Instytut Badawczy Dróg i Mostów
Zakład Technologii Nawierzchni
Pracownia Technologii Nawierzchni

Sprawozdanie końcowe

z pracy:

Ocena przydatności kruszyw wypełniających pochodzenia niewapiennego do mieszanek mineralno-asfaltowych

Temat TN-240

Opracowali:

Zespół Zakładu Technologii Nawierzchni
mgr inż. Robert Mularzuk
mgr inż. Dominika Maliszewska
mgr inż. Maciej Maliszewski

Ośrodek Badań Mostów, Betonów i Kruszyw
dr inż. Andrzej Duszyński
mgr inż. Aneta Pryga-Szulc

Zatwierdził:

Kierownik Zakładu Technologii Nawierzchni

prof. dr hab. inż. Dariusz Sybilski

Warszawa, listopad 2007

SPIS TREŚCI

1) Podstawa pracy ... 3
2) Cel pracy ... 3
3) Program pracy ... 3
3.1) Wybór i badania wypełniaczy niewapiennych ... 3
3.2) Zaprojektowanie składów mieszanek mineralno-asfaltowych ... 4
3.3) Badania mieszanek mineralno-asfaltowych ... 4
4) Podstawy teoretyczne ... 8
4.1) Podstawowe definicje ... 8
4.2) Dokumenty odniesienia ... 8
4.3) Cel stosowania wypełniacza ... 9
4.4) Stosowanie wypełniaczy niewapiennych ... 9
4.5) Podstawowe materiały ... 10
5) Badania laboratoryjne wypełniaczy ... 11
5.1) Próbki do badań ... 11
5.2) Wyniki badań laboratoryjnych wypełniaczy ... 12
5.3) Analiza wyników badań wypełniaczy ... 16
6) Badania mieszanek mineralno-asfaltowych ... 19
6.1) Zakres badań mieszanek mineralno-asfaltowych ... 19
6.2) Projektowanie mieszanek mineralno-asfaltowych ... 28
6.3) Wyniki badań mieszanek mineralno-asfaltowych i ich analiza ... 32
6.3.1) Ogólne ... 32
6.3.2) Wodoodporność ... 33
6.3.3) Odporność na koleinowanie ... 36
6.3.4) Zmęczenie i zespolony moduł sztywności ... 42
6.3.5) Spękania niskotemperaturowe ... 44
7) Podsumowanie ... 48
8) Wnioski ... 50
9) Bibliografia ... 52
ZAŁĄCZNIK 1 ... 53
ZAŁĄCZNIK 2 ... 66
ZAŁĄCZNIK 3 ... 112
ZAŁĄCZNIK 4 ... 122

1) Podstawa pracy

Niniejsze sprawozdanie jest podsumowaniem prac przeprowadzonych w okresie od stycznia do listopada 2007 roku w ramach tematu „Ocena przydatności kruszyw wypełniających pochodzenia niewapiennego do mieszanek mineralno-asfaltowych". Praca została wykonana na podstawie umowy nr 1657/2007 z dnia 23.01.2007 r. zawartej pomiędzy Generalną Dyrekcją Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA) a Instytutem Badawczym Dróg i Mostów (IBDiM). Pracy badawczej nadano symbol tematu TN-240.

Temat TN-240 był prowadzony przez IBDiM, Zakład Technologii Nawierzchni, w kooperacji z Ośrodkiem Badań Mostów, Betonów i Kruszyw, Pracownia Kruszyw.

2) Cel pracy

W Polsce, przy produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych, jako wypełniacz stosuje się przede wszystkim mączkę mineralną pochodzenia wapiennego. Inne materiały wypełniające są bardzo rzadko stosowane. Celem pracy było sprawdzenie możliwości zastosowania innych rodzajów wypełniaczy. W niniejszej pracy analizowano, czy dobrym materiałem wypełniającym w mieszankach mineralno-asfaltowych może być pył będący odpadem przy produkcji lub odpylaniu kruszyw. W trakcie takich procesów przetwarzania kruszywa powstają bardzo duże ilości niewykorzystanego materiału. Sprawdzano więc możliwość zastosowania takiego materiału w mieszankach mineralno-asfaltowych. W niniejszej pracy analizowano również wpływ zastosowania wypełniaczy pochodzenia niewapiennego na jakość, trwałość oraz właściwości fizyczne i funkcjonalne mieszanki mineralno-asfaltowej.

3) Program pracy

Zgodnie z umową nr 1657/2007 z dnia 23.01.2007 r. ustalony został następujący program pracy:

3.1) Wybór i badania wypełniaczy niewapiennych

Do badań zostały wybrane wypełniacze niewapienne oraz wypełniacz wapienny. Badaniom poddane zostały wypełniacze niewapienne, wypełniacz wapienny oraz ich mieszanki. Wybrany wypełniacz wapienny, wypełniacze niewapienne i ich mieszanki były badane laboratoryjnie w celu określenia następujących właściwości:

- Uziarnienie wg PN-EN 933-10,
- Jakość pyłów wg PN-EN 933-9,

- Zawartość wody wg PN-EN 1097-5,
- Gęstość ziaren wg PN-EN 1097-7,
- Zawartość wolnych przestrzeni w suchym zagęszczonym wypełniaczu wg PN-EN 1097-4,
- Przyrost temperatury mięknienia mieszanki wypełniacz – asfalt, oznaczony metodą pierścienia i kuli wg PN-EN 13179-1,
- Rozpuszczalność w wodzie wg PN-EN 1744-1,
- Zawartość węglanu wapnia wg PN-EN 196-21 (dla wapiennych),
- „Liczba asfaltowa" wypełniacza dodanego wg PN-EN 13179-2,
- Gęstość ziaren wypełniacza dodanego wg PN-EN 1097-7,
- Gęstość nasypowa w stanie luźnym oznaczana w nafcie wg PN-EN 1097-3,
- Badanie Blaine'a wg PN-EN 196-6.

3.2) Zaprojektowanie składów mieszanek mineralno-asfaltowych

Do badań właściwości fizycznych i mechanicznych zostaną wytypowane mieszanki mineralno-asfaltowe zawierające wypełniacz wapienny lub mieszanki wypełniacza wapiennego i niewapiennego.

Badaniom będą poddane mieszanki mineralno-asfaltowe:

- beton asfaltowy BA przeznaczony do warstwy wiążącej,
- mieszanka SMA przeznaczona do warstwy ścieralnej.

Zadanie będzie obejmowało zaprojektowanie składów mieszanek i wykonanie badań laboratoryjnych następujących cech objętościowych mieszanek:

- gęstość (wg PN-EN 12697-5:2005 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 5: Oznaczanie gęstości),
- gęstość objętościowa (wg PN-EN 12697-6:2005 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 6: Oznaczanie gęstości objętościowej),
- zawartość wolnych przestrzeni (wg PN-EN 12697-8:2005 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 8: Oznaczanie zawartości wolnej przestrzeni).

3.3) Badania mieszanek mineralno-asfaltowych

W ramach punktu 3.3 zostaną wykonane badania mieszanek mineralno-asfaltowych, a następnie przeprowadzona zostanie analiza wyników badań. Na tej podstawie ustalona zostanie przydatność i wpływ wypełniaczy niewapiennych na jakość i właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych.

Badania laboratoryjne będą obejmowały ocenę betonów asfaltowych przeznaczonych do warstwy wiążącej i mieszanek SMA do warstwy ścieralnej.

Na mieszankach BA zostaną przeprowadzone badania odporności na koleinowanie, badania trwałości zmęczeniowej i wodoodporności. Na mieszankach SMA zostaną oznaczone odporności na koleinowanie, wodoodporności oraz spękania niskotemperaturowe. Badania odporności na koleinowanie zostaną wykonane zgodnie z normą PN-EN 12697-22:2004 (U) „Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco. Część 22: Trasowanie kołem". Badania trwałości zmęczeniowej zostaną wykonane zgodnie z normą PN-EN 12697-24:2005 (U) „Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 24: Odporność na zmęczenie", natomiast badania wodoodporności zostaną przeprowadzone według procedur normy PN-EN 12697-12:2004 (U) „Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 12: Określanie wrażliwości próbek asfaltowych na wodę".

W ramach tematu TN-240, do czerwca 2007 r. wykonano w całości prace objęte punktem 1 „Programu prac" będącym załącznikiem do umowy nr 1657/2007 z dnia 23.01.2007 r. Program prac obejmował badania przedstawione w niniejszym sprawozdaniu w tablicy 1. Prace zostały wykonane zgodnie z umową i odebrane przez Przedstawicieli Zleceniodawcy w lipcu 2007 r.

W okresie od czerwca do listopada 2007 r. zrealizowano prace zawarte w „Programie prac" w punktach 2 i 3. Zakres prac obejmował badania przedstawione w tablicy 2 i 3. Praca została zakończona i przekazana do GDDKiA w listopadzie 2007 r.

Tablica 1. Zakres badań laboratoryjnych mieszanek wypełniacza

Lp.	Właściwość	Norma badawcza
1	**Uziarnienie**	PN-EN 933-10 Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Część 10: Ocena zawartości drobnych cząstek. Uziarnienie wypełniaczy (przesiewanie w strumieniu powietrza)
2	**Jakość pyłów**	PN-EN 933-9 Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Ocena zawartości drobnych cząstek. Badanie błękitem metylenowym
3	**Zawartość wody**	PN-EN 1097-5 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Część 5: Oznaczanie zawartości wody przez suszenie w suszarce z wentylacją
4	**Gęstość ziaren**	PN-EN 1097-7 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Część 7: Oznaczanie gęstości wypełniacza. Metoda piknometryczna (woda destylowana)
5	**Gęstość nasypowa w stanie luźnym oznaczana w nafcie**	PN-EN 1097-3, załącznik B Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie gęstości nasypowej i jamistości, załącznik B
6	**Zawartość węglanu wapnia**	PN-EN 196-21:1997 Metoda badania cementu. Oznaczanie zawartości chlorków, dwutlenku węgla i alkaliów w cemencie p. 5 Oznaczanie zawartości dwutlenku węgla (metoda wzorcowa)
7	**Przyrost temperatury mięknienia**	PN-EN 13179-1 Badanie kruszyw wypełniających stosowanych do mieszanek bitumicznych. Część 1: Badanie metodą „pierścienia i kuli”
8	**Liczba bitumiczna**	PN-EN 13179-2 Badania kruszyw wypełniających stosowanych do mieszanek bitumicznych. Część 2: Liczba bitumiczna
9	**Wolne przestrzenie w suchym zagęszczonym wypełniaczu**	PN-EN 1097-4 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Część 4: Oznaczanie pustych przestrzeni suchego, zagęszczonego wypełniacza
10	**Rozpuszczalność w wodzie**	PN-EN 1744-1 Badania chemicznych właściwości kruszyw. Analiza chemiczna. Rozdział 16 Oznaczanie rozpuszczalności w wodzie
11	**Podatność na działanie wody**	PN-EN 1744-4 Badania chemicznych właściwości kruszyw. Część 4: Oznaczenie podatności na wodę wypełniaczy do mieszanek bitumicznych
12	**Badanie Blaine′a**	PN-EN 196-6 Metody badania cementu. Oznaczanie stopnia zmielenia.

Tablica 2. Zakres badań przy projektowaniu mieszanek mineralno-asfaltowych

Lp.	Właściwość	Norma badawcza
1	**Gęstość**	PN-EN 12697-5:2005 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 5: Oznaczanie gęstości
2	**Gęstość objętościowa**	PN-EN 12697-6:2005 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 6: Oznaczanie gęstości objętościowej
3	**Zawartość wolnych przestrzeni**	PN-EN 12697-8:2005 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 8: Oznaczanie zawartości wolnej przestrzeni
4	**Badanie Marshalla**	PN-EN 12697-34:2005 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 34: Badanie Marshalla

Tablica 3. Zakres badań zaprojektowanych mieszanek mineralno-asfaltowych

Lp.	Właściwość	Norma badawcza
4	**Odporność na koleinowanie**	PN-EN 12697-22:2007 Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco. Część 22: Koleinowanie
5	**Odporność na zmęczenie**	PN-EN 12697-24:2005 (U) Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 24: Odporność na zmęczenie
6	**Zespolony moduł sztywności**	PN-EN 12697-26:2005 (U) Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 26: Sztywność
7	**Odporność na spękania nisko-temperaturowe**	Procedura badawcza IBDiM/TN-1według normy amerykańskiej nr AASHTO TP10-93 “Method for Thermal Stress Restrained Specimen Tensile Strength”
8	**Wodoodporność**	PN-EN 12697-12:2004 (U) Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 12: Określanie wrażliwości próbek asfaltowych na wodę

4) Podstawy teoretyczne

4.1) Podstawowe definicje

W niniejszym sprawozdaniu stosuje się następujące wyrażenia:

- wypełniacz – kruszywo, którego większość ziaren przechodzi przez sito o wymiarze oczek 0,063 mm. Wypełniacz może być dodawany do materiałów budowlanych w celu uzyskania określonych właściwości,
- wypełniacz mieszany – kruszywo wypełniające pochodzenia mineralnego wymieszane z wodorotlenkiem wapnia,
- wypełniacz dodany – kruszywo wypełniające pochodzenia mineralnego wytworzone oddzielnie,
- wypełniacz zastępczy – materiał, w którym ziarna są większe od ziaren wypełniacza i spełniają odpowiednie wymagania dotyczące frakcji piaskowej; wypełniaczem zastępczym może być mączka dolomitowa, pył cementowy czy popiół lotny,
- pyły – frakcja kruszywa o wymiarach ziaren przechodzących przez sito o wymiarze oczek 0,063 mm,
- mączka wapienna – materiał mineralny, ziarnisty pochodzący z rozdrobnienia skał wapiennych i spełniający określone wymagania.

W mieszankach mineralno-asfaltowych stosuje się również wypełniacz, którego ziarna przechodzą przez sito o wymiarach oczek 0,075 mm i który pochodzi z różnych procesów przeróbki surowców mineralnych. [1]

4.2) Dokumenty odniesienia

Obecnie dokumentem odniesienia dla kruszyw do zastosowania drogowego jest Norma Europejska PN-EN 13043:2004 „Kruszywa do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utrwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu” oraz dokument aplikacyjny do tej normy AD/PN-EN 13043 „Kruszywa do Mieszanek Mineralno-Asfaltowych i Powierzchniowych Utrwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu – WT Kruszywa MMA PU – 2006”. Definicje cytowane w punkcie 4.1 zaczerpnięte zostały z powyższych dokumentów. Z definicji tych oraz z treści normy wynika, że pyły z kruszywa stosowanego do

wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych mogą być wypełniaczem w mieszankach mineralno-asfaltowych, o ile spełniają wymagania wobec wybranych właściwości wypełniacza.

W niniejszej pracy powoływane są także normy serii PN-EN 13108 (U), wprowadzone przez PKN drogą uznaniową oraz dokument opracowany na podstawie tych norm przez Zespół GREN pt. „Wymagania Techniczne – Nawierzchnie Asfaltowe Drogowe i Lotniskowe – WT Nawierzchnie Asfaltowe DiL – 2007”.

4.3) Cel stosowania wypełniacza

Wypełniacz spełnia w mieszance mineralno-asfaltowej wiele ważnych funkcji. Usztywnia asfalt i tworzy z nim jednorodny mastyks. Od jakości i właściwości tego mastyksu zależy siła wiązania w wytworzonej i wbudowanej w nawierzchnię mieszance mineralno-asfaltowej oraz odporność warstw na działanie obciążeń w zależności od temperatury. Mączka wapienna wypełnia wolne przestrzenie pomiędzy ziarnami mieszanki mineralnej, poprawia zagęszczalność MMA i przyczepność asfaltu do kruszywa. Przyczynia się również do lepszej adhezji lepiszcza do powierzchni kruszywa, polepsza wodoszczelność i mrozoodporność mieszanki mineralno-asfaltowej. Najlepsze właściwości wykazują wypełniacze pochodzące z przemiału skał wapiennych, zawierające co najmniej 90 % $CaCO_3$ i nie zawierające części ilastych i organicznych. [2]

4.4) Stosowanie wypełniaczy niewapiennych

Dokument DA/PN-EN 13043:2004 jednoznacznie określa możliwości stosowania wypełniaczy oraz właściwości jakie powinny spełniać. Treść normatywu nie pozostawia dowolności interpretacji. Nieoficjalnie wiadomo jednak, że powszechną praktyką jest stosowanie przez producentów mieszanek mineralno-asfaltowych wypełniaczy niewapiennych w sposób niewłaściwy. Stwierdzenie to dotyczy zarówno niebadania wymaganych właściwości wymaganych przez normę oraz przekraczanie ilości dopuszczonych przez specyfikacje techniczne kontraktów.

