

Instytut Badawczy Dróg i Mostów
Zakład Technologii Nawierzchni
Pracownia Technologii Nawierzchni

Sprawozdanie końcowe

„Badania możliwości stosowania kruszyw lokalnych o niższej jakości w betonie
asfaltowym o wysokim module sztywności BAWMS”

Temat TN-237

Opracowali:

dr inż. Wojciech Bańkowski
mgr inż. Robert Mularzuk
mgr inż. Dominika Maliszewska
mgr inż. Maciej Maliszewski

Kierownik Zakładu
Technologii Nawierzchni:

prof. dr hab. inż. Dariusz Sybilski

Spis treści

1	Wstęp	5
2	Cel opracowania	5
3	Wprowadzenie	5
4	Program i metodyka badań	7
4.1	Program badań	7
4.2	Badania kruszyw	8
4.3	Badania betonu asfaltowego o wysokim module sztywności.....	9
5	Asfalt ze środkiem adhezyjnym	10
6	Beton asfaltowy o wysokim module sztywności z kruszywem bazaltowym BAWMS16B	11
6.1	Uziarnienie materiałów mineralnych.....	11
6.2	Skład BAWMS16B.....	12
6.3	Właściwości BAWMS16B	13
7	Beton asfaltowy o wysokim module sztywności z kruszywem wapiennym BAWMS16W	14
7.1	Kruszywo wapienne.....	14
7.2	BAWMS16W.....	14
8	Beton asfaltowy o wysokim module sztywności z kruszywem granitowym BAWMS16G	17
8.1	Kruszywo granitowe	17
8.2	BAWMS16G	21
9	Beton asfaltowy o wysokim module sztywności z kruszywem łamanym z otoczków BAWMS16O	24
9.1	Kruszywo łamane z otoczków	24
9.2	BAWMS16O	31
10	Beton asfaltowy o wysokim module sztywności z kruszywem z żużla stalowniczego BAWMS16Z.....	34
10.1	Kruszywo z żużla stalowniczego	34
10.2	BAWMS16Z	39
11	Analiza wyników badań	42
11.1	Właściwości fizyczne	42
11.2	Odporność na deformacje trwałe	45
11.3	Sztywność	47
11.4	Trwałość zmęczeniowa.....	48
11.5	Odporność na działanie wody.....	49
12	Wnioski.....	50
13	Bibliografia	52

1 Wstęp

Pracę wykonano w IBDiM. Niniejsze opracowanie stanowi sprawozdanie końcowe z prac wykonanych w 2005 i 2006 r. przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów na podstawie umowy nr 677/GDDKiA/2004 z dnia 07.04.2004 r., w ramach dwuletniej pracy zleconej przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad w Warszawie. Praca nosiła tytuł „Badania możliwości stosowania kruszyw lokalnych o niższej jakości w betonie asfaltowym o wysokim module sztywności BAWMS” i nadano jej symbol TN-237.

2 Cel opracowania

Polska obecnie znajduje się w sytuacji dużego napływu kapitału z Unii Europejskiej. Skutkuje to znaczną dynamiką wzrostu w budownictwie, również w budownictwie drogowym. Polskie drogownictwo stanęło przed niemałym problemem, który spowodowany jest dużym tempem budowy nowych dróg, bądź remontu i przebudowy starych nawierzchni. Zasadniczą kwestią jest zapotrzebowanie na surowiec mineralny wysokiej jakości, przekraczające moce produkcyjne wytwórni kruszyw lub kłopoty organizacyjne związane z transportowaniem kruszyw na duże odległości. Nie rzadko zdarzają się sytuacje konieczności sprowadzania kruszyw na budowę z odległych krańców Polski. Obecnie transport kolejowy pozostawia wiele do życzenia, jeśli chodzi o terminowość usług. Te fakty wiążą się z opóźnieniami oraz znacznym podniesieniem kosztów własnych firm drogowych. Sytuacja ta wynika jednak nie tylko z ilości prac drogowych, ale również ze specyfikacji technicznych kontraktów, których autorzy wymuszają na wykonawcach stosowanie jedynie materiałów najwyższej jakości.

Wdrażany od kilku lat w Polsce beton asfaltowy o wysokim module sztywności (**BAWMS**) daje możliwość zwiększenia trwałości zmęczeniowej i odporności na koleinowanie nawierzchni. Uzyskuje się to głównie przez zastosowanie asfaltów specjalnych z równoczesnym ustaleniem optymalnych proporcji składników BAWMS. Do tej pory do mieszanki tej stosowano wyłącznie kruszywo wysokiej jakości, co poza asfaltem specjalnym, podraża koszty produkcji. Istotna jest również dostępność materiałów na rynku polskim. Ostatni okres pokazał niedobór materiałów mineralnych, przede wszystkim grysów dobrej jakości i wiele firm drogowych miało problemy z ich zdobyciem. Do mieszanek mineralno-asfaltowych wielokrotnie wykorzystywano materiały dostępne lokalnie. Celowe jest więc sprawdzenie, na ile zastosowanie specjalnego lepiszcza asfaltowego pozwoli na zastosowanie kruszywa mineralnego o niższej jakości lub dostępnego lokalnie, niż wymaga się w zastosowaniu do zwykłego betonu asfaltowego.

Niniejsza praca miała na celu ocenę możliwości zastosowania kruszyw lokalnych i/lub o gorszych parametrach, do produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej o wysokich parametrach. W ramach pracy zaprojektowano i zbadano betony asfaltowe o wysokim module sztywności w różnych wariantach zastosowanych kruszyw.

3 Wprowadzenie

Norma na mieszanki mineralno-asfaltowe PN-S-96025:2000 [1] do betonu asfaltowego dla kategorii ruchu KR3-KR6 do warstwy podbudowy dopuszcza stosowanie:

- kruszyw łamanych zwykłych i granulowanych z surowca skalnego oraz sztucznego (żuźle) wg PN-B-11112:1996 [2], klasy I i II, gatunku 1 i 2,
- grysów i żwiru kruszonego z naturalnie rozdrobnionego surowca skalnego wg PN-S-96025:2000 [1], załącznik G, klasy I i II, gatunku 1 i 2,

- piasku wg PN-B-11113:1996 [3], gatunku 1 i 2,
- destruktu wg PN-S-96025:2000 [1], punkt 2.1.1,
- wypełniacza mineralnego wg PN-S-96504:1961 [4],
- pyłów z odpylania w otaczarce lub popioły lotne wg PN-S-96025:2000 [1], punkt 2.1.1.

Do warstwy wiążącej w porównaniu z warstwą podbudowy według PN-S-96025:2000 [1] dla kategorii ruchu KR3-KR6 nie dopuszczone są do stosowania materiały uznane za słabsze. Nie stosuje się kruszyw łamanych zwykłych, piasku oraz popiołów lotnych. Zawężono również stosowanie kruszywa łamanego granulowanego z surowca skalnego oraz z surowca sztucznego do klasy I i gatunku 2 (poza ścieralnością jak dla klasy II), przy czym uściślono rodzaj żużli: pomiedziowe i stalownicze. Nie powołano w normie na beton asfaltowy normy PN-B-11115:1998 [5] dotyczącej żużli stalowniczych, gdyż nie było to możliwe ze względów formalno-prawnych. Do betonu asfaltowego stosuje się również grys i żwir kruszony z surowca naturalnie rozdrobnionego klasy I oraz gatunku 1 i 2 (poza ścieralnością jak dla klasy II).

Zeszyt 63/2002 IBDiM [6] przewiduje do stosowania do betonu asfaltowego o wysokim module sztywności (BAWMS) do warstw wiążącej i podbudowy:

- piasek łamany, kruszywo drobne granulowane oraz grysy według PN-B-11112:1996 [2], klasy I i II,
- grysy z żużla stalowniczego według PN-B-11115:1998 [5], klasy A i B lub według Aprobaty Technicznej,
- grysy z żużla pomiedziowego według Aprobaty Technicznej.

Widać stąd, że w przypadku BAWMS znacznie zredukowano stosowanie materiałów mineralnych o jakości mogącej budzić wątpliwości, czy uzyska się wysoki moduł sztywności i trwałość. Nie prowadzono do tej pory szerokich badań wskazujących, czy takie zastrzeżenia są słuszne. Ograniczenie podane w Zeszycie 63/2002 do stosowania w BAWMS kruszyw o najwyższej jakości zostało podane w celu zagwarantowania uzyskania betonu asfaltowego wysokiej jakości. Obecne badania mają stwierdzić, czy możliwe jest uzyskanie betonu asfaltowego o wysokim module z kruszywami niższej klasy. Do tych materiałów zaliczyć należy np. kruszywa według PN-B-11112:1996 [2] klasy III i/lub gatunku 2.

Ważną kwestią są wymagania stawiane poszczególnym rodzajom kruszyw. O ile kruszywa łamane zwykłe i granulowane z surowca skalnego, niezależnie z jakiej skały, mają jednakowe wymagania, tak inne wymagania stawiane są żużlom. W tablicy 1 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 żużla.

Tablica 1 Wymagania wg PN-B-11115:1998 i PN-B-11112:1996 wobec grysu ze skał magmowych i przeobrażonych

Lp.	Właściwości	Wymagania w procentach (m/m)		
		Klasa*		
		A/I	B/II	C/III
1	Zawartość zanieczyszczeń obcych, nie więcej niż	1/0,1	2/0,2	5/0,3
2	Zawartość pyłów mineralnych poniżej 0,063/0,075 mm, nie więcej niż	3/(2;1,5)	5/(4;2,5)	8/(5;3,5)
3	Nasiąkliwość, nie więcej niż	3/(1,5;2)	5/2	8/3
4	Mrozoodporność metodą krystalizacji, nie więcej niż	2/2	5/5	10/10
5	Mrozoodporność metodą bezpośrednią, nie więcej niż	10/10	30/30	-/-
6	Zawartość ziarn nieforemnych, nie więcej niż	20/25	35/30	50/35
7	Rozpad wapniowy, nie więcej niż	1/-	2/-	3/-
8	Rozpad żelazawy, nie więcej niż	1/-	2/-	3/-
9	Ścieralność w bębnie Los Angeles, nie więcej niż	25/25	35/35	45/45
10	Przyczepność do bitumów	dobra	dobra	-
* - w liczniku znajdują się wymagania wg PN-B-11115:1998 [5], a w mianowniku wg PN-B-11112:1996 [2]				

Ostatnim aspektem jest wdrażanie w Polsce od marca 2004 r. nowej normy europejskiej dotyczącej kruszyw do mieszanek mineralno-asfaltowych, tj. PN-EN 13043:2004 [7]. Norma ta wprowadza nową klasyfikację kruszyw na podstawie badań nowych, bądź zmienionych w stosunku do obecnie stosowanych w Polsce. W związku z tym konieczne jest ustalenie kruszyw nadających się do BAWMS wg nowej klasyfikacji. Uwzględnienia wymagają również „Zalecenia doboru materiałów...” [8], które zawierają dodatkowe informacje konieczne szczególnie na etapie projektowania składu betonu asfaltowego. Oba aspekty będą stanowić dodatkowe elementy tej pracy, nieujęte w programie pracy.

4 Program i metodyka badań

4.1 Program badań

Program badań stanowiący załącznik 1 do umowy na wykonanie pracy badawczej uwzględniał dwa etapy. Całą pracę podzielono na 4 zadania.

Zadanie 1 Zgromadzenie i przygotowanie materiałów składowych BAWMS oraz oznaczenie ich podstawowych właściwości

W betonie asfaltowym o wysokim module sztywności (BAWMS) będzie zastosowany asfalt zwykły 20/30.

Przewiduje się zastosowanie kruszywa klasy III lub pozaklasowego:

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

Kruszywo bazaltowe klasy I lub II zastosowane będzie w celach porównawczych.

Zadanie obejmuje zgromadzenie materiałów oraz wykonanie niezbędnych badań lepiszcza i kruszyw.

Zadanie 2 Opracowanie składów BAWMS

Przewidziano wykonanie batonu asfaltowego o wysokim module sztywności o uziarnieniu od 0 do 16 mm (**BAWMS16**).

Zadanie obejmuje ustalenie składów mieszanek na podstawie badań podstawowych cech fizyczno-wytrzymałościowych. Przewiduje się korekty składu mieszanek na podstawie uzyskanych wyników badań (korekta przebiegu krzywej uziarnienia, mieszanie różnych kruszyw, zmiana zawartości asfaltu).

W pracy tej zaprojektowano i zbadano każdy rodzaj BAWMS16 ze względu na rodzaj kruszywa. Zastosowano dodatkowy symbol w opisie BAWMS16 jako pierwszą literę rodzaju kruszywa o przeważającej zawartości w mieszance:

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

Zadanie 3 Wykonanie badań mechanicznych zaprojektowanych mieszanek BAWMS

Program badań obejmuje określenie:

- modułu sztywności sprężystej w aparacie NAT w 0, 10, 20 °C,
- modułu sztywności pełzania statycznego w aparacie OMEGA w 40 °C,
- modułu sztywności metodą belki 4PB w aparacie MTS w 10 °C i 10 Hz,
- trwałości zmęczeniowej metodą belki 4PB w aparacie MTS w 10 °C, 10 Hz i odkształceniu poziomym 130×10^{-6} ,
- koleinowanie w aparacie dużym (LCPC) w 60 °C.

Zadanie obejmuje ewentualne korekty składu mieszanek w przypadku niezadowolających wyników badań.

Zadanie 4 Weryfikacja zaleceń doboru materiałów do BAWMS

Zakończeniem pracy jest sprawozdanie z realizacji tematu wraz z wynikami badań i oceną przydatności kruszyw o niższej jakości oraz wymagania, które będą stanowić podstawę przy weryfikacji zaleceń i doboru materiałów do BAWMS.

W związku z wdrożeniem nowej normy europejskiej PN-EN 13043:2004 [7] oraz opracowaniem „Zaleceń doboru materiałów, projektowania składu, wymagań empirycznych i funkcjonalnych mieszanek mineralno-asfaltowych betonu asfaltowego i SMA” ustalono dodatkowe badania rozszerzające zakres zaplanowanych prac głównie o nowe lub zmodyfikowane badania kruszyw oraz mieszanek mineralno-asfaltowych.

4.2 Badania kruszyw

4.2.1 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 [9],
- nasiąkliwość wg PN-B-06714-18:1977 [10],
- mrozoodporność wg PN-B-06714-19:1978 [11],
- mrozoodporność wg PN-B-06714-20:1978 [12],
- uziarnienie metodą na mokro wg PN-EN 933-1:2000 [13],
- zawartość zanieczyszczeń obcych wg PN-B-06714-12:1976 [14],
- zawartość ziarn nieforemnych wg PN-B-06714-16:1976 [15],
- zawartość zanieczyszczeń organicznych wg PN-B-06714-26:1978 [16],
- rozpad krzemianu dwuwapniowego wg PN-EN 1744-1:2000 [17],
- rozpad związków żelaza wg PN-EN 1744-1:2000 [17],

- przyczepność do asfaltu wg PN-EN 12697-11:2000 (U) [18].

4.2.2 Badania uzupełniające

- gęstość objętościowa wg Zeszytu 64/2002 IBDiM [19]),
- gęstość objętościowa wg EN 12697-5:2002 [20],
- kąt zsypania piasku, według procedury IBDiM (frakcja 0,18-2 mm),
- zawartość ziarn przekruszonych wg PN-S-96025:2000 [1].

4.2.3 Badania dodatkowe kruszyw wg PN-EN-13043:2004

- wskaźnik płaskości wg PN-EN 933-3:1999 [21],
- wskaźnik kształtu wg PN-EN 933-4:2001 [22],
- zawartość ziarn przekruszonych lub łamanych wg PN-EN 933-5:2000 [23],
- kanciastość kruszywa drobnego wg PN-EN 933-6:2002 [24],
- odporność na rozdrabnianie (współczynnik Los Angeles) wg PN-EN 1097-2:2000 [25],
- odporność na uderzenie wg PN-EN 1097-2:2000 [25],
- odporność na polerowanie (PSV) wg PN-EN 1097-8:2002 [26],
- odporność na ścieranie powierzchniowe (AAV) wg PN-EN 1097-8:2002 [26],
- odporność na ścieranie (mikro-Deval) wg PN-EN 1097-1:2000 [27],
- gęstość ziarn wg PN-EN 1097-6:2002 i PN-EN 1097-6:2002/AC:2004 [28],
- nasiąkliwość wg PN-EN 1097-6:2002 i PN-EN 1097-6:2002/AC:2004 [28],
- mrozoodporność wg PN-EN 1367-1:2001 oraz PN-EN 1367-1:2001/Ap1:2004 [29] lub PN-EN 1367-2:2000 [30],
- odporność na szok termiczny wg PN-EN 1367-5:2004 [31].

