformacje trwałe oceniono na podstawie badań w wysokiej temperaturze: pełzania pod obciążeniem statycznym i koleinowania dużym aparatem. Obie metody mają inny sposób obciążenia próbki. Wyniki badań tymi metodami nie zawsze dają porównywalne wyniki. Uważa się, że badanie koleinowania (w warunkach obciążenia powtarzalnego) lepiej oddaje charakter pracy mieszanki mineralno-asfaltowej. Głównie to badanie powinno stanowić podstawę do porównywania różnych mieszanek BAWMS16.

Na rysunku 9 zestawiono wyniki badań przebiegu koleinowania wszystkich badanych BAWMS16 wraz z prognozą deformacji trwałej do 100 000 cykli obciążeń (przy założeniu braku wystąpienia zniszczenia materiału, czyli trzeciej fazy koleinowania – deformacji plastycznej). Na rysunku 10 porównano natomiast wynik koleinowania po 30 000 cykli każdej z mieszanek BAWMS16.



Rys.9. Zmiana względnej głębokości koleiny  $P_{LD}$  w funkcji liczby cykli obciążeń  $N$  mieszanek BAWMS16 wraz z ekstrapolacją deformacji trwałej  
Fig.9. Rutting curves for asphalt mixtures BAWMS16 with extrapolation of permanent deformation



Rys.10. Zmiana względnej głębokości koleiny  $P_{LD}$  po 30 000 cykli mieszanek BAWMS16  
 Fig.10. Rutting test results after 30 000 cycles for asphalt mixtures BAWMS16

Mieszanki BAWMS16 wykazały nieznaczną deformację, czyli dużą odporność na koleinowanie, spełniając wymaganie nie więcej niż 5 % (warunki badania: temp. 60 °C, względna głębokość koleiny  $\leq 5$  %) po 30 000 cykli obciążenia. Wyróżnia się jednak BAWMS16B5.1 (z kruszywem bazaltowym, o zwiększonej zawartości asfaltu i zmniejszonej zawartości wolnych przestrzeni). Mieszanka ta uległa największej deformacji trwałej – nawet trzykrotnie większej niż najbardziej odporna BAWMS16O z kruszywem łamanym z otoczków o najmniejszej zawartości asfaltu.

Mieszanka BAWMS16B4.6 (z kruszywem bazaltowym, o mniejszej zawartości asfaltu i ustalonej do poziomu ok. 3,0 % (v/v) wolnych przestrzeni) wykazała się odpornością na deformacje trwałe zbliżoną do pozostałych BAWMS16 z innymi kruszywami. Mieszanka ta nie spełniła jednak wymagania trwałości zmęczeniowej.

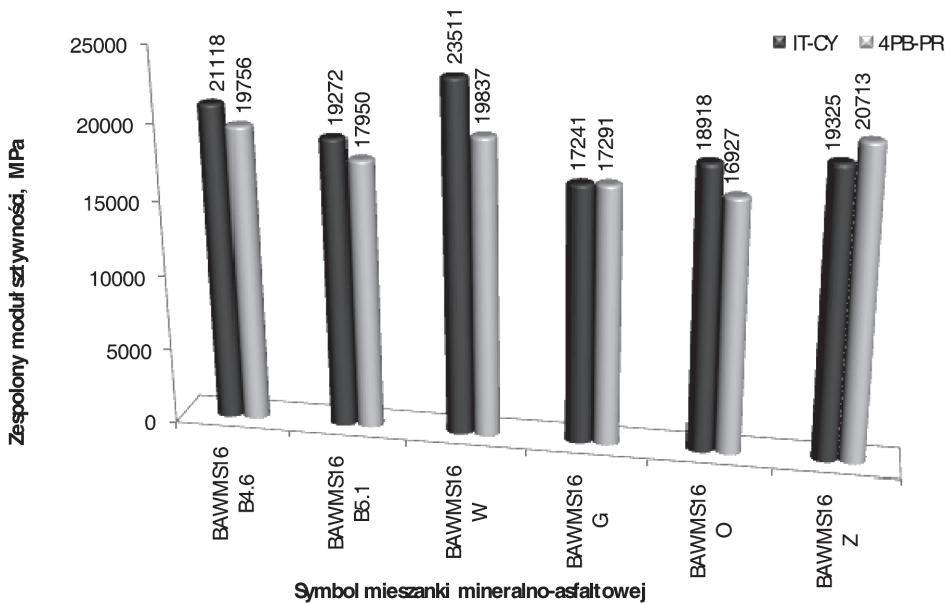
Biorąc pod uwagę mieszanki o zbliżonej zawartości wolnych przestrzeni, najbardziej była podatna mieszanka z wapieniem. Przy podobnie dużej zawartości asfaltu mieszanka z granitem uległa mniejszemu skoleinowaniu.