Do tej pory prowadzone były badania mające na celu ustalenie przydatności wypełniaczy niewapiennych. Zakres tych prac zazwyczaj ograniczony był do badania właściwości samych mastyksów, czyli połączenia wypełniacza z czystym asfaltem oraz do podstawowych badań mieszanek mineralno-asfaltowych. W literaturze

można znaleźć następujące uszeregowanie rodzajów kruszyw wypełniających pod względem ich przydatności w mieszankach mineralno-asfaltowych (od najlepszego do najgorszego) [3]:

- wapień
- piaskowiec o spoiwie wapiennym
- dolomit
- żużel
- kwarcyt
- bazalt
- less
- popiół lotny z węgla kamiennego
- pyły cementowe (klinkierowe)
- granit
- serycyt
- anhydryt

W niniejszej pracy poddano ocenie zarówno same wypełniacze, jak i mieszanki mineralno-asfaltowe wykonane z zastosowaniem tych wypełniaczy. Wypełniacze przebadane zostały zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 13043:2004 oraz Dokumentu Aplikacyjnego. Zakres badań mieszanek mineralno-asfaltowych objął oprócz pełnych standardowych badań wg serii PN-EN 13108 również badania rozszerzone. W przypadku mieszanki mineralno-asfaltowej z betonu asfaltowego do warstwy wiążącej przeprowadzono dodatkowo badania zmęczeniowe oraz zespolonego modułu sztywności. W przypadku mieszanki SMA przeprowadzono dodatkowe badania niskotemperaturowe TSRST.

4.5) Podstawowe materiały

Na cele niniejszej pracy wybrano trzy wypełniacze zaszeregowane na początku, w środku i na końcu listy wg p. 4.4 pod względem przydatności do stosowania w MMA ustalonej we wcześniejszych pracach badawczych. Były to następujące wypełniacze [4]:

- wapień – skała osadowa, zbudowana z węglanu wapnia ($CaCO_3$), charakteryzuje się niską odpornością na rozdrobnienie ale bardzo dobrą adhezja do asfaltu,

– bazalt – skała magmowa, wylewna, najczęściej stosowana w drogownictwie, charakteryzuje się dobrymi parametrami wytrzymałościowymi i dobrym powinowactwem z asfaltem,

– granit – skała magmowa, głębinowa, bardzo często stosowana w drogownictwie, charakteryzuje się dobrymi parametrami wytrzymałościowymi. [5]

W mieszankach mineralno-asfaltowych wykonanych na cele niniejszej pracy badawczej zastosowano kruszywa:

– bazaltowe frakcji 2/5, 5/8, 8/11 i 11/16,

– granitowe frakcji 0/4, 16/22,5.

Zastosowano następujące lepiszcza asfaltowe:

– asfalt drogowy 35/50 z rafinerii Lotos,

– asfalt modyfikowany polimerami 80B z rafinerii Lotos.

5) Badania laboratoryjne wypełniaczy

5.1) Próbki do badań

Przedmiotem pierwszego etapu pracy TN-240 były badania materiałów mogących pełnić funkcje wypełniacza w mieszankach mineralno-asfaltowych. Do badań wybrano pyły z odpylania kruszyw bazaltowych i pyły z kruszyw granitowych. Zdecydowano się na takie materiały ze względu na duży ich dostęp, powszechne stosowanie oraz odpowiednie uszeregowanie wg p. 5.3. W mieszankach mineralno-asfaltowych najczęściej stosowanymi kruszywami są właśnie granity i bazalty. Przy ich wykorzystywaniu powstają bardzo duże ilości niezagospodarowanych pyłów traktowanych jako materiał odpadowy i nieprzydatny. Celem pracy było sprawdzenie przydatności tych pyłów w mieszankach mineralno-asfaltowych. Badaniom podlegały mieszanki wypełniaczy niewapiennych z wapiennymi. Pochodzenie poszczególnych materiałów zestawiono w tablicy 4.

Tablica 4. Materiały poddane badaniom

Lp.	**Pochodzenie**	**Rodzaj materiału**	**Oznaczenie** ***(używane w dalszej części opracowania)***
1	*2*	*3*	*4*
1	Lhoist Opolwap S.A. Ul. Świerczewskiego 5 46-050 Tarnów Opolski	Wypełniacz wapienny	1/W

2	PG-P „BAZALT” w Wilkowie Skr. poczt. 34 59-500 Złotoryja	Kruszywo drobne	1/KD
3	Wrocławskie Kopalnie Surowców Mineralnych S.A. Kopalnia 58-152 Goczałków, Graniczna 15	Kruszywo drobne	2/KD

Mieszanki przygotowane do badań powinny charakteryzować się stałą zawartością składników i stałym uziarnieniem składników oraz samej mieszanki. Dlatego też, wydzielono następujące rodzaje frakcji badawczych:

A - mieszanki,

B - odsianej mieszanki na sicie 2 mm,

C - odsianej mieszanki na sicie 0,125 mm.

Badania zostały przeprowadzone na mieszankach w następujących proporcjach:

- 50% 1/KD – 50% 1/W
- 80% 1/KD – 20% 1/W
- 50% 2/KD – 50% 1/W
- 80% 2/KD– 20% 1/W

5.2) Wyniki badań laboratoryjnych wypełniaczy

Wyniki badań laboratoryjnych wypełniacza wapiennego zostały przedstawione w Załączniku 1. Numery kart z wynikami badań przedstawiono w tablicy 5. Wyniki badań mieszanek wypełniacza wapiennego i pochodzącego z drobnego kruszywa mineralnego zawiera natomiast Załącznik 2. W tablicy 6 zestawiono numery kart z pomiarami i wynikami badań dla mieszanek wypełniacza wapiennego i pochodzącego z drobnego kruszywa mineralnego. W tablicy 7 zawarto zestawienie wyników badań laboratoryjnych mieszanek wypełniacza wapiennego i pochodzącego z drobnego kruszywa bazaltowego oznaczonych jako 50% 1/KD – 50% 1/W oraz 80% 1/KD – 20% 1/W. Tablica 8 zawiera natomiast zestawienia wyników badań laboratoryjnych mieszanek wypełniacza wapiennego i pochodzącego z drobnego kruszywa granitowego oznaczonych jako 50% 2/KD – 50% 1/W oraz 80% 2/KD – 20% 1/W.

Tablica 5. Numery kart z wynikami badań wypełniacza wapiennego

Właściwości wypełniacza	Numer karty
Uziarnienie	1
Jakość pyłów	2
Zawartość wody	3
Gęstość ziaren	4
Gęstość nasypowa w stanie luźnym oznaczana w nafcie	5
Zawartość $CaCO_3$ w wypełniaczu wapiennym	6
Przyrost temperatury mięknienia	7

Tablica 6. Numery kart z pomiarami i wynikami badań dla mieszanek wypełniacza wapiennego i pochodzącego z drobnego kruszywa mineralnego

Właściwości	Numer karty
Uziarnienie	1a, 1b, 1c, 1d
Jakość pyłów	2a, 2b, 2c, 2d
Zawartość wody	3a, 3b, 3c, 3d
Gęstość ziaren	4a, 4b, 4c, 4d
Gęstość nasypowa w stanie luźnym oznaczana w nafcie	5a, 5b, 5c, 5d
Zawartość $CaCO_3$ w wypełniaczu wapiennym	6
Przyrost temperatury mięknienia mieszanki wypełniacz-asfalt, oznaczony metodą pierścienia i kuli	7a, 7b, 7c, 7d
„Liczba asfaltowa” wypełniacza dodanego	8a, 8b, 8c, 8d
Wolne przestrzenie w suchym zagęszczonym wypełniaczu	9a, 9b, 9c, 9d
Rozpuszczalność w wodzie	10a, 10b, 10c, 10d
Podatność na działanie wody	11a, 11b, 11c, 11d
Badanie Blaine′a	12a, 12b, 12c, 12d

Tablica 7. Zestawienie wyników badań laboratoryjnych mieszanek wypełniacza wapiennego i pochodzącego z drobnego kruszywa bazaltowego

Lp.	Właściwości		Jednostki	Wyniki badań dla mieszanki		Normy badawcze
				50% 1KD – 50% 1/W	80% 1/KD – 20% 1/W	
1	**Uziarnienie**	Wymiar otworu sita [mm]	%	Procenty materiału przechodzącego		PN-EN 933-10
		2		95	97	
		0,125		55	34	
		0,063		49	25	
		< 0,063		-	-	
2	**Jakość pyłów**		g/kg	1,4	2,0	PN-EN 933-9
3	**Zawartość wody[1)]**		%	0,5	0,7	PN-EN 1097-5
4	**Gęstość ziaren**		Mg/m^3	2,72	2,79	PN-EN 1097-7
5	**Gęstość nasypowa w stanie luźnym oznaczana w nafcie**		Mg/m^3	1,0	1,1	PN-EN 1097-3, załącznik B
6	**Zawartość węglanu wapnia[2)]**		%	-	-	PN-EN 196-21, p. 5
7	**Przyrost temperatury mięknienia**		°C	8,3	5,2	PN-EN 13179-1
8	**Liczba bitumiczna**		-	14	13	PN-EN 13179-2
9	**Wolne przestrzenie w suchym zagęszczonym wypełniaczu**		%	28	27	PN-EN 1097-4
10	**Rozpuszczalność w wodzie**		%	0,8	0,9	PN-EN 1744-1
11	**Podatność na działanie wody**		%	0	0	PN-EN 1744-4
12	**Badanie Blaine'a**		cm^2/g	4088	1084	PN-EN 196-6

[1)] Wartości przeliczone ze składników
[2)] Zawartość $CaCO_3$ w wypełniaczu wapiennym wynosi 92,5 % (patrz Zał. nr 2, Karta 6)

Tablica 8. Zestawienie wyników badań laboratoryjnych mieszanek wypełniacza wapiennego i pochodzącego z drobnego kruszywa granitowego

Lp.	Właściwości		Jednostki	Wyniki badań dla mieszanki		Normy badawcze
				50% 2KD – 50% 1/W	80% 2/KD – 20% 1/W	
1	**Uziarnienie**	Wymiar otworu sita	%	Procent materiału przechodzący na sicie		PN-EN 933-10
		2		100	100	
		0,125		85	78	
		0,063		68	55	
		< 0,063		-	-	
2	**Jakość pyłów**		g/kg	0,8	0,5	PN-EN 933-9
3	**Zawartość wody[1)]**		%	7,5	11,9	PN-EN 1097-5
4	**Gęstość ziaren**		Mg/m^3	2,59	2,48	PN-EN 1097-7
5	**Gęstość nasypowa w stanie luźnym oznaczana w nafcie**		Mg/m^3	0,8	0,6	PN-EN 1097-3, załącznik B
6	**Zawartość węglanu wapnia[2)]**		%	-	-	PN-EN 196-21, p. 5
7	**Przyrost temperatury mięknienia**		^oC	7,9	9,8	PN-EN 13179-1
8	**Liczba bitumiczna**		-	23	26	PN-EN 13179-2
9	**Wolne przestrzenie w suchym zagęszczonym wypełniaczu**		%	28	26	PN-EN 1097-4
10	**Rozpuszczalność w wodzie**		%	1,1	2,1	PN-EN 1744-1
11	**Podatność na działanie wody**		%	16	35	PN-EN 1744-4
12	**Badanie Blaine'a**		cm^2/g	4887	3027	PN-EN 196-6

[1)] Wartości przeliczone ze składników
[2)] Zawartość CaCO3 w wypełniaczu wapiennym wynosi 92,5 % (patrz Zał. nr 1, Karta 6)

5.3) Analiza wyników badań wypełniaczy

Analizę wyników badań przeprowadzono w odniesieniu do zestawionych wymagań dla wypełniaczy do mieszanek mineralno-asfaltowych przeznaczonych do wykonywania warstw nawierzchni i powierzchniowych utrwaleń – tablice zamienne do normy PN-S-96025:2000 "Drogi samochodowe i lotniskowe. Nawierzchnie asfaltowe".

Wyniki badań, klasyfikacje i wymagania wobec mieszanek wypełniacza wapiennego i pochodzącego z drobnego kruszywa bazaltowego 50% 1KD – 50% 1/W oraz 80% 1/KD– 20% 1/W zawarto w tablicy 9. Wyniki porównano do wymagań dokumentu 'Wymagania Techniczne – WT Kruszywa MMA PU – 2006 – Kruszywa do Mieszanek Mineralno-Asfaltowych i Powierzchniowych Utrwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu" utworzonego na podstawie normy PN-EN 13043:2004. Uzyskano następujące wnioski:

a) Mieszanka o składzie 50% 1KD – 50% 1/W spełnia wymagania dokumentu „WT Kruszywa MMA PU – 2006",

b) Mieszanka o składzie 80% 1/KD– 20% 1/W nie spełnia wymagań dokumentu WT Kruszywa z uwagi na przekroczenie dopuszczalnych granic zawartych tam wymagań dla:

- zawartości wolnej przestrzeni w suchym zagęszczonym wypełniaczu,
- przyrostu temperatury mięknienia,
- wynik podatności na działanie wody wg PN-EN 1744-4 był zerowy.

Wyniki badań, klasyfikacje i wymagania wobec mieszanek wypełniacza wapiennego i pochodzącego z drobnego kruszywa granitowego 50% 2KD – 50% 1/W oraz 80% 2KD– 20% 1/W zawarto w tablicy 10. Uzyskano następujące wnioski:

a) mieszanka 50% 2KD – 50% 2/W spełniła wymagania dokumentu WT Kruszywa utworzonego na podstawie normy PN-EN 13043:2004. Należy jednak podkreślić, że granitowe kruszywo drobne wymagało przesuszenia.

b) mieszanka 80% 2/KD – 20% 1/W nie spełniła wymagań dokumentu WT Kruszywa z uwagi na przekroczenie dopuszczalnych granic zawartych tam wymagań dla:

- zawartości wolnej przestrzeni w suchym zagęszczonym wypełniaczu,
- podatność na działanie wody wg PN-EN 1744-4 można określić jako dużą. Wynosiła ona 16 % i 35 %, odpowiednio przy zawartości granitu 50 i 80 %.

Tablica 9. Klasyfikacja mieszanek wypełniacza wapiennego i pochodzącego z drobnego kruszywa bazaltowego 50% 1KD – 50% 1/W oraz 80% 1/KD– 20% 1/W oraz wymagania dla wypełniaczy *)

Punkt normy PN-EN 13043 i WT	Właściwości wypełniacza		Wyniki		Nadana kategoria		Wymagania wobec wypełniacza
			1/KD 50	1/KD 80	1/KD 50	1/KD 80	
5.2.1	Uziarnienie wg PN-EN 933-10:	Wymiar otworu sita [mm]	Procent przechodzącej masy				zgodne z tablicą 24
		2	95	93	-	-	100
		0,125	55	34	-	-	85-100
		0,063	49	25	-	-	70-100
5.2.2	Jakość pyłów wg PN-EN 933-9; kategoria nie wyższa od:		1,4	2,0	MBF 10	MBF 10	MBF10
5.3.1	Zawartość wody wg PN-EN 1097-5, nie wyższa od:		0,5	0,7	-	-	1
5.3.2	Gęstość ziaren wg EN 1097-7		2,72	2,79	ρf 2,72	ρf 2,79	deklarowana przez producenta
5.3.3.1	Wolne przestrzenie w suchym zagęszczonym wypełniaczu wg PN-EN 1097-4: wymagana kategoria:		28	27	V28/38	-	V28/45
5.3.3.2	Przyrost temperatury mięknienia wg PNEN 13179-1; wymagana kategoria:		8,3	5,2	ΔR&B8/16	-	ΔR&B8/25
5.4.1	Rozpuszczalność w wodzie wg PN-EN 1744-1, kategoria nie wyższa niż:		0,8	0,9	WS10	WS10	WS10
5.4.3	Zawartość $CaCO_3$ w wypełniaczu wapiennym wg PN-EN 196-21; kategoria, co najmniej:		-	-	-	-	CC70
5.4.4	Zawartość wodorotlenku wapnia w wypełniaczu mieszanym; kategoria:		-	-	-	-	Ka10, KaDeklar.
5.5.2	"Liczba asfaltowa" wg EN 13179-2		14	13	BNDeklar.	BNDeklar.	BNDeklar.

Oznaczenia:

WT Wymagania Techniczne – WT Kruszywa MMA PU – 2006 – „Kruszywa do Mieszanek Mineralno Asfaltowych i Powierzchniowych Utrwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu” utworzony na podstawie normy PN-EN 13043:2004, listopad 2006 r.

*) Zestaw tablic wymagań wobec kruszyw do mieszanek mineralno-asfaltowych przeznaczonych do wykonywania warstw nawierzchni i powierzchniowych utrwaleń – tablice zamienne do normy PN-S-96025:2000 Drogi samochodowe i lotniskowe. Nawierzchnie asfaltowe.