4.3 Badania betonu asfaltowego o wysokim module sztywności

4.3.1 Badania podstawowe

Zbadano i obliczono następujące właściwości fizyczne:

- A) Gęstość objętościowa (dawna gęstość strukturalna lub pozorna) - metoda hydrostatyczna, wg Zeszytu 64/2002 IBDiM, arkusz 05 [19]
- B) Gęstość (dawna gęstość objętościowa lub ciężar właściwy) oznaczona w piknometrze z użyciem czterochloroetyleny, wg Zeszytu 64/2002 IBDiM, arkusz 04 [19]
- C) Zawartość wolnej przestrzeni Pp w zagęszczonej mieszance mineralno-asfaltowej oraz wypełnienie jej asfaltem obliczono wg Zeszytu 64/2002 IBDiM, arkusz 09 i 10 [19]
- D) Moduł sztywności pełzania pod obciążeniem statycznym w +40 °C wg Zeszytu 64/2002 IBDiM, arkusz 16 [19]

4.3.2 Badanie koleinowania

Badanie wykonano aparatem dużym wg PN-EN 12697-22:2004 (U) [32].

4.3.3 Badanie zmęczenia

W IBDiM badanie zmęczenia mieszanki mineralno-asfaltowej wykonywano metodą belki czteropunktowo zginanej przeprowadzaną zgodnie z amerykańską normą AASHTO TP8-94 [33]. Badanie służy do oszacowania właściwości zmęczeniowych pod powtarzalnym obciążeniem, jakie występuje od ruchu samochodowego na drodze. Znajomość właściwości zmęczeniowych jest przydatna w projektowaniu mieszanek mineralno-asfaltowych i pozwala przewidzieć zachowanie tych mieszanek po wbudowaniu.

Badanie wykonane było na stanowisku pomiarowym MTS przeznaczonym do materiałowych badań wytrzymałościowych [34]. Stanowisko to było sprzętem laboratoryjnym nowej

generacji, pozwalającym na symulację skomplikowanych warunków obciążenia materiału w nawierzchni drogowej pod działaniem pojazdu i klimatu.

Badanie zmęczenia polega na cyklicznym, sinusoidalnym, czteropunktowym zginaniu próbki prostopadłościowej, belkowej, o wymiarach: 380x50x63 mm (długość, wysokość, szerokość). Belka jest swobodnie podparta na końcach i obciążona w dwóch punktach pomiędzy podparciami. Warunki podparcia i obciążenia zapewniają swobodny obrót i przesunięcie poziome, co nie wywołuje dodatkowych naprężeń w próbce.

Przyjęto warunki badania:

- temperatura 10 °C,
- częstotliwość obciążenia 10 Hz,
- tryb kontrolowanego odkształcenia.

Przed właściwym badaniem zmęczenia wykonywane jest badanie wstępne modułu sztywności zginania i kąta przesunięcia fazowego. Moduł sztywności zginania obliczono ze wzorów od (1) do (3):

$$S = \frac{\sigma_r}{\varepsilon_r} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{0,357 \cdot P}{b \cdot h^2} \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

$$\varepsilon_r = \frac{12 \cdot \Delta \cdot h}{3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2} \quad [\text{mm/mm}] \quad (3)$$

gdzie:

σ_r - maksymalne naprężenie rozciągające, MPa,

ε_r - maksymalne odkształcenie przy rozciąganiu,

P - przyłożona siła, N,

b - szerokość średnia próbki, mm,

h - wysokość średnia próbki, mm,

Δ - maksymalne ugięcie próbki, mm,

a - odległość między punktami przyłożenia siły, (119 mm),

L - odległość między punktami podparcia, (357 mm).

Cykliczne zginanie próbki belkowej w trybie kontrolowanego odkształcenia, tzn. ze stałą amplitudą odkształcenia, powoduje mikrospękania próbki, ujawniające się zmniejszeniem modułu sztywności. Liczba cykli, po której moduł sztywności osiągnie 50 % wartości początkowej, określana jest jako trwałość zmęczeniowa D.

4.3.4 Badania dodatkowe

Poza wymaganiami według Zeszytu 63/2002 zbadano również wodoodporność mieszanek mineralno-asfaltowych według PN-EN 12697-12:2004(U) [35] oraz moduł sztywności IT-CY w rozciąganiu pośrednim w urządzeniu NAT wg PN-EN 12697-26:2005(U) [36].

5 Asfalt ze środkiem adhezyjnym

We wszystkich zbadanych BAWMS16 użyto asfalt drogowy 20/30. W tablicy 2 przedstawiono podstawowe właściwości tego asfaltu.

W każdym rodzaju BAWMS16 stosowano środek adhezyjny Teramin 14 jako dodatek do asfaltu w ilości 0,3 % (m/m). Zaprojektowana ilość asfaltu zawierała w sobie środek adhezyjny.

Tablica 2 Podstawowe właściwości asfaltu drogowego 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 wg Fraassa,	°C	-9
Po RTFOT		
Zmiana masy po RTFOT	g	-0,054
Penetracja w 25 °C,	0,1 mm	19
Temperatura mięknięcia PiK,	°C	66
Temperatura łamliwości wg Fraassa,	°C	-8

6 Beton asfaltowy o wysokim module sztywności z kruszywem bazaltowym BAWMS16B

6.1 Uziarnienie materiałów mineralnych

W tablicy 3 zestawiono uziarnienie poszczególnych frakcji kruszyw wchodzących w skład mieszanki mineralnej.

Tablica 3 Uziarnienie poszczególnych frakcji kruszyw

Rozmiar oczka sita #, mm	Mączka wapienna	0/4 Granit	2/5 Bazalt	5/8 Bazalt	8/11 Bazalt	11/16 Bazalt
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,3
12,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	46,0
9,6	0,0	0,0	0,0	0,2	46,4	33,8
8	0,0	0,0	0,0	6,8	41,5	1,6
6,3	0,0	0,0	0,1	29,5	8,4	0,2
4	0,0	0,9	21,7	57,6	2,4	0,0
2	0,0	14,7	70,1	4,6	0,4	0,0
0,85	0,0	32,2	7,1	0,6	0,1	0,0
0,42	0,0	23,6	0,5	0,1	0,2	0,1
0,3	0,1	9,3	0,1	0,0	0,1	0,1
0,18	1,2	11,6	0,1	0,1	0,1	0,2
0,15	0,9	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0
0,075	12,5	4,1	0,1	0,1	0,1	0,2
< 0,075	85,5	2,3	0,3	0,4	0,2	0,3
Suma	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

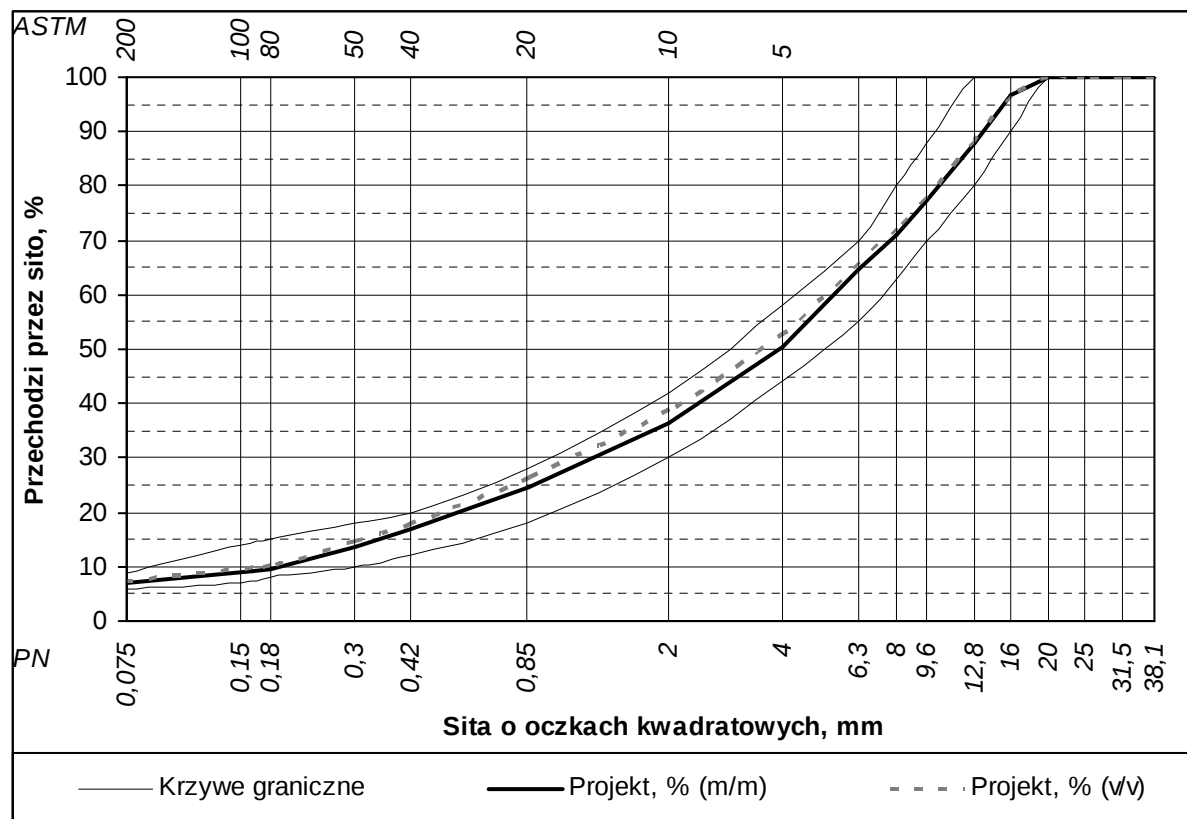
6.2 Skład BAWMS16B

Tablica 4 Skład BAWMS16B

Lp.	Składniki	Udział w MM	Udział w MMA
1	11/16 Bazalt	19,0	18,0
2	8/11 Bazalt	10,0	9,5
3	5/8 Bazalt	19,0	18,0
4	2/5 Bazalt	12,0	11,4
5	0/2 Granit	33,0	31,4
6	Mączka wapienna	7,0	6,6
7	Asfalt 20/30	-	5,1
Razem		100,0	100,0

Tablica 5 Uziarnienie mieszanki mineralnej BAWMS16B

Rozmiar oczka sita #, mm	Pozostaje na sicie, % (m/m)	Przechodzi przez sito, %(m/m)	Krzywe graniczne, %(m/m)	
			Dolna	Górna
20	0,0	100,0	100	100
16	3,3	96,7	90	100
12,8	8,7	87,9	80	100
9,6	11,1	76,8	70	88
8	5,8	71,1	63	80
6,3	6,5	64,6	55	70
4	14,1	50,5	44	58
2	14,2	36,3	30	42
0,85	11,6	24,7	18	28
0,42	7,9	16,8	12	20
0,30	3,1	13,7	10	18
0,18	4,0	9,7	8	15
0,15	0,5	9,2	7	14
0,075	2,3	6,9	6	9
< 0,075	6,9	-	-	-
Suma	100,0	-	-	-



Rysunek 1 Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej BAWMS16B

6.3 Właściwości BAWMS16B

Tablica 6 Właściwości BAWMS16B o zawartości asfaltu $A_m = 4,6 \%$ (m/m)

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

Tablica 7 Właściwości BAWMS16B o zawartości asfaltu $A_m = 5,1 \%$ (m/m)

Lp.	Właściwości	Wyniki	Wymagania
1	Gęstość mieszanki mineralnej, g/cm^3	2,850	-
2	Gęstość, g/cm^3	2,617	-
3	Gęstość objętościowa, g/cm^3	2,568	-
4	Wolna przestrzeń w próbkach Marshalla, 2×75 uderzeń, % (v/v)	1,9	od 3,0 do 5,0
5	Moduł sztywności pełzania pod obciąż. statycznym, 40°C , MPa	39	≥ 22
6	Koleinowanie po 30 000 cykli w 60°C , %	6,3	≤ 5
7	Moduł sztywności rozciągania pośredniego, 10°C , MPa	19 272	-
8	Zespolony moduł sztywności w 10°C , 10 Hz, MPa	17 950	$\geq 14\,000$
9	Szkoda zmęczeniowa D po 10^6 cykli, przy odkształceniu równym $130\,\mu\text{mm/mm}$, %	49	≤ 50
10	Wodoodporność, %	118,7	≥ 80

7 Beton asfaltowy o wysokim module sztywności z kruszywem wapiennym BAWMS16W

7.1 Kruszywo wapienne

W tablicy 8 zebrano wybrane właściwości przykładowego kruszywa wapiennego.

Tablica 8 Wybrane właściwości kruszywa wapiennego

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

7.2 BAWMS16W

7.2.1 Uziarnienie materiałów mineralnych

W tablicy 9 zestawiono uziarnienie poszczególnych frakcji kruszyw wchodzących w skład mieszanki mineralnej.

Tablica 9 Uziarnienie poszczególnych frakcji kruszyw

Rozmiar oczka sita #, mm	Mączka wapienna	0/4 Wapień	4/16 Wapień
20	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0
12,8	0,0	0,0	31,5
9,5	0,0	0,0	21,5
8	0,0	0,0	15,1
6,3	0,0	0,0	13,1
4	0,0	16,2	14,9
2	0,0	21,0	1,3
0,85	0,0	26,3	1,1
0,42	0,0	12,7	0,0
0,3	0,1	5,2	0,0
0,18	1,2	6,9	0,0
0,15	0,9	1,9	0,0
0,075	12,5	4,4	0,0
< 0,075	85,5	5,4	1,5
Suma	100,0	100,0	100,0

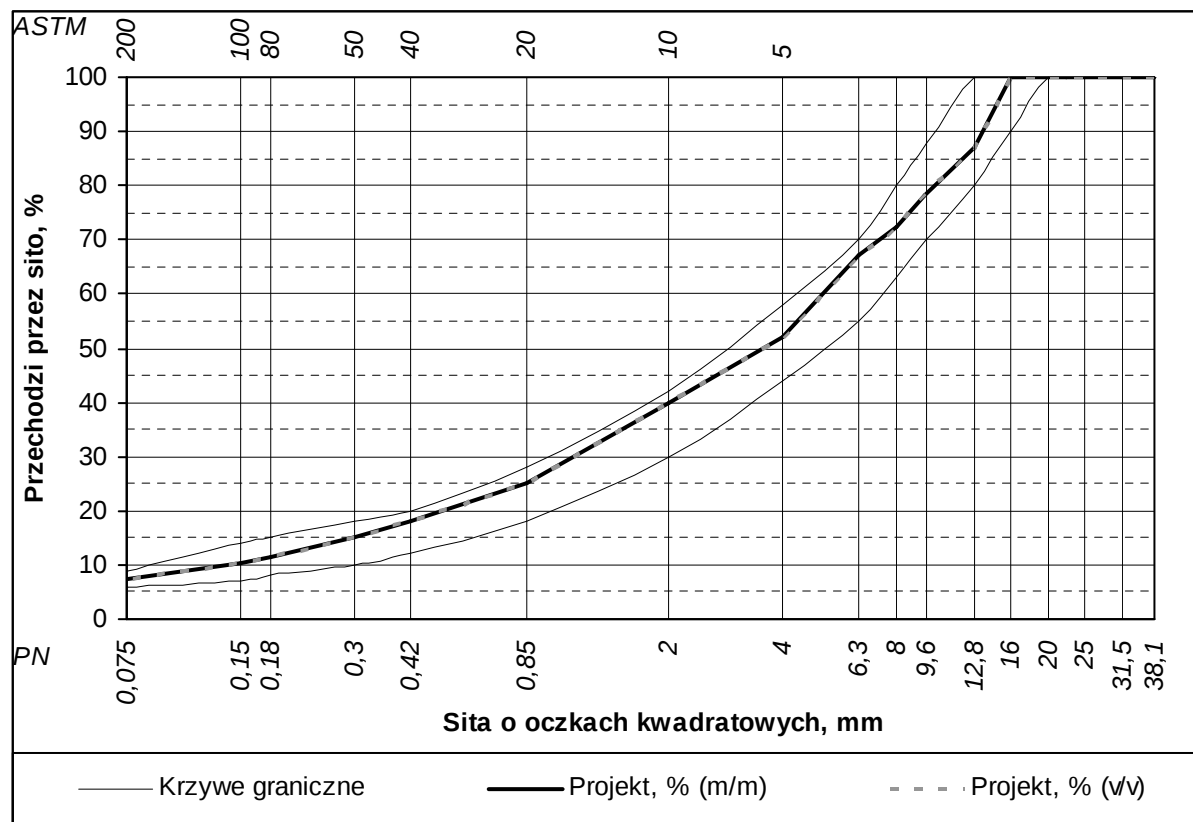
7.2.2 Skład BAWMS16W

Tablica 10 Skład BAWMS16W

Lp.	Składniki	Udział w MM, % (m/m)	Udział w MMA, % (m/m)
5	4/16 Wapień	40,7	38,4
6	0/4 Wapień	55,0	52,0
7	Mączka wapienna	4,3	4,1
8	Asfalt 20/30	-	5,5
	Razem	100,0	100,0

Tablica 11 Uziarnienie mieszanki mineralnej BAWMS16W

Rozmiar oczka sita #, mm	Pozostaje na sicie, % (m/m)	Przechodzi przez sito, % (m/m)	Krzywe graniczne, % (m/m)	
			Dolna	Górna
20	0,0	100,0	100	100
16	0,0	100,0	90	100
12,8	12,8	87,2	80	100
9,6	8,8	78,4	70	88
8	6,1	72,3	63	80
6,3	5,3	67,0	55	70
4	15,0	52,0	44	58
2	12,1	39,9	30	42
0,85	14,8	25,0	18	28
0,42	7,1	18,0	12	20
0,30	2,9	15,1	10	18
0,18	3,8	11,3	8	15
0,15	1,1	10,2	7	14
0,075	2,9	7,3	6	9
< 0,075	7,3	-	-	-
Suma	100,0	-	-	-



Rysunek 2 Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej BAWMS16W

7.2.3 Właściwości BAWMS16W

Tablica 12 Właściwości BAWMS16W o zawartości asfaltu $A_m = 5,5 \%$ (m/m)

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

8 Beton asfaltowy o wysokim module sztywności z kruszywem granitowym BAWMS16G

8.1 Kruszywo granitowe

W tablicach 13, 14 i 15 zebrano właściwości przykładowych kruszyw łamanych granitowych.