Stwierdzone różnice między mieszankami z różnymi kruszywami wynikają zapewne i wpływu na odporność na koleinowanie kształtu ziaren i ich tekstury wpływających na tarcie wewnętrzne.

### 8.3. SZTYWNOŚĆ

Moduł sztywności (skrótowo określany jako sztywność) mieszanki mineralno-asfaltowej jest właściwością wymaganą i wykorzystywaną w obliczaniu nośności konstrukcji nawierzchni. Wykonano badanie modułu dwiema metodami: rozciągania pośredniego próbek cylindrycznych (IT-CY) oraz zginania 4-punktowego próbek prostokątnościennych (4PB-PR). Oba badania wykonano w 10 °C.

Na rysunku 11 przedstawiono wartości modułu IT-CY i 4PB-PR mieszanek BAWMS16. Wyniki badań uzyskanych dwiema metodami nieco różnią się. Wyniki badań metodą rozciągania pośredniego IT-CY są na ogół wyższe niż wyniki uzyskane metodą 4PB-PR. Tę prawidłowość stwierdzono wcześniej w badaniach międzylaboratoryjnych RILEM [9], a także ostatnio w odrębnych badaniach IBDiM [10]. Na podstawie tych badań określono wstępnie współczynniki przeliczeniowe modułu sztywności uzyskanego różnymi metodami pomiarowymi: rozciągania pośredniego IT-CY, czteropunktowego zginania belki 4PB-PR, ściskania – rozciągania osiowego DTC-CY. Współczynnik przeliczeniowy pomiędzy 4PB-PR : IT-CY zaproponowano wstępnie 0,80. Jednak liczba badań była bardzo ograniczona i wymaga znacznego poszerzenia. Przedstawiane tu wyniki potwierdzają relację między obiema metodami, aczkolwiek współczynnik przeliczeniowy wynosi tu średnio 0,9467, z odchyleniem standardowym 0,0806.



Rys.11. Moduł sztywności mieszanek BAWMS16

Fig.11. Stiffness modulus of asp0halt mixtures BAWMS16

Analizując moduł badanych mieszanek zauważa się, że:

- zwiększenie zawartości asfaltu w BAWMS16B spowodowało zmniejszenie modułu sztywności,
- powyższa reguła nie dotyczy jednak porównania mieszanek z różnymi kruszywami,
- porównywalny moduł wykazał BAWMS16 z kruszywem bazaltowym, wapiennym i żużlowym,
- mniejszy moduł wykazały mieszanki z kruszywem łamanym z otoczków i granitowym.

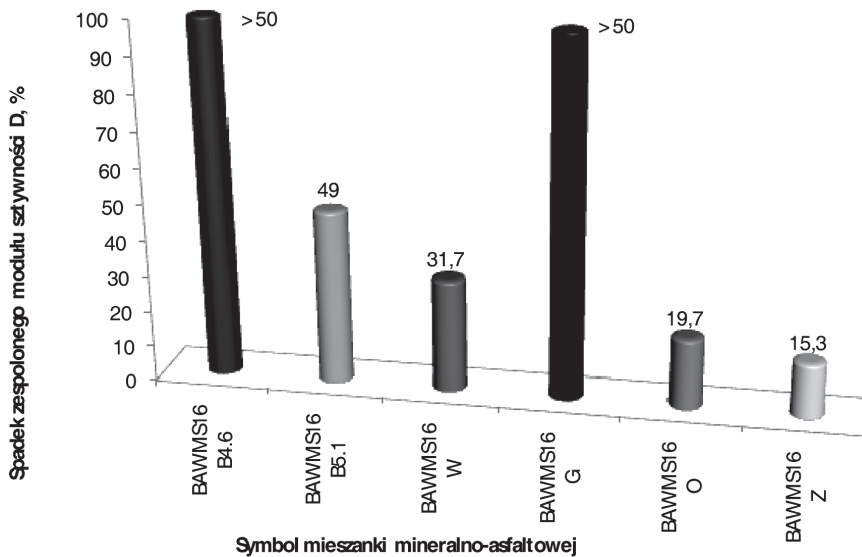
## 8.4. TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA

Trwałość zmęczeniowa jest bardzo ważnym kryterium oceny mieszanek mineralno-asfaltowych. Ze względu na projektowanie konstrukcji nawierzchni cecha ta jest zwłaszcza istotna w warstwach podbudowy. Aczkolwiek, biorąc pod uwagę nowo zdefiniowany rodzaj uszkodzenia zmęczeniowego konstrukcji nawierzchni z góry na dół, cecha ta jest także ważna w warstwie ścieralnej. W wypadku betonu asfaltowego o wysokim module sztywności trwałość zmęczeniowa obok modułu sztywności i odporności na koleinowanie jest kluczową właściwością funkcjonalną.

Na rysunku 12 przedstawiono wartość liczbową  $D$ , jako proporcjonalny spadek modułu sztywności po 1 milionie obciążeń w warunkach kontrolowanego odkształcenia (tu 130  $\mu\text{m}$ ). Spełnienie kryterium zmęczenia wymaga, aby wartość  $D$  wynosiła nie więcej niż 50 %, które jest wartością uznawaną za zniszczenie materiału.

Spośród badanych mieszanek dwie nie spełniły wymagania zmęczenia: BAWMS16B4.6 oraz BAWMS16G. Spadek modułu  $D$  po 1 milionie obciążeń wyniósł w badaniu tych mieszanek 100 %. Oznacza to, że próbki uległy zniszczeniu zmęczeniowemu przed osiągnięciem 1 miliona obciążeń. Zwiększenie zawartości asfaltu w zwiększyło trwałość zmęczeniową BAWMS z kruszywem bazaltowym – mieszanka BAWMS16B5.1 spełniła wymaganie ( $D = 49$  %). Podobny efekt zapewne byłby uzyskany w wypadku BAWMS16G. Lecz badań takich nie wykonano.

Mieszanki BAWMS16 z pozostałymi kruszywami wykazały bardzo dużą trwałość zmęczeniową. Nie wyróżnia się tu, podobnie jak w przypadku modułu sztywności, bezpośrednia zależność trwałości od zawartości asfaltu w mieszankach z różnym kruszywem.



Rys.12. Odporność zmęczeniowa mieszanek BAWMS16  
 Fig.12. Fatigue resistance of asphalt mixtures BAWMS16

## 8.5. ODPORNOŚĆ NA DZIAŁANIE WODY

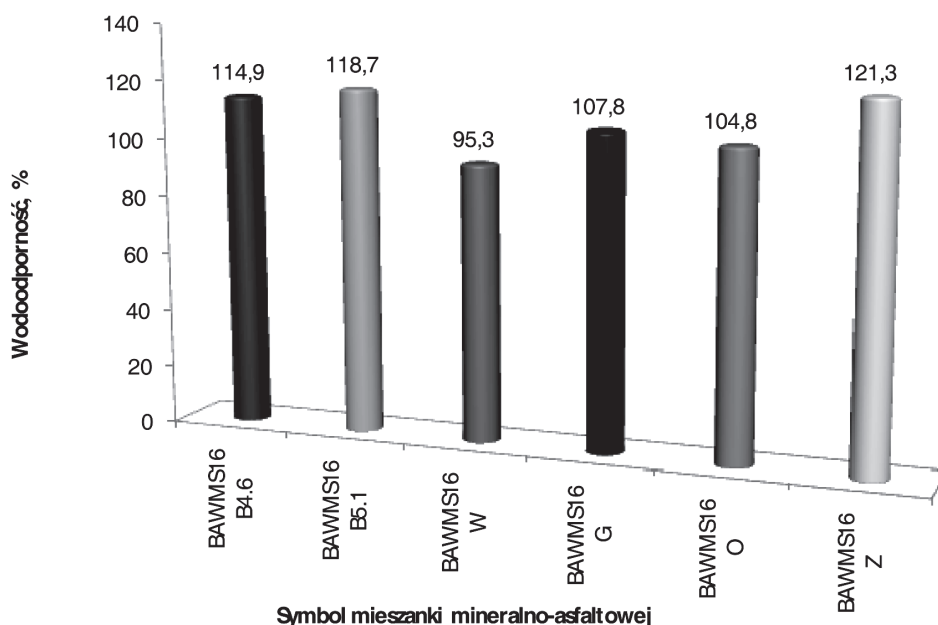
Badanie odporności na działanie wody (i mrozu) jest niezwykle ważne w polskich warunkach klimatycznych. Wdrożenie tego badania do naszych przepisów technicznych wraz z pakietem norm europejskich przyczyni się do poprawy trwałości naszych nawierzchni asfaltowych.