Tablica 10. Klasyfikacja mieszanek wypełniacza wapiennego i pochodzącego z drobnego kruszywa granitowego 50% 2KD – 50% 1/W oraz 80% 2/KD– 20% 1/W oraz wymagania dla wypełniaczy *)

Punkt normy PN-EN 13043 i WT	Właściwości wypełniacza		Wyniki		Nadana kategoria		Wymagania wobec wypełniacza
			2/KD 50	2/KD 80	2/KD 50	2/KD 80	
5.2.1	Uziarnienie wg PN-EN 933-10:	Wymiar otworu sita [mm]	Procent przechodzącej masy				zgodne z tablicą 24
		2	100	100	-	-	100
		0,125	85	78	-	-	85-100
		0,063	68	55	-	-	70-100
5.2.2	Jakość pyłów wg PN-EN 933-9; kategoria nie wyższa od:		0,8	0,5	MBF 10	MBF 10	MBF10
5.3.1	Zawartość wody wg PN-EN 1097-5, nie wyższa od:		7,5	11,9	-	-	1
5.3.2	Gęstość ziaren wg EN 1097-7		2,59	2,48	ρf 2,59	ρf 2,48	Deklarowana przez producenta
5.3.3.1	Wolne przestrzenie w suchym zagęszczonym wypełniaczu wg PN-EN 1097-4: wymagana kategoria:		28	26	V28/38	-	V28/45
5.3.3.2	Przyrost temperatury mięknienia wg PNEN 13179-1; wymagana kategoria:		7,9	9,8	ΔR&B8/16	ΔR&B8/16	ΔR&B8/25
5.4.1	Rozpuszczalność w wodzie wg PN-EN 1744-1, kategoria nie wyższa niż:		1,1	2,1	WS10	WS10	WS10
5.4.3	Zawartość CaCO3 w wypełniaczu wapiennym wg PN-EN 196-21; kategoria, co najmniej:		-	-	-	-	CC70
5.4.4	Zawartość wodorotlenku wapnia w wypełniaczu mieszanym; kategoria:		-	-	-	-	Ka10, KaDeklar.
5.5.2	"Liczba asfaltowa" wg EN 13179-2		23	26	BNDeklar.	BNDeklar.	BNDeklar.

Oznaczenia:

WT Wymagania Techniczne – WT Kruszywa MMA PU – 2006 – „Kruszywa do Mieszanek Mineralno Asfaltowych i Powierzchniowych Utrwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu" utworzony na podstawie normy PN-EN 13043:2004, listopad 2006 r.

*) Zestaw tablic wymagań wobec kruszyw do mieszanek mineralno-asfaltowych przeznaczonych do wykonywania warstw nawierzchni i powierzchniowych utrwaleń – tablice zamienne do normy PN-S-96025:2000 Drogi samochodowe i lotniskowe. Nawierzchnie asfaltowe.

Na podstawie przeprowadzonych badań mieszanek wypełniacza wapiennego z bazaltowym i granitowym kruszywem drobnym i otrzymanych wyników badań według norm serii PN-EN oraz ich analizy pod względem zastosowania w budownictwie drogowym do nawierzchni asfaltowych uzyskano następujące wnioski:

a) Mieszanki w proporcjach 50% 1KD – 50% 1/W oraz 50% 2KD – 50% 1/W spełniły wymagania Wytycznych Technicznych do normy PN-EN 13043:2004, przy czym kruszywo drobne 2KD wymagało przesuszenia.

b) Mieszanka zawierająca 80 % kruszyw drobnych nie spełniła wymagań dokumentu WT Kruszywa przede wszystkim ze względu na przekroczenie dopuszczalnych granic wymagań dla:

- zawartości wolnej przestrzeni w suchym zagęszczonym wypełniaczu, lub/i
- przyrostu temperatury mięknienia.

c) Podatność na działanie wody, nie ujęta w WT Kruszywa, wykazywała znaczne różnice w odniesieniu do bazaltu i granitu w badanych próbkach:

- 0 % przy obu proporcjach bazaltu,
- 16 % i 35 % odpowiednio przy zawartości granitu 50 i 80 %.

d) Wartości powierzchni właściwej uzyskane w badaniu Blaine′a odpowiadały zmianom uziarnienia.

Przydatność badanych wypełniaczy pochodzenia niewapiennego do wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych oraz wpływ zastosowania takich materiałów na jakość, trwałość oraz właściwości fizyczne i mechaniczne mieszanki mineralno-asfaltowej została sprawdzona w drugim etapie pracy.

6) Badania mieszanek mineralno-asfaltowych

6.1) Zakres badań mieszanek mineralno-asfaltowych

Badania laboratoryjne cech objętościowych i funkcjonalnych mieszanek mineralno-asfaltowych z zastosowanymi różnymi rodzajami wypełniaczy były drugim etapem realizacji pracy badawczej o symbolu TN-240.

Badaniom cech fizycznych i mechanicznych poddane zostały mieszanki mineralno-asfaltowe zawierające wypełniacz wapienny lub mieszanki wypełniacza

wapiennego i niewapiennego. Do badań laboratoryjnych wytypowano dwa rodzaje mieszanek mineralno-asfaltowych:

- beton asfaltowy BA o uziarnieniu do 16 mm przeznaczony do warstwy wiążącej, do kategorii ruchu KR3-6,
- mieszankę SMA o uziarnieniu do 8 mm przeznaczoną do warstwy ścieralnej, do ruchu kategorii KR3-6.

Badaniom poddano dwa rodzaje pyłów, z najczęściej stosowanych w drogownictwie kruszyw, granitu i bazaltu. Ustalono, że pyły zostaną wymieszane z mączką wapienną w różnym stosunku, a następnie zostaną sprawdzone pod kątem wymagań stawianych wypełniaczom przez normę PN-EN 13043:2004. Przyjęto, że wypełniacze do badań będą składały się z 50% mączki wapiennej i 50 % pyłu oraz z 20 % mączki wapiennej i 80 % pyłu z odpylania kruszyw. Nie uwzględniono przypadku, w którym sam pył stanowiłby wypełniacz.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wypełniacz składający się z 80 % z pyłu i 20 % mączki wapiennej nie spełnia wymagań normy PN-EN 13043:2004. Dyskwalifikowało to więc taki rodzaj wypełniacza. Według normy i definicji w niej zawartych, pyły z kruszywa stosowanego do wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych mogą być wypełniaczem, ale tylko wtedy, gdy spełniają wymagania wobec wybranych właściwości wypełniacza. Na tej podstawie ustalono, że materiały dobrane w proporcji 80 % pyłu z odpylania kruszyw i 20 % mączki wapiennej nie mogą stanowić wypełniacza do zastosowania w mieszankach mineralno-asfaltowych. Mieszanki mineralno-asfaltowe zawierające więc taki wypełniacz nie zostały poddane badaniom laboratoryjnym.

Podsumowując, oznaczenia wykonano na mieszankach, w których mączka wapienna w 100 % stanowiła wypełniacz lub wypełniacz tworzyła mączka wapienna połączona w 50 % z pyłem granitowym lub bazaltowym.

Na zaprojektowanych i wyprodukowanych mieszankach mineralno-asfaltowych przeprowadzono badania laboratoryjne i oznaczono następujące właściwości:

Gęstość objętościowa (poprzednio gęstość strukturalna, dawna gęstość pozorna)

Gęstość objętościową oznaczono zgodnie z normą PN-EN 12697-6:2005, według metody B – „Gęstość objętościowa próbki w stanie nasyconym powierzchniowo suchym”. Oznaczenie wykonano na nienaruszonych,

zagęszczonych próbkach mieszanki mineralno-asfaltowej, a ρ_{bssd} obliczono z ilorazu masy próbki przez jej objętość według wzoru:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$$

w którym:

ρ_{bssd} – gęstość objętościowa próbki, g/cm^3,

m_1 – masa suchej próbki, g,

m_2 – masa próbki w wodzie, g,

m_3 – masa próbki nasyconej, powierzchniowo suchej, g,

ρ_w – gęstość wody w temperaturze badawczej, g/cm^3.

Gęstość (poprzednio gęstość objętościowa, dawna gęstość właściwa)

Gęstość oznaczono zgodnie z normą PN-EN 12697-5:2005. Opisano w niej metodę oznaczenia gęstości mieszanek mineralno-asfaltowych bez wolnych przestrzeni. Do wyznaczenia gęstości skorzystano z metody A – „Metoda objętościowa". Metoda polegała na obliczeniu ilorazu masy próbki i jej objętości, określonej w piknometrze. Gęstość oznaczano na wysuszonej i rozdrobnionej próbce. Objętość próbki była mierzona objętością wody lub rozpuszczalnika, która wypierała próbkę umieszczoną w piknometrze. Obliczenia wykonano według wzoru:

$$\rho_{mw} = \frac{m_2 - m_1}{1000 \times V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w}}$$

w którym:

m_1 masa piknometru z nasadką, w gramach (g);

m_2 masa piknometru z nasadką i z badaną próbka, w gramach (g);

m_3 masa piknometru z nasadką i próbką oraz z wodą lub rozpuszczalnikiem, (g);

V_p objętość piknometru napełnionego do kreski pomiarowej, (m^3);

ρ_w gęstość wody lub rozpuszczalnika w temperaturze badania, wyrażona w kilogramach na metr sześcienny (kg/m^3), z dokładnością 0,1 kg/m^3.

Zawartość wolnych przestrzeni

Zawartość wolnej przestrzeni w próbce została obliczana na podstawie gęstości i gęstości objętościowej mieszanki mineralno-asfaltowej z dokładnością do 0,1 % (v/v) według normy PN-EN 12697-8:2005, według następującego równania:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100$$

w którym:

V_m – zawartość wolnej przestrzeni w próbce mieszanki mineralno-asfaltowej, % (v/v),

ρ_m – gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm^3,

ρ_b – gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm^3.

Zawartość procentową wolnych przestrzeni w mieszance mineralnej wypełnionej lepiszczem bitumicznym obliczano z dokładnością do 0,1 % (v/v) wg następującego równania:

$$VFB = \frac{B \times \frac{\rho_b}{\rho_B}}{VMA} \times 100$$

w którym:

VFB – procentowa zawartość wolnej przestrzeni w mieszance mineralnej wypełnionej lepiszczem bitumicznym, do 0,1 % (v/v);

B – zawartość lepiszcza w próbce (w 100% mieszanki), do 0,1 % (v/v),

ρ_b – gęstość objętościowa próbki, (kg/m^3),

ρ_B – gęstość lepiszcza, (kg/m^3),

VMA – zawartość wolnej przestrzeni w mieszance mineralnej, do 0,1% (v/v):

$$VMA = V_m + B \times \frac{\rho_b}{\rho_B}$$

w którym:

VMA – zawartość wolnej przestrzeni w mieszance mineralnej, do 0,1 % (v/v),

V_m – zawartość wolnej przestrzeni w próbce, do 0,1 % (v/v),

B – zawartość lepiszcza w próbce (w 100% mieszanki), do 0,1 % (m/m),

ρ_b – gęstość objętościowa próbki, (kg/m^3),

ρ_B – gęstość lepiszcza, (kg/m^3).

Badanie Marshalla

Parametry Marshalla (stabilność i odkształcenie) oznaczono zgodnie z normą PN-EN 12697-34:2007. Stabilność mieszanki mineralno-asfaltowej jest to największa siła w chwili zniszczenia próbki w aparacie Marshalla. Odkształcenie natomiast jest różnicą pomiędzy wysokością przed obciążeniem i w trakcie odciążania, mierzoną w osi działania siły. Oznaczenie stabilności i odkształcenia metodą Marshalla polega na określeniu wartości liczbowych siły i odkształcenia w chwili zniszczenia próbki w wyniku ściskania jej w aparacie Marshalla. Badanie wykonano równolegle na trzech próbkach uformowanych w kształcie walca. Wykonanie oznaczenia polegało na umieszczeniu próbek w szczękach do ściskania, doprowadzeniu górnej płyty prasy do zetknięcia ze szczękami i zanotowaniu odczytu „zerowego" na czujniku odkształcenia, uruchomieniu prasy, a następnie odczytaniu stabilności S_o i odkształcenia L.

Odporność na koleinowanie

Określanie odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na trwałe deformacje lepko-plastyczne przy pomocy aparatu LCPC (zwanego w normie PN-EN 12697−22 aparatem dużym) polegało na poddaniu zagęszczonej próbki z mieszanki mineralno-asfaltowej wielokrotnym przejazdom znormalizowanego koła ogumionego, w znormalizowanych warunkach temperatury, nacisku i liczby przejazdów koła po próbce. Po zakończeniu badania zmierzono głębokość koleiny utworzonej na próbce przez koło.

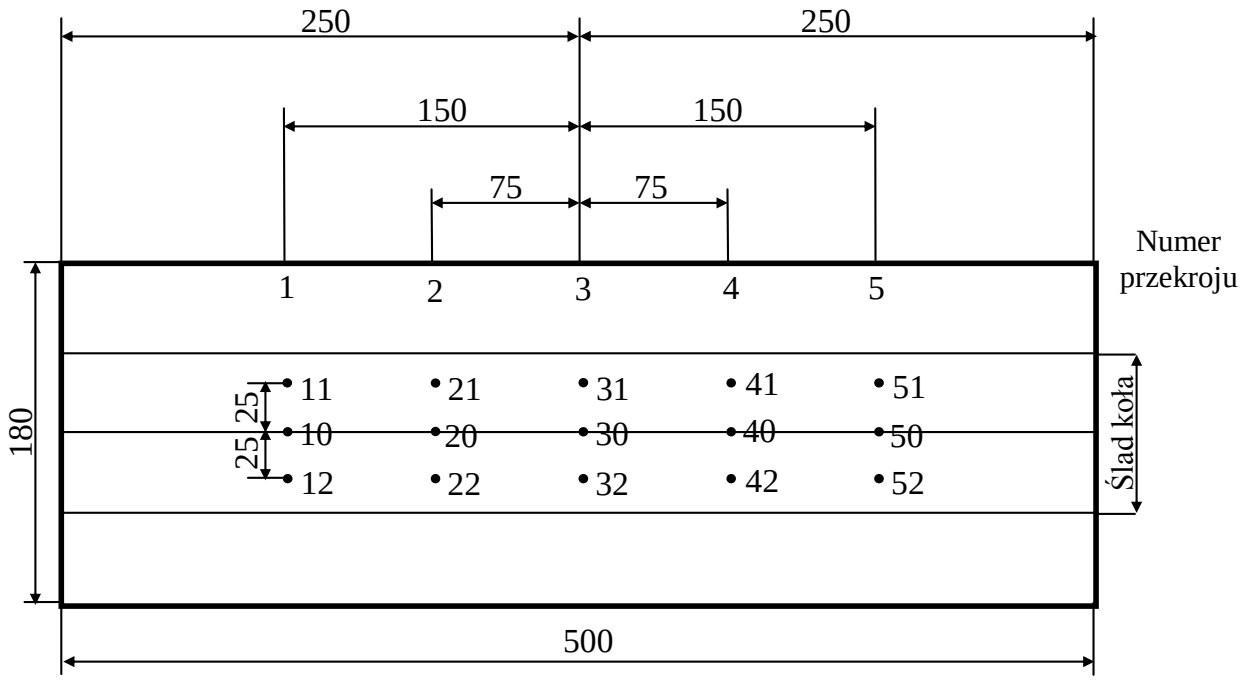
Warunki badania:

- długość przejazdu koła 410 mm ± 5 mm,
- częstotliwość ruchu koła: 1 Hz ± 0,1 Hz,
- ciśnienie w oponie: 6 ± 0,1 bar (na początku badania),
- obciążenie ruchome 5000 ± 50 N, pomierzone statycznie na środku próbki,
- temperatura badania + 60 ± 0,2 °C,
- liczba cykli obciążających kołem wynosi 10 000 lub 30 000.

Próbki w kształcie płyty wykonano w formach stalowych dzielonych, o długości 500 mm i szerokości 180 mm. Grubość próbek wynosiła:

- 50 mm – dla mieszanek do warstwy ścieralnej
- 100 mm – dla mieszanek do warstwy wiążącej

Formy z próbkami umieszczono na płycie aparatu. Próbki poddano 1000 cyklom wstępnego obciążenia ruchomego. Po wstępnej fazie dostosowania, został wykonany pomiar zerowy m_{i0j} (j = 1 ÷ 15) zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 1. Dokonano ustawienia temperatury pomiaru w komorze na +60 °C, w otworze wywierconym w próbce. Próbka była przechowywana w tych warunkach co najmniej przez 12 h przed wykonaniem badania. Następnie próbkę obciążano obciążeniem ruchomym od kół. Po zatrzymaniu koła odczytywano wartość temperatury próbki. Następnie wykonano pomiary głębokości koleiny m_{ij}, w punktach i w kolejności zaznaczonej na rysunku 1. Dla każdej próbki pomiary zostały wykonane w pięciu przekrojach, po trzy odczyty.



Rysunek 1. Schemat pomiaru głębokości koleiny w aparacie LCPC

Głębokość koleiny P_i pojedynczej próbki obliczono wg równania:

$$P_i = \frac{\sum j\left(m_{ij} - m_{ij}0_j\right)}{15 \times E} \times 100$$

w którym:

j – punkt pomiaru 1 ÷ 15,

E – grubość badanej próbki, mm,

m_{ij} – odczyt głębokości koleiny w poszczególnych punktach, mm,

m_{ij0j} – odczyty zerowe w śladzie koła w poszczególnych punktach, mm.