Tablica 13 Właściwości kruszywa łamanego granitowego 0/2 mm

Właściwości		Sposób badania	Wynik badania	Ocena - kategorie wg ¹⁾	
				PN-EN 12620	PN-EN 13043
Uziarnienie, % (m/m); skład ziarnowy; wymiar oczka # sita kontrolnego w mm	4	PN-EN 933-10:2002	100		
	2		85,82		
	1		58,20		
	0,5		34,13		
	0,25		14,62		
	0,125		3,95		
Wymiar ziarn d/D		PN-EN 933-10:2002	0/2		
Uziarnienie 2D 1,4 D D		PN-EN 933-10:2002	100 100 85,82	G _F 85	G _F 85
Gęstość ziarn, Mg/m ³ ρ_a ρ_{rd} ρ_{ssd}		PN-EN 1097-6:2002	2,65 2,33 2,45		
Nasiąkliwość, W ₂₄ %		PN-EN 1097-6:2002	3,4		
Zawartość pyłów, f %		PN-EN 933-10:2002	1,5	f ₃	f ₃
Wskaźnik piaskowy, SE		PN-EN 933-8:2001	94		

Zanieczyszczenia organiczne, humus	PN-EN 1744-1:2000	barwa jaśniejsza		
Reaktywność alkaliczna, % frakcja mm: 1-2 2-4	PN-78/B-06714/34	0,15 st.0 0,12 st.0	stopień: 0 ≤ 0,5 1 > 0,5 ≤ 2,0 2 > 2,0	
Uwalniane substancje niebezpieczne, mg/l As Ba Co Cr Cu Mo Ni Pb Zn V Cd Sr Sn	PN-EN 1744-1:2000	7 468 7 39 17 4 24 19 51 58 6 94 4		
Skład chemiczny, % SiO ₂ TiO ₂ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ MnO MgO CaO Na ₂ O K ₂ O P ₂ O ₅ SO ₃ Cl F	fluoroscencyjna spektrofotometria rentgenowska XRF	72,64 0,449 12,2 3,35 0,042 0,94 0,75 2,37 3,11 0,018 0,01 0,12 0,09		

¹⁾ Jeżeli norma nie określa, dla poszczególnych kategorii, wartości liczbowej, to podaje się wynik badania

Tablica 14 Właściwości kruszywa łamanego granitowego 2/8 mm

Właściwości		Sposób badania	Wynik badania	Ocena - kategorie wg ¹⁾	
				PN-EN 12620	PN-EN 13043
Uziarnienie, % (m/m); skład ziarnowy; wymiar oczka # sita kontrolnego w mm	16 8 4 2 1	PN-EN 933-1:2000	100 95,23 31,33 1,91 0,09		
Wymiar ziarn d/D		PN-EN 933-1:2000	2/8		

Uziarnienie 2D 1,4 D D d d/2	PN-EN 933-1:2000	100 100 95,23 1,91 0,09	$G_F85/20$	$G_F90/10$
Gęstość ziarn, Mg/m^3 ρ_a ρ_{rd} ρ_{ssd}	PN-EN 1097-6:2002	2,67 2,58 2,61		
Zawartość pyłów, $f\%$	PN-EN 933-1:2000	0,02	$f_{1,5}$	$f_{0,5}$
Wskaźnik kształtu, SI	PN-EN 933-4:2001	14	SI_{15}	SI_{15}
Odporność na rozdrabnianie, LA	PN-EN 1097-2:1998	32	LA_{35}	LA_{35}
Odporność na polerowanie, PSV	PN-EN 1097-8:2002	53	PSV_{50}	PSV_{50}
Nasiąkliwość, $W_{24}\%$	PN-EN 1097-6:2002	0,3		$W_{24}1$
Mrozoodporność, $F\%$	PN-EN 1367-1:2001	0,15	F_1	F_1
Szok termiczny, $I\%$ V_{LA}	PN-EN 1367-5:2004	0,2 7,1		
Reaktywność alkaliczna, % frakcja mm: 2-4 4-8	PN-78/B-06714/34	0,12 st.0 0,11 st.0		
Zanieczyszczenia organiczne, humus	PN-EN 1744-1:2000	barwa jaśniejsza		
Ziarna przekruszone, % ziarna o pow. przekrusz. i łamanych ziarna o pow. zaokrąglonych ziarna całkowicie przekrusz. i łamane ziarna całkowicie zaokrąglone	PN-EN 933-5:2000	100 0,0 100 0,0		$C_{100/0}$
Uwalniane substancje niebezpieczne, mg/l As Ba Co Cr Cu Mo Ni Pb Zn V Cd Sr Sn	PN-EN 1744-1:2000	7 468 7 39 17 4 24 19 51 58 6 94 4		

Skład chemiczny, %			
SiO ₂		72,64	
TiO ₂		0,449	
Al ₂ O ₃		12,2	
Fe ₂ O ₃		3,35	
MnO		0,042	
MgO		0,94	
CaO		0,75	
Na ₂ O		2,37	
K ₂ O		3,11	
P ₂ O ₅		0,018	
SO ₃		0,01	
Cl		0,12	
F		0,09	
	fluoroscencyjna spektrofotometria rentgenowska XRF		

¹⁾ Jeżeli norma nie określa, dla poszczególnych kategorii, wartości liczbowej, to podaje się wynik badania

Tablica 15 Właściwości kruszywa łamanego granitowego 8/16 mm

Właściwości		Sposób badania	Wynik badania	Ocena - kategorie wg ¹⁾	
				PN-EN 12620	PN-EN 13043
Uziarnienie, % (m/m); skład ziarnowy; wymiar oczka # sita kontrolnego w mm	31,5 16 8 4	PN-EN 933-1:2000	100 92,85 7,59 1,17		
Wymiar ziarn d/D		PN-EN 933-1:2000	8/16		
Uziarnienie 2D 1,4 D D d d/2		PN-EN 933-1:2000	100 100 92,85 7,59 1,17	G _C 85/20	G _C 90/10
Gęstość ziarn, Mg/m ³ ρ_a ρ_{rd} ρ_{ssd}		PN-EN 1097-6:2002	2,65 2,62 2,63		
Zawartość pyłów, f %		PN-EN 933-1:2000	0,06	$f_{1,5}$	$f_{0,5}$
Wskaźnik kształtu, SI		PN-EN 933-4:2001	16	SI_{20}	SI_{20}
Odporność na rozdrabnianie, LA		PN-EN 1097-2:1998	34	LA_{40}	LA_{40}
Odporność na rozdrabnianie, M_{DE}		PN-EN 1097-1:2000	8	M_{DE10}	M_{DE10}
Odporność na polerowanie, PSV		PN-EN 1097-8:2002	53	PSV_{50}	PSV_{50}
Nasiąkliwość, W_{24} %		PN-EN 1097-6:2002	0,3		W_{241}
Mrozoodporność, F %		PN-EN 1367-1:2001	0,18	F_1	F_1
Szok termiczny, I % V_{LA}		PN-EN 1367-5:2004	0,2 7,1		
Reaktywność alkaliczna, %		PN-78/B-06714/34	0,13 st.0		
Skurcz przy wysychaniu, S %		PN-EN 1367-4:2000	0,02		

Zanieczyszczenia organiczne, humus	PN-EN 1744-1:2000	barwa jaśniejsza		
Ziarna przekruszone, % ziarna o pow. przekrusz. i łamanych ziarna o pow. zaokrąglonych ziarna całkowicie przekrusz. i łamane ziarna całkowicie zaokrąglone	PN-EN 933-5:2000	100 0,0 100 0,0		$C_{100/0}$
Uwalniane substancje niebezpieczne, mg/l As Ba Co Cr Cu Mo Ni Pb Zn V Cd Sr Sn	PN-EN 1744-1:2000	7 468 7 39 17 4 24 19 51 58 6 94 4		
Skład chemiczny, % SiO ₂ TiO ₂ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ MnO MgO CaO Na ₂ O K ₂ O P ₂ O ₅ SO ₃ Cl F	fluoroscencyjna spektrofotometria rentgenowska XRF	72,64 0,449 12,2 3,35 0,042 0,94 0,75 2,37 3,11 0,018 0,01 0,12 0,09		

¹⁾ Jeżeli norma nie określa, dla poszczególnych kategorii, wartości liczbowej, to podaje się wynik badania

8.2 BAWMS16G

8.2.1 Uziarnienie materiałów mineralnych

W tablicy 16 zestawiono uziarnienie poszczególnych frakcji kruszyw wchodzących w skład mieszanki mineralnej.

Tablica 16 Uziarnienie poszczególnych frakcji kruszyw

Rozmiar oczka sita #, mm	Mączka wapienna	0/2 Granit	2/8 Granit	8/16 Granit
20	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	5,9
12,8	0,0	0,0	0,0	31,7
9,6	0,0	0,0	0,0	34,0
8	0,0	0,0	1,9	16,1
6,3	0,0	0,0	14,7	10,0
4	0,0	0,0	38,6	1,7
2	0,0	0,4	37,4	0,2
0,85	0,0	43,6	6,4	0,0
0,42	0,0	20,8	0,4	0,0
0,30	0,1	8,4	0,1	0,0
0,18	1,2	11,1	0,1	0,0
0,15	0,9	3,0	0,0	0,2
0,075	12,5	6,3	0,2	0,1
< 0,075	85,5	6,4	0,2	0,1
Suma	100,0	100,0	100,0	100,0

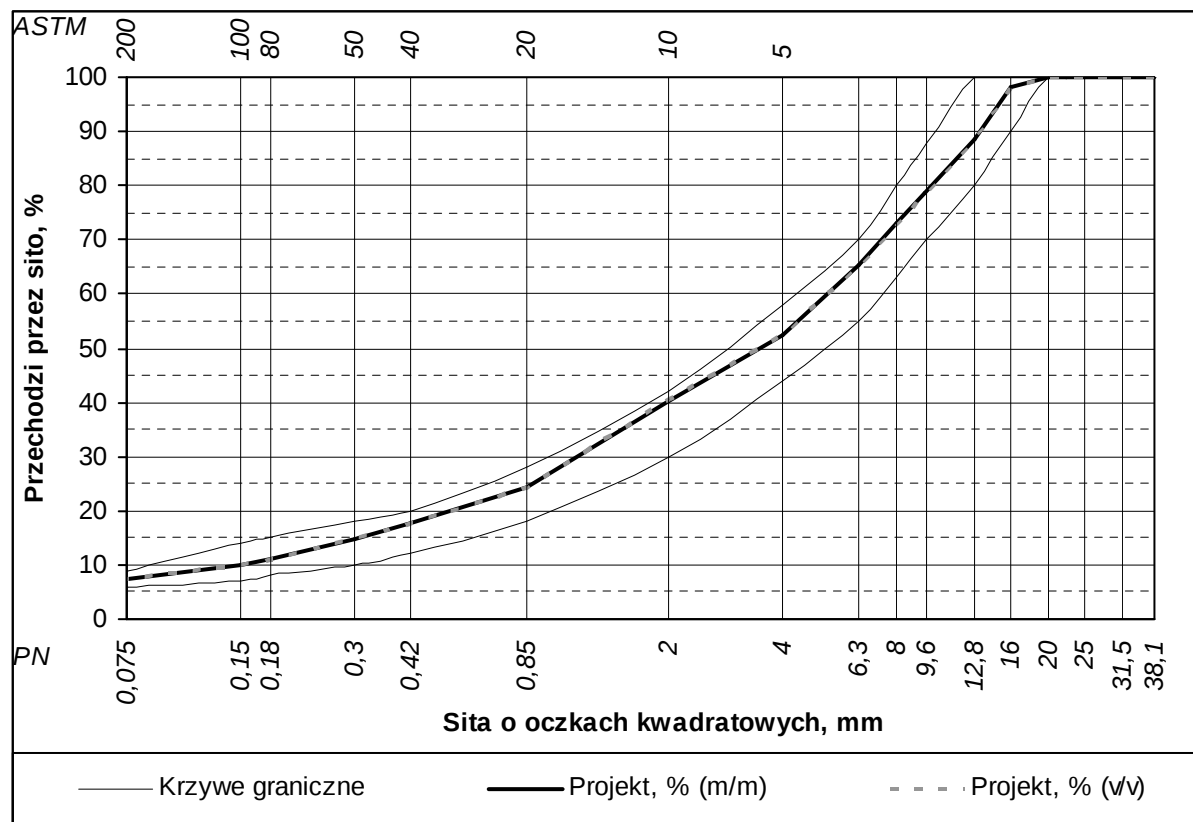
8.2.2 Skład BAWMS16G

Tablica 17 Skład BAWMS16G

Lp.	Składniki	Udział w MM	Udział w MMA
1	8/16 Granit	30,0	28,4
2	2/8 Granit	32,0	30,2
3	0/2 Granit	32,0	30,2
5	Mączka wapienna	6,0	5,7
6	Asfalt 20/30	-	5,5
Razem		100,0	100,0

Tablica 18 Uziarnienie mieszanki mineralnej BAWMS16G

Rozmiar oczka sita #, mm	Pozostaje na sicie, % (m/m)	Przechodzi przez sito, % (m/m)	Krzywe graniczne, % (m/m)	
			Dolna	Górna
20	0,0	100,0	100	100
16	1,8	98,2	90	100
12,8	9,5	88,7	80	100
9,6	10,2	78,5	70	88
8	5,4	73,1	63	80
6,3	7,7	65,4	55	70
4	12,9	52,5	44	58
2	12,2	40,4	30	42
0,85	16,0	24,4	18	28
0,42	6,8	17,6	12	20
0,30	2,7	14,9	10	18
0,18	3,7	11,2	8	15
0,15	1,1	10,1	7	14
0,075	2,9	7,3	6	9
< 0,075	7,3	-	-	-
Suma	100,0	-	-	-



Rysunek 3 Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej BAWMS16G

8.2.3 Właściwości BAWMS16G

Tablica 19 Właściwości BAWMS16G o zawartości asfaltu $A_m = 5,5 \%$ (m/m)

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

9 Beton asfaltowy o wysokim module sztywności z kruszywem łamanym z otoczków BAWMS16O

9.1 Kruszywo łamane z otoczków

W tablicach 20, 21, 22 i 23 zebrano właściwości przykładowych kruszyw łamanych z otoczków.