Cecha ta powinna być sprawdzana w projektowaniu każdej mieszanki, niezależnie od warstwy. Wymaganiem tym jest objęty również BAWMS do warstw wiążącej lub podbudowy. Ocena wykonywane jest metodą badania według normy europejskiej PN-EN 12697-12:2004. Wymaganie wobec BAWMS określono na co najmniej 80 %.

Wyniki badań mieszanek BAWMS16 przedstawiono na rysunku 13.

Wszystkie mieszanki wykazały bardzo dobrą odporność na działanie wody. Większość mieszanek wykazała usztywnienie w normowych warunkach badania bez cyklu zamrażania. Należy to tłumaczyć tym, że w wypadku braku istotnej podatności na działanie wody w podwyższonej temperaturze próbki pielęgnowane, czyli nasączone wodą, wykazują większą sztywność wskutek ciśnienia porowego w nasączonych próbkach niż w próbkach nienasączonych.

Mieszanka BAWMS16W uległa osłabieniu pod działaniem wody. Należy pamiętać, że w każdej mieszance BAWMS16 zastosowano środek adhezyjny, którego wpływu wstępnie nie oceniono. Najpewniej był on zbędny w wypadku kruszywa wapiennego i żuźlowego.



Rys.13. Odporność na działanie wody mieszanek BAWMS16  
Fig.13. Resistance to water of asphalt mixtures BAWMS16

## 9. WNIOSKI

Celem przedstawionych badań była ocena możliwości stosowania kruszyw lokalnych i/lub o słabszych parametrach do produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej o wysokich wymaganiach funkcjonalnych – beton asfaltowy o wysokim module sztywności (BAWMS). Ocenie poddano wpływ stosowania kruszyw:

- wapiennego,
- granitowego,
- przekruszonych otoczków,
- z żużla stalowniczego.

Jako kruszywo porównawcze przyjęto kruszywo bazaltowe.

Mieszanki poddano badaniom podstawowym i funkcjonalnym obejmującym: sztywność, trwałość zmęczeniową, odporność na koleinowanie, odporność na działanie wody. Na podstawie analizy wyników badań można stwierdzić:

- kruszywa o większej porowatości i chłonności (np. żużle stalownicze) lub bardziej rozwiniętej teksturze ziaren (np. granit) wymagają większej ilości lepiszcza;

- większa zawartość lepiszcza w mieszance powinna zwiększać trwałość zmęczeniową, jak to stwierdzono w wypadku mieszanki z bazaltem, lecz nie uzyskano tego efektu z granitem – mieszanka BAWMS16G nie spełniła kryterium zmęczeniowego;
- trwałość zmęczeniowa i odporność na koleinowanie to dwie przeciwstawne cechy – zwiększenie zawartości asfaltu poprawia trwałość zmęczeniową, lecz pogarsza odporność na koleinowanie; mieszanka BAWMS164.6 nie spełniła kryterium zmęczeniowego, ale spełniła kryterium koleinowania, podczas gdy mieszanka BAWMS16B5.1 odwrotnie – spełniała kryterium zmęczenia, a nie spełniła kryterium koleinowania;
- mieszanki BAWMS z kruszywami uznawanymi za wątpliwe, słabsze, gorszej jakości – z żuźla stalowniczego, wapienne, z surowca skalnego naturalnie rozdrobnionego (otoczeków) – spełniły wszystkie wymagania stawiane BAWMS.