Wynik obliczono jako średnią arytmetyczną badania z co najmniej 2 próbek, o tym samym składzie. Pośrednie pomiary głębokości koleiny posłużyły do wykreślenia krzywej oraz obliczenia parametrów funkcji potęgowej koleinowania.

Trwałość zmęczeniowa

Badania zmęczeniowe przeprowadzono według normy PN-EN 12697-24:2007. Metoda polegała na cyklicznym, czteropunktowym zginaniu próbki belkowej umieszczonej w aparacie zmęczeniowym przy stałej amplitudzie ugięcia. Podczas badania rejestrowana była siła, ugięcie belki, kąt przesunięcia fazowego, liczba cykli, obliczany był moduł sztywności oraz naprężenia i odkształcenia rozciągające. Badanie przeprowadzono w trybie kontrolowanych odkształceń, w temperaturze 10 °C, przy częstotliwości 10 Hz i sinusoidalnym kształcie obciążenia. Badania prowadzone były do osiągnięcia 10^6 cykli obciążenia. Wynikiem badania była szkoda zmęczeniowa określona następującym równaniem:

$$D = 100 - \frac{E_n}{E_0} \times 100 \qquad (1)$$

w którym:

E_n – moduł sztywności w n-tym cyklu obciążenia, MPa,

n – liczba cykli obciążenia (n = 1 000 000),

E_0 – początkowy moduł sztywności, MPa.

Uważa się, że wymaganie trwałości zmęczeniowej jest spełnione, jeśli szkoda zmęczeniowa nie przekroczyła 50 %.

W badaniach, których celem jest opracowanie charakterystyk zmęczeniowych przyjmowane są różne wartości odkształceń, a badanie jest prowadzone do momentu spełnienia kryterium zniszczenia próbki, czyli do osiągnięcia 50 % spadku wartości modułu sztywności.

Charakterystyka zmęczeniowa materiału jest to funkcja opisująca zależność pomiędzy wartością zadanej amplitudy obciążenia a trwałością zmęczeniową w określonych warunkach badania. Ilustracją graficzną jest krzywa Wöhlera, którą opisuje następujące równanie:

$$N = A \cdot \varepsilon^b \qquad (2)$$

w którym:

N – trwałość zmęczeniowa,

ε – amplituda odkształcenia, mm/mm,

A, b - stałe wyznaczone na podstawie regresji liniowej.

Zespolony moduł sztywności

Badania były przeprowadzane zgodnie normą ASTM D 3497 79/95 oraz PN-EN 12697-26:2007. Celem badania było określenie zespolonego modułu sztywności określającego lepko-sprężyste zachowanie mieszanek mineralno-asfaltowych i wykorzystywanego w projektowaniu mieszanek.

Badanie polegało na cyklicznym obciążaniu próbki walcowej w warunkach osiowego ściskania. Odkształcenia i naprężenia w zależności od czasu opisywano następującymi równaniami:

$$\sigma_t = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t - \phi)$$

w których:

σ_0 - amplituda naprężenia, [MPa]

ε_0 – amplituda odkształcenia sprężystego, [mm/mm]

ω - prędkość kątowa, [rad/s]

t – czas, [s]

Obciążenie przykładane było prostopadle do podstawy próbki. Podczas badania rejestrowana była siła i przemieszczenie. Wynikiem badania był moduł sztywności i kąt przesunięcia fazowego. Zespolony moduł sztywności E* jest liczbą zespoloną, którą można opisać równaniem:

$$E^* = E' + iE''$$

w którym:

E’ – część rzeczywista (sprężysta),

E’’ – część urojona (lepka).

Obie składowe modułu zespolonego związane są wartością kąta przesunięcia fazowego wg równania:

$$tg\phi = \frac{E''}{E'}$$

w którym:

φ - kąt przesunięcia fazowego, °.

Moduł sztywności jest wartością bezwzględną zespolonego modułu sztywności:

$$E = |E^*|$$

Spękania niskotemperaturowe

Jedną z metod oceny odporności mieszanki mineralno-asfaltowej na spękania niskotemperaturowe jest badanie wytrzymałości na rozciąganie termiczne przy ograniczonym odkształceniu TSRST (Thermal Stress Restrained Specimen Tensile Strength Test TSRST). Metodyka badania została opracowana na podstawie normy AASHTO TP10-93.

Badania przeprowadzane były na stanowisku pomiarowym MTS. Próbki do badań miały kształt prostopadłościenny o wymiarach 50 x 50 x 250 mm. Do górnej i dolnej podstawy próbki przyklejone zostały stalowe krążki, które umożliwiały zamocowanie w ramie wytrzymałościowej. Do bocznych krawędzi próbki przyklejono ekstensometry do pomiaru odkształceń wzdłużnych. Całość została zamkniet w komorze termicznej. Temperatura początkowa badania wynosiła 5˚C, a następnie była obniżana z prędkością 10˚C/h. Zadaniem ramy wytrzymałościowej było niedopuszczenie do odkształcenia (skurczu) próbki. W takich warunkach w próbce indukowane są termiczne naprężenia rozciągające. Podczas badania rejestrowana była temperatura, siła rozciągająca oraz odkształcenie. Koniec badania następował w momencie pęknięcia próbki. Wynikiem badania było naprężenie przy zniszczeniu oraz temperatura pęknięcia. [6]

Odporność na działanie wody

Określanie wrażliwości próbek asfaltowych na wodę wykonano zgodnie z normą PN-EN 12697-12:2004 (U). Do badania przygotowano 6 próbek walcowych i podzielono je na dwie grupy. Próbki z „zestawu suchego” doprowadzono do temperatury badania umieszczając je w komorze powietrznej, natomiast próbki z „zestawu mokrego” umieszczono w szczelnej, miękkiej plastikowej torebce wypełnioną wodą lub w wodoszczelnym naczyniu wypełnionym wodą i wstawiono do komory powietrznej. Przed badaniem osuszono mokre próbki i postępowano zgodnie z normą PN-EN 12697-23:2004 czyli określono wytrzymałość próbek na rozciąganie pośrednie.

Wskaźnik wytrzymałości na rozciąganie pośrednie ITSR obliczono według poniższego wzoru:

$$ITSR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d}$$

w którym:

ITSR wskaźnik wytrzymałości próbki na rozciąganie pośrednie, w procentach (%),

ITS_w średnia wytrzymałość wyznaczona dla grupy próbek mokrych, w (kPa),

ITS_d średnia wytrzymałość wyznaczona dla grupy próbek suchych, w (kPa).

6.2) Projektowanie mieszanek mineralno-asfaltowych

Składy mieszanek mineralno-asfaltowych do badań laboratoryjnych mających na celu sprawdzenie przydatności wypełniaczy niewapiennych zostały zaprojektowane według wytycznych Norm Europejskich oraz „Wymagań Technicznych – Nawierzchnie Asfaltowe Drogowe i Lotniskowe – WT Nawierzchnie Asfaltowe DiL – 2007”. Optymalne ilości asfaltu w każdej mieszance określono na podstawie metody Marshalla.

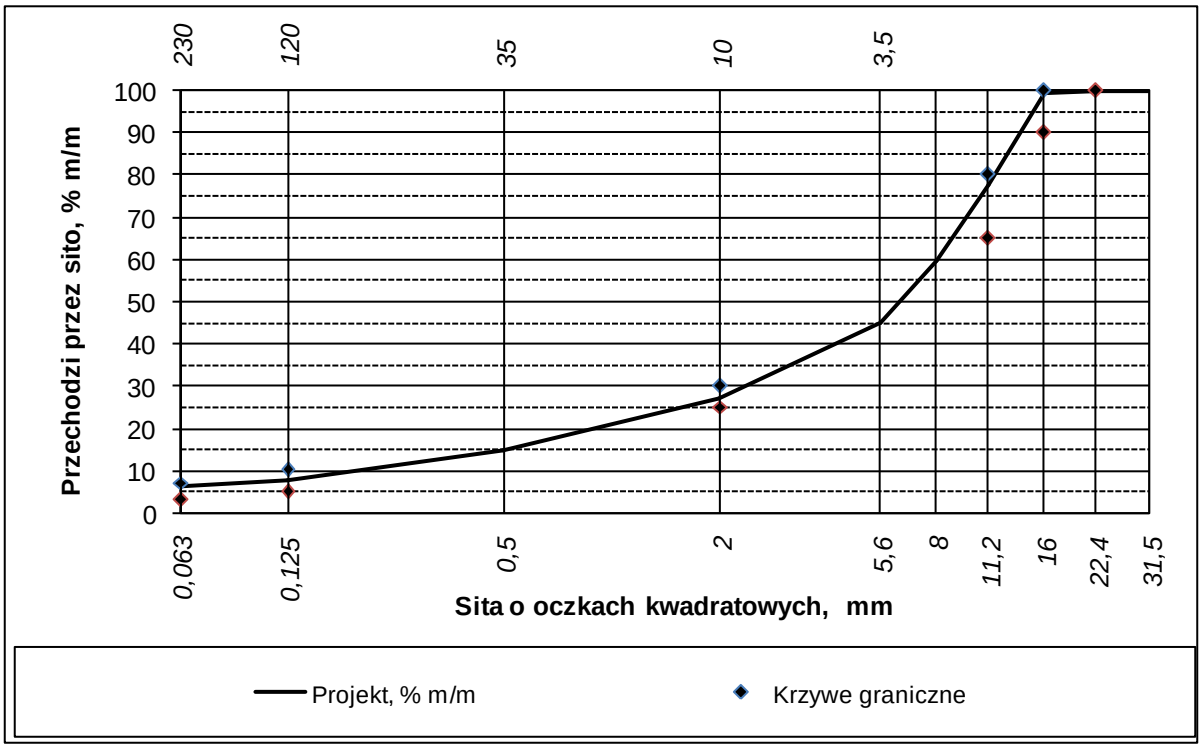
Skład zaprojektowanego betonu asfaltowego o uziarnieniu do 16 mm z wypełniaczem wapiennym i skład mieszanki SMA z wypełniaczem wapiennym przedstawiono w poniższych tablicach i na rysunkach. Skład i uziarnienie betonu asfaltowego zestawiono w tablicach 11 i 12, natomiast skład i uziarnienie SMA zestawiono w tablicach 13 i 14. Wykresy krzywych uziarnienia przedstawiono na rysunku 2 dla BA i na rysunku 3 dla SMA. Szczegółowe wartości i ilości składników przedstawiono w receptach laboratoryjnych znajdujących się w Załączniku 3. Zestawiono tam również recepty na BA16 i SMA8 z mieszankami wypełniacza wapiennego i pyłu bazaltowego i granitowego.

Tablica 11. Skład mieszanki BA16

Składniki	MM % (m/m)	MMA % (m/m)
Mączka wapienna	6,0	5,75
Piasek łamany 0/2 mm	22,0	21,08
Bazalt 2/5 mm	13,0	12,45
Bazalt 5/8 mm	13,0	12,45
Bazalt 8/11 mm	20,0	19,16
Bazalt 11/16 mm	26,0	24,91
Granit 11/25 mm	6,0	5,75
Asfalt 35/50	–	4,2
SUMA	**100 %**	**100 %**

Tablica 12. Uziarnienie mieszanki BA16

Wymiar oczka sita # mm	Odsiew % m/m	Przesiew % m/m	Punkty graniczne % m/m	
			dolne	górne
22,4		100,0	–	100
16	0,7	99,3	100	90
11,2	21,8	77,5	80	65
8	18,1	59,4	–	–
5,6	14,5	44,9	–	–
2	18,0	27,0	30	25
0,5	12,1	14,9	–	–
0,125	7,5	7,4	10	5
0,063	1,1	6,3	7	3
< 0,063	6,3		–	–



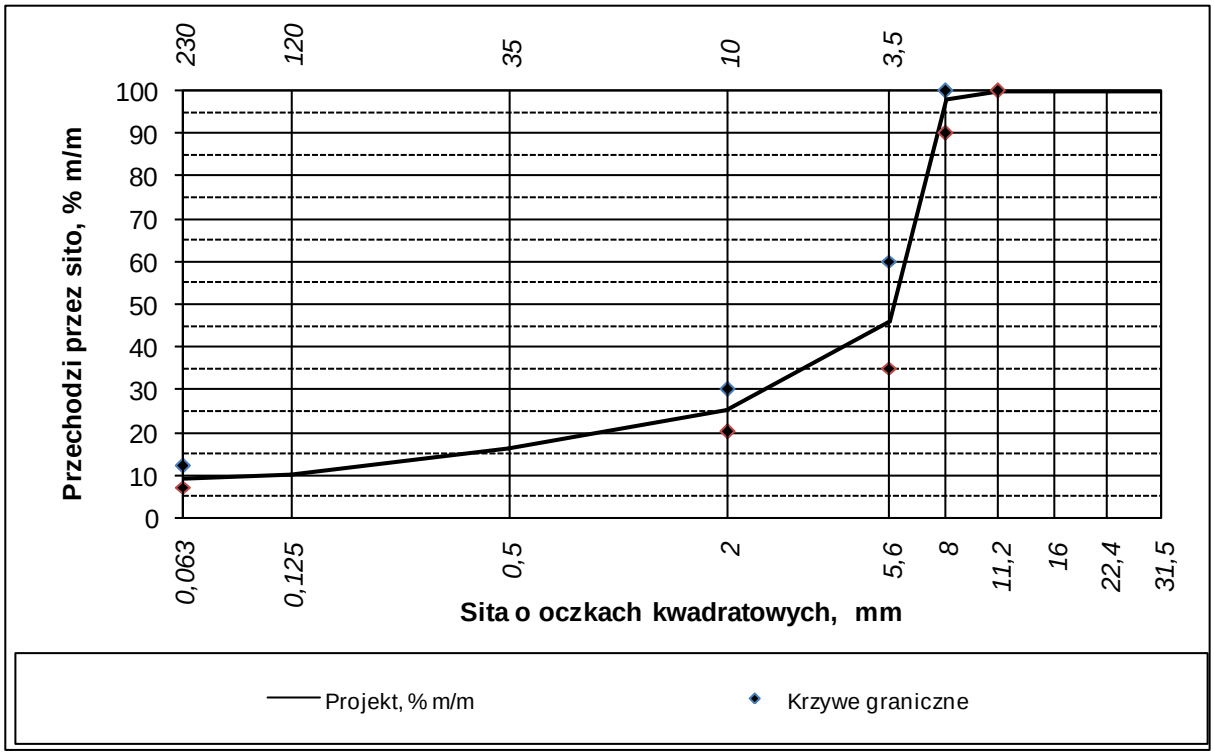
Rysunek 2. Krzywa uziarnienia mieszanki BA16

Tablica 13. Skład mieszanki SMA8

Składniki	**MM % (m/m)**	**MMA % (m/m)**
Mączka wapienna	9,0	8,38
Piasek łamany 0/2 mm	17,0	15,83
Bazalt 5/8 mm	74,0	68,89
Asfalt 35/50	–	6,60
SUMA	**100 %**	**100 %**

Tablica 14. Uziarnienie mieszanki SMA8

Wymiar oczka sita # mm	Odsiew % m/m	Przesiew % m/m	Punkty graniczne % m/m	
			dolne	górne
22,4	–	100,0	–	–
16	–	100,0	–	–
11,2	–	100,0	–	100
8	2,0	98,0	100	90
5,6	51,9	46,1	60	35
2	21,2	24,9	30	20
0,5	8,9	16,0	–	–
0,125	5,9	10,2	–	–
0,063	1,1	9,1	12	7
< 0,063	9,1	–	–	–



Rysunek 3. Krzywa uziarnienia mieszanki SMA8

Na zaprojektowanych mieszankach mineralno-asfaltowych wykonane zostały badania cech fizycznych, takich jak gęstość, gęstość objętościowa oraz zawartość wolnych przestrzeni. Wyniki dla BA16 przedstawiono w tablicy 15, natomiast wyniki dla SMA8 zawiera tablica 16.