Tablica 20 Właściwości kruszywa łamanego z otoczków 0/2 mm

Właściwości		Sposób badania	Wynik badania	Ocena - kategorie wg ¹⁾		
				PN-EN 12620	PN-EN 13242	PN-EN 13043
Uziarnienie, % (m/m); skład ziarnowy; wymiar oczka # sita kontrolnego w mm	4	PN-EN 933-1:2000	100			
	2		96,16			
	1		70,25			
	0,5		49,12			
	0,25		34,44			
	0,125		22,86			
Wymiar ziarn d/D		PN-EN 933-1:2000	2/6			
Uziarnienie 2D 1,4 D D		PN-EN 933-1:2000	100 100 96,16	G _F 85	G _F 85	G _F 85
Gęstość ziarn, Mg/m ³ ρ_a ρ_{rd} ρ_{ssd}		PN-EN 1097-6:2002	2,68 2,52 2,58			
Nasiąkliwość, WA ₂₄ %		PN-EN 1097-6:2002	2,37			
Zawartość pyłów, f %		PN-EN 933-1:2000	8,72	f_{10}	f_{10}	f_{10}
Wskaźnik piaskowy, SE		PN-EN 933-8:2001	76,13			

Błękit metylenowy, MB_F	PN-EN 933-9:2001	0,7			$MB_F 10$
Skurcz przy wysychaniu, %	PN-EN 1367-4:2000	0,033	<0,075		
Składniki wpływające na wiązanie i twardnienie cementu zwiększenie czasu wiązania, min zmniejszenie wytrzyma. na ściskanie, %	PN-EN 1744-1:2000	10 107	<120 <120	<120 <120	
Lekkie zanieczyszczenia, m_{LPC} %	PN-EN 1744-1:2000	0,122			$m_{LPC} 0,1$
Zanieczyszczenia organiczne, humus	PN-EN 1744-1:2000	barwa jaśniejsza			
Zawartość siarki, %	PN-EN 1744-1:2000	0,049	<1		
Siarczany, AS %	PN-EN 1744-1:2000	0,078	$AS_{0,2}$		
Reaktywność alkaliczna ²⁾ , % frakcja mm: 2-4 4-8	PN-78/B-06714/34	0,32 0,59	stopień: 0 ≤ 0,5 1 > 0,5 ≤ 2,0 2 > 2,0		
Promieniotwórczość naturalna ²⁾ $f_{1 \max}$ $f_{2 \max}$, Bq/kg	Instrukcja ITB 234/95	0,39 27,88	≤ 1 ≤ 185		
Uwalniane substancje niebezpieczne, mg/l ³⁾ Cd Cr Cu Ni Pb Zn Ba As	PN-EN 1744-1:2000	<0,01 <0,05 <0,05 0,125 0,181 0,027 0,173 <0,1	0,2 0,5 0,5 0,5 0,5 2 2 0,1		
Skład chemiczny, % SiO ₂ TiO ₂ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ MnO MgO CaO Na ₂ O K ₂ O P ₂ O ₅ SO ₃ Cl F	fluoroscencyjna spektrofotometria rentgenowska XRF	36,33 0,188 5,89 1,91 0,067 1,50 26,16 1,09 1,80 0,302 <0,01 0,035 0,08			

¹⁾ Jeżeli norma nie określa, dla poszczególnych kategorii, wartości liczbowej, to podaje się wynik badania

²⁾ Wymagania Wg PN-86/B-06712

³⁾ Wymagania wg Rozporządzenia Ministra Środowiska z 29.11.2002 r. w sprawie warunków, jakie należy spełniać przy wprowadzaniu ścieków do wód lub ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego

Tablica 21 Właściwości kruszywa łamanego z otoczków 2/6,3 mm

Badana cecha		Sposób badania	Wynik badania	Ocena - kategorie wg ¹⁾		
				PN-EN 12620	PN-EN 13242	PN-EN 13043
Uziarnienie, % (m/m); skład ziarnowy; wymiar oczka # sita kontrolnego w mm	8	PN-EN 933-1:2000	100			
	6,3		98,35			
	4		64,14			
	2		11,37			
	1		3,51			
Wymiar ziarn d/D		PN-EN 933-1:2000	2/6			
Uziarnienie		PN-EN 933-1:2000				
2D			100			
1,4 D			100	G_C	G_C	G_C
D			98,36	85/20	85-15	90/15
d			11,37			
d/2			3,51			
Gęstość ziarn, Mg/m ³		PN-EN 1097-6:2002				
ρ_a			2,69			
ρ_{rd}			2,56			
ρ_{ssd}			2,61			
Nasiąkliwość, WA_{24} %		PN-EN 1097-6:2002	1,88		WA_{242}	WA_{242}
Zawartość pyłów, f %		PN-EN 933-1:2000	1,1	$f_{1,5}$	f_2	f_2
Błękit metylenowy, MB_F		PN-EN 933-9:2001	0,7			MB_F10
Wskaźnik kształtu, SI		PN-EN 933-4:2001	10,6	SI_{15}	SI_{20}	SI_{15}
Wskaźnik płaskości, FI		PN-EN 933-3:1999	11,9	FI_{15}	FI_{20}	FI_{15}
Mrozoodporność, F %		PN-EN 1367-1:2001	1,13	F_2	F_2	F_2
Mrozoodporność w soli, F % f		PN-EN 1367-1:2001	2,4			
Odporność na rozdrabnianie, LA		PN-EN 1097-2:2000	18,9	LA_{25}	LA_{25}	LA_{25}
Odporność na ścieranie, M_{DE}		PN-EN 1097-1:2000	14,0	M_{DE15}	M_{DE20}	M_{DE15}
Odporność na polerowanie, PSV		PN-EN 1097-8:2002	51,0	PSV_{50}		PSV_{50}
Skurcz przy wysychaniu, %		PN-EN 1367-4:2000	0,033	<0,075		
Szok termiczny		PN-EN 1367-5:2004				
I %			0,53			
V_{LA}			2,07			
Składniki wpływające na wiązanie i twardnienie cementu		PN-EN 1744-1:2000				
zwiększenie czasu wiązania, min			10	<120	<120	
zmniejszenie wytrzym. na ściskanie, %			107	<120	<120	
Lekkie zanieczyszczenia, m_{LPC} %		PN-EN 1744-1:2000	0,122			$m_{LPC}0,1$
Zanieczyszczenia organiczne, humus		PN-EN 1744-1:2000	barwa jaśniejsza			
Zawartość siarki, %		PN-EN 1744-1:2000	0,049	<1		
Siarczany, AS %		PN-EN 1744-1:2000	0,078	$AS_{0,2}$		
Ziarna przekruszone, %		PN-EN 933-5:2000				
ziarna o pow. przekrusz. i łamanych			przekruszona skała	100		$C_{100/0}$
ziarna o pow. zaokrąglonych				0,0		
ziarna całkowicie przekrusz. i łamane				100		
ziarna całkowicie zaokrąglone				0,0		

Reaktywność alkaliczna ²⁾ , % frakcja mm: 2-4 4-8	PN-78/B-06714/34	0,32 0,59	stopień: 0 ≤ 0,5 1 > 0,5 ≤ 2,0 2 > 2,0
Promieniotwórczość naturalna ²⁾ f _{1 max} f _{2 max} , Bq/kg	Instrukcja ITB 234/95	0,39 27,88	≤ 1 ≤ 185
Uwalniane substancje niebezpieczne, mg/l ³⁾ Cd Cr Cu Ni Pb Zn Ba As	PN-EN 1744-1:2000	<0,01 <0,05 <0,05 0,125 0,181 0,027 0,173 <0,1	0,2 0,5 0,5 0,5 0,5 2 2 0,1
Skład chemiczny, % SiO ₂ TiO ₂ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ MnO MgO CaO Na ₂ O K ₂ O P ₂ O ₅ SO ₃ Cl F	fluoroscencyjna spektrofotometria rentgenowska XRF	36,33 0,188 5,89 1,91 0,067 1,50 26,16 1,09 1,80 0,302 <0,01 0,035 0,08	

¹⁾ Jeżeli norma nie określa, dla poszczególnych kategorii, wartości liczbowej, to podaje się wynik badania

²⁾ Wymagania Wg PN-86/B-06712

³⁾ Wymagania wg Rozporządzenia Ministra Środowiska z 29.11.2002 r. w sprawie warunków, jakie należy spełniać przy wprowadzaniu ścieków do wód lub ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego

Tablica 22 Wyniki badań kruszywa łamanego z otoczków 6,3/12,5 mm

Badana cecha		Sposób badania	Wynik badania	Ocena - kategorie wg ¹⁾		
				PN-EN 12620	PN-EN 13242	PN-EN 13043
Uziarnienie, % (m/m); skład ziarnowy; wymiar oczka # sita kontrolnego w mm	16 12,5 8 6,3 4	PN-EN 933-1:2000	100 99,00 52,27 11,30 1,66			
Wymiar ziarn d/D		PN-EN 933-1:2000	6/12			
Uziarnienie 2D 1,4 D D d d/2		PN-EN 933-1:2000	100 100 99,00 11,30 1,66	G_C 85/20	G_C 85-15	G_C 90/15
Gęstość ziarn, Mg/m ³ ρ_a ρ_{rd} ρ_{ssd}		PN-EN 1097-6:2002	2,68 2,58 2,62			
Nasiąkliwość, WA_{24} %		PN-EN 1097-6:2002	1,37		WA_{242}	WA_{242}
Zawartość pyłów, f %		PN-EN 933-1:2000	0,75	$f_{1,5}$	f_2	f_1
Błękit metylenowy, MB_F		PN-EN 933-9:2001	0,7			MB_F10
Wskaźnik kształtu, SI		PN-EN 933-4:2001	13,8	SI_{15}	SI_{20}	SI_{15}
Wskaźnik płaskości, FI		PN-EN 933-3:1999	8,6	FI_{15}	FI_{20}	FI_{10}
Mrozoodporność, F %		PN-EN 1367-1:2001	1,15	F_2	F_2	F_2
Mrozoodporność w soli, F % f		PN-EN 1367-1:2001	2,9	F_4	F_4	F_4
Odporność na rozdrabnianie, LA		PN-EN 1097-2:2000	18,4	LA_{25}	LA_{25}	LA_{25}
Odporność na ścieranie, M_{DE}		PN-EN 1097-1:2000	13,7	M_{DE15}	M_{DE20}	M_{DE15}
Odporność na polerowanie, PSV		PN-EN 1097-8:2002	51,0	PSV_{50}		PSV_{50}
Skurcz przy wysychaniu, %		PN-EN 1367-4:2000	0,033	<0,075		
Szok termiczny I % V_{LA}		PN-EN 1367-5:2004	0,53 2,07			
Składniki wpływające na wiązanie i twardnienie cementu zwiększenie czasu wiązania, min zmniejszenie wytrzymał. na ściskanie, %		PN-EN 1744-1:2000	10 107	<120 <120	<120 <120	
Lekkie zanieczyszczenia, m_{LPC} %		PN-EN 1744-1:2000	0,122			$m_{LPC0,1}$
Zanieczyszczenia organiczne, humus		PN-EN 1744-1:2000	barwa jaśniejsza			
Zawartość siarki, %		PN-EN 1744-1:2000	0,049	<1		
Siarczany, AS %		PN-EN 1744-1:2000	0,078	$AS_{0,2}$		
Ziarna przekruszone, % ziarna o pow. przekrusz. i łamanych ziarna o pow. zaokrąglonych ziarna całkowicie przekrusz. i łamane ziarna całkowicie zaokrąglone		PN-EN 933-5:2000	przekrusz ona skała	100 0,0 100 0,0		$C_{100/0}$

Reaktywność alkaliczna ²⁾ , % frakcja mm: 4-8 8-16	PN-78/B-06714/34	0,49 2,45	stopień: 0 ≤ 0,5 1 > 0,5 ≤ 2,0 2 > 2,0
Promieniotwórczość naturalna ²⁾ $f_{1 \max}$ $f_{2 \max}$, Bq/kg	Instrukcja ITB 234/95	0,39 27,88	≤ 1 ≤ 185
Uwalniane substancje niebezpieczne, mg/l ³⁾ Cd Cr Cu Ni Pb Zn Ba As	PN-EN 1744-1:2000	<0,01 <0,05 <0,05 0,125 0,181 0,027 0,173 <0,1	0,2 0,5 0,5 0,5 0,5 2 2 0,1
Skład chemiczny, % SiO ₂ TiO ₂ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ MnO MgO CaO Na ₂ O K ₂ O P ₂ O ₅ SO ₃ Cl F	fluoroscencyjna spektrofotometria rentgenowska XRF	36,33 0,188 5,89 1,91 0,067 1,50 26,16 1,09 1,80 0,302 <0,01 0,035 0,08	

¹⁾ Jeżeli norma nie określa, dla poszczególnych kategorii, wartości liczbowej, to podaje się wynik badania

²⁾ Wymagania Wg PN-86/B-06712

³⁾ Wymagania wg Rozporządzenia Ministra Środowiska z 29.11.2002 r. w sprawie warunków, jakie należy spełniać przy wprowadzaniu ścieków do wód lub ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego

Tablica 23 Wyniki badań kruszywa łamanego z otoczków 12,5/20 mm

Badana cecha		Sposób badania	Wynik badania	Ocena - kategorie wg ¹⁾		
				PN-EN 12620	PN-EN 13242	PN-EN 13043
Uziarnienie, % (m/m); skład ziarnowy; wymiar oczka # sita kontrolnego w mm	31,5	PN-EN 933-1:2000	100			
	20		97,25			
	16		30,22			
	12,5		13,07			
	8		2,03			
	6,3		0,04			
Wymiar ziarn d/D		PN-EN 933-1:2000	12/20			
Uziarnienie		PN-EN 933-1:2000				
2D			100			
1,4 D			100	G_C	G_C	G_C
D			97,25	90/15	85-15	90/15
d			13,08			
d/2			0,04			
Gęstość ziarn, Mg/m ³		PN-EN 1097-6:2002				
ρ_a			2,67			
ρ_{rd}			2,61			
ρ_{ssd}			2,63			
Nasiąkliwość, WA_{24} %		PN-EN 1097-6:2002	1,04		WA_{241}	WA_{241}
Zawartość pyłów, f %		PN-EN 933-1:2000	0,91	$f_{1,5}$	f_2	f_1
Błękit metylenowy, MB_F		PN-EN 933-9:2001	0,7			MB_F10
Wskaźnik kształtu, SI		PN-EN 933-4:2001	5,1	SI_{15}	SI_{20}	SI_{15}
Wskaźnik płaskości, FI		PN-EN 933-3:1999	6,8	FI_{15}	FI_{20}	FI_{10}
Mrozoodporność, F %		PN-EN 1367-1:2001	0,98	F_1	F_1	F_1
Mrozoodporność w soli, F % f		PN-EN 1367-1:2001	2,1	F_4	F_4	F_4
Odporność na rozdrabnianie, LA		PN-EN 1097-2:2000	18,4	LA_{25}	LA_{25}	LA_{25}
Odporność na ścieranie, M_{DE}		PN-EN 1097-1:2000	13,7	$M_{DE}15$	$M_{DE}20$	$M_{DE}15$
Odporność na polerowanie, PSV		PN-EN 1097-8:2002	51,0	PSV_{50}		PSV_{50}
Skurcz przy wysychaniu, %		PN-EN 1367-4:2000	0,033	<0,075		
Szok termiczny		PN-EN 1367-5:2004				
I %			0,53			
V_{LA}			2,07			
Składniki wpływające na wiązanie i twardnienie cementu		PN-EN 1744-1:2000				
zwiększenie czasu wiązania, min			10	<120	<120	
zmniejszenie wytrzym. na ściskanie, %			107	<120	<120	
Lekkie zanieczyszczenia, m_{LPC} %		PN-EN 1744-1:2000	0,122			$m_{LPC}0,1$
Zanieczyszczenia organiczne, humus		PN-EN 1744-1:2000	barwa jaśniejsza			
Zawartość siarki, %		PN-EN 1744-1:2000	0,049	<1		
Siarczany, AS %		PN-EN 1744-1:2000	0,078	$AS_{0,2}$		
Ziarna przekruszone, %		PN-EN 933-5:2000				
ziarna o pow. przekrusz. i łamanych						
ziarna o pow. zaokrąglonych						
ziarna całkowicie przekrusz. i łamane						
ziarna całkowicie zaokrąglone						
			przekruszona skała	89,1 10,9 13,9 100		$C_{90/100}$

Reaktywność alkaliczna ²⁾ , %	PN-78/B-06714/34	2,45	stopień: 0 ≤ 0,5 1 > 0,5 ≤ 2,0 2 > 2,0
Promieniotwórczość naturalna ²⁾ $f_{1 \max}$ $f_{2 \max}$, Bq/kg	Instrukcja ITB 234/95	0,39 27,88	≤ 1 ≤ 185
Uwalniane substancje niebezpieczne, mg/l ³⁾ Cd Cr Cu Ni Pb Zn Ba As	PN-EN 1744-1:2000	<0,01 <0,05 <0,05 0,125 0,181 0,027 0,173 <0,1	0,2 0,5 0,5 0,5 0,5 2 2 0,1
Skład chemiczny, % SiO ₂ TiO ₂ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ MnO MgO CaO Na ₂ O K ₂ O P ₂ O ₅ SO ₃ Cl F	fluoroscencyjna spektrofotometria rentgenowska XRF	36,33 0,188 5,89 1,91 0,067 1,50 26,16 1,09 1,80 0,302 <0,01 0,035 0,08	

¹⁾ Jeżeli norma nie określa, dla poszczególnych kategorii, wartości liczbowej, to podaje się wynik badania

²⁾ Wymagania Wg PN-86/B-06712

³⁾ Wymagania wg Rozporządzenia Ministra Środowiska z 29.11.2002 r. w sprawie warunków, jakie należy spełniać przy wprowadzaniu ścieków do wód lub ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego

9.2 BAWMS160

9.2.1 Uziarnienie materiałów mineralnych

W tablicy 24 zestawiono uziarnienie poszczególnych frakcji kruszyw wchodzących w skład mieszanki mineralnej.