Stwierdzono, że kruszywa uznawane za słabsze lub wzbudzające niepewność i obawy o trwałość wykonanych z nimi nawierzchni asfaltowych mogą być z powodzeniem stosowane w BAWMS. Niezbędne do ich właściwej oceny jest określenie wymagań i metod badań, które pozwalają obiektywnie i wiarygodnie ocenić właściwości wytworzonych z nimi mieszanek mineralno-asfaltowych. Norma europejska PN-EN 13108-1 [11], w której podano dwie metody projektowania betonu asfaltowego – empiryczną i funkcjonalną pozwala na wprowadzenie wymagań i zaawansowanych metod badań funkcjonalnych. Badania te umożliwiają ocenę i dają szansę inwestorowi i wykonawcy na zastosowanie materiałów, które pozornie są gorszej jakości. Beton asfaltowy o wysokim module sztywności jest szczególnie mieszanką, która daje możliwości zastosowania takich wątpliwych kruszyw ze względu na stosowanie specjalnych, twardszych lepiszczy.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Sybilski D., Pałys M., Mularzuk R., Bańkowski W.: Zasady wykonywania nawierzchni asfaltowej odpornej na koleinowanie i zmęczenie (ZW-WMS 2002). Zeszyt I-63, IBDiM, 2002
- [2] Sybilski D., Bańkowski W., Mularzuk R.: Zasady wykonywania nawierzchni asfaltowej odpornej na koleinowanie i zmęczenie (ZW-WMS 2007). Zeszyt I-70, IBDiM, 2007
- [3] PN-S-96025:2000 Drogi samochodowe i lotniskowe – Nawierzchnie asfaltowe – Wymagania
- [4] PN-EN 13043:2004 Kruszywa do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utrwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu
- [5] Sybilski D. i Zespół Zakładu TN: Zalecenia doboru materiałów, projektowania składu, wymagań empirycznych i funkcjonalnych mieszanek mineralno-asfaltowych betonu asfaltowego i SMA, zadania: 1, 2, 3, 4, 5, 6. Praca niepublikowana, na zlecenie GDDKiA, Warszawa, październik 2004, załącznik 5



- [6] Informator techniczny Slag Recycling 2000 r.
- [7] *Sybilski D., Pałys M., Mularzuk R.*: Zastosowanie grysów z żużli stalowniczych w celu poprawy szorstkości nawierzchni drogowej. VIII Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe”, Kielce 2002
- [8] *Makikyro M., Hultunen A., Salmnkita S., Kujala K.*: Slag products as road construction materials in Finland. II Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe”, Kielce 1996
- [9] Bituminous Binders and Mixes. State of the Art. and Interlaboratory Tests on Mechanical Behaviour and Mix Design. RILEM Report 17. Edited by L. Francken. E&FN Spon. London and New York, 1998
- [10] *Sybilski D., Malinowicz M., Mularzuk R.*: Sprawozdanie z realizacji tematu TN-228: Wpływ metody i parametrów pomiaru na wartość modułu sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej. IBDiM, 2005 (praca niepublikowana)
- [11] PN-EN 13108-1 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Wymagania. Część 1: Beton asfaltowy

## HIGH MODULUS ASPHALT CONCRETE WITH LOCAL MINERAL AGGREGATES

### Abstract

Implementation of new standards and advanced performance test methods for asphalt mixtures allow for more reliable evaluation of their properties and prediction of pavement durability. It opens new possibilities for application of local or alternative mineral aggregates, which properties are considered as weaker or uncertain. Paper presents testing of High Modulus Asphalt Concrete with various aggregates. Mixtures were subjected to performance tests such as rutting, stiffness modulus, fatigue, resistance to water. Aggregates considered as weaker were evaluated as applicable for High Modulus Asphalt Concrete.