Tablica 15. Właściwości fizyczne próbek Marshalla z mieszanki BA16

Rodzaj wypełniacza w mieszance	Gęstość g/cm^3	Gęstość objętościowa g/cm^3	Zawartość asfaltu % (m/m)	Zawartość wolnych przestrzeni % (v/v)	Parametry Marshalla	
					Stabilność kN	Odkształcenie mm
100% WW	2,701	2,583	4,2	4,4	11,6	3,1
50% WW + 50% PB	2,707	2,589	4,3	4,4	11,6	3,2
50% WW + 50% PG	2,686	2,565	4,4	4,5	11,6	3,2

Tablica 16. Właściwości fizyczne próbek Marshalla z mieszanki SMA8

Rodzaj wypełniacza w mieszance	Gęstość g/cm3	Gęstość objętościowa g/cm3	Zawartość asfaltu % (m/m)	Zawartość wolnych przestrzeni % (v/v)
100% WW	2,591	2,498	6,6	3,6
50% WW + 50% PB	2,600	2,508	6,6	3,5
50% WW + 50% PG	2,583	2,489	6,7	3,6

6.3) Wyniki badań mieszanek mineralno-asfaltowych i ich analiza

6.3.1) Ogólne

Celem badań mieszanek mineralno-asfaltowych było sprawdzenie zachowania się mieszanki po dodaniu do niej takiego wypełniacza, w skład którego wchodziły pyły z odpylania kruszyw. Badaniom poddano również mieszanki, w których wypełniaczem była tylko mączka wapienna. Następnie dokonano analizy otrzymanych wyników i porównano jakość mieszanek zawierających jako wypełniacz tylko mączkę wapienną i jakość mieszanek, w których wypełniaczem była mączka wapienna połączona z pyłem granitowym lub bazaltowym. Analizy dokonano dla każdego oznaczenia oddzielnie i przedstawiono w poniższych podpunktach.

Na zaprojektowanych mieszankach mineralno-asfaltowych zostały wykonane badania cech funkcjonalnych. Na betonie asfaltowym o uziarnieniu do 16 mm oznaczono odporność na koleinowanie i zmęczenie oraz wodoodporność. Na mieszance SMA o uziarnieniu do 8 mm zbadano odporność na koleinowanie, spękania niskotemperaturowe oraz wodoodporność.

W tablicach 17, 18 i 19 przedstawiono wyniki badań odporności na działanie wody próbek mieszanki BA16, natomiast w tablicy 20, 21 i 22 wyniki badania próbek z mieszanki SMA.

Wyniki badania odporności na koleinowanie przedstawiono w tablicach 23 i 24, odpowiednio dla betonu asfaltowego i SMA. Przyrosty głębokości kolein w próbkach tych mieszanek zobrazowano na rysunkach 4, 5 i 6 dla betonu asfaltowego i na rysunkach 7, 8 i 9 dla mieszanki SMA.

Na próbkach z betonu asfaltowego wykonano oznaczenie odporności na zmęczenie i zespolonego modułu sztywności. Wyniki przedstawiono w tablicy 25 oraz na rysunkach 10, 11 i 12. Próbki mieszanki SMA zostały poddane badaniu odporności na spękania niskotemperaturowe metodą TSRST (badanie wytrzymałości na rozciąganie termiczne przy ograniczonym odkształceniu). Wyniki tego badania liczbowo zostały zawarte w tablicach 26, 27 i 28, natomiast graficznie na rysunkach 13, 14 i 15.

6.3.2) Wodoodporność

Badania odporności na działanie wody zostały wykonane na wszystkich mieszankach BA16 oraz SMA8. Wymagania odnośnie tej właściwości zaczerpnięte zostały z „Wymagań Technicznych – Nawierzchnie Asfaltowe Drogowe i Lotniskowe – WT Nawierzchnie Asfaltowe DiL – 2007”. Właściwość ta jest definiowana jako stosunek wytrzymałości na rozciąganie pośrednie próbek kondycjonowanych w wodzie do wytrzymałości na rozciąganie pośrednie próbek kondycjonowanych w powietrzu.

Tablica 17. Wodoodporność ITSR mieszanki BA16 z wypełniaczem wapiennym

Symbol i rodzaj próbki	**ITS_w kPa**	**ITS_d kPa**	**ITSR %**
1W – próbka mokra	2192,418	–	103,3
2W – próbka sucha	–	1956,546	
3W – próbka sucha	–	1994,409	
4W – próbka sucha	–	2006,757	
5W – próbka mokra	1998,167	–	
6W – próbka mokra	1961,430	–	

Tablica 18. Wodoodporność ITSR mieszanki BA16 z pyłem bazaltowym

Symbol i rodzaj próbki	ITS_w kPa	ITS_d kPa	ITSR %
1B – próbka mokra	2157,992	–	108,5
2B – próbka sucha	–	2095,439	
3B – próbka sucha	–	1876,168	
4B – próbka mokra	2351,303	–	
5B – próbka sucha	–	1920,420	
6B – próbka mokra	1880,910	–	

Tablica 19. Wodoodporność ITSR mieszanki BA16 z wypełniaczem granitowym

Symbol i rodzaj próbki	ITS_w kPa	ITS_d kPa	ITSR %
1G – próbka mokra	1877,501	–	93,2
2G – próbka sucha	–	1948,178	
3G – próbka mokra	1938,671	–	
4G – próbka sucha	–	2006,721	
5G – próbka mokra	2157,194	–	
6G – próbka sucha	–	2453,832	

Tablica 20. Wodoodporność ITSR mieszanki SMA8 z wypełniaczem wapiennym

Symbol i rodzaj próbki	ITS_w kPa	ITS_d kPa	ITSR %
1W – próbka mokra	1493,245	–	116,3
2W – próbka mokra	1456,246	–	
3W – próbka mokra	1494,715	–	
4W – próbka sucha	–	1253,087	
5W – próbka sucha	–	1285,718	
6W – próbka sucha	–	1283,367	

Tablica 21. Wodoodporność ITSR mieszanki SMA8 z pyłem bazaltowym

Symbol i rodzaj próbki	ITS_w kPa	ITS_d kPa	ITSR %
1B – próbka mokra	1417,881	–	115,0
2B – próbka sucha	–	1229,338	
3B – próbka mokra	1396,885	–	
4B – próbka sucha	–	1267,601	
5B – próbka sucha	–	1270,917	
6B – próbka mokra	1516,445	–	

Tablica 22. Wodoodporność ITSR mieszanki SMA8 z wypełniaczem granitowym

Symbol i rodzaj próbki	ITS_w kPa	ITS_d kPa	ITSR %
1G – próbka mokra	1395,010	–	98,6
2G – próbka mokra	1470,237	–	
3G – próbka mokra	1449,941	–	
4G – próbka sucha	–	1469,655	
5G – próbka sucha	–	1395,380	
6G – próbka sucha	–	1511,990	

W przypadku badanego betonu asfaltowego do warstwy wiążącej wymagane jest, aby stosunek wytrzymałości na rozciąganie pośrednie próbek kondycjonowanych w wodzie do wytrzymałości na rozciąganie pośrednie próbek kondycjonowanych w powietrzu procentowo nie był mniejszy niż 80 % ($ITSR_{80}$). Wszystkie badane betony asfaltowe spełniły to wymaganie. Najwyższą odporność na wodę, wyznaczoną poprzez ITSR = 108,5 %, wykazały próbki betonu asfaltowego, w którym wypełniaczem była mączka wapienna połączona z pyłem bazaltowym. Nieco niższą odpornością charakteryzował się beton asfaltowy z dodatkiem wypełniacza wapiennego osiągając 103,3 %. Najniższym stosunkiem wytrzymałości odznaczał się natomiast beton z dodatkiem do wypełniacza pyłu granitowego (ITSR = 93,2 %).

W przypadku mieszanki SMA8 do warstwy ścieralnej wymaganie co do odporności na działanie wody wynosiło 90 % ($ITSR_{90}$). Wszystkie mieszanki spełniły to wymaganie i charakteryzowały się odpowiednimi właściwościami

wytrzymałościowymi po długotrwałym działaniu wody. Najwyższą odpornością na działanie wody charakteryzowała się mieszanka, w której mączka wapienna pełniła funkcję wypełniacza Stosunek wytrzymałości na rozciąganie pośrednie wyniósł 116,3 %. Nieco niższą wodoodpornością charakteryzowała się SMA, w której wypełniaczem była mieszanka mączki wapiennej i pyłu bazaltowego (ITSR = 115,0 %)., natomiast najniższą SMA z dodatkiem pyłu granitowego. W tym przypadku wartość liczbowa wodoodporności nie przekraczała 98,6 %.

Na podstawie przeprowadzonych badań wodoodporności można stwierdzić, że zauważalny jest wpływ rodzaju zastosowanego wypełniacza w mieszance mineralni-asfaltowej na jej właściwości wytrzymałościowe. Największy wpływ wody na mieszankę można zauważyć w przypadku zastosowania pyłu granitowego. W obu przypadkach, zarówno w SMA, jak i w betonie asfaltowym, po zastosowaniu wypełniacza w postaci mieszanki mączki wapiennej i pyłu granitowego wskaźnik ITSR jest najniższy w porównaniu do mieszanek z innymi wypełniaczami. Pył granitowy obniża stosunek wytrzymałości próbek nasyconych wodą to tych przechowywanych w powietrzu o ponad 10 % w przypadku BA i o prawie 18 % w przypadku SMA, w porównaniu do próbek mieszanek z tradycyjnym wypełniaczem w postaci mączki wapiennej. W przypadku obu rodzajów mieszanek z dodatkiem pyłu granitowego wystąpił spadek wytrzymałości na rozciąganie pośrednie grupy próbek kondycjonowanych w wodzie. W przypadku mieszanek z dodatkiem pyłu bazaltowego bądź z samym wypełniaczem wapiennym nastąpił wzrost wytrzymałości na rozciąganie pośrednie grupy próbek kondycjonowanych w wodzie.

Zjawisko to można tłumaczyć osłabieniem właściwości adhezyjnych lepiszcza asfaltowego przez pył granitowy. Wskazane byłoby przeprowadzenie dodatkowych badań przyczepności lepiszcza do kruszywa, które potwierdziłyby ten wniosek. Pomimo, że mieszanki z pyłem granitowym spełniły wymagania, to jednak w przypadku mieszanki SMA uzyskany wynik był bliski wymaganej wartości granicznej.

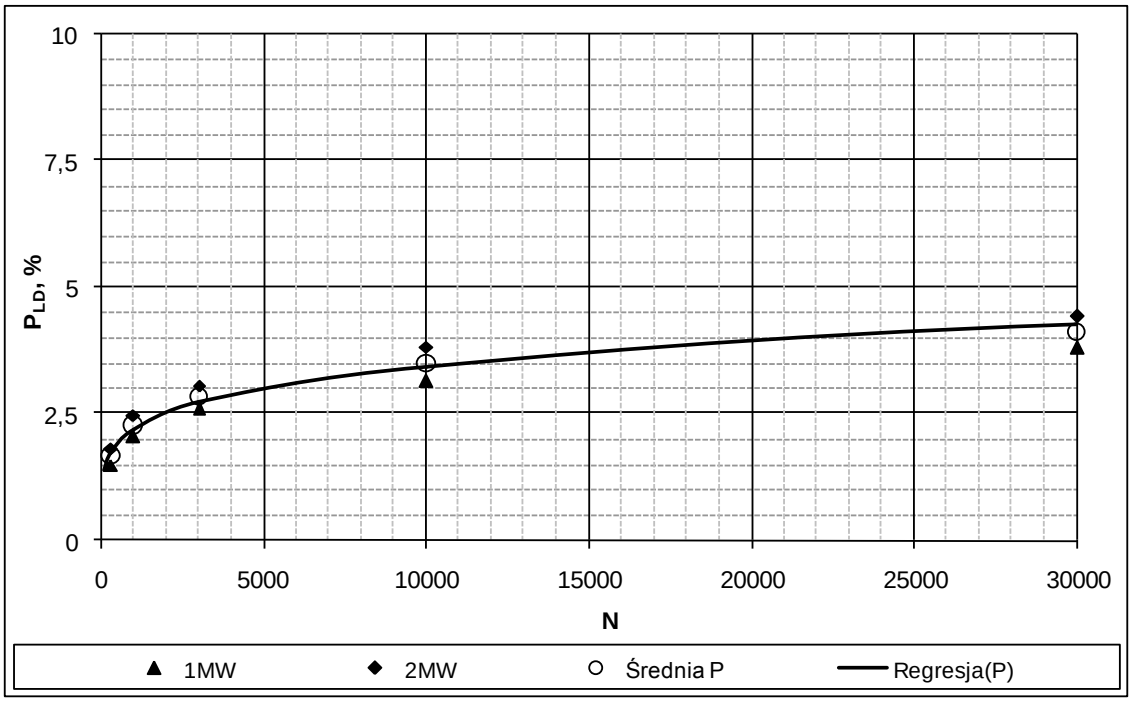
6.3.3) Odporność na koleinowanie

Badaniu odporności na koleinowanie został poddany zarówno beton asfaltowy o uziarnieniu do 16 mm, jak również mieszanka SMA8 do warstwy ścieralnej.

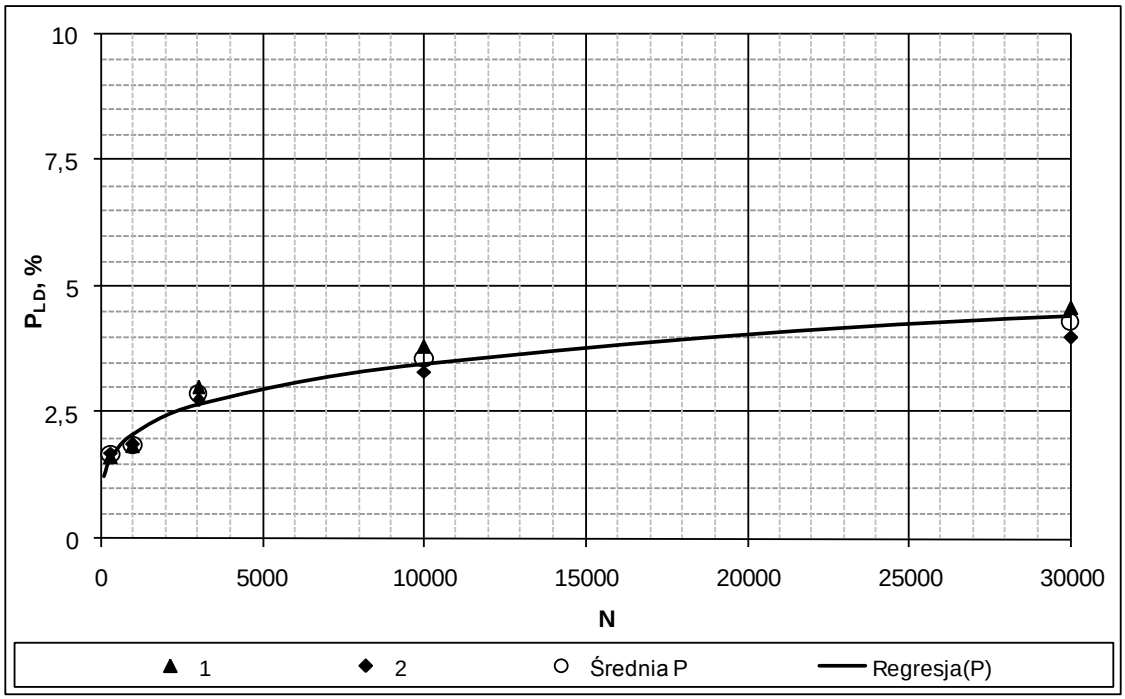
Miarą odporności na koleinowanie mieszanki mineralno-asfaltowej była głębokość koleiny w próbce wyrażona w procentach w stosunku do grubości próbki po określonej liczbie cykli przejazdów koła.