Tablica 24 Uziarnienie poszczególnych frakcji kruszyw

Rozmiar oczka sita #, mm	Mączka wapienna	0/2 piasek łamany	2/6,3 grys z otoczek	6,3/12,8 grys z otoczek	8/16 Dolomit
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	6,1
12,8	0,0	0,0	0,0	7,6	42,6
9,5	0,0	0,0	0,0	54,7	28,5
8	0,0	0,0	0,3	23,1	14,0
6,3	0,0	0,0	7,4	12,5	5,0
4	0,0	1,0	51,3	1,0	0,8
2	0,0	10,5	33,3	0,2	0,2
0,85	0,0	40,5	6,0	0,1	0,3
0,42	0,0	19,4	0,4	0,1	0,4
0,3	0,0	8,0	0,1	0,1	0,3
0,18	0,0	9,9	0,1	0,1	0,3
0,15	0,8	2,2	0,1	0,1	0,2
0,075	6,2	4,4	0,2	0,1	0,4
< 0,075	93,0	4,1	0,8	0,3	0,9
Suma	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

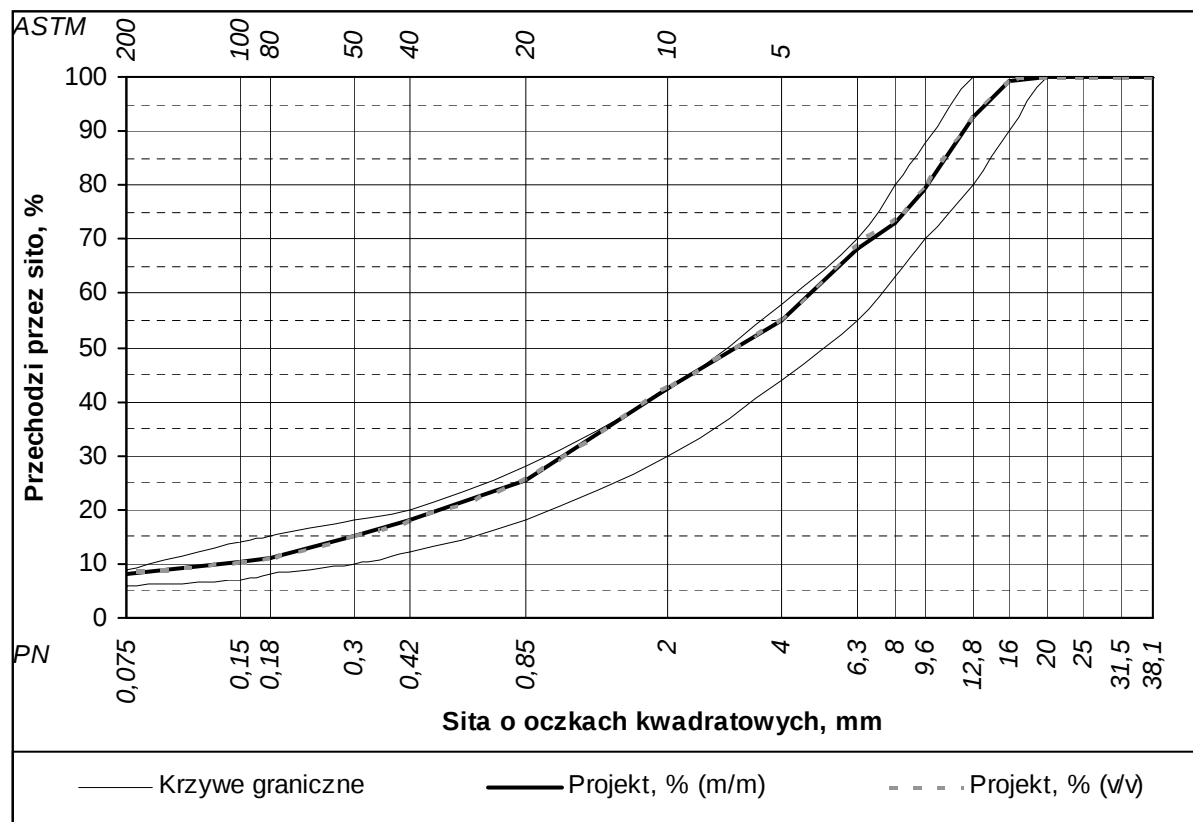
9.2.2 Skład BAWMS160

Tablica 25 Skład BAWMS160

Lp.	Składniki	Udział w MM, % (m/m)	Udział w MMA, % (m/m)
1	8/16 Dolomit	12,5	11,9
2	6,3/12,8 grys z otoczek	18,0	17,1
3	2/6,3 grys z otoczek	25,0	23,8
4	0/2 piasek łamany	38,0	36,1
5	Mączka wapienna	6,5	6,2
6	Asfalt 20/30	-	4,9
Razem		100,0	100,0

Tablica 26 Uziarnienie mieszanki mineralnej BAWMS16O

Rozmiar oczka sita #, mm	Pozostaje na sicie, % (m/m)	Przechodzi przez sito, % (m/m)	Krzywe graniczne, % (m/m)	
			Dolna	Górna
20	-	100,0	100	100
16	0,8	99,2	90	100
12,8	9,5	89,7	80	100
9,5	17,2	72,5	70	88
8	7,8	64,7	63	80
6,3	5,2	59,5	55	70
4	12,9	46,6	44	58
2	11,1	35,5	30	42
0,85	13,6	21,9	18	28
0,42	6,0	15,9	12	20
0,3	2,5	13,4	10	18
0,18	3,1	10,3	8	15
0,15	0,8	9,5	7	14
0,075	1,9	7,7	6	9
< 0,075	7,7	-	-	-
Suma	100,0	-	-	-



Rysunek 4 Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej BAWMS16O

9.2.3 Właściwości BAWMS160

Tablica 27 Właściwości BAWMS160 o zawartości asfaltu $A_m = 4,9 \%$ (m/m)

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

10 Beton asfaltowy o wysokim module sztywności z kruszywem z żużla stalowniczego BAWMS16Z

10.1 Kruszywo z żużla stalowniczego

10.1.1 Charakterystyka

Żużel stalowniczy konwertorowy powstaje podczas wytapiania stali w urządzeniu zwanym konwertorem. Wsad do pieca konwertorowego składa się ze złomu zalewanego ciekłą surówką oraz materiału żużłotwórczego, jakim zwykle jest wapno palone. Przy pomocy lancy doprowadzany jest tlen, którym wypalane są szkodliwe składniki takie jak: węgiel, siarka, fosfor, krzem itp.

Ciekły żużel z konwertora jest gromadzony w dole w celu powolnego zestalania. W trakcie powolnego ochładzania, w gorącej masie żużlowej, wykryszalizowują krzemiany dwu i trzy wapniowe, ferryt wapniowy, wustyt oraz zanieczyszczenia pochodzące z wsadu.

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 CaOw. W żużlu stalowniczym dochodzi także do zmian fazowych, a więc i rozpadów krzemianowych. Jednak rozpady związane z występowaniem wolnego tlenu wapnia mają większe znaczenie. Fragmenty wolnego wapna w zetknięciu z wilgocią ulegają lasowaniu, co wytwarza temperaturę i prowadzi do powstania uwodnionego tlenu wapnia ze zwiększeniem objętości. Skutkiem tego procesu jest rozpad żużla polegający na pęknięciach pojedynczych ziaren kruszywa [37].

Żużle stalownicze przypominają z wyglądu bazalt, mają dużą gęstość właściwą i 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.

10.1.2 Zastosowanie

Przydatność żużli hutniczych jako materiału na budowy dróg znana jest już od dawna. Oprócz zastosowań współczesnych znane są przykłady nawet z czasów rzymskich. W Anglii, w rejonach rzymskich ośrodków produkcji żelaza, znaleziono fragmenty dróg zbudowanych z użyciem żużla. Podobnie w okresie rewolucji przemysłowej, kiedy nastąpił gwałtowny wzrost produkcji żelaza, zaczęto szeroko wykorzystywać żużle hutnicze w drogownictwie.

Obecnie, zwłaszcza w Europie Zachodniej i USA, żużel hutniczy jest uważany za pełnowartościowy surowiec do produkcji kruszy drogowych i nie tylko. Coraz większa dbałość o środowisko naturalne spowodowała potrzebę poszukiwania nowych, alternatywnych materiałów (w celu ochrony złóż naturalnych) pochodzących z szeroko pojętego recyklingu.

Według Katalogu Typowych Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych (KTNPP) [38] dopuszczalne są zastosowania żużli w każdym z elementów konstrukcji nawierzchni drogowej. Są to:

- Roboty ziemne
Niesort z żużla wielkopiecowego znakomicie nadaje się do wszelkiego rodzaju wymian gruntu i budowy nasypów.
- Wzmocnienia podłoża
KTNPP zalicza żużle nierozpadowe do materiałów niewysadzinowych. Zalicza je do grupy G1 nośności podłoża o wskaźniku CBR 10 % i dopuszcza do stosowania przy wzmacnianiu podłoża.
- Odwodnienie
Z uwagi na bardzo dobrą mrozoodporność, brak minerałów ilastych we frakcji drobniejszej niż 0,063 mm oraz dobre właściwości filtracyjne, nadają się do stosowania do warstwy filtracyjnej i odcinającej.
- Podbudowy
KTNPP dopuszcza mieszanki z kruszyw żużlowych do podbudowy stabilizowanej mechanicznie a także użycie kruszywa łamanego z żużli do produkcji betonu asfaltowego do podbudowy nawet dla kategorii ruchu KR6, o ile odpowiadają one odpowiedniej klasie i gatunkowi materiału.
- Warstwy wiążące
Podobnie jak w wypadku podbudowy z betonu asfaltowego.
- Warstwa ścieralna
KTNPP zezwala na stosowanie żużli do mieszanek mineralno-asfaltowych do tej warstwy.

10.1.3 Skład chemiczny

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

Przez duży wpływ składu chemicznego żużli na cechy produkowanych z nich kruszyw istotnym zagadnieniem staje się stałość proporcji składników. W tablicy 28 przedstawiono przykładowy skład żużla stalowniczego i jego zmienność oraz dla porównania skład bazaltu. Proporcje składników bazaltu i żużla różnią się między sobą. Wynikają z tego odmienne właściwości mimo pozornego, wizualnego podobieństwa obu kruszyw.

Tablica 28 Skład chemiczny żużla stalowniczego oraz bazaltu

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

10.1.4 Promieniotwórczość

Żużle stalownicze zawierają pewne ilości pierwiastków promieniotwórczych. Przepisy dopuszczające materiały budowlane do stosowania w budownictwie określają wartości dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych wydzielanych przez nie. Żużle spełniają te wymagania i mogą być stosowane nie tylko w budownictwie drogowym ale nawet w budownictwie mieszkaniowym, co pokazują wyniki badań w tablicy 29.

Tablica 29 Wyniki badań promieniotwórczości żużla stalowniczego

	Aktywność właściwa [Bq/kg]			f ₁	f ₂
	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	-	[Bq/kg]
Kruszywo z żużla stalowniczego	18 ± 10	17 ± 3	5 ± 3	0,07 ± 0,01	17 ± 3

Wymagania (wg Instrukcji ITB Nr 234/95 [39]):

$$f_{1\max} = f_1 + \Delta f_1 \leq 1$$

$$f_{2\max} = f_2 + \Delta f_2 \leq 185 \text{ Bq/kg}$$

gdzie Δ - dwa odchylenia standardowe.

Ponadto poziom promieniotwórczości naturalnej żużli jest niższy od promieniotwórczości naturalnych materiałów stosowanych w budownictwie. Pokazuje to tablica 30.

Tablica 30 Promieniotwórczość naturalna niektórych surowców budowlanych

Rodzaj surowca	Średnia wartość współczynników	
	f ₁	f ₂
Kreda	0,07	11
Gips	0,08	16
Piasek	0,11	16
Glina	0,47	46
Popiół lotny	0,87	122
Cement portlandzki	0,28	48
Żużel wielkopiecowy	0,44	106
Żużel stalowniczy	0,07	17

10.1.5 Właściwości fizyko-mechaniczne

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/cm³ (bazalt około 3,0 g/cm³, granit około 2,6-2,7 g/cm³). Mieszanki mineralno-asfaltowe (MMA) zawierające żużel konwertorowy są prze to cięższe. Zwiększony ciężar sprawia iż ta sama masa MMA z żużłami w stosunku do MMA z kruszywami pochodzenia naturalnego wystarczy na wykonanie mniejszej powierzchni (przy tej samej grubości) warstwy nawierzchni.

Żużel stalowniczy ze względu na większą porowatość charakteryzuje się też zwiększoną nasiąkliwością (żużel około 3 % w zależności od frakcji i wieku, 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 wad materiałowych. 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 przez nie określonych wymagań. Tablica 31 pokazuje wymagania normy PN-B-11115:1998 [5] oraz średnie parametry kruszywa żużlowego.

Tablica 31 Wymagania i właściwości fizyko-mechaniczne grysów z żużla stalowniczego

Właściwości	Wymagania dla klasy wg PN-B-11115:1998 [5]			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 do bitumów	dobra	dobra	-	bardzo dobra

Jak widać, kruszywo z przykładowego żużla stalowniczego spełnia wymagania normy w większości dla klasy A (oprócz nasiąkliwości). Charakteryzują się one niską ścieralnością. Spełniają one także wymagania co do mrozoodporności i to ze znacznym zapasem.

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 SiO₂, około 15,5 % (m/m), i wynikającego z tego zasadowego charakteru żużla. Żużel stalowniczy posiada odczyn 10,5 pH i pod względem kwasowości zbliżony jest do wapienia i dolomitu, a więc skał, do których stosowanie środka adhezyjnego nie jest konieczne. W przypadku, gdy mieszanka mineralna składa się z żużla i kruszywa bogatego w krzemionkę, stosowanie środka adhezyjnego może być konieczne. Należy to ustalić laboratoryjnie.

Jednocześnie należy sprawdzić, czy dobierany środek nie pogorszy przyczepności asfaltu do żuźla.

Wymagania dotyczące rozpadowości żuźla mają zapobiec występowaniu tego zjawiska w już wbudowanych partiach kruszywa. Aby procesy te zaszły jeszcze przed produkcją kruszywa wymagane jest jego sezonowanie. W praktyce wystarczający jest okres od 2 do 6 miesięcy.

Poza właściwościami normowymi bardzo przydatne przy ocenie przydatności kruszyw do np. MMA są cechy pozanormowe. Tablica 32 przedstawia niektóre z tych cech dla żuźli i dla bazaltu [40].

Tablica 32 Właściwości pozanormowe żuźla stalowniczego i bazaltu

Właściwości	Rodzaj kruszywa	
	Żużel stalowniczy	Bazalt
Wskaźnik rozkruszenia, % (m/m)		
Frakcja:		
16-31,5	19,2	14,5
8-16	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
Polerowalność PSV	74	47
Kąt zsypu dla frakcji 0,18-2, stopnie (procedura IBDiM)		
pochylenie bazowe 45°	34	39
pochylenie bazowe 90°	33	36

Na podstawie tablicy 32 widzimy, iż żużle stalownicze posiadają mniejszą od bazaltu, lecz nadal dużą, odporność na rozkruszenie. Charakteryzuje się również wysoką wytrzymałością na ściskanie. Wartość kąta zsypu naturalnego jest mniejsza dla żuźli stalowniczych. Świadczy to o mniejszym tarcu wewnętrznym między najgrubszymi ziarnami badanej frakcji.

Bardzo ważną i decydującą o niektórych zastosowaniach cechą żuźli stalowniczych jest wysoka szorstkość, znacznie wyższa od bazaltu. Także niska polerowalność PSV jest bardzo korzystną cechą. Wskaźnik PSV dla żuźla stalowniczych może wynosić 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 posiadają odmienne od kruszyw naturalnych właściwości termiczne. Według [41] przewodnictwo cieplne żuźla stalowniczego w porównaniu z żużlem wielkopieczowym i granitem kształtuje się jak w tablicy 33.

Tablica 33 Porównanie przewodnictwa cieplnego żużli i granitu (1 - próbka sezonowana 1 rok, 2 - próbka sezonowana 2 lata)

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
nasycony wodą, -10 °C	1,16	2,09	0,8-1,3	2,3

Jak widać, przewodnictwo cieplne żużla stalowniczego jest mniejsze od żużla wielkopiecowego i od granitu zarówno w stanie suchym w dodatniej temperaturze jak i nasyconego wodą w temperaturze ujemnej. Może to powodować odmienne właściwości termiczne mieszanek mineralno-asfaltowych, przy czym nie bez znaczenia jest większa pojemność cieplna żużla stalowniczego z uwagi na jego znaczny ciężar właściwy.

10.2 BAWMS16Z

10.2.1 Uziarnienie materiałów mineralnych

W tablicy 34 zestawiono uziarnienie poszczególnych frakcji kruszyw wchodzących w skład mieszanki mineralnej.

Tablica 34 Uziarnienie poszczególnych frakcji kruszyw

Rozmiar oczka sita #, mm	Mączka wapienna	0/4 Żużel	4/8 Żużel	8/12 Żużel	12/20 Żużel
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	39,5
12,8	0,0	0,0	0,0	0,8	46,4
9,5	0,0	0,0	0,0	59,7	13,1
8	0,0	0,0	2,4	26,7	0,1
6,3	0,0	0,1	36,4	10,8	0,0
4	0,0	6,6	59,3	0,6	0,0
2	0,0	24,1	0,4	0,0	0,0
0,85	0,0	27,4	0,0	0,0	0,1
0,42	0,0	15,6	0,1	0,1	0,0
0,3	0,1	5,3	0,0	0,1	0,0
0,18	1,2	7,3	0,1	0,2	0,1
0,15	0,9	0,9	0,0	0,1	0,0
0,075	12,5	5,7	0,2	0,3	0,1
< 0,075	85,5	7,0	1,1	0,6	0,5
Suma	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

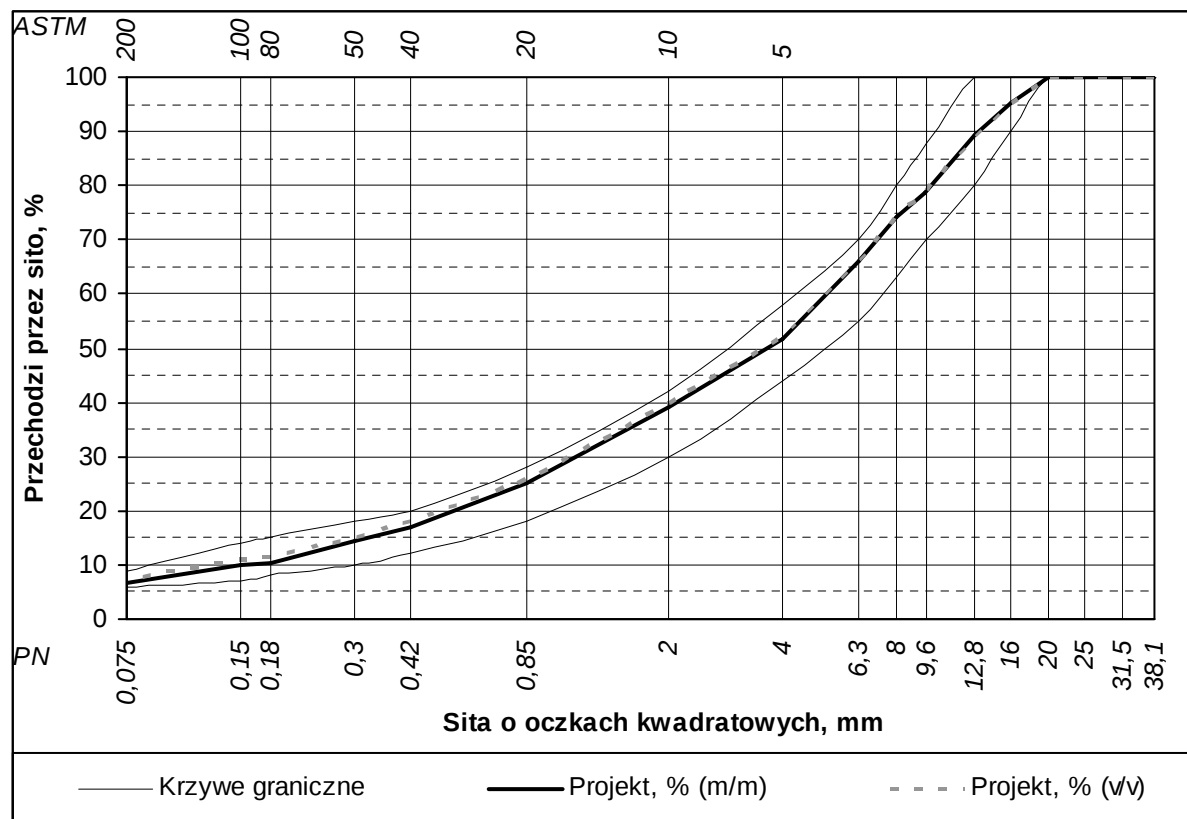
10.2.2 Skład BAWMS16Z

Tablica 35 Skład BAWMS16Z

Lp.	Składniki	Udział w MM, % (m/m)	Udział w MMA, % (m/m)
1	12/20 Żużel	12,5	11,8
2	8/12 Żużel	15,0	14,2
3	4/8 Żużel	18,0	17,1
4	0/4 Żużel	51,5	48,8
5	MW	3,0	2,8
6	Asfalt 20/30	-	5,3
	Razem	100,0	100,0

Tablica 36 Uziarnienie mieszanki mineralnej BAWMS16Z

Rozmiar oczka sita #, mm	Pozostaje na sicie, % (m/m)	Przechodzi przez sito, % (m/m)	Krzywe graniczne, % (m/m)	
			Dolna	Górna
20	0,0	100,0	100	100
16	4,9	95,1	90	100
12,8	5,9	89,1	80	100
9,6	10,6	78,5	70	88
8	4,5	74,1	63	80
6,3	8,2	65,9	55	70
4	14,2	51,7	44	58
2	12,5	39,2	30	42
0,85	14,1	25,1	18	28
0,42	8,1	17,0	12	20
0,30	2,7	14,3	10	18
0,18	3,9	10,4	8	15
0,15	0,5	9,9	7	14
0,075	3,4	6,5	6	9
< 0,075	6,5	-	-	-
Suma	100,0	-	-	-



Rysunek 5 Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej BAWMS16Z

10.2.3 Właściwości BAWMS16Z

Tablica 37 Właściwości BAWMS16Z o zawartości asfaltu $A_m = 5,3$ % (m/m)

Lp.	Właściwości	Wyniki	Wymagania
1	Gęstość mieszanki mineralnej, g/cm^3	3,645	-
2	Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm^3	3,212	-
3	Gęstość strukturalna mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm^3	3,115	-
4	Wolna przestrzeń w próbkach Marshalla, 2×75 uderzeń, % (v/v)	3,0	od 3,0 do 5,0
5	Moduł sztywności pełzania pod obciąż. statycznym, 40 °C, MPa	52,7	$\geq 22,0$
6	Koleinowanie w dużym aparacie, 60 °C, 30 000 cykli, %	2,3	≤ 5
7	Moduł sztywności rozciągania pośredniego, 10 °C, MPa	19 325	-
8	Zespolony moduł sztywności, belka 4-punktowo zginana, MPa	20 713	$\geq 14\ 000$
9	Szkoda zmęczeniowa D po 10^6 cykli, przy odkształceniu równym $130\ \mu\text{mm/mm}$, %	15,3	≤ 50
10	Wodoodporność, %	121,3	≥ 80

11 Analiza wyników badań

11.1 Właściwości fizyczne

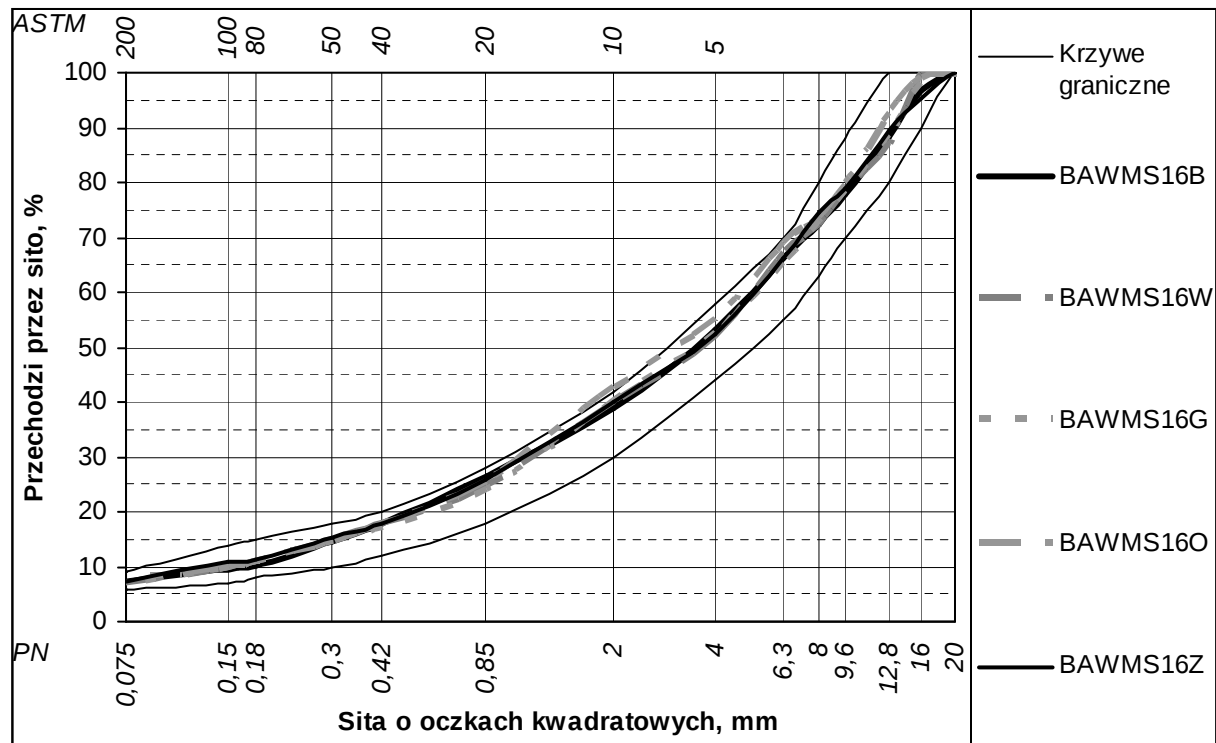
11.1.1 Uziarnienie

Zgodnie z założeniami pracy, zaprojektowano BAWMS16 o uziarnieniu jak do warstwy ścieralnej pod ruch ciężki wg PN-S-96025:2000. Pierwotnie zaprojektowano uziarnienie kruszywa bazaltowego (przewaga kruszyw bazaltowych), co stanowiło podstawę do opracowania uziarnień mieszanek mineralnych z innych kruszyw. Istotna była również zasada dopasowywania krzywych uziarnienia. Otóż łączono razem kruszywa o różnej gęstości, czyli kruszywa cięższego jest mniej objętościowo niż kruszywa lekkiego. To wpływa na rzeczywisty przebieg krzywej uziarnienia i należało ten efekt kontrolować. W punktach tej pracy dotyczących składu BAWMS16 na wykresach pokazywano dwie zaprojektowane krzywe: „Projekt % (m/m)” i „Projekt % (v/v)”. Druga krzywa, pokazująca proporcje objętościowe, była właściwą. Dopasowywanie krzywych uziarnienia poszczególnych BAWMS16 odbywało się więc zgodnie z proporcjami objętościowymi.

Jak widać na rysunku 6, na którym zamieszczono już tylko uziarnienie w proporcjach objętościowych, nie było kłopotów z uzyskaniem odpowiedniego przebiegu krzywej uziarnienia. Jedynie największe różnice wystąpiły w przypadku kruszywa łamanego z otoczków i nieznacznie wykroczone poza górną krzywą graniczną na sicie 2 mm.

Należy zaznaczyć, że część badanych kruszyw stanowiły dość szerokie frakcje i wydawało się pierwotnie, że będą kłopoty z dostosowaniem uziarnienia. Okazało się, że w przypadku badanych kruszyw nie stanowiło to utrudnień w projektowaniu przebiegu krzywej uziarnienia, natomiast na potrzeby laboratoryjne było konieczne rozsiewanie szerokich frakcji na drobniejsze (zminimalizowanie rozrzutu badań poprzez zmniejszenie odchyłń dozowania i rozsegregowania składników).

Wszystkie frakcje każdego rodzaju kruszywa nadają się do stosowania w mieszankach mineralno-asfaltowych pod kątem możliwości zaprojektowania odpowiedniej mieszanki mineralnej. Pozostaje jedynie kwestią, do uznania przez wytwórców mieszanek mineralno-asfaltowych, czy z uwagi na szerokie frakcje nie wpłynęłoby to zbyt negatywnie na jednorodność produkcji.

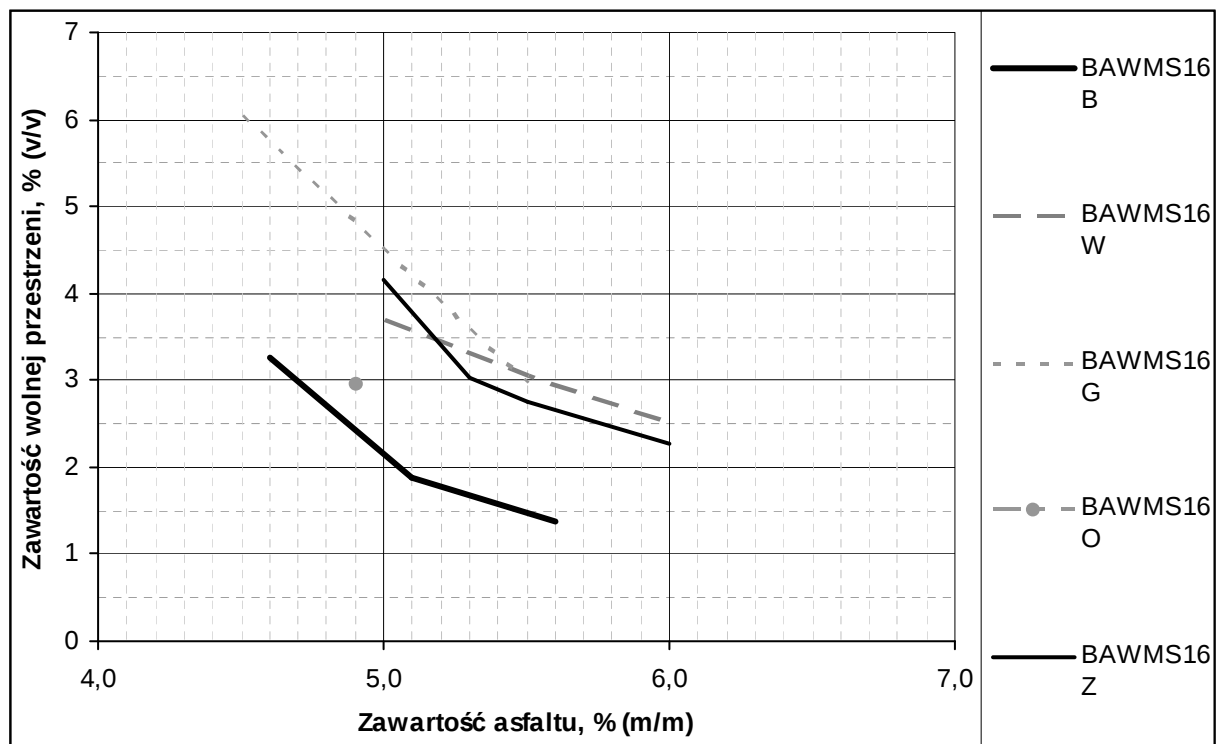


Rysunek 6 Zbiorcze zestawienie krzywych uziarnienia BAWMS16; udział procentowy objętościowy

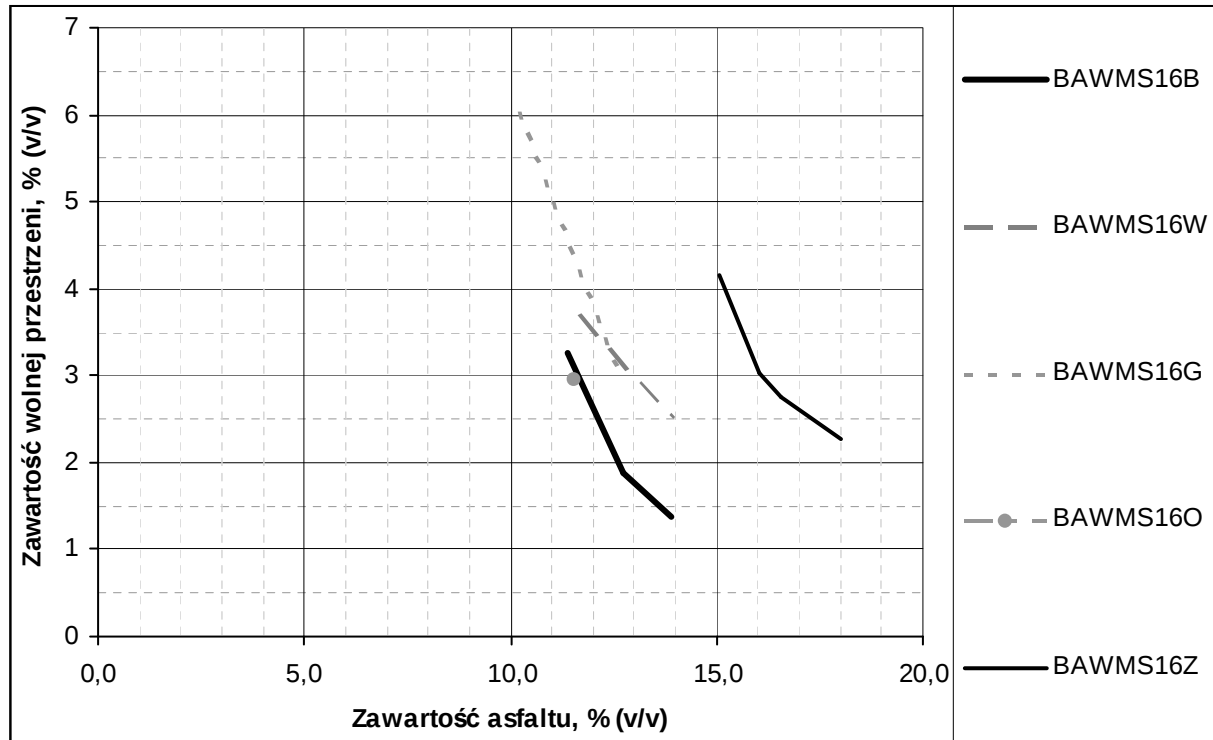
11.1.2 Zawartość asfaltu a zawartość wolnej przestrzeni

Podczas ustalania optymalnej zawartości asfaltu w BAWMS16 z różnymi kruszywami kierowano się ogólną zasadą, aby otrzymać we wszystkich mieszankach zbliżoną zawartość wolnej przestrzeni. Pierwotnie zaprojektowano BAWMS16B (bazalt) z zawartością asfaltu 4,6 % (m/m), uzyskując zawartość wolnej przestrzeni 3,3 % (v/v). Do tej wartości projektowano pozostałe rodzaje BAWMS16. Zależność zawartości wolnej przestrzeni od zawartości asfaltu przedstawiono zbiorczo na rysunkach 7 i 8. Charakterystyczne było, że przy założonej zawartości wolnej przestrzeni około 3,0 % (v/v) BAWMS16 z bazaltem miała najniższą zawartość asfaltu. Nieco więcej asfaltu należało użyć w przypadku kruszyw łamanych z otoczków. Wyraźnie najwięcej asfaltu wymagały mieszanki z kruszywami chłonnymi, tj. wapienne i żuźlowe oraz średnio chłonne granitowe. Największa ilość asfaltu była w mieszankach z kruszywami najłżejszymi, czyli wapiennym i granitowym. Celowo sklasyfikowano zależność ilości asfaltu od rodzaju kruszywa, gdyż na tą zależność wpływają dwie główne właściwości kruszywa: powierzchnia właściwa oraz gęstość. Kruszywo o rozwiniętej teksturze ziarna, wynikające głównie z rodzaju skały (kryształy o charakterze blaszkowym, gąbczastym itp.), wchłaniają pewną ilość asfaltu. 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 trwałościowe mieszanki mineralno-asfaltowej. Gęstość kruszywa wpływa na proporcje objętościowe składników, o czym była mowa przy omawianiu dopasowania krzywych uziarnienia mieszanki mineralno-asfaltowej. To samo dotyczy zależności kruszywo-asfalt. Im cięższe kruszywo, tym jego objętość jest mniejsza, czyli potrzeba objętościowo, a więc i wagowo, mniej asfaltu. Zostało to uwzględnione m.in. w projekcie „Zaleceń...”. Wypadkowa chłonności kruszyw i ich gęstości stanowi o zawartości asfaltu, dlatego w każdym rodzaju BAWMS16 jest inna zawartość asfaltu.