Tablica 23. Wyniki badania koleinowania mieszanki BA16 do warstwy wiążącej

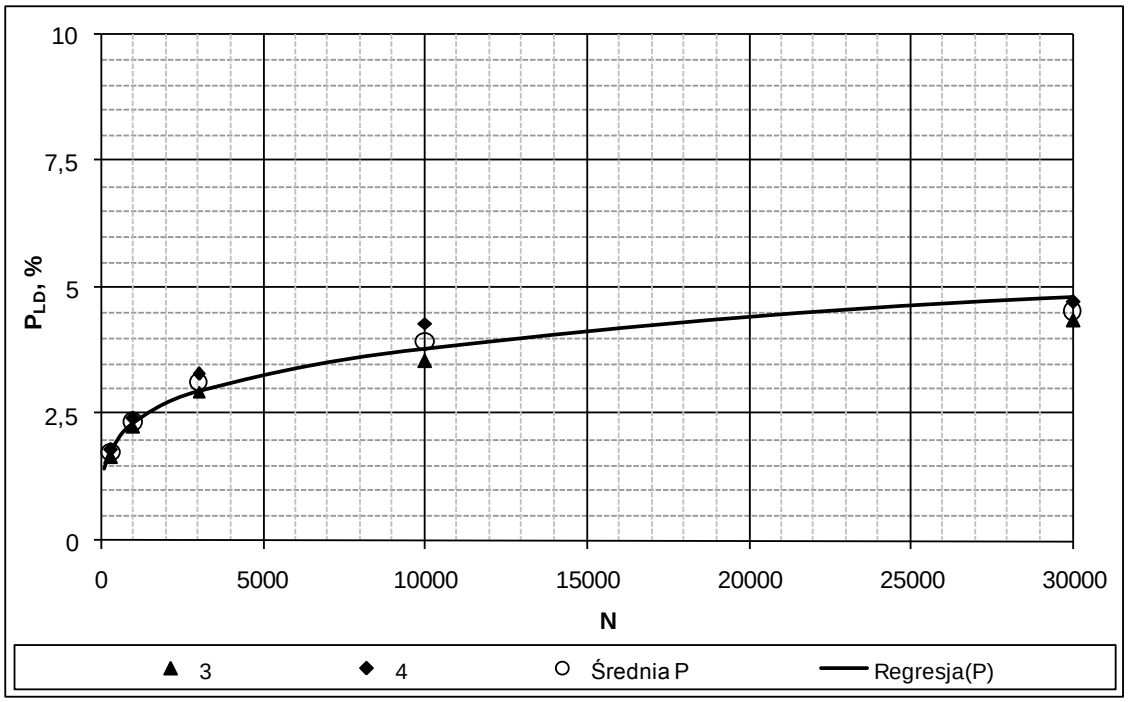
Rodzaj wypełniacza w mieszance	Gęstość objętościowa g/cm^3	Zawartość wolnych przestrzeni % (v/v)	Wyniki koleinowania, %	Średni wynik koleinowania, %
100% WW	2,529	6,4	3,8	4,1
	2,538	6,0	4,4	
50% WW + 50% PB	2,539	6,2	4,6	4,3
	2,541	6,1	4,0	
50% WW + 50% PG	2,524	6,0	4,3	4,5
	2,512	6,5	4,7	



Rysunek 4. Przebieg badania koleinowania próbek wykonanych z BA16 z wypełniaczem wapiennym



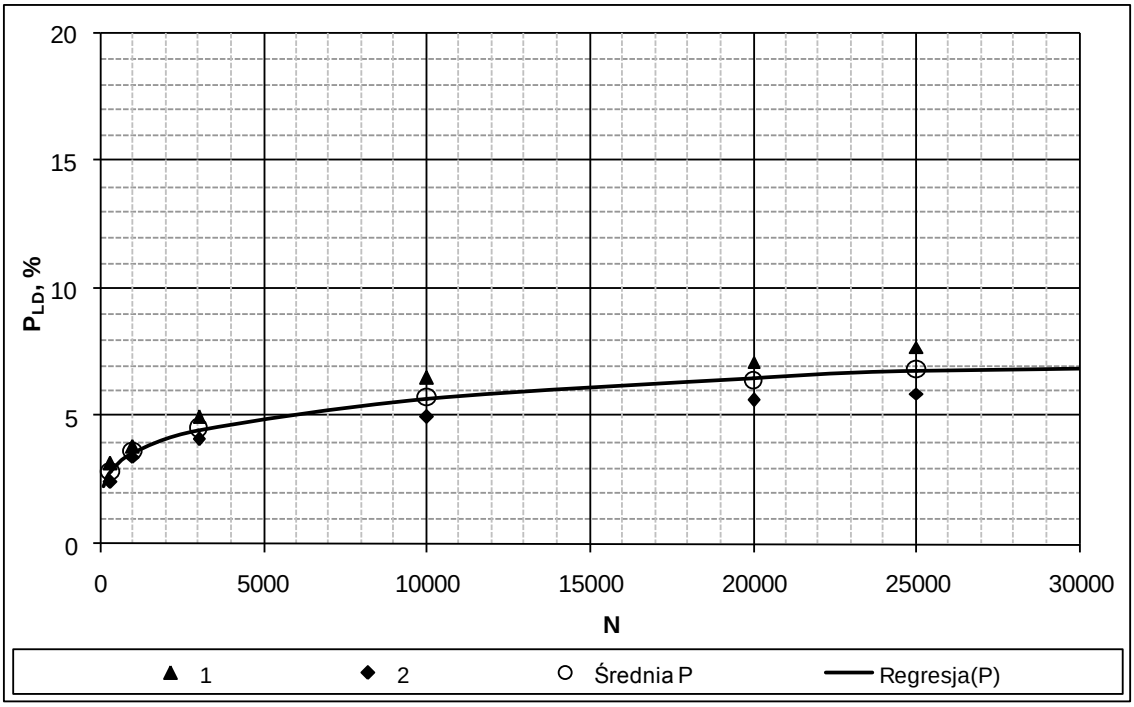
Rysunek 5. Przebieg badania koleinowania próbek wykonanych z BA16 z dodatkiem pyłu bazaltowego



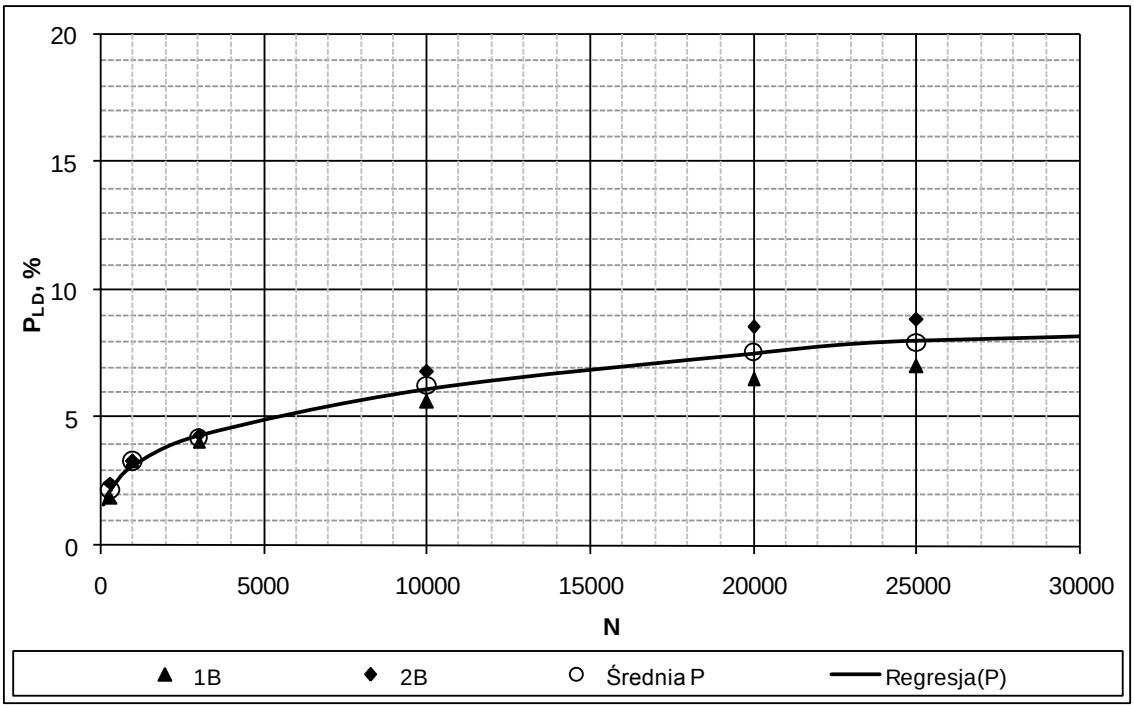
Rysunek 6. Przebieg badania koleinowania próbek wykonanych z BA16 z dodatkiem pyłu granitowego

Tablica 24. Wyniki badania koleinowania mieszanki SMA8 do warstwy ścieralnej

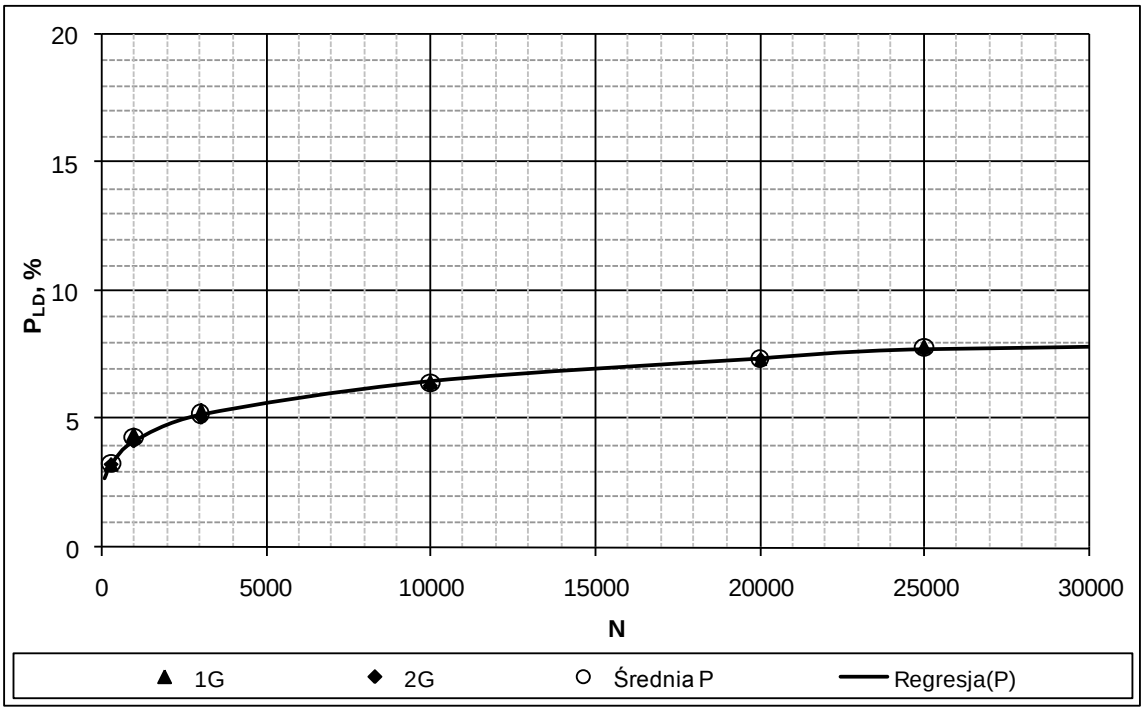
Rodzaj wypełniacza w mieszance	Gęstość objętościowa g/cm^3	Zawartość wolnych przestrzeni % (v/v)	Wyniki koleinowania, %	Średni wynik koleinowania %
100% WW	2,515	2,9	6,5	5,8
	2,517	2,9	5,0	
50% WW + 50% PB	2,513	3,3	5,7	6,2
	2,518	3,2	6,8	
50% WW + 50% PG	2,481	3,9	6,4	6,4
	2,487	3,7	6,3	



Rysunek 7. Przebieg badania koleinowania próbek wykonanych z SMA8 z wypełniaczem wapiennym



Rysunek 8. Przebieg badania koleinowania próbek wykonanych z SMA8 z dodatkiem pyłu bazaltowego



Rysunek 9. Przebieg badania koleinowania próbek wykonanych z BA16 z dodatkiem pyłu granitowego

W przypadku betonu asfaltowego wymaganie stawiane przez „Zalecenia materiałowe i technologiczne nawierzchni asfaltowych o zwiększonej trwałości (ZMT-

NAZT 2006)” mówiło o dopuszczalnej głębokości koleiny 5 % po 30 000 przejazdów obciążenia. Wszystkie mieszanki BA spełniły to wymaganie. Beton asfaltowy zawierający wypełniacz w postaci mączki wapiennej osiągnął 4,1 %. Beton asfaltowy, w którym wypełniaczem była mieszanka mączki wapiennej i pyłu bazaltowego, osiągnął 4,3 %. Najsłabiej natomiast wypadła mieszanka BA z dodatkiem pyłu granitowego. Głębokość koleiny wyniosła średnio 4,5 %. Różnice pomiędzy poszczególnymi wynikami nie były znaczne. Najwyższą odporność na koleinowanie wykazała mieszanka, w której wypełniaczem była mączka wapienna. Nie oznacza to jednak nieprzydatności innych wypełniaczy. Zarówno mieszanka wypełniacza z pyłem granitowym, jak i bazaltowym dała niższy, ale bardzo podobny wynik. Można więc stwierdzić, że zastąpienie w mieszance mineralno-asfaltowej BA wypełniacza wapiennego innym wypełniaczem, w tym przypadku 50 % dodatkiem pyłu granitowego lub bazaltowego daje mieszankę o bardzo wysokiej, porównywalnej odporności na koleinowanie.

W przypadku mieszanki SMA wnioski były podobne. Wymaganiem była głębokość koleiny nie przekraczająca 10 % po 10 000 cykli. Wszystkie mieszanki SMA spełniły to wymaganie. Podobnie jak w przypadku BA, najwyższą odporność osiągnęła mieszanka SMA, której mączka wapienna stanowiła wypełniacz. Głębokość koleiny w próbce nie przekroczyła 5,8 %. Mieszanki, w których wypełniacz wapienny połączony był z pyłem bazaltowym lub granitowym, charakteryzowały się mniejszą odpornością na koleinowanie. W przypadku mieszanki z dodatkiem pyłu bazaltowego było to 6,2 %, natomiast przy dodatku pyłu graniowego – 6,4 %. Głębokość koleiny była więc większa o 0,6 % od mieszanki z mączką wapienną. W przypadku mieszanki typu SMA większe procentowo głębokości koleiny nie dyskwalifikują przydatności wypełniaczy mieszanych w MMA. Zarówno mieszanka wypełniacza z pyłem granitowym, jak i bazaltowym dała niższy, ale bardzo podobny wynik koleinowania. Można więc stwierdzić, że zastąpienie w mieszance mineralno-asfaltowej SMA wypełniacza wapiennego innym wypełniaczem, w tym przypadku 50 % dodatkiem pyłu granitowego lub bazaltowego daje mieszankę o bardzo wysokiej, porównywalnej odporności na powstawanie trwałych deformacji lepko-plastycznych.

Na podstawie przeprowadzonych badań odporności na koleinowanie można stwierdzić, że zastosowanie pyłów z odpylania kruszyw na wpływ na odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na powstawanie deformacji lepko-plastycznych. Po

dodaniu do wypełniacza pyłu, mieszanka staje się nieco mniej odporna na powstawanie kolein. Staje się bardziej plastyczna. Jest to jednak niewielka różnica, zwłaszcza w przypadku betonu asfaltowego do warstwy wiążącej. Tam różnica w głębokości koleiny wahała się w okolicach 0,2÷0,4 %. Nieco większe różnice odnotowano w przypadku mieszanki SMA. W mieszance z dodatkiem pyłu bazaltowego wynik badania był o około 0,6 % wyższy.

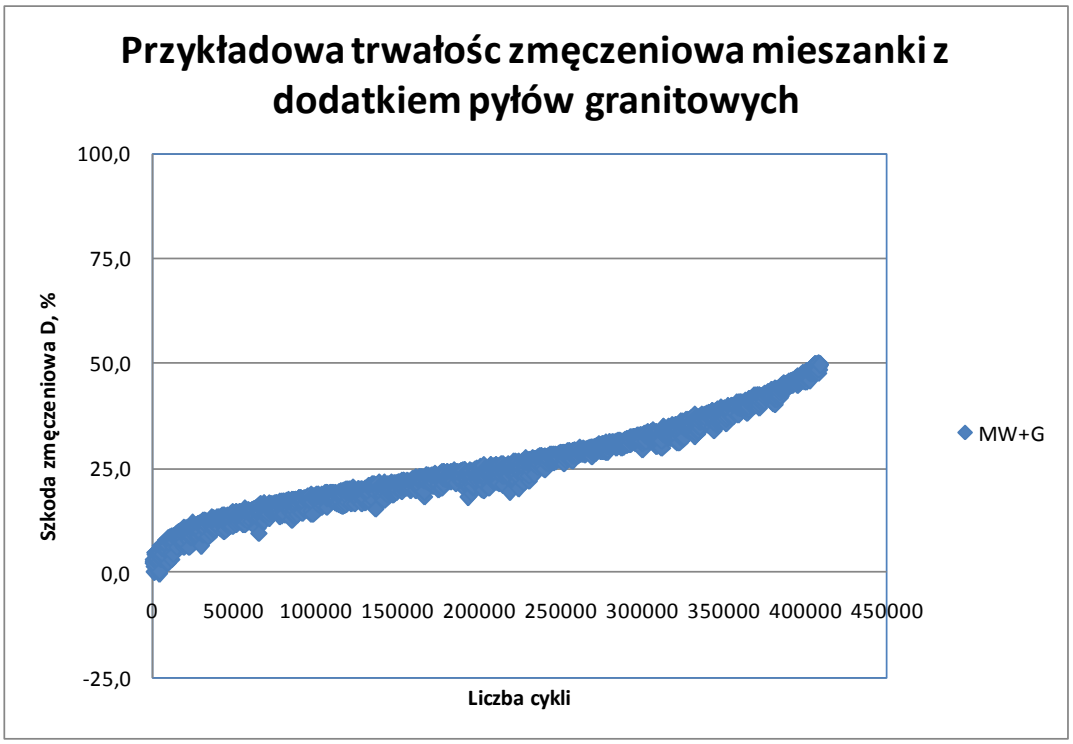
6.3.4) Zmęczenie i zespolony moduł sztywności

W aparacie MTS przeprowadzono badanie odporności na zmęczenie oraz oznaczenie zespolonego modułu sztywności. Wyniki przedstawiono w tablicy 25, natomiast przebieg badania zmęczenia odtworzono na wykresach na rysunkach 10, 11 i 12.