Niepokojąco okazało się, że BAWMS16B, z kruszywem bazaltowym i asfaltem w ilości 4,6 % (m/m), mimo odpowiedniej zawartości wolnej przestrzeni ok. 3,0 % (v/v) miał za małą trwałość zmęczeniową. Aby zwiększyć tą trwałość zwiększono zawartość asfaltu do 5,1 % (m/m), co z kolei wpłynęło na obniżenie zawartości wolnej przestrzeni do ok. 2,0 % (v/v). Również niezrozumiałe wyniki uzyskano w przypadku BAWMS16G, w którym było 5,5 % (m/m) asfaltu, i mimo tak dużej zawartości nie zapewniło to odpowiedniej trwałości na zmęczenie.



Rysunek 7 Zbiorcze zestawienie zależności zawartości wolnej przestrzeni od zawartości asfaltu w BAWMS16; zawartość asfaltu wyrażona w procentach masy



Rysunek 8 Zbiorcze zestawienie zależności zawartości wolnej przestrzeni od zawartości asfaltu w BAWMS16; zawartość asfaltu wyrażona w procentach objętości

11.2 Odporność na deformacje trwałe

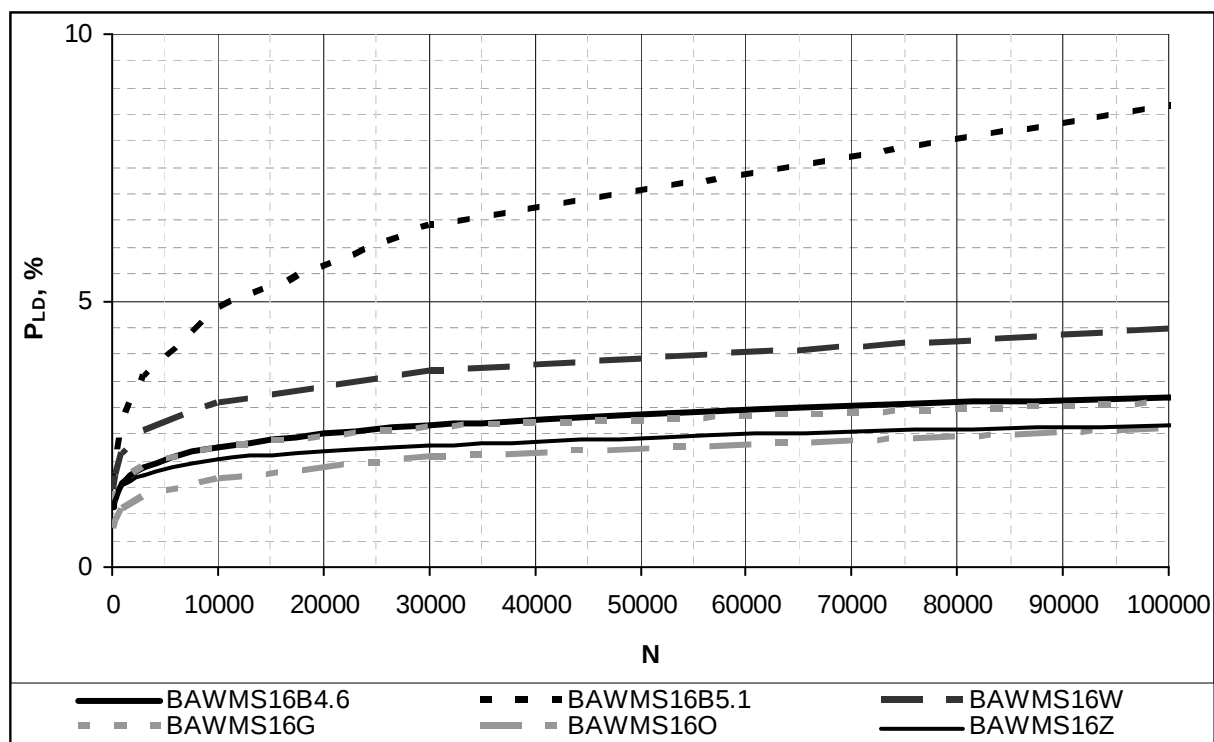
Odporność BAWMS16 na deformacje trwałe oceniono na podstawie badań w wysokiej temperaturze: pełzania pod obciążeniem statycznym i koleinowania aparatem dużym. Obie metody mają zupełnie inny sposób obciążenia próbki, więc wyniki z tych metod mogą nie być porównywalne. Uważa się, że badanie koleinowania zawierające obciążenie powtarzalne, lepiej oddaje charakter „pracy” mieszanki mineralno-asfaltowej. Głównie to badanie powinno stanowić podstawę do porównywania różnych rodzajów BAWMS16.

Na rysunku 9 zestawiono zbiorczo wyniki badań przebiegu koleinowania wszystkich rodzajów BAWMS16, wraz z przewidywaniem dalszej deformacji trwałej (przy założeniu braku wystąpienia zniszczenia materiału, czyli deformacji plastycznej). Na rysunku 10 porównano natomiast wynik koleinowania po 30 000 cykli każdej z mieszanek BAWMS16.

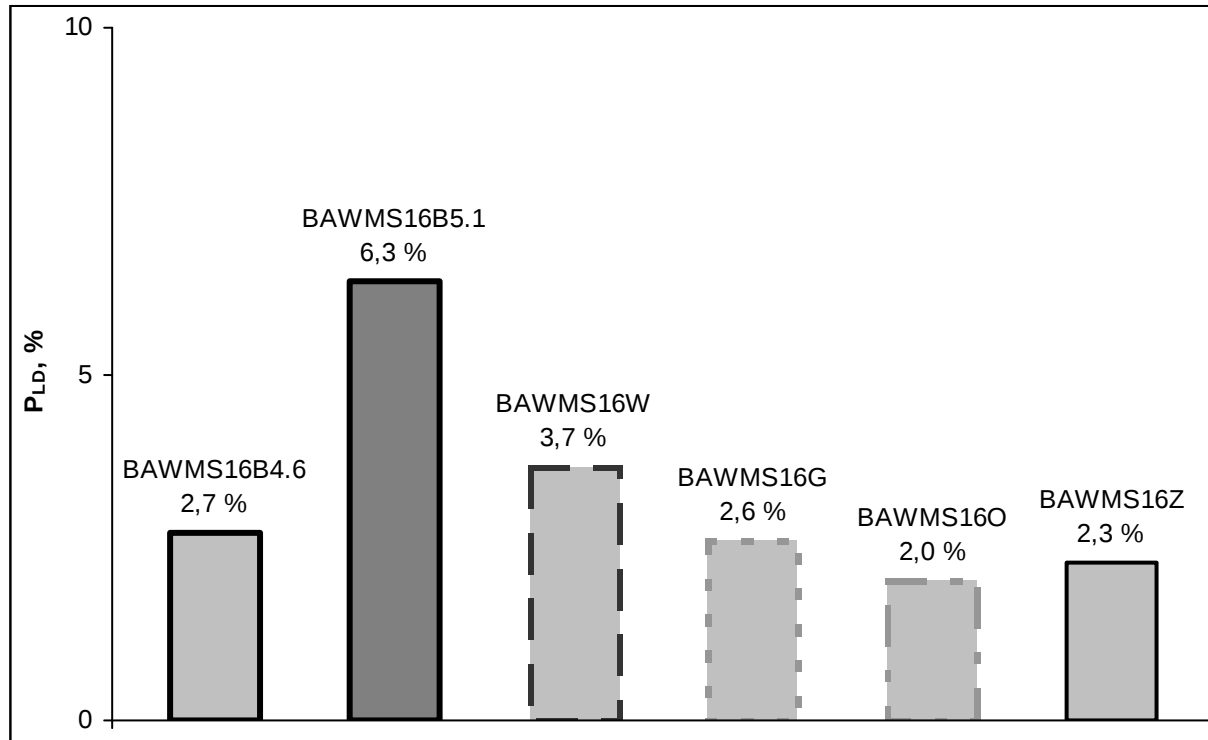
Każda ze zbadanych BAWMS16 skoleinowała się w niewielkim stopniu. Wyróżnia się jednak BAWMS16B5.1 (czyli z kruszywem bazaltowym o podwyższonej zawartości asfaltu i obniżonej zawartości wolnej przestrzeni), która najbardziej się zdeformowała, nawet trzykrotnie więcej niż najbardziej odporna BAWMS16O, z kruszywem łamanym z otoczków o najmniejszej zawartości asfaltu. Mieszanka BAWMS16B4.6, z kruszywem bazaltowym o zawartości asfaltu ustalonej do poziomu ok. 3,0 % (v/v) wolnej przestrzeni, wykazała się odpornością na deformacje trwałe zbliżoną do pozostałych BAWMS16 z innymi kruszywami. Biorąc pod uwagę mieszanki o zbliżonej zawartości wolnej przestrzeni, najbardziej z nich była podatna mieszanka z wapniem. Miała ona dużą zawartość asfaltu, choć tyle samo co mieszanka z granitem, która mniej się skoleinowała. Nie wiadomo z jakich przyczyn wystąpiła różnica między tymi rodzajami BAWMS16. Możliwe jest, że poza wpływem zawartości asfaltu może również odgrywać znaczenie rodzaj skały.

Uwzględniając porównywalną, ze względu na zawartość wolnej przestrzeni, zawartość asfaltu wszystkie mieszanki BAWMS16 wykazały dobrą odporność na deformacje trwałe i mogą być stosowane we wszystkich warstwach. Uwzględniając jednak konieczność zwiększenia

zawartości asfaltu, ze względu na trwałość zmęczeniową, w mieszance BAWMS16B okazało się, że może być ona stosowana tylko do najniższych warstw konstrukcyjnych, gdzie generowane są mniejsze naprężenia ścinające.



Rysunek 9 Zbiorcze zestawienie przebiegu koleinowania mieszanek BAWMS16 wraz z przewidywaniem dalszej deformacji trwałej

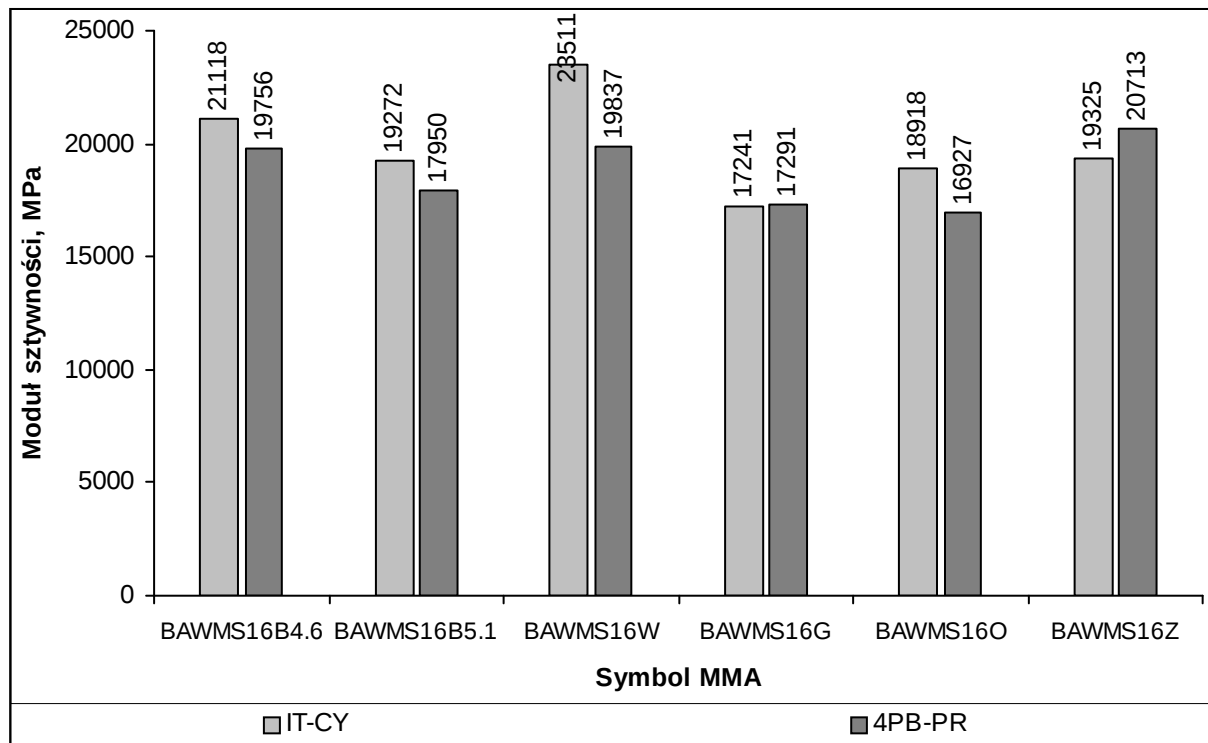


Rysunek 10 Zbiorcze zestawienie koleinowania po 30 000 cykli mieszanek BAWMS16

11.3 Sztywność

Sztywność mieszanki mineralno-asfaltowej wyrażona tzw. modulem sztywności sprężystej jest właściwością najczęściej wykorzystywaną w projektowaniu nośności konstrukcji. Wykonano dwa rodzaje badań: rozciągania pośredniego na próbkach cylindrycznych (IT-CY) oraz zginania 4-punktowo podpartego na próbkach prostokątnych (4PB-PR). Na rysunku 11 zebrano wartość modułu IT-CY i 4PB-PR mieszanek BAWMS16. Wartość modułu zależy od metody badania różni się. Nie są to różnice skrajnie duże. Generalnie, jak pokazały ostatnie badania porównawcze, wyniki badania IT-CY w IBDiM były wyższe niż w innych laboratoriach, dlatego należy brać pod uwagę głównie moduł 4PB-PR. Wystąpiło pewne zróżnicowanie BAWMS16 ze względu na rodzaj kruszywa, a w przypadku bazaltu również ze względu na zawartość asfaltu. W mieszance tej większa ilość asfaltu spowodowała obniżenie modułu sztywności. Porównując rodzaje BAWMS16 o zbliżonej zawartości wolnej przestrzeni widać, że najwyższe wartości modułu, i zbliżone do siebie, były w przypadku kruszyw bazaltowych, wapiennych i żużlowych. Niższe wartości modułu wykazały mieszanki z kruszywem łamanym z otoczków i granitowym. Na podstawie tych badań nie można wyróżnić wpływu np. zawartości asfaltu na wartość modułu sztywności.

Wyniki wskazały, że ze względu na sztywność wszystkie rodzaje BAWMS16 można stosować do każdej warstwy konstrukcyjnej.

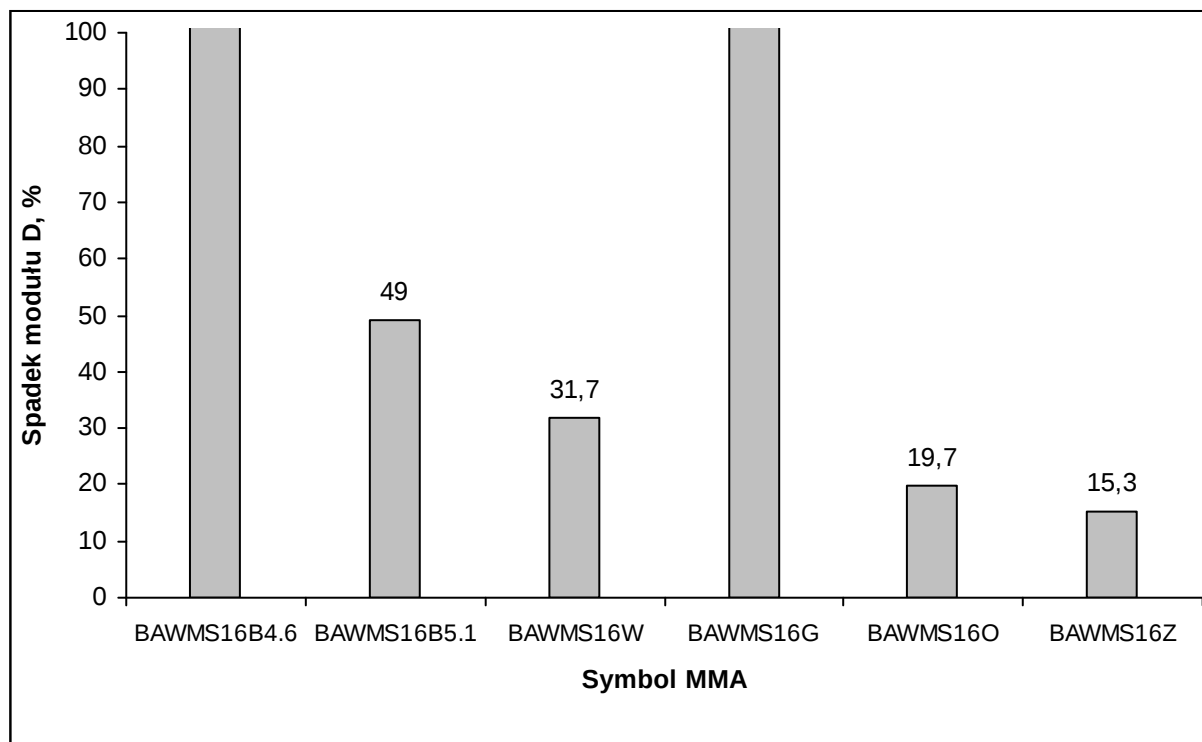


Rysunek 11 Zbiorcze zestawienie modułu sztywności mieszanek BAWMS16

11.4 Trwałość zmęczeniowa

Ważnym kryterium oceny warstw asfaltowych jest ich trwałość zmęczeniowa, zwłaszcza gdy konstrukcja nie może być zbyt gruba (np. warunki miejskie) i mogą występować jej duże ugięcia. Najistotniejsze jest to w przypadku najniższych warstw, gdzie z reguły generowane są największe odkształcenia, choć problem dotyczy również wierzchnich warstw asfaltowych lub w przypadku słabego połączenia warstw. Na rysunku 12 przedstawiono wartość liczbową D, jako proporcjonalny spadek modułu sztywności wraz z liczbą powtórzeń odkształceń próbki badawczej (4PB-PR), opisującą trwałość zmęczeniową badanych rodzajów BAWMS16. BAWMS16B4.6 oraz BAWMS16G nie spełniły wymagania trwałościowego $D < 50\%$ i miały spadek ponad 50 % po milionie cykli. W przypadku BAWMS16B5.1, ze zwiększoną zawartością asfaltu, miał poprawioną trwałość na zmęczenie. W przypadku BAWMS16G nie sprawdzono trwałości zmęczeniowej przy większej zawartości asfaltu. Można się spodziewać, że podobna byłaby zależność, jak w przypadku kruszywa bazaltowego: zwiększenie zawartości asfaltu polepszy trwałość oraz wpłynie na zmniejszenie zawartości wolnej przestrzeni i obniży odporność na koleinowanie. Pozostałe BAWMS16 miały stosunkowo mały parametr D świadczący o ich dobrej odporności na zmęczenie. Nie wyróżnia się tu, podobnie jak w przypadku modułu sztywności, bezpośrednia zależność trwałości od zawartości asfaltu w mieszankach z różnym kruszywem.

Ze względu na odporność na zmęczenie nie zawsze można uzyskać zadowalające właściwości projektowanych BAWMS. można stosować do każdej warstwy konstrukcyjnej, przy czym w przypadku stosowania kruszywa bazaltowego wymaga to stosowania zwiększonej ilości asfaltu.



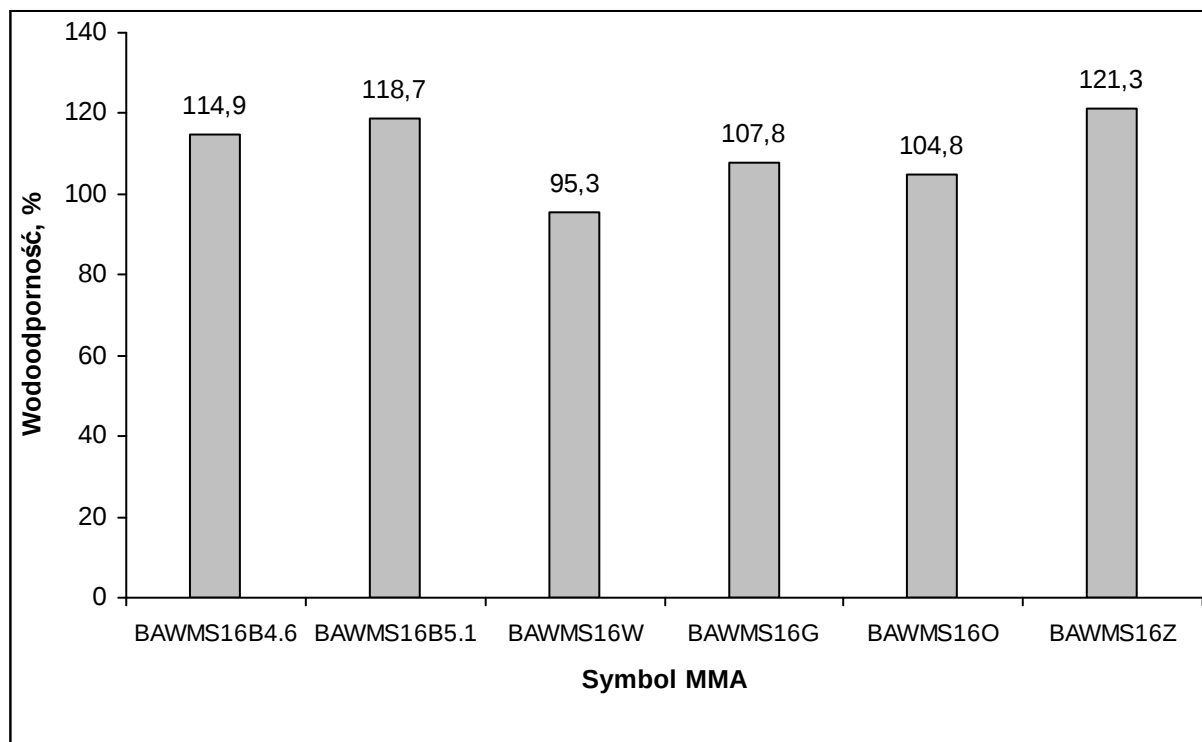
Rysunek 12 Zbiorcze zestawienie trwałości zmęczeniowej mieszanek BAWMS16

11.5 Odporność na działanie wody

Od dawna w polskich przepisach brakowało kryterium oceny odporności mieszanki mineralnej na działanie wody i mrozu. Kiedyś istniało dość pośrednie badanie wskazujące nasiąkliwość próbek MMA. Zrezygnowano również z tego, gdyż z reguły był on spełniony. Wyjątkowo przywracano takie kryterium np. w aprobatkach technicznych (AT) dla mniej „typowych” materiałów (np. w AT dotyczącej kruszyw z żużla stalowniczego do mieszanek mineralno-asfaltowych). Brak oceny trwałości na czynniki atmosferyczne spowodowało tendencję do zubożenia MMA w asfalt tak znacznego, że często w bardzo krótkim czasie warstwy asfaltowe zużywały się również od czynników pogodowych. Obecnie wprowadzono do projektowanych wymagań kryterium oceny wodoodporności MMA, a określanej zgodnie z normą europejską PN-EN 12697-12:2004. W przypadku BAWMS wodoodporność powinna wynosić co najmniej 80 %.

W ramach pracy wykonano badania wodoodporności BAWMS16 z różnymi kruszywami, a wyniki zbiorczo przedstawiono na rysunku 13. Wszystkie BAWMS16 wykazały bardzo dobrą odporność na działanie wody, przy czym większość mieszanek wykazała usztywnienie w normowych warunkach badania bez cykli zamrażania. Tłumaczy się to faktem, że w przypadku braku istotnej podatności na działanie wody o podwyższonej temperaturze, próbki pielęgnowane, czyli nasączone wodą, wykazują większą sztywność (pojawia się np. ciśnienie porowe w próbkach) niż próbki nienasączone. Mieszanka BAWMS16W, z kruszywem wapiennym, uległa osłabieniu od działania wody. Należy pamiętać, że do każdego rodzaju BAWMS16 stosowano środek adhezyjny, którego wpływu wstępnie nie oceniono. Możliwe, że był on zbędny w przypadku kruszywa wapiennego i żuźlowego.

Ze względu na odporność na działanie wody wszystkie rodzaje BAWMS16 można stosować do każdej warstwy konstrukcyjnej.



Rysunek 13 Zbiorne zestawienie odporności na działanie wody mieszank BAWMS16

12 Wnioski

Oceniono możliwość stosowania kruszyw lokalnych i/lub o gorszych parametrach, do produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej o wysokich parametrach, takich jak beton asfaltowy o wysokim module sztywności (BAWMS). W ramach pracy zaprojektowano i zbadano BAWMS o uziarnieniu do 16 mm w różnych wariantach ze względu na zastosowany w nich rodzaj kruszywa. Okazało się również konieczne wykonanie wariantu ze zwiększoną ilością asfaltu w jednym z rodzajów BAWMS z powodu niespełnienia kryterium zmęczenia.

Ocenie poddano wpływ stosowania kruszyw:

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

natomiast kruszywo bazaltowe stanowiło pierwowzór w projektowaniu różnych rodzajów BAWMS.

Po analizie wyników badań stwierdzono, że niektóre rodzaje kruszyw wymagają stosowania zwiększonej ilości asfaltu z uwagi na ich chłonność. To z kolei znacznie poprawia trwałość zmęczeniową bez istotnego wpływu na pozostałe właściwości fizyczno-mechaniczne. Do takich kruszyw należy oceniony wapień i żużel stalowniczy. Okazało się również, że dobre właściwości ma BAWMS z kruszywa łamanego z otoczków. Mieszanki BAWMS z tymi kruszywami miały dobrą odporność na koleinowanie, wysoki moduł sztywności, dobrą trwałość zmęczeniową i odporność na działanie wody. Klasyfikowały się one do stosowania w każdej warstwie: podbudowie o podwyższonym wymaganiu dotyczącym sztywności i trwałości zmęczeniowej, oraz wiążącej o podwyższonej odporności na deformacje trwałe.

Zastanawiające jest natomiast, że stosowanie kruszywa bazaltowego i granitowego zakończyło się w pewnym stopniu niepowodzeniem, gdyż należało w tym wypadku zwiększyć zawartość asfaltu w BAWMS. Mieszanki z kruszywem bazaltowym oraz dodatkowo granitowym o

zawartości asfaltu dającej zawartość wolnej przestrzeni na poziomie jak w pozostałych mieszankach BAWMS, miały niewystarczającą trwałość zmęczeniową. Tylko zwiększenie ilości asfaltu, czyli zmianę właściwości fizycznych w porównaniu z pozostałymi mieszankami, powodowała polepszenie trwałości. Oznacza to, że stosowanie kruszyw o większej chłonności wymusza konieczność stosowania większej ilości asfaltu, a to polepsza jakość betonu asfaltowego. Nie zauważono istotnego wpływu jakości kruszyw (gatunek, klasa) na jakość betonu asfaltowego o wysokim module sztywności. Istotniejszy od jakości zastosowanych w BAWMS ziarn może być przebieg uziarnienia mieszanki mineralnej.

Należy skorygować opracowywane wymagania i dopuścić w sposób jawny stosowanie kruszyw lokalnych i/lub o gorszych parametrach.

13 Bibliografia

- 1 PN-S-96025:2000 „Drogi samochodowe i lotniskowe – Nawierzchnie asfaltowe – Wymagania”
- 2 PN-B-11112:1996 „Kruszywa mineralne – Kruszywa łamane do nawierzchni drogowych”
- 3 PN-B-11113:1996 „Kruszywa mineralne – Kruszywa naturalne do nawierzchni drogowych; piasek”
- 4 PN-S-96504:1961 „Drogi samochodowe – Wypełniacz kamienny do mas bitumicznych”
- 5 PN-B-11115:1998 „Kruszywa mineralne – Kruszywa sztuczne z żużla stalowniczego do nawierzchni drogowych”
- 6 Sybilski D., Pałys M., Mularzuk R., Bańkowski W.: “Zasady wykonywania nawierzchni asfaltowej o zwiększonej odporności na koleinowanie I zmęczenie (ZW-WMS 2002)”. Informacje, Instrukcje – Zeszyt 63, IBDiM 2002
- 7 PN-EN 13043:2004 “kruszywa do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utrwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu”
- 8 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
- 9 PN-B-06714-42:1979 “Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczanie ścieralności w bębnie Los Angeles”
- 10 PN-B-06714-18:1977 “Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczanie nasiąkliwości”
- 11 PN-B-06714-19:1977 “Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczanie mrozoodporności metodą bezpośrednią”
- 12 PN-B-06714-20:1977 “Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczanie mrozoodporności metodą krystalizacji”
- 13 PN-EN 933-1:2000 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Oznaczanie składu ziarnowego – Metoda przesiewania”
- 14 PN-B-06714-12:1977 “Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczanie zawartości zanieczyszczeń obcych”
- 15 PN-B-06714-16:1977 “Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczanie zawartości ziaren nieforemnych”
- 16 PN-B-06714-26:1977 “Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczanie zanieczyszczeń organicznych”
- 17 PN-EN 1744-1:2000 „Badania chemicznych właściwości kruszyw. Analiza chemiczna”
- 18 PN-EN 12697-11:2000 (U) „Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco. Część 11: Określanie powiązania pomiędzy kruszywem i asfaltem”
- 19 Zawadzki J., Chałackiewicz E., Pałys M., Skierczyński P.: “Procedury badań do projektowania składu i kontroli mieszanek mineralno-asfaltowych”. Informacje, Instrukcje – Zeszyt 64, IBDiM 2002
- 20 EN 12697-5:2002 “Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 5: Determination of the maximum density”
- 21 PN-EN 933-3:1999 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie kształtu ziarn za pomocą wskaźnika płaskości”
- 22 PN-EN 933-4:2001 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Część 4: Oznaczanie kształtu ziarn. Wskaźnik kształtu”

- 23 PN-EN 933-5:2000 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie procentowej zawartości ziarn o powierzchniach powstałych w wyniku przekruszenia lub łamania kruszyw grubych”
- 24 PN-EN 933-6:2002 „Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Część 6: Ocena właściwości powierzchni. Wskaźnik przepływu kruszyw”
- 25 PN-EN 1097-2:2000 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Metody oznaczania odporności na rozdrabianie”
- 26 PN-EN 1097-8:2002 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Część 8: Oznaczanie polerowalności kamienia”
- 27 PN-EN 1097-1:2000 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie odporności na ścieranie (mikro-Deval)”
- 28 PN-EN 1097-6:2002 „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Część 6: Oznaczanie gęstości ziarn i nasiąkliwości”
- 29 PN-EN 1367-1:2001 „Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych. Część 1: Oznaczanie mrozoodporności”
- 30 PN-EN 1367-2:2000 „Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych. Badanie w siarczanie magnezu”
- 31 PN-EN 1367-5:2004 „Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych. Część 5: Oznaczanie odporności na szok termiczny”
- 32 PN-EN 12697-22:2004 (U) “Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco. Część 22: Trasowanie kołem”
- 33 AASHTO TP8-94 "Standard test method for determining the fatigue life of compacted hot mix asphalt (HMA) subjected to repeated flexural bending"
- 34 Sybilski D., Bańkowski W.: „Nowe stanowisko badania mieszanek mineralno-asfaltowych w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów”. Drogownictwo 10/1999
- 35 PN-EN 12697-12:2004(U) – Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 12: Określanie wrażliwości próbek asfaltowych na wodę
- 36 PN-EN 12697-12:2004(U) – Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 26: Sztywność
- 37 Informator techniczny Slag Recycling 2000 r.
- 38 “Katalog Typowych Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych”. IBDiM – GDDP, Warszawa 1997
- 39 Instrukcja ITB Nr 234/95 "Wytyczne badania promieniotwórczości naturalnej surowców i materiałów budowlanych". Warszawa 1995
- 40 Sybilski D., Pałys M., Mularzuk. R.: „Zastosowanie gryków z żużli stalowniczych w celu poprawy szorstkości nawierzchni drogowej”. VIII Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe”, Kielce 2002
- 41 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