Tablica 25. Wyniki badania odporności zespolonego modułu sztywności

Rodzaj mieszanki	Rodzaj wypełniacza w mieszance	Zespolony moduł sztywności, MPa
BA16 do warstwy wiążącej	100% WW	15 440
	50% WW + 50% PB	15 186
	50% WW + 50% PG	14 968

Rysunek 10. Przebieg badania zmęczenia próbek wykonanych z BA16



Rysunek 11. Przebieg badania zmęczenia próbek wykonanych z BA16

Rysunek 12. Przebieg badania zmęczenia próbek wykonanych z BA16

Na podstawie przeprowadzonych badań zmęczeniowych nie można obiektywnie porównać trwałości zmęczeniowej wykonanych próbek. Pewne jest, że żadna mieszanka nie spełniła kryterium zmęczeniowego, czyli spadku modułu sztywności o mniej niż 50 % po 1 mln cykli. Jedynie w przypadku 2 próbek na 12 zbadanych uzyskano spełnienie kryterium trwałości zmęczeniowej. Spadek modułu sztywności o 50 % w pozostałych próbkach następował po ok. 200 000 – 500 000 cykli obciążenia.

W przypadku zespolonego modułu sztywności najsztywniejsze okazały się próbki betonu asfaltowego z czystym wypełniaczem wapiennym (15 440 MPa), natomiast pozostałe mieszanki z dodatkiem pyłu bazaltowego i granitowego uzyskały nieco niższe średnie wartości modułu sztywności (odpowiednio 15 186 i 14 968 MPa). Są to jednak bardzo nieznaczne różnice.

6.3.5) Spękania niskotemperaturowe

Spękania niskotemperaturowe należą do spękań indukowanych termicznie. Obniżenie temperatury do wartości ujemnych powoduje zesztywnienie warstwy, przejście ze stanu lepko-plastycznego w stan kruchy, sprężysty. Pojawiają się wówczas naprężenia rozciągające, których czas relaksacji w warunkach niskich temperatur jest wyraźnie wydłużony. Obniżenie temperatury oraz brak możliwości swobodnych

odkształceń powoduje wzrost tych naprężeń. Wytrzymałość mieszanki mineralno-asfaltowej na rozciąganie początkowo rośnie, ale potem zaczyna spadać. W momencie przekroczenia wytrzymałości na rozciąganie przez naprężenia rozciągające dochodzi do powstania spękań poprzecznych warstw nawierzchni. [7]

Wynikiem badania odporności na pękania niskotemperaturowe jest naprężenie przy zniszczeniu oraz temperatura pęknięcia. Na rysunkach 13, 14 i 15 przedstawiono porównanie wykresów średnich wyników zależności naprężenia od temperatury w próbkach SMA z różnymi wypełniaczami.

Tablica 26. Wyniki badania oporności na spękania niskotemperaturowe mieszanki SMA8 z wypełniaczem wapiennym

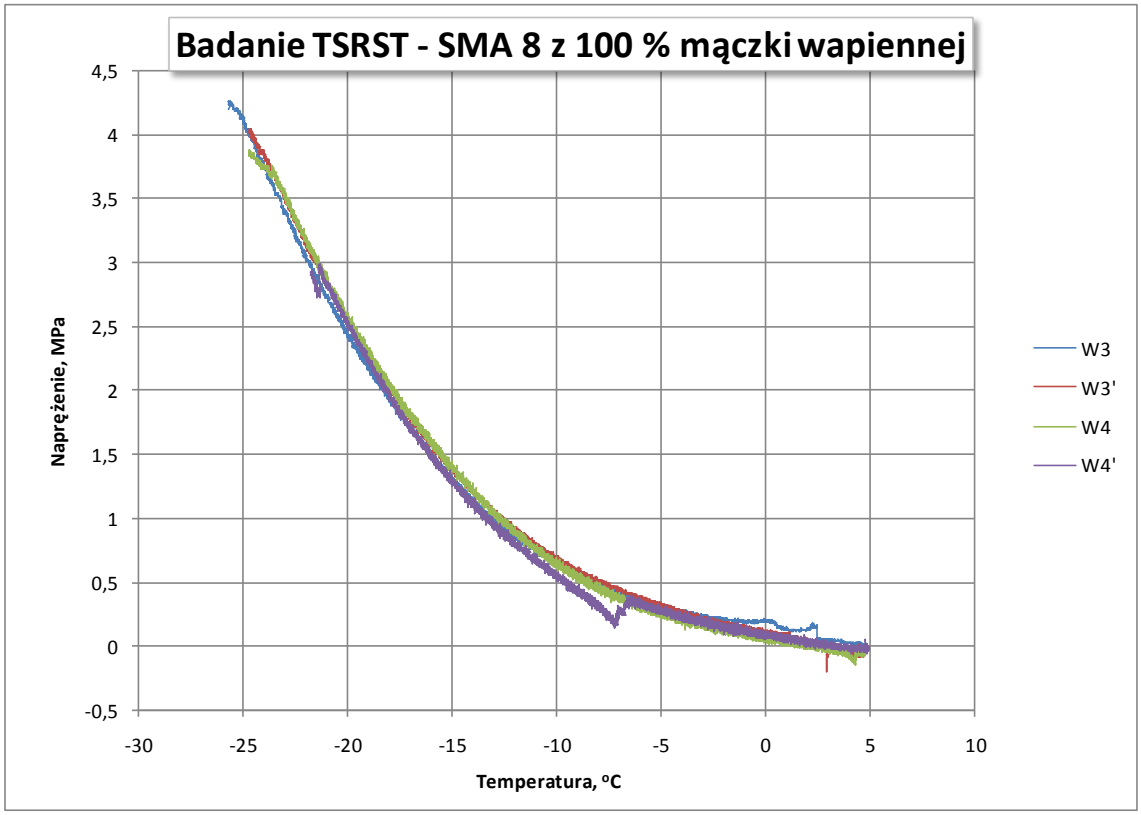
Symbol próbki	Temperatura pęknięcia, ˚C	Naprężenie niszczące, MPa
W3	-25,62	4,259
W3’	-24,62	4,042
W4	-24,70	3,882
W4’ *)	-21,47	2,988
Średnia	**-24,10**	**3,793**
Odchylenie standardowe	**1,813**	**0,558**

Tablica 27. Wyniki badania oporności na spękania niskotemperaturowe mieszanki SMA8 z dodatkiem pyłu bazaltowego

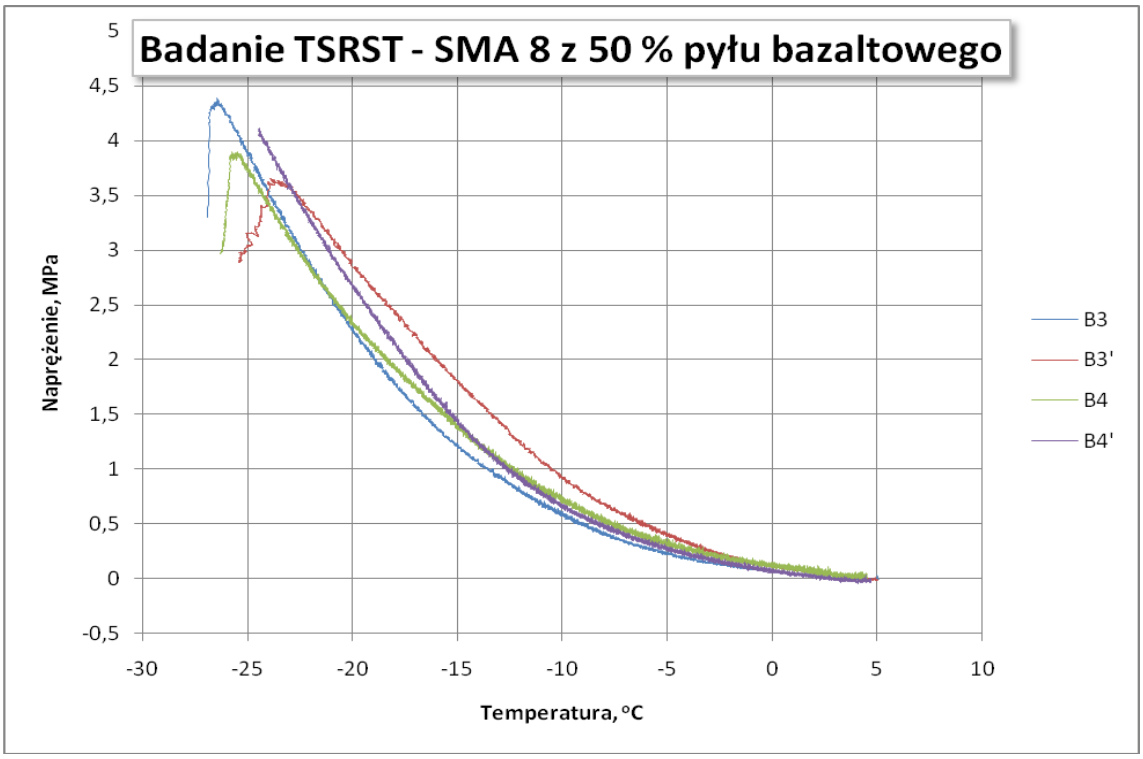
Symbol próbki	Temperatura pęknięcia, ˚C	Naprężenie niszczące, MPa
B3	-26,41	4,393
B3’	-23,90	3,654
B4	-25,43	3,902
B4’	-24,39	4,109
Średnia	**-25,03**	**4,015**
Odchylenie standardowe	**1,118**	**0,313**

Tablica 28. Wyniki badania oporności na spękania niskotemperaturowe mieszanki SMA8 z dodatkiem pyłu granitowego

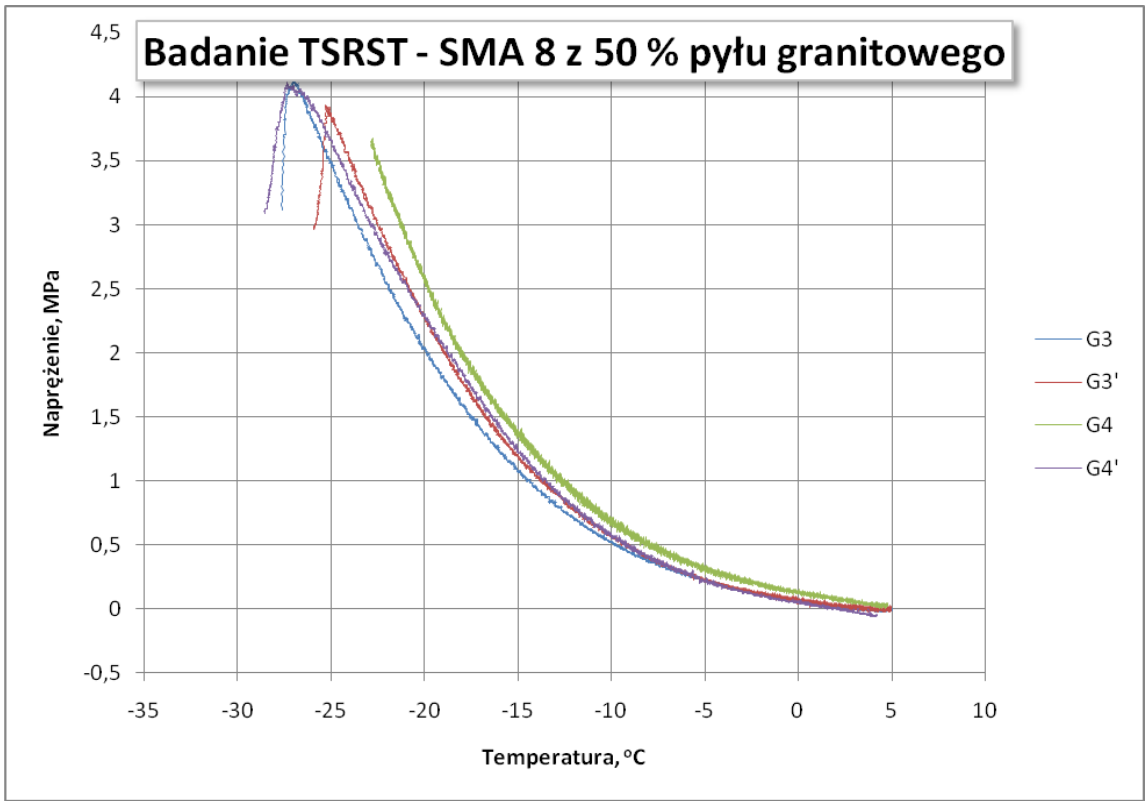
Symbol próbki	Temperatura pęknięcia, ˚C	Naprężenie niszczące, MPa
G3	-26,88	4,128
G3’	-25,27	3,939
G4	-22,73	3,674
G4’	-27,29	4,114
Średnia	**-25,54**	**3,964**
Odchylenie standardowe	**2,068**	**0,211**



Rysunek 13. Przebieg badania dla próbek z SMA8 z wypełniaczem wapiennym



Rysunek 14. Przebieg badania dla próbek z SMA8 z pyłem bazaltowym



Rysunek 15. Przebieg badania dla próbek z SMA8 z pyłem granitowym

Podczas badania rejestrowana jest temperatura, siła rozciągająca oraz odkształcenie. Koniec badania następuje w momencie pęknięcia próbki. Wynikiem badania jest naprężenie przy zniszczeniu oraz temperatura pęknięcia.

Temperatura pęknięcia próbek z mieszanki SMA8 wahała się w przedziale od -27,3 °C do -21,47 °C. Najwyższą odporność na skurcz termiczny wykazała mieszanka SMA8 z wypełniaczem wapiennym połączonym z pyłem granitowym (średnia temperatura: –25,54 °C). Najniższą odpornością wykazały się próbki SMA8 z wypełniaczem wapiennym, pękając w temperaturze –24,98 °C.

Największe naprężenie niszczące spośród mieszanek SMA8 wykazała mieszanka z mączką wapienną – 4,061 MPa. Mniejsze naprężenia osiągnęła mieszanka z dodatkiem pyłu bazaltowego, a najniższe SMA z dodatkiem pyłu granitowego – 3,964 MPa.

Z przeprowadzonych badań wynika, że najsztywniejszą i przy tym najmniej odporną na spękania niskotemperaturowe była mieszanka z samym wypełniaczem wapiennym. Pozostałe mieszanki odznaczały się niższą temperaturą pękania i wyższymi maksymalnymi naprężeniami przy rozciąganiu. Potwierdzają się zatem wyniki bania koleinowania, w których również zaobserwowano najsztywniejsza charakterystykę mieszanki na wypełniaczu wapiennym.

Z wcześniej prowadzonych w IBDiM badań wynikało, że na właściwości niskotemperaturowe największy wpływ ma rodzaj i ilość asfaltu. Skład ziarnowy oraz rodzaj kruszywa miał minimalny wpływ na uzyskiwane wyniki. Tym należy tłumaczyć nieznaczne różnice w wynikach badań uzyskane w ramach niniejszej pracy. Niemniej jednak różnice są możliwe do zaobserwowania.

7) Podsumowanie

Celem pracy badawczej o symbolu TN-240 było sprawdzenie możliwości stosowania materiałów odpadowych, jakimi są pyły pozostające z odpylania kruszyw, jako wypełniaczy w mieszankach mineralno-asfaltowych. Zbadano właściwości wypełniacza wapiennego oraz mieszanek wypełniacza wapiennego i pyłu z odpylania kruszywa. Badaniom poddano dwa rodzaje pyłów, z najczęściej stosowanych w drogownictwie kruszyw, granitu i bazaltu. Ustalono, że pyły zostaną wymieszane z mączką wapienną w różnym stosunku, a następnie zostaną sprawdzone pod kątem wymagań stawianych wypełniaczom przez normę PN-EN 13043. Przyjęto, że wypełniacze do badań będą składały się z 50% mączki wapiennej i 50 % pyłu oraz z

20 % mączki wapiennej i 80 % pyłu z odpylania kruszyw. Nie uwzględniono przypadku, w którym sam pył stanowiłby wypełniacz.

Następnie zaprojektowano mieszanki mineralno-asfaltowe z dodatkiem wypełniacza wapiennego oraz z dodatkiem mieszanek wypełniacza wapiennego i pyłu z odpylania kruszyw. Gotowe mieszanki poddano badaniom cech fizycznych i mechanicznych i na tej podstawie przeanalizowano przydatność pyłów będących odpadem z procesu odpylania kruszyw. Badania nie były przeprowadzane na mieszankach mineralno-asfaltowych, w których wypełniaczem byłby w 100 % pył z odpylania kruszyw. Badaniom nie zostały poddane również mieszanki zawierające wypełniacz w postaci 80% zawartości pyłu i 20 % zawartości materiału wapiennego. Było to spowodowane negatywnym wynikiem badań samego wypełniacza. Połączenie pyłu i maczki wapiennej w takim stosunku spowodowało niespełnienie przez niego wymagań normy PN-EN 13043:2004. Na tej podstawie taki rodzaj materiału nie był już brany pod uwagę jako potencjalny wypełniacz w mieszance mineralno-asfaltowej.

Na zaprojektowanych mieszankach mineralno-asfaltowych przeprowadzono oznaczenia cech fizycznych i funkcjonalnych. Na tej podstawie sprawdzano przydatność materiałów odpadowych w zastosowaniach w mieszankach mineralno-asfaltowych i stwierdzono:

- Wyniki badań wrażliwości próbek na wodę wykazały większą wodoodporność próbek mieszanek z pyłami bazaltowymi i wypełniaczem wapiennym. Mieszanki z pyłem granitowym odznaczały się niższą odpornością na działanie wody ale wszystkie badane próbki spełniły wymagania.
- Wyniki badań koleinowania wykazały najwyższą odporność na deformacje trwałe mieszanek opartych na czystym wypełniaczu wapiennym, natomiast dodatek pyłu bazaltowego i granitowego powodował niewielkie osłabienie odporności na deformacje lepko-plastyczne. Wszystkie mieszanki spełniły jednak postawione wymagania.
- Badania niskotemperaturowe potwierdziły przydatność pyłów (jako dodatku do wypełniacza do mieszanek mineralno-asfaltowych) pod względem odporności na niskie temperatury. W badaniach wykazano, że mieszanka wykonana z czystym wypełniaczem wapiennym pękała przy wyższych niż pozostałe mieszanki temperaturach, generując przy tym jednak najniższe naprężenia. Najwyższą

odpornością na niskie temperatury charakteryzowała się mieszanka z dodatkiem pyłu granitowego.

- W kwestii badań zmęczeniowych, uzyskane wyniki nie pozwoliły na jednoznaczne wyznaczenie mieszanki o najlepszych właściwościach zmęczeniowych. Na podstawie badania modułu sztywności stwierdzono, że największą sztywnością charakteryzowała się mieszanka mineralno-asfaltowa z zastosowanym czystym wypełniaczem wapiennym.

W rozważaniach pominięte zostało dosyć istotne zagadnienie, czyli „praktyczne" właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych. Chodzi tu przede wszystkim o zagęszczalność, urabialność, zmianę adhezji i kohezji mogące wystąpić po dodaniu wypełniaczy niewapiennych. Badania takie należałoby rozpocząć od badań w prasie żyratorowej, z których wynikałyby pierwsze wnioski dotyczące zagęszczalności i urabialności mieszanek z wypełniaczami niewapiennymi [8]. Zakresem pracy nie objęta była również współpraca z wytwórnią mas asfaltowych oraz wykonawcą, który dopiero w warunkach budowy mógłby określić przydatność mieszanek. Praktyczna wiedza z zastosowania danej mieszanki pozwoliłaby na pełne określenie jej przydatności przy budowie dróg i pozwoliłaby określić cechy, które na etapie standardowych badań laboratoryjnych nie były możliwe do ustalenia.

Skomentowania wymaga również uzyskana powtarzalność wyników. Nie wszystkie z przeprowadzonych badań odznaczały się zadowalającą powtarzalnością wyników. Niektóre badania należałoby ewidentnie powtórzyć w celu uzyskania bardziej spójnych wyników.

8) Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że dodatek pyłów z odpylania kruszyw wpływa na właściwości objętościowe i funkcjonalne mieszanki mineralno-asfaltowej. Dodatek pyłu wpływa zarówno na właściwości objętościowe mieszanek, gdyż zmienia procentową zawartość wolnych przestrzeni w zagęszczonej mieszance, jak również wpływa na parametry funkcjonalne mieszanki. Było to widoczne w wynikach badań laboratoryjnych. Różnice w odporności na koleinowanie, w odporności na działanie wody, odporności na zmęczenie i na pękania niskotemperaturowe były niekiedy znaczne. Nigdy jednak nie przekroczyły

dopuszczalnych wartości. W każdym przypadku zastosowanie pyłu osłabiło jedynie właściwości mieszanki, nie dyskwalifikowało jej jednak.

Przeprowadzone badania mączek wapiennych, pyłów i mieszanek mineralno-asfaltowych nie stanowiły podstawy do przeprowadzenia pełnej analizy problemu wypełniaczy. Nie można było bowiem przeprowadzić analizy przydatności pyłów jedynie na podstawie badań dwóch rodzajów mieszanek (BA i SMA) i dwóch materiałów odpadowych. Aby w pełni wyjaśnić zjawisko roli i znaczenia wypełniacza w MMA oraz ustalić zachowanie się pyłów lub innych materiałów należałoby wykonać badania w szerszym zakresie uwzględniając różne rodzaje pyłów (bazaltowe, granitowe, dolomitowe, itd.), różne rodzaje mieszanek (BA, SMA, MNU, AL, itd.) oraz różne ich przeznaczenie (warstwa ścieralna, wiążąca, podbudowa, itd.). Należałoby również zwiększyć ilość próbek poddawanych badaniom oraz przeprowadzić dodatkowe badania, m.in. w prasie żyratorowej, mające na celu porównanie sił występujących w mieszance mineralno-asfaltowej podczas zagęszczania.

9) Bibliografia

[1] - J. Judycki – „Niewłaściwe proporcje wypełniacz – asfalt w betonie asfaltowym możliwą przyczyną uszkodzeń nawierzchni" – Drogownictwo nr 10/2007

[2] – W. Płaza – „Poradnik drogowca – wypełniacz. Wypełniacze do mieszanek mineralno-asfaltowych" – Drogownictwo nr 10/2007

[3] - M. Danowski, K. Jabloński – „Rola wypełniacza mineralnego w mieszankach mineralno-asfaltowych i wykorzystanie pyłów z odpylania kuszyw" – Drogownictwo nr 11/2006,

[4] – K. Błażejowski, S. Styk – Technologia warstw asfaltowych, Nawierzchnie Asfaltowe – Poradnik, WKiŁ Warszawa 2004,

[5] – M. Iwański – Wpływ rodzaju materiału mineralnego na trwałość mieszanki SMA,

[6] – W. Bańkowski, R. Horodecka, A. Wróbel – „Ocena właściwości niskotemperaturowych mieszanek mineralno-asfaltowych" – Praca badawcza o symbolu TN-220, niepublikowana, wykonana na zlecenie GDDKiA,

[7] – W. Bańkowski, K. Mirski, D. Sybilski – „Ocena porównawcza wpływu zastosowania asfaltu drogowego produkowanego w PKN ORLEN S.A. oraz innych producentów na odporność niskotemperaturową nawierzchni drogowej" – Praca niepublikowana, wykonana na zlecenie Polskiego Koncernu Naftowego Orlen S.A.

[8] – J. Zawadzki, R. Mularzuk – „Wpływ sposobu zagęszczania próbek betonu asfaltowego i mieszanki SMA metodami laboratoryjnymi na ocenę właściwości fizyczno-wytrzymałościowych warstw nawierzchni wykonanych z tych mieszanek"

ZAŁĄCZNIK 1

WYNIKI BADAŃ WYPEŁNIACZA WAPIENNEGO

Materiał:	Wypełniacz wapienny
Oznaczenie:	1/W
Pochodzenie:	Lhoist Opolwap S.A.

Karta 1

Wyniki	**Uziarnienie**
Norma:	PN-EN 933-10 Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Część 10: Ocena zawartości drobnych cząstek. Uziarnienie wypełniaczy (przesiewanie w strumieniu powietrza)

Sucha masa próbki analitycznej:	M1 = 50,0 g

Wymiar otworu sita	Masa materiału pozostającego	Procent materiału pozostającego	Narastająco procenty materiału przechodzącego
	(R_i)	(R_i / M_1) 100	100 – (100 R_i / M_1)
mm	g	%	%
2	R_3 = 0,0	0,0	100
0,125	R_2 = 0,5	1,0	99
0,063	R_1 = 5,0	10,0	89
< 0,065	44,5	89,0	0
Suma	50,0	100,0	-

Uwagi:

Laboratorium:	Pracownia Kruszyw i Urządzeń Odwadniających
Data:	16.10.2006 r.
Wykonujący badanie:	Elżbieta Grzechowska-Lis

Materiał:	Wypełniaczwapienny
Oznaczenie:	1/W
Pochodzenie:	Lhoist Opolwap S.A

Karta 2

Wyniki	**Jakość pyłów**
Norma:	PN-EN 933-9 Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Ocena zawartości drobnych cząstek. Badanie błękitem metylenowym

Masa suchej próbki analitycznej kruszywa (z dokładnością grama), M1		M1= 200 g
Objętość roztworu zaadsorbowanego przez kaolinit (jeżeli był użyty) V'		V'= (-) ml
Całkowita ilość dodanego roztworu barwnika V1		V_1= 20 ml
Wartość MB wyrażona w gramach błękitu na kilogram kruszywa	$MB= \frac{V_1}{M_1} 10$	MB= 1,0 g/kg
	$MB= \frac{V_1-V'}{M_1} 10$	MB= (-)

Uwagi:

Laboratorium:	Pracownia Kruszyw i Urządzeń Odwadniających
Data:	07.11.2006 r.
Wykonujący badanie:	Elżbieta Grzechowska - Lis

Materiał:	Wypełniaczwapienny
Oznaczenie:	1/W
Pochodzenie:	Lhoist Opolwap S.A

Karta 3

Wyniki	**Zawartość wody**
Norma:	PN-EN 1097-5 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Część 5: Oznaczanie zawartości wody przez suszenie w suszarce z wentylacją

1	Pojemnik	M2	64, g
2	Masa tacy + wilgotna próbka analityczna	M1 + M2	164,3 g
3	Masa tacy + sucha próbka analityczna	Md1 + M2	164,2 g
4	Drugie ważenie tacy z suchą próbką analityczną	Mdi + M2	164,2 g
5	Różnica masy	(pozycja 3 - pozycja 4)	0,0 g
6	$\frac{\text{(pozycja 3 - pozycja 4)}}{\text{(pozycja 3 - pozycja 1)}} \times 100$		0,00% (patrz uwaga)
7	Masa wody (pozycja 2 - pozycja 4)	(M1+ M2) - (M3 + M2)	0,1 g
8	Masa suchej próbki analitycznej (pozycja 4 - pozycja 1)	M3	99,9 g
9	Zawartość wody $\frac{\text{(pozycja 7)}}{\text{(pozycja 8)}} \times 100$	(masa %)	0,10 %
UWAGA: 0,00 % w pozycji 6 jest mniejsze niż 0,1 %. Dodatkowe ważenie nie jest wymagane.			

Uwagi:

Laboratorium:	Pracownia Kruszyw i Urządzeń Odwadniających
Data:	10.11.2006 r.
Wykonujący badanie:	Elżbieta Grzechowska - Lis

Materiał:	Wypełniacz wapienny
Oznaczenie:	1/W
Pochodzenie:	Lhoist Opolwap S.A.

Karta 4

Wyniki	**Gęstość ziaren**
Norma:	PN-EN 1097-7 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Część 7: Oznaczanie gęstości wypełniacza. Metoda piknometryczna
Ciecz:	woda destylowana

1	Numer próbki		-	1	2	3
2	Masa pustego piknometru z korkiem [g]		m_0	38,0938	38,0938	38,0938
3	Masa pustego piknometru z próbką analityczną [g]		m_1	48,2348	48,5721	48,3532
4	Masa pustego piknometru z próbką analityczną wypełniacza wypełnionego cieczą [g]		m_2	144,2249	144,5881	144,4596
5	Objętość piknometru [ml]		V	100,29	100,29	100,29
6	Gęstość cieczy w temperaturze 25 ^oC [Mg/m^3]		ρ_1	0,997	0,997	0,997
7	Gęstość wypełniacza w temperaturze 25 ^oC [Mg/m^3]	$\rho_f = \dfrac{m_1 - m_0}{V - \dfrac{m_2 - m_1}{\rho_1}}$	ρ_{fi}	2,5255	2,5420	2,6310
8	Średnia gęstość wypełniacza w temperaturze 25 ^oC z dokładnością 0,01 [Mg/m^3]		ρ_f	2,56		
Uwagi:						

Data:	02.11.2006 r.
Wykonujący badanie:	Elżbieta Lis-Grzechowska

Załącznik A	Wzorcowanie piknometru

1	Masa piknometru z korkiem [g]		m_0	38,0938
2	Masa piknometru wypełnionego wodą [g]		m_3	138,0874
3	Gęstość wody w temperaturze 25 ^oC [Mg/m^3]		ρ_w	0,997
4	Objętość piknometru [ml]	$V = m_3 - m_0$	V	100,29

		ρ_w		
Uwagi:				
Data:	31.10.2006 r.			
Wykonujący badanie:	Elżbieta Grzechowska-Lis			

Materiał:	Wypełniacz wapienny
Oznaczenie:	1/W
Pochodzenie:	Lhoist Opolwap S.A.

Karta 5

Wyniki	**Gęstość nasypowa w stanie luźnym oznaczana w nafcie**
Norma:	PN-EN 1097-3, załącznik B Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie gęstości nasypowej i jamistości, załącznik B
Ciecz:	nafta

1	Numer próbki			-	1	2	3	4	5
2	Masa próbki, z dokładnością 0,1 g			m	10,18	10,10	10,41		
3	Objętość masy wypełniacza, z dokładnością 1 ml			V	16	16	15		
4	Gęstość objętościowa próbki, z dokładnością do 0,01 Mg/m^3			ρ	0,636	0,631	0,694		
5	Średnia gęstość objętościowa z trzech próbek, z dokładnością do 0,01 Mg/m^3			ρ_3	0,654			-	-
6	Bezwzględna różnica między średnią gęstość objętościowa a gęstością objętościową próbki, z dokładnością do 0,01 Mg/m^3	$\Delta\rho=$	$\lvert\rho_3 - \rho\rvert$	$\Delta\rho$	0,018	0,023	0,040	-	-
7	Wynik odrzucony oznaczony X, jeżeli $\Delta\rho>0{,}05$ Mg/m^3			-	-	-	-		
8	Średnia gęstość objętościowa z próbek nieodrzuconych, z dokładnością do 0,01 Mg/m^3			ρ_s	-				
9	Wartość średnia gęstości objętościowej wypełniacza w nafcie, z dokładnością do 0,1 Mg/m^3			ρ_n	0,7				

Uwagi:	
Laboratorium:	Pracownia Kruszyw i Urządzeń Odwadniających
Data:	10.11.2006 r.
Wykonujący badanie:	Elżbieta Grzechowska-Lis

Materiał:	Wypełniaczz
Oznaczenie:	1/W
Pochodzenie:	Lhoist Opolwap S.A

Karta 6

Wyniki	**Zawartość węglanu wapnia**
Norma:	PN-EN 196-21:1997 Metoda badania cementu. Oznaczanie zawartości chlorków, dwutlenku węgla i alkaliów w cemencie p. 5 Oznaczanie zawartości dwutlenku węgla (metoda wzorcowa)

1	Zawartość dwutlenku węgla	$CO_2 = \frac{m_3 + m_4}{m_2}$	40,71 %
2	Zawartość węglanu wapnia	$CaCO_3 = 2{,}2742 * CO_2$	92,5 %

Uwagi:	
Laboratorium:	Instytut Mineralnych Materiałów Budowlanych w Opolu
Data:	13.11.2006 r.

Materiał:	Wypełniacz wapienny
Oznaczenie:	1/W
Pochodzenie:	Lhoist Opolwap S.A

Karta 7

Wyniki	**Przyrost temperatury mięknienia**
Norma:	PN-EN 13179-1 Badanie kruszyw wypełniających stosowanych do mieszanek bitumicznych. Część 1: Badanie metodą "pierścienia i kuli"

1	Masa bitumu z zaokrągleniem do 0,1 g			m_b	20,0
2	Gęstość ziaren kruszywa wypełniającego, w Mg/m^3			ρ_f	2,57
3	Gęstość bitumu drogowego w temp. 25 ^oC, w Mg/m^3			ρ_b	1,025
4	Masa dodanego kruszywa wypełniającego, w gramach	$mf = 0,6\ m_b\ \rho_f / \rho_b$		m_f	30,04
5	Temperatura mięknienia bitumu	48,1	48,0	T_b	48,0
6	Temperatura mięknienia mieszaniny bitum/kruszywo	65,8	66,0	$T_{b/k}$	60,9

	wypełniające				
7	Efekt utwardzenia kruszywa wypełniającego z zaokrągleniem do 0,5 ^{o}C			$\Delta_{R\&B}$	12,9

Uwagi:	
Laboratorium:	Pracownia Kruszyw i Urządzeń Odwadniających
Data:	10.11.2006 r.
Wykonujący badanie:	Elżbieta Grzechowska-Lis

ZAŁĄCZNIK 2

WYNIKI BADAŃ MIESZANEK WYPEŁNIACZA WAPIENNEGO I POCHODZĄCEGO Z DROBNEGO KRUSZYWA MINERALNEGO

ZAŁĄCZNIK 3

RECEPTY LABORATORYJNE NA MIESZANKI MINERALNO-ASFALTOWE

ZAŁĄCZNIK 4

WYNIKI BADAŃ MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH