

**Instytut Badawczy Dróg i Mostów
Zakład Technologii Nawierzchni
Pracownia Lepiszczy Bitumicznych**

SPRAWOZDANIE

Temat TN-251

Ocena skuteczności dodatku włókien do mieszanek mineralno-asfaltowych

Kierownik Zakładu TN:

prof. dr hab. inż. Dariusz SYBILSKI

Zespół:

prof. dr hab. inż. Dariusz Sybilski
mgr inż. Renata Horodecka
mgr inż. Andrzej Wróbel
dr inż. Wojciech Bańkowski
Krzysztof Mirski

Technicy:

Teresa Gawenda
Jadwiga Migdalska
Tomasz Michalski
Dariusz Jasiński

Warszawa, czerwiec 2010

Spis treści

1. Podstawa pracy	4
2. Cel pracy.....	4
3. Program pracy	4
4. Weryfikacja dotychczasowych i poszukiwania nowych systemów oceny skuteczności zastosowania dodatku włókien do mieszanek mineralno-asfaltowych (Zadanie 1).....	9
5. Zgromadzenie materiałów do badań oraz podstawowe badania materiałów wyjściowych (Zadanie 2 i 3).....	19
6. Opracowanie składów mieszanek mineralno-asfaltowych przy uwzględnieniu różnej zawartości włókna i lepiszcza (Zadanie 4)	20
6.1. Mieszanka BAWMS16 (wg Zeszytu 70).....	20
6.2. Mieszanki BAWMS16 (wg Zeszytu 70) z dodatkiem włókna.....	23
6.3. Mieszanka ACWMS 16 20/30L (wg WT-2)	25
6.4. Mieszanka AC WMS16 20/30L/W (wg WT-2) z włóknem	27
7. Metodyka badania.....	29
7.1. Koleinowanie (duży aparat)	29
7.2. Koleinowanie (mały aparat)	30
7.3. Odporność na zmęczenie	31
7.4. Moduł sztywności.....	34
7.5. Wodoodporność.....	36
7.6. Odporność na pękanie niskotemperaturowe.....	37
7.7. Symulacja starzenia krótko- i długoterminowego.....	39
8. Wyniki badań	40
8.1. Koleinowanie (Zadanie 5.1)	40
8.2. Odporność na zmęczenie (Zadanie 5.2).....	43
8.3. Moduł sztywności (Zadanie 5.3)	48
8.4. Wodoodporność (Zadanie 5.4)	50
8.5. Odporność na pękanie niskotemperaturowe (Zadanie 5.5)	50
9. Analiza wyników (zadanie 6).....	55
9.1. BAWMS 16 20/30 wg recept TN/251/08-1 i TN/251/08-2.....	55
9.1.1. Właściwości podstawowe	55
9.1.2. Odporność na koleinowanie	56
9.1.3. Trwałość zmęczeniowa	57
9.1.4. Sztywność	58
9.1.5. Wodoodporność	61

9.1.6.	Odporność na niską temperaturę	61
9.1.7.	Podsumowanie wyników analizy	62
9.2.	ACWMS 16 20/30 wg recept TN/09/2L i TN/09/2L/W	63
9.2.1.	Właściwości podstawowe	63
9.2.2.	Odporność na koleinowanie	63
9.2.3.	Trwałość zmęczeniowa	64
9.2.4.	Sztywność	66
9.2.5.	Ocena uzyskanych wyników.....	66
10.	Opracowanie składów mieszanek do badań pakietów wielowarstwowych (zadanie 7).....	66
10.1.	Mieszanka AC8 (80B) wg rec. TN/251/09-3	67
10.1.1.	Projekt i podstawowe właściwości – AC8 (80B)	67
10.1.2.	Odporność na koleinowanie - AC8 (80B).....	70
10.1.3.	Odporność na zmęczenie - AC8 (80B)	72
10.1.4.	Moduł sztywności - AC8 (80B).....	73
10.1.5.	Wodoodporność - AC8 (80B)	73
10.2.	Mieszanka ACWMS16 (20/30) wg rec. TN/251/09-4.....	74
10.2.1.	Projekt i podstawowe właściwości – ACWMS16 (20/30)	74
10.2.2.	Odporność na koleinowanie – ACWMS16 (20/30).....	76
10.2.3.	Odporność na zmęczenie - ACWMS16 (20/30)	77
10.2.4.	Moduł sztywności - ACWMS16 (20/30)	77
10.2.5.	Wodoodporność - ACWMS16 (20/30)	78
10.3.	Ocena zaprojektowanych mieszanek	79
11.	Badania pakietów warstw.....	80
11.1.	Próbki do badań	80
11.2.	Wyniki badań.....	82
11.3.	Analiza wyników badań	84
12.	Podsumowanie i wnioski	85
13.	Literatura.....	88

1. Podstawa pracy

Badania wykonano na podstawie umowy nr 2195/2008 (temat TN-251) z dnia 11.08.2008 r. zawartej pomiędzy Generalną Dyрекcją Dróg Krajowych i Autostrad w Warszawie, a Instytutem Badawczym Dróg i Mostów w Warszawie.

2. Cel pracy

Celem pracy jest sprawdzenie wpływu dodatku włókien polimerowych na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych. Wzmacnianie nawierzchni drogowych w dobie nasilającego się transportu samochodowego jest wielkim wyzwaniem dla naukowców i zarządców dróg. Jednym ze sposobów wzmocnienia jest zastosowanie włókien polimerowych, jako zbrojenia mieszanek mineralno-asfaltowych.

Wytrzymałość na rozciąganie włókna wykorzystywana jest do zbrojenia mieszanki mineralno-asfaltowej, zwiększając odporność na pękanie pod cyklicznym obciążeniem, czyli trwałość zmęczeniową mieszanki i nawierzchni drogowej oraz odporność niskotemperaturową. Dodatek włókien zasługuje na szczególną uwagę ze względów ekonomicznych, pozwoli wydłużyć okres eksploatacji nawierzchni drogowej. Rezultaty pracy pozwolą na porównanie właściwości nawierzchni wykonanych w technologii z włóknami i bez włókien. Wyniki pracy mogą być pomocne dla biur projektowych, inwestorów i przedsiębiorstw przy wyborze i zastosowaniu nowych technik przebudowy zniszczonych nawierzchni drogowych lub przy budowie nowych.

3. Program pracy

Program pracy zgodnie z założeniami umowy został podzielony na trzy etapy. W części pierwszej przewidziano badania podstawowe materiałów składowych, projektowanie recept oraz wybór mieszanki mineralno-asfaltowej do dalszych badań. W części drugiej przewidziano kontynuację szerokiego programu badań oraz analizę uzyskanych wyników badań pod kątem oceny wpływu zastosowanych włókien na wybrane właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej (koleinowanie, zmęczenie, właściwości niskotemperaturowe oraz odporność na działanie wody). Na zakończenie pracy (etap III) przewidziano analizę wyników, opracowanie składu mieszanki mineralno-asfaltowej do warstwy antyzmęczeniowej, przeprowadzenie badań oraz opracowanie sprawozdania końcowego. Program pracy przedstawiono poniżej.

Etap I

Zadanie 1

Weryfikacja dotychczasowych i poszukiwania nowych systemów oceny skuteczności zastosowania dodatku włókien do mieszanek mineralno-asfaltowych

Zadanie 2

Zgromadzenie materiałów do badań (lepiszcze, kruszywo, włókna)

Zadanie 3

Podstawowe badania materiałów wyjściowych (asfalt, kruszywo)

Zadanie 4

Opracowanie składów mieszanek mineralno-asfaltowych przy uwzględnieniu różnej zawartości włókna i lepiszcza

Wykonanie badań podstawowych MMA:

- Określenie zawartości wolnych przestrzeni – oznaczenie gęstości i, gęstości objętościowej
- Wytypowanie wariantów recept do dalszych badań, na podstawie analizy uzyskanych wyników.

Zadanie 5

Badania wytypowanych mieszanek mineralno-asfaltowych

Zadanie 5.1

Badanie odporności na koleinowanie

Badania zostaną przeprowadzone metodą według PN-EN 12697-22 w dużym aparacie. Celem zadania będzie wyznaczenie odporności na koleinowanie wytypowanych mieszanek mineralno-asfaltowych.

Zadanie 5.2

Badanie odporności na zmęczenie

Badania zostaną przeprowadzone metodą belki czteropunktowo zginanej wg PN-EN 12697-24. Celem zadania będzie określenie trwałości zmęczeniowej metodą konwencjonalną i energetyczną mieszanek.

Zadanie 5.3

Badanie modułu sztywności

Badania zostaną przeprowadzone metodą belki czteropunktowo zginanej (w -10, 0, 10, 20°C), rozciągania pośredniego (w 10°C) i ściskania-rozciągania (w -10, 0, 10, 20°C) wg PN-EN 12697-26.

Celem zadania będzie wyznaczenie modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego oraz opracowanie krzywych wiodących

Zadanie 5.4

Badanie wodoodporności

Badania zostaną przeprowadzone metodą według PN-EN 12697-12.

Zadanie 5.5

Badanie odporności na pękanie niskotemperaturowe

Badania zostaną przeprowadzone metodą według AASHTO TP10-93 : "Standard test method for thermal restrained specimen tensile strength". Celem zadania będzie wyznaczenie temperatury pęknięcia i naprężenia przy pęknięciu wybranych mieszanek opracowanych w ramach zadania 4.

Uwaga:

Przewidziano wykonanie badań wyszczególnionych w zadaniu 5 dla dwóch wybranych wariantów mieszanek mineralno- asfaltowych (porównawczej oraz z dodatkiem włókien) w trzech stanach, tj.:

- oryginalnym (przed starzeniem),
- po starzeniu krótkoterminowym STOA (wg raportu SHRP A-383),
- po starzeniu długoterminowym LTOA (wg raportu SHRP A-383).

Etap II

c.d. Zadania 5 (badania po starzeniu długoterminowym LTOA)

Zadanie 5

Badania wytypowanych mieszanek mineralno-asfaltowych

Zadanie 5.1

Badanie odporności na koleinowanie

Badania zostaną przeprowadzone metodą według PN-EN 12697-22 w dużym aparacie.

Zadanie 5.2

Badanie odporności na zmęczenie

Badania zostaną przeprowadzone metodą belki czteropunktowo zginanej wg PN-EN 12697-24.

Zadanie 5.3

Badanie modułu sztywności

Badania zostaną przeprowadzone metodą belki czteropunktowo zginanej (w -10, 0, 10, 20°C), rozciągania pośredniego (w 10°C) i ściskania-rozciągania (w -10, 0, 10, 20°C) wg PN-EN 12697-26. Wyznaczenie modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego oraz opracowanie krzywych wiodących

Zadanie 5.4

Badanie wodoodporności

Badania zostaną przeprowadzone metodą według PN-EN 12697-12 (U).

Zadanie 5.5

Badanie odporności na pękanie niskotemperaturowe

Badania zostaną przeprowadzone metodą według AASHTO TP10-93 : "Standard test method for thermal restrained specimen tensile strength".

Uwaga:

Przewidziano wykonanie badań wyszczególnionych w zadaniu 5 dla dwóch wybranych wariantów mieszanek mineralno- asfaltowych (porównawczej oraz z dodatkiem włókien) w trzech stanach, tj.:

- „O” - oryginalnym (przed starzeniem),
- „K” - po starzeniu krótkoterminowym STOA (wg raportu SHRP A-383 [1]),
- „D” - Starzenie długoterminowe LTOA (wg raportu SHRP A-383).

Zadanie 6.

Analiza otrzymanych wyników mieszanek mineralno-asfaltowych

Analiza uzyskanych wyników badań pod kątem oceny wpływu zastosowanych włókien na wybrane właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej (koleinowanie, zmęczenie, właściwości niskotemperaturowe oraz odporność na działanie wody).

Etap III

Zadanie 7

Opracowanie składu mieszanki mineralno-asfaltowej drobnoziarnistej z włóknem do warstwy antyzmęczeniowej i wykonanie badań:

- Właściwości objętościowych
- Odporności zmęczeniowej mieszanki antyzmęczeniowej oraz pakietu warstw.

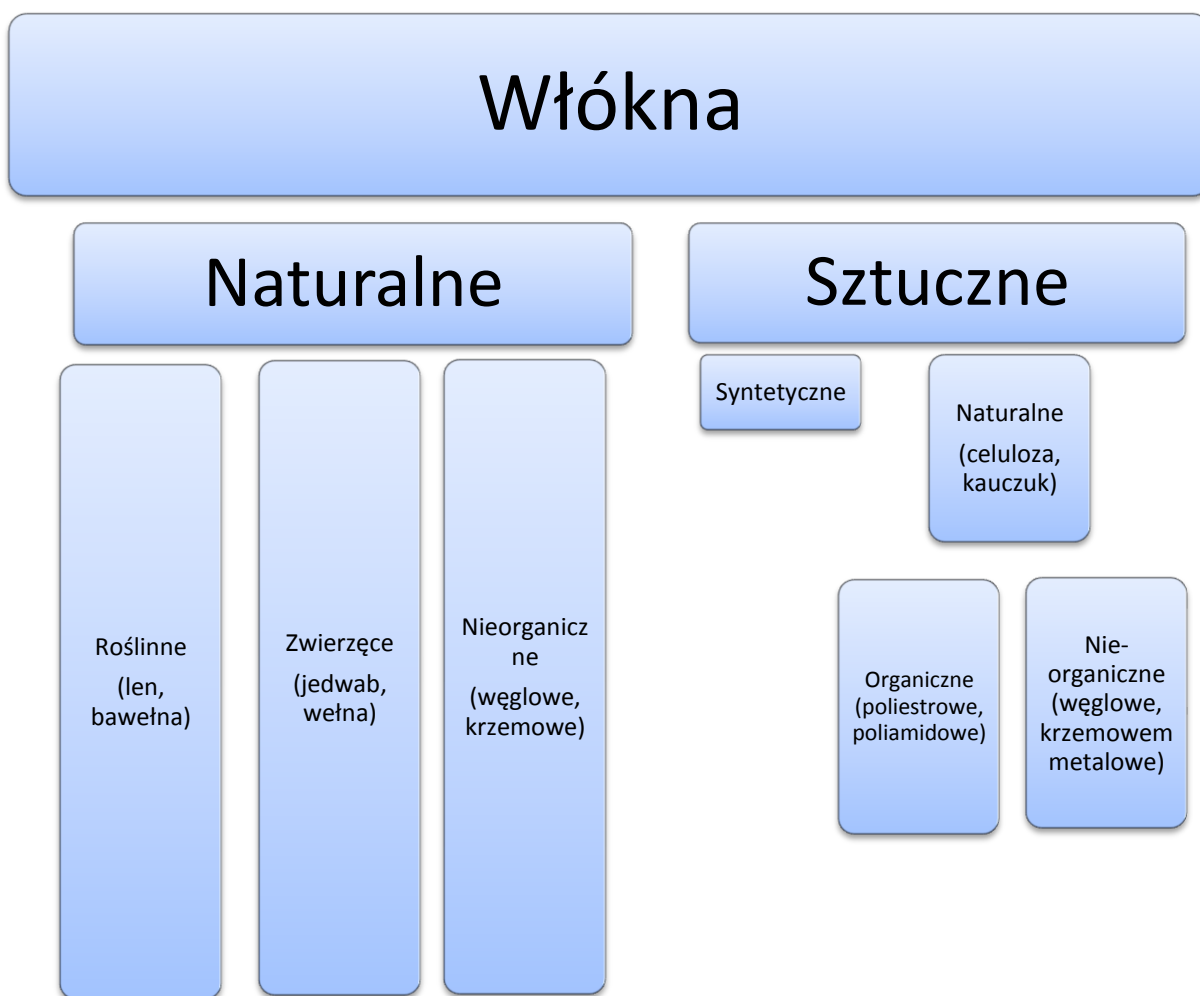
Zadanie 8

Sprawozdanie końcowe z pracy oraz opracowanie wniosków dotyczących oceny skuteczności dodatku włókien do mieszanek mineralno-asfaltowych.

4. Weryfikacja dotychczasowych i poszukiwania nowych systemów oceny skuteczności zastosowania dodatku włókien do mieszanek mineralno-asfaltowych (Zadanie 1)

Stosowanie włókien do poprawy właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych ma swoją bogatą i długą tradycję [2, 3]. Wzrost zastosowania włókien obserwujemy zwłaszcza w ostatnich latach wraz z pojawieniem się mieszanek o nieciągłym uziarnieniu we Francji BBTM, w Wielkiej Brytanii asfaltu porowatego PA¹, w Niemczech SMA i upowszechnieniem tych mieszanek w całym świecie.

Stosowane włókna są różnego pochodzenia i o różnych właściwościach. Klasyfikację włókien ze względu na pochodzenie przedstawiono na rys. 1.



Rysunek 1 Klasyfikacja włókien

¹ W opisie zastosowano terminologię według projektu Wymagań Technicznych Nawierzchni Asfaltowych Drogowych i Lotniskowych opracowanych w IBDiM

W wielu publikacjach opisane są różne sposoby poprawiania cech użytkowych mieszanek mineralno-bitumicznych, w wyniku których można uzyskać zwiększenie odporności nawierzchni na obciążenia, koleinowanie i spękania oraz odporności na działanie czynników atmosferycznych. Sposoby te polegają na poprawianiu właściwości podstawowych materiałów do produkcji mieszanek.

Cel i skuteczność stosowania włókien jako dodatku do asfaltu lub mieszanek mineralno-asfaltowych zależy od takich czynników jak kształt, stan powierzchni, jak też zdolność tworzenia połączeń poprzez adsorpcję fizyczną i chemiczną. Włókna stalowe i szklane (niebędące termoplastami) nie ulegają rozpuszczeniu w wysokiej temperaturze i nie następuje ich połączenie z asfaltem. Mogą zatem stanowić zbrojenie mieszanki. Niektóre z włókien syntetycznych mają natomiast na tyle niską temperaturę topnienia, że ulegają całkowitemu rozpuszczeniu w gorącym asfalcie, nie spełniając roli włókien, ale polimerowego modyfikatora asfaltu. Tak jest w wypadku włókien polietylenowych lub polipropylenowych.

Włókna azbestowe, które najwcześniej znalazły zastosowanie jako stabilizator w mieszance SMA, w większości krajów zostały wycofane ze stosowania z powodu szkodliwości zdrowiu pracowników i zostały zastąpione włóknami celulozowymi lub mineralnymi.

Obecnie do najczęściej stosowanych włókien w drogownictwie należą włókna celulozowe, a generalnie włókna pochodzenia roślinnego, włókna wełniane oraz wełna żużlowa lub wata szklana oraz ich mieszaniny. Efekt wynikający ze stosowania włókien do mieszanki, to poprawa odporności na pękanie i propagację pęknięć przynajmniej w takim zakresie, w jakim włókna te mogą tworzyć mikrowzmocnienia wewnątrz mieszanki mineralno-asfaltowej. Jako niekorzystne cechy włókien pochodzenia roślinnego, tj. włókien celulozowych, wymieniono ich degradację pod wpływem wody i utratę spójności pomiędzy kruszywem i spoiwem w mieszance, co powoduje utratę wytrzymałości mechanicznej mieszanki w trakcie eksploatacji nawierzchni. Włókna waty szklanej i wełny żużlowej nie ulegają uszkodzeniu wskutek działania wody, ale ich stosowanie jest szkodliwe dla otoczenia, ponieważ mogą rozprzestrzeniać się w powietrzu i powodować różne podrażnienia u ludzi.

Zestawienie wad i zalet włókien stosowanych w drogownictwie przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1 - Zalety i wady włókien

Włókno	Zaleta	Wada
Azbestowe	Duża chłonność asfaltu	Zagrożenie zdrowia
Celulozowe	Duża chłonność asfaltu	Podatność na wilgoć Brak efektu (lub słaby) zbrojenia
Mineralne (skalne)	Duża chłonność asfaltu	Brak efektu (lub słaby) zbrojenia
Szklane	Efekt zbrojenia	Kruchość Mała chłonność asfaltu
Syntetyczne: poliestrowe polipropylenowe akrylowe	Efekt zbrojenia	Mała chłonność asfaltu
Stalowe	Efekt zbrojenia	Brak chłonności asfaltu Rdzewienie Trudności w zagęszczaniu Pogorszenie charakterystyki powierzchniowej nawierzchni

Włókna są obecnie najpowszechniej stosowane jako stabilizator lepiszcza w mieszankach o nieciągłym uziarnieniu: SMA lub MNU oraz w technologiach specjalnych, np. do „zbrojenia” warstw nawierzchni betonowych. W nawierzchniach asfaltowych w zasadzie włókna w celu wzmocnienia (zbrojenia) nawierzchni nie są stosowane, a jeśli to w celach eksperymentalnych. Najczęściej powodem jest koszt włókien.

Od dłuższego czasu w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów prowadzone są prace nad szeroko pojętym zastosowaniem włókien do mieszanek mineralno-asfaltowych. W wyniku tych prac okazało się, że w trakcie procesu utylizacji wyrobów gumowych, wzmacnianych kordem tekstylnym, takich jak opony samochodowe, taśmy transporterów, odzyskiwany jest materiał w postaci zgremplowanych włókien kordu, o bardzo korzystnych cechach technicznych, jak odporność na działanie wody, elastyczność, wytrzymałość.

Kord tekstylny składa się z mieszaniny syntetycznych włókien polimerowych i/lub poliestrowych, i/lub wiskozowych, i/lub poliamidowych, i/lub para-aramidowych.

Zalety wynikające ze stosowania włókien, to przede wszystkim uzyskanie dodatku do mieszanek mineralno-asfaltowych, który jednocześnie może spełnić rolę stabilizatora mieszanki, przeciwdziałającego segregacji składników, modyfikatora, wpływającego na poprawę cech użytkowych mieszanki, ze względu na bardzo korzystne właściwości mechaniczne tekstylnego materiału włóknistego, jak wytrzymałość na rozciąganie i odporność na degradację pod wpływem wody i zmieniających się warunków atmosferycznych.

Te korzystne cechy włókien wynikają z tego, że otrzymany jest z kordu tekstylnego, stanowiącego wzmocnienie wyrobów gumowych, w tym opon, decydującego o wytrzymałości tych wyrobów, a więc jest zbudowany z jednego lub wielu rodzajów włókien najwyższej jakości, jak włókna para-aramidowe, poliestrowe, poliamidowe, wiskozowe. Dla przykładu włókno para-aramidowe jest jednym z najlepszych pod względem wytrzymałości na rozciąganie przy małym ciężarze właściwym. Odznacza się również doskonałą wytrzymałością termiczną i stabilnością wymiarową oraz niewielkim wydłużeniem przy zerwaniu. Nie ulega korozji i jest odporne na działanie większości chemikaliów. Włókno to jest także niepalne, nieprzewodzące oraz odporne na zużycie.

Włókno poliamidowe jest wytwarzane z syntetycznego polimeru o bardzo dużej wytrzymałości na rozciąganie, o wysokim module sprężystości, twardości i odporności na ścieranie.

Również włókna poliestrowe odznaczają się dużą wytrzymałością na rozerwanie, zginanie i ścieranie, dobrą odpornością na działanie światła, czynników chemicznych (słabe kwasy i alkalia), są odporne biologicznie, bardzo słabo chłoną wodę.

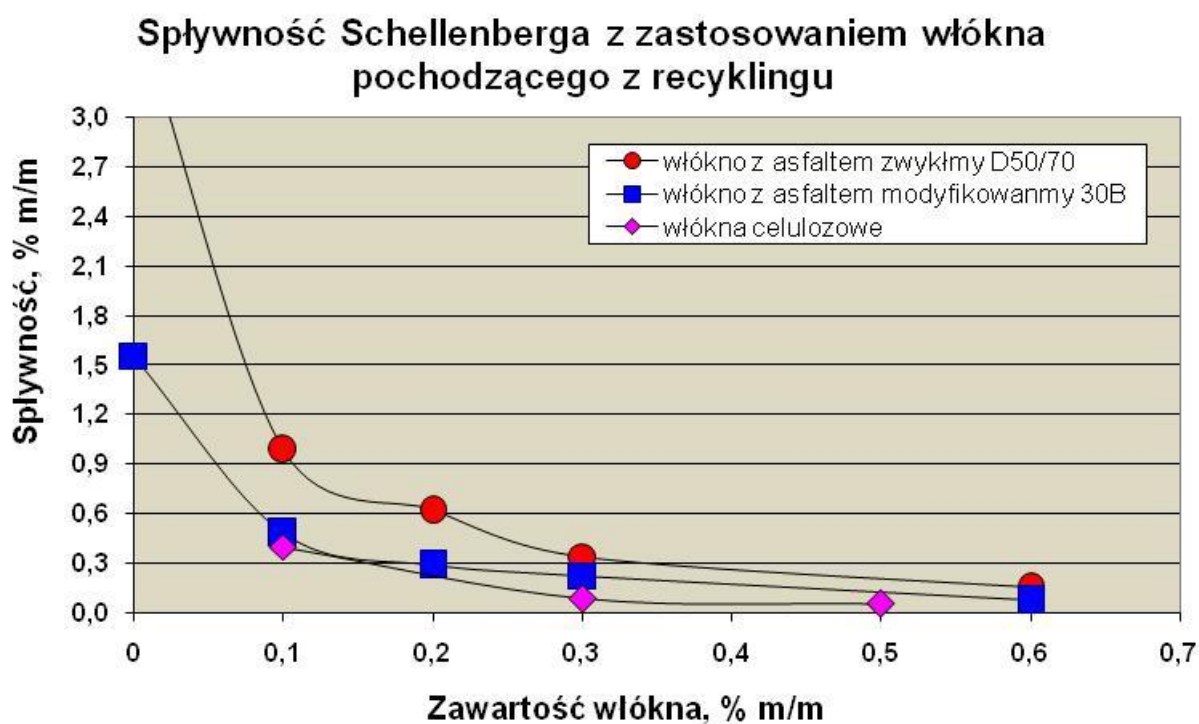
Włókna wiskozowe, oznaczane na oponach jako Rayon, są właściwie włóknami celulozowymi, ale o zdecydowanie zmienionych i poprawionych właściwościach.

Wstępne wyniki badań potwierdziły przypuszczenia, że włókno pochodzące z recyklingu opon samochodowych może stanowić doskonały materiał stosowany w produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych.

Badaniom poddano mieszankę SMA oraz mieszankę betonu asfaltowego [4]. Oznaczono spływność mastyksu w mieszance SMA metodą Schellenberga. Do badań

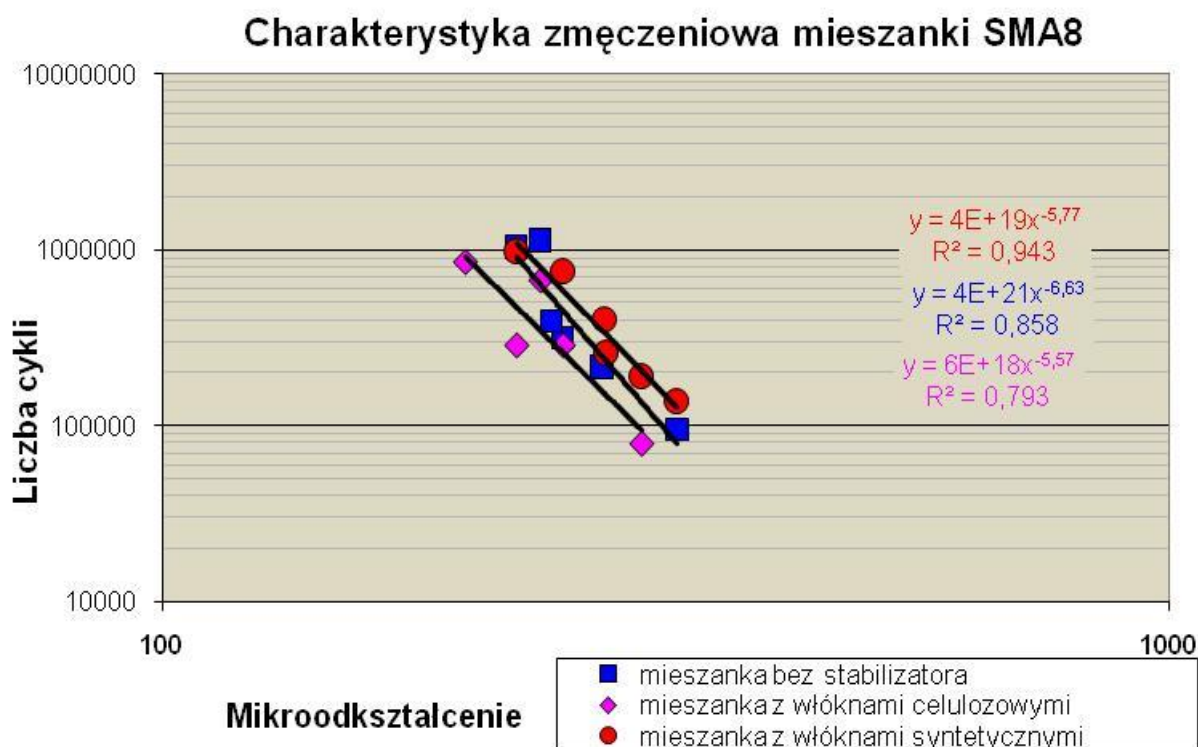
przygotowano próbki z mieszank SMA8 zarówno z dodatkiem włókien syntetycznych, jak również włókien celulozowych, z asfaltami zwykłym i modyfikowanym.

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki badań spływności lepiscza metodą Schellenberga.



Rysunek 2 Porównanie wyników spływności

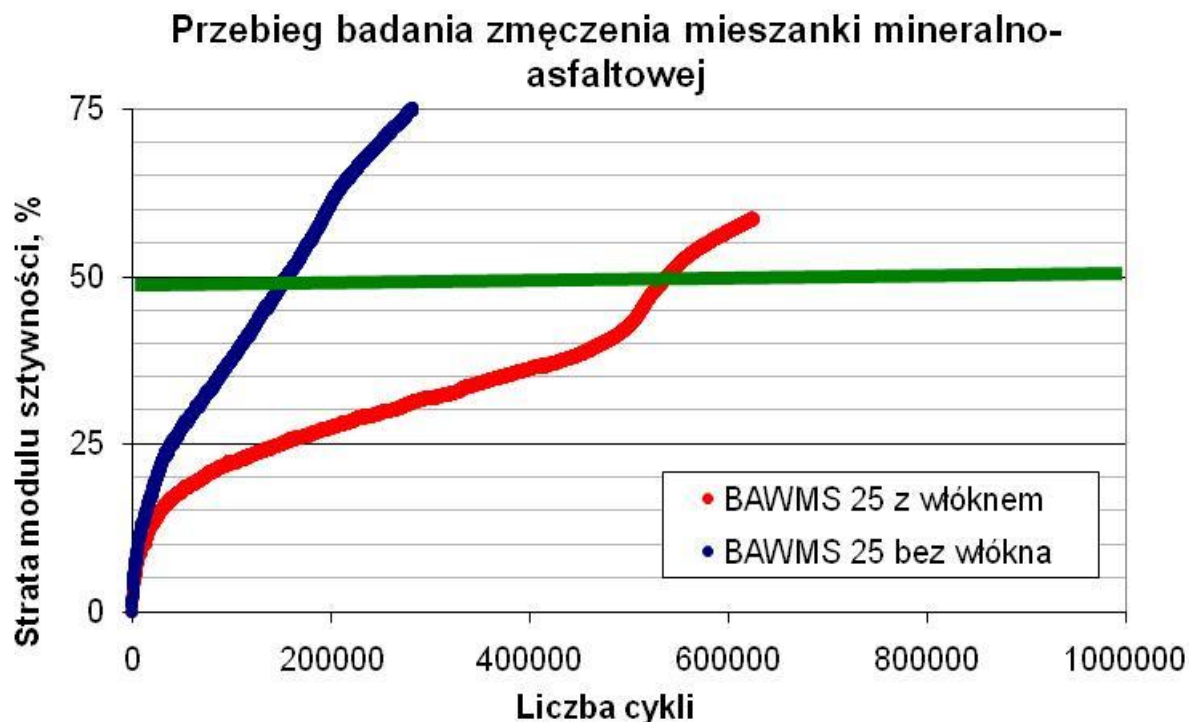
Na podstawie rysunku 2 można stwierdzić, że dzięki zastosowaniu włókien syntetycznych możliwe jest skuteczne ograniczenie spływności mastyksu w mieszankach typu SMA.



Rysunek 3 Porównanie charakterystyk zmęczeniowych SMA8

Z przeprowadzonych badań zmęczeniowych mieszanek SMA8, wynika, że mieszanka z dodatkiem włókien syntetycznych przy takim samym odkształceniu przenosi nieco większą liczbę cykli obciążeń, porównywalne do mieszanki bez żadnego dodatku stabilizującego. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że najwyższe wartości uzyskała mieszanka SMA8 z dodatkiem włókien syntetycznych, a najniższe z dodatkiem włókna celulozowego. Świadczy to o tym, że dodatek włókien syntetycznych oprócz właściwości stabilizujących, posiada właściwości wzmacniające, dzięki czemu należy oczekiwać zwiększenia trwałości nawierzchni drogowej.

Badania zmęczeniowe wykonano również dla mieszanki mineralno-asfaltowej typu BAWMS z zastosowaniem twardego asfaltu 20/30.

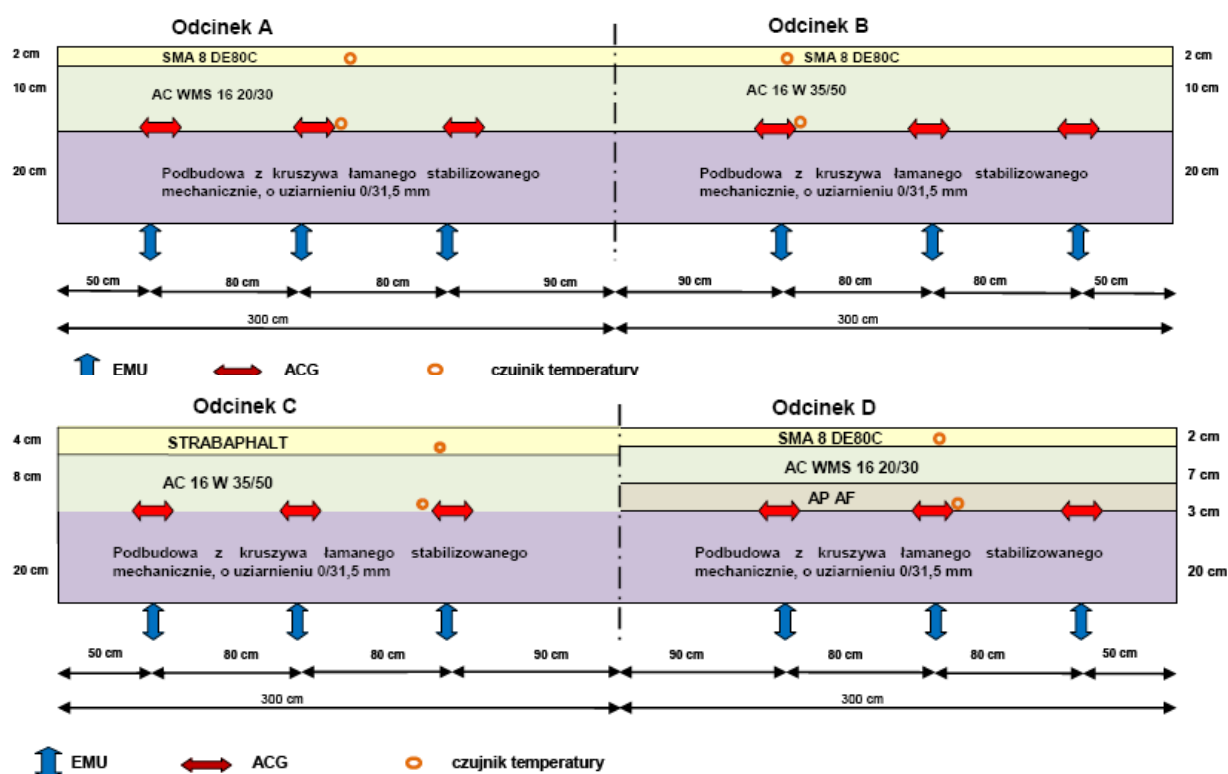


Rysunek 4 Przebieg badania zmęczenia mieszanki z włóknem i bez włókna

Przeprowadzone badania zmęczeniowe wykazały, że mieszanka BAWMS25 z dodatkiem włókien syntetycznych charakteryzuje się lepszymi właściwościami zmęczeniowymi niż mieszanka porównawcza bez dodatku. Ilustruje to rys. 4, na którym trwałość zmęczeniowa, czyli liczba cykli, kiedy strata modułu sztywności osiągnie 50%, mieszanki BAWMS25 z dodatkiem włókien jest kilkukrotnie wyższa niż mieszanki porównawczej.

Mieszanka BAWMS25 – 20/30 została wytypowana celowo, ponieważ trudno jest uzyskać jednocześnie wysoki moduł sztywności i dobre parametry zmęczeniowe. Dzięki zastosowaniu twardego asfaltu 20/30 uzyskuje się mieszankę o wysokim module sztywności, a dobre właściwości zmęczeniowe zapewnia się poprzez wprowadzenie stosunkowo dużej zawartości asfaltu.

Przydatność włókien syntetycznych została również sprawdzona na odcinku testowym w ramach projektu SPENS, w którym uczestniczył IBDiM [25]. W tym przypadku włókno zostało dodane do mieszanki asfaltu piaskowego (APAF), która została ułożona jako najniższej położona warstwa asfaltowa (rysunek 5, odcinek D).

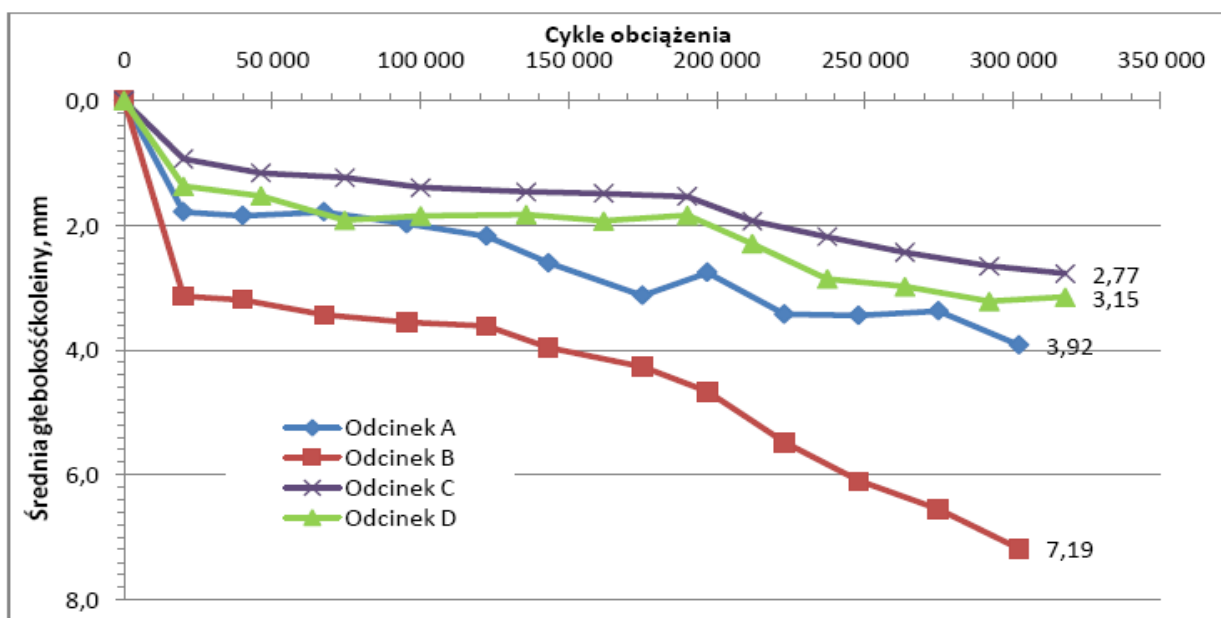


Rysunek 5 Konstrukcje odcinków testowych w projekcie SPENS

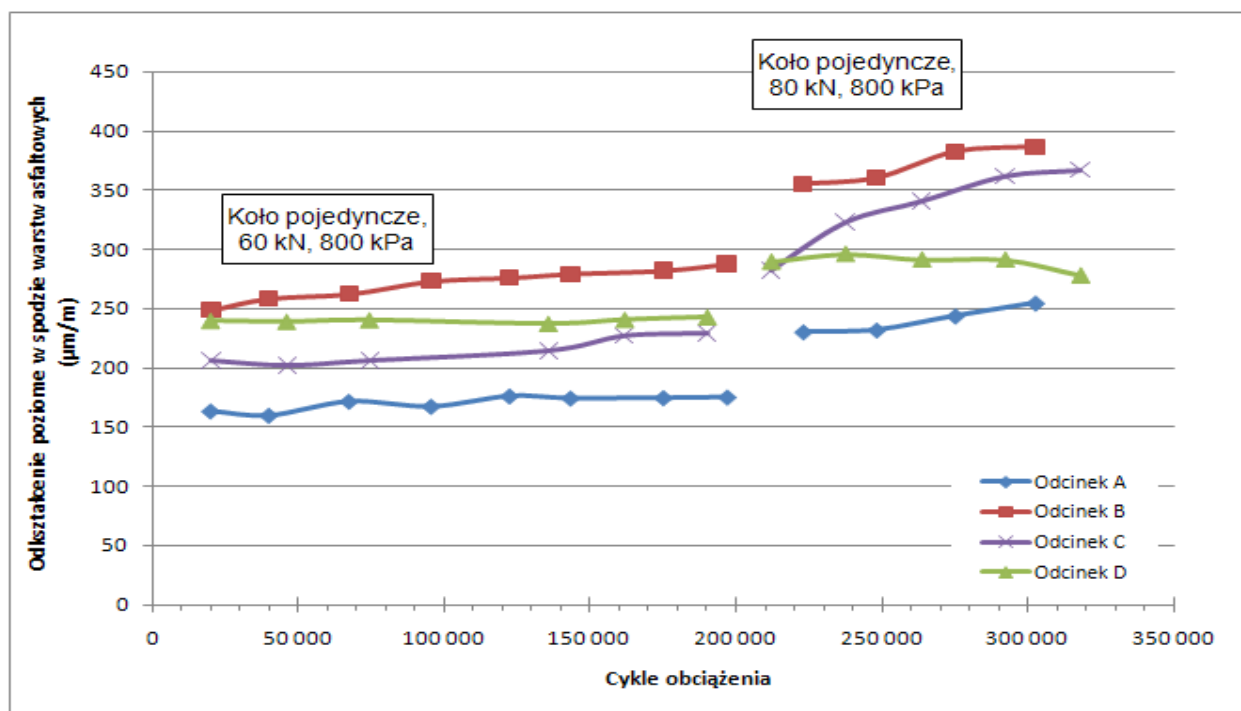
Zasadniczą cechą charakterystyczną tej konstrukcji jest zastosowanie warstwy antyzmęczeniowej, która zgodnie z założeniami koncepcji takiej warstwy powinna zwiększyć trwałość zmęczeniową konstrukcji. Jest to uzyskiwane przez odpowiednie umiejscowienie tej warstwy tj. w spodzie warstw asfaltowych czyli w miejscu, gdzie są największe odkształcenia rozciągające i gdzie najczęściej inicjowane jest zmęczenie konstrukcji oraz przez podwyższoną odporność zmęczeniową mieszanki do tej warstwy. Dobre właściwości zmęczeniowe mieszanki AP AF uzyskano poprzez drobnoziarniste uziarnienie mieszanki mineralno-asfaltowej (asfalt piaskowy) umożliwiające wprowadzenie większej ilości lepiszcza, zastosowanie asfaltu modyfikowanego ORBITON 80C oraz poprzez dodanie włókna polimerowego TOFIC. Dobre właściwości mieszanki AC AF zostały potwierdzone w laboratorium.

Odcinki testowe zostały poddane obciążeniom z zastosowaniem symulatora pojazdów ciężkich (HVS). W ciągu dwóch tygodni nawierzchnia została poddana około 300 000 przejeżdżających koła o obciążeniu 60 i 80 kN. Konstrukcja z warstwą antyzmęczeniową wykazała bardzo dobre właściwości w stosunku do pozostałych konstrukcji. Zaobserwowano bardzo małą deformację trwałą warstwy ścieralnej (rysunek 6) oraz niewielki przyrost odkształceń w spodzie warstw asfaltowych – najmniejszy ze

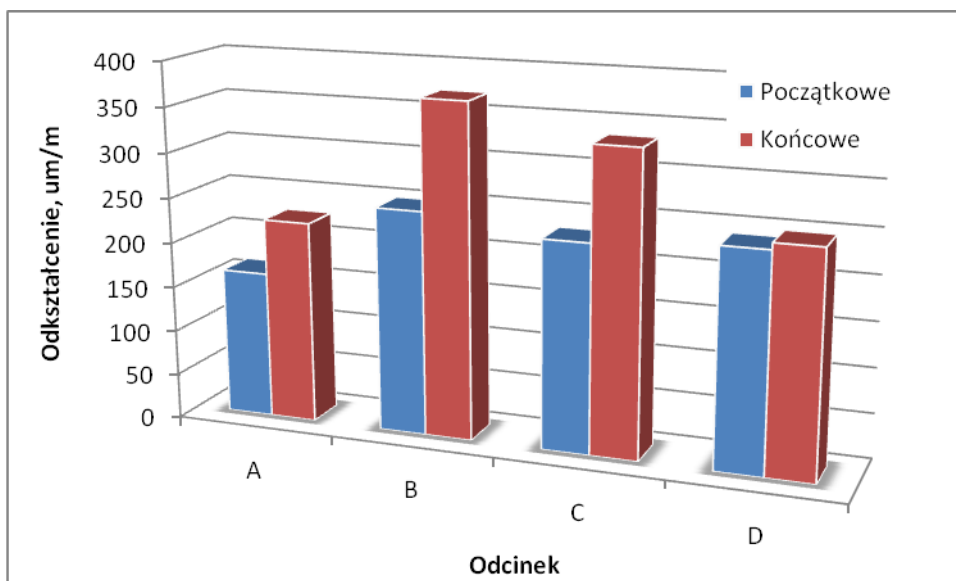
wszystkich konstrukcji poddanych badaniom (rysunek 7 i 8). Dobre właściwości konstrukcji na odcinku D znalazły również potwierdzenie w badaniach FWD (rysunek 9). Zastosowanie warstwy antyzmęczeniowej wykonanej z asfaltu piaskowego z włóknem w spodzie warstw asfaltowych jest efektywnym sposobem na zwiększenie trwałości konstrukcji nawierzchni.



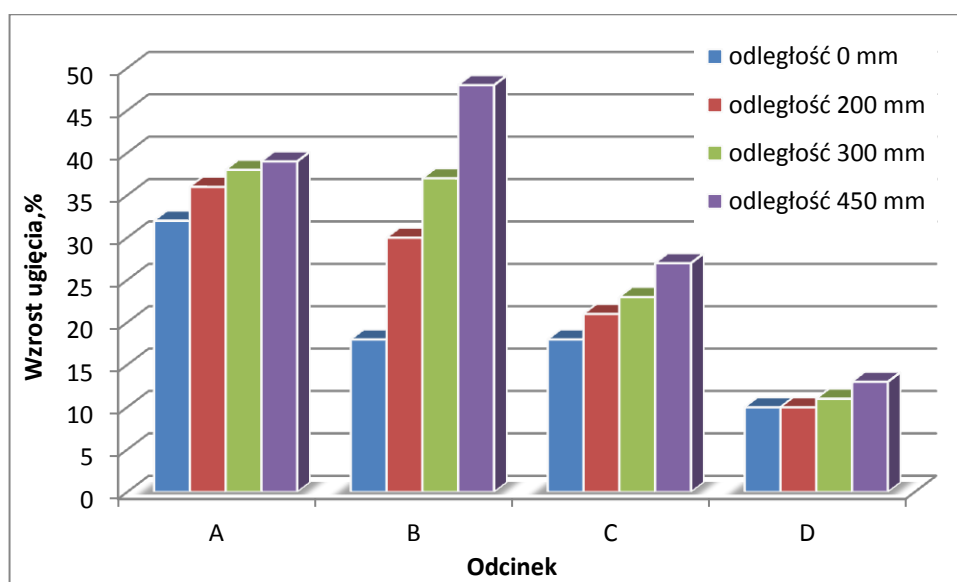
Rysunek 6 Przyrost deformacji warstwy ścieranej w badaniu HVS



Rysunek 7 Przyrost odkształceń poziomych w spodzie warstw asfaltowych w badaniu HVS



Rysunek 8 Porównanie odkształceń w spodzie warstw asfaltowych na początku i po zakończeniu badania HVS



Rysunek 9 Przyrost ugięcia (FWD) na poszczególnych odcinkach

5. Zgromadzenie materiałów do badań oraz podstawowe badania materiałów wyjściowych (Zadanie 2 i 3)

W celu realizacji przyjętego programu badań w niniejszej pracy przewidziano wykonanie projektu betonu asfaltowego o wysokim module sztywności BAWMS16 jako mieszanki porównawczej. Materiały wyjściowe do wykonania projektu BAWMS16 stanowiły:

Lepiszczce: asfalt drogowy 20/30 produkcji Orlen Asfalt

Kruszywo: mączka wapienna, piasek łamany granitowy 0/2 mm, bazalt 2/5, 5/8, 8/11, 11/16 mm,

Włókno: włókno pochodzące z recyklingu opon samochodowych, (materiał odzyskiwany w postaci zgremplowanych włókien kordu) Natomiast kord tekstylny składa się z mieszaniny syntetycznych włókien polimerowych i/lub poliestrowych, i/lub wiskozowych, i/lub poliamidowych, i/lub para-aramidowych

Środek adhezyjny: Wetfix BE produkcji Akzo Nobel.

A. Lepiszczce

Do wykonania mieszanki mineralno-asfaltowej typu BAWMS16 zastosowano asfalt drogowy 20/30 z firmy PKN ORLEN. W tablicy 2 podane zostały podstawowe właściwości tego asfaltu (załącznik 1).

Tablica 2 Podstawowe właściwości asfaltu 20/30

WŁAŚCIWOŚCI		Rodzaj asfaltu
		20/30
Penetracja w 25°C,	0,1 mm	26
Temperatura mięknięcia PiK,	°C	62,4
Temperatura łamliwości wg Fraassa	°C	-12

B. Kruszywo

W tablicy 3 zostało przedstawione uziarnienie materiałów mineralnych oznaczone w laboratorium IBDiM dla poszczególnych frakcji kruszyw przewidzianych do wykonania mieszanki BAWMS16.

Tablica 3 Analizy sitowe kruszyw

Wymiar oczek sita # [mm]	Mączka wapienna	Piasek łam. granitowy 0/2 mm	Bazalt 2/5 mm	Bazalt 5/8 mm	Bazalt 8/11 mm	Bazalt 11/16 mm
20						
16						3,7
12,5						46,7
9,6					29,6	48,9
8,0				4,1	42,3	0,5
6,3				39,1	20,5	0,1
4		0,1	23,2	54,2	6,1	
2		10,3	72,7	2,0	0,8	
0,85		34,1	3,2	0,2		
0,42		27,2	0,2		0,1	
0,3		10,8	0,1			
0,18	0,4	11,3	0,1		0,1	
0,15	0,8	1,3				
0,075	10,8	3,3	0,1		0,1	
<0,075	88,0	1,6	0,4	0,4	0,4	0,1
Łącznie	100	100	100	100	100	0,1

6. Opracowanie składów mieszanek mineralno-asfaltowych przy uwzględnieniu różnej zawartości włókna i lepiszcza (Zadanie 4)

Zgodnie z programem pracy przygotowano składy mieszanek mineralno-asfaltowych o różnej zawartości włókna i lepiszcza typu beton asfaltowy o wysokim module sztywności. Po wstępnej analizie wyników oraz w związku z wydaniem dokumentu „WT-2 Nawierzchnie asfaltowe na drogach publicznych 2008” zdecydowano o opracowaniu drugiego wariantu betonu asfaltowego o wysokim module sztywności ACWMS 16 (porównawcza) oraz z dodatkiem włókna polimerowego i przeprowadzeniu przewidzianych badań. W porównaniu do założeń pierwotnych projektu rozszerzony został więc program i zakres pracy.

6.1. Mieszanka BAWMS16 (wg Zeszytu 70)

Projekt mieszanki BAWMS16 do warstwy podbudowy nawierzchni drogowej o kategorii ruchu od KR3 do KR6 wykonano wg PN-S-96025:2000 [5] i Zeszytu nr 70 [6].

A. Skład MM, MMA

Tablica 4 Skład mieszanki mineralnej (MM) i mineralno-asfaltowej (MMA)

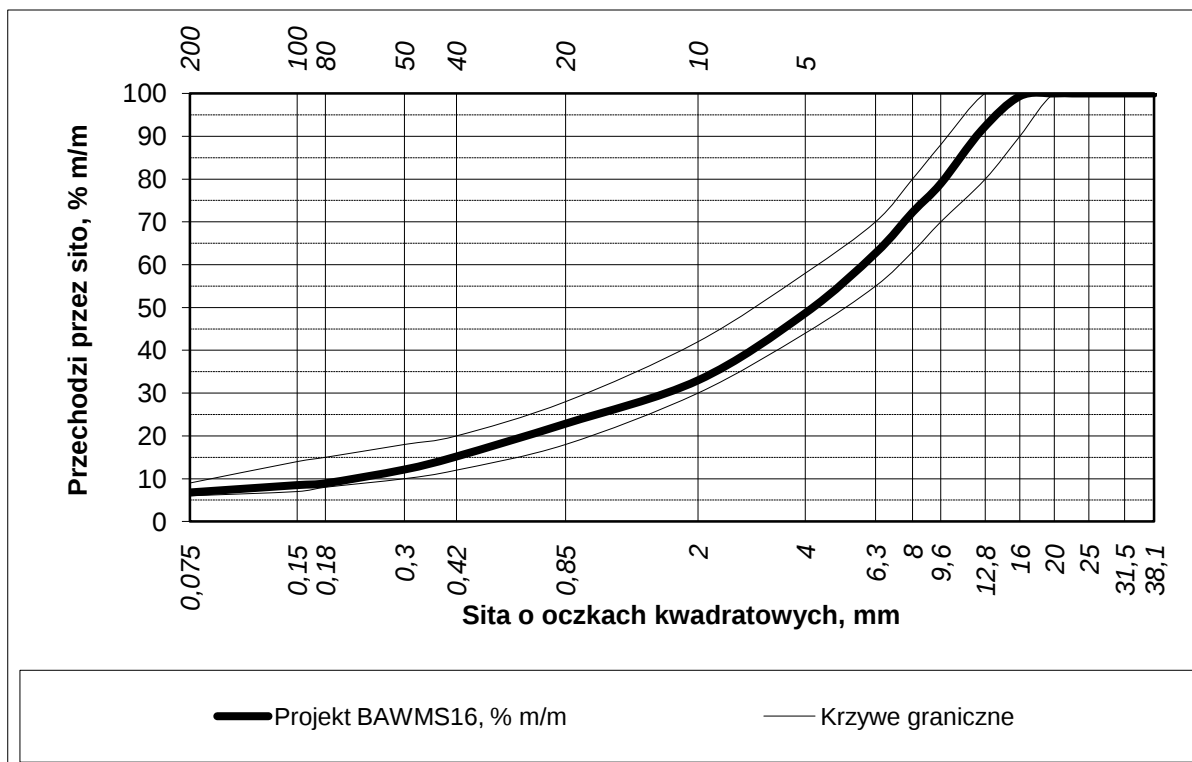
Lp.	Składniki	Mieszanka mineralna % m/m	Mieszanka mineralno-asfaltowa % m/m
1	Mączka wapienna	7,0	6,64
2	Piasek łamany granitowy 0/2 mm	28,0	26,54
3	Bazalt 2/5 mm	17,0	16,12
4	Bazalt 5/8 mm	17,0	16,12
5	Bazalt 8/11 mm	14,0	13,27
6	Bazalt 11/16 mm	17,0	16,12
7	Asfalt drogowy 20/30	-	5,18
8	WETFIX BE	-	0,01
	Razem	100,0	100

W mieszance zastosowano środek adhezyjny: WETFIX BE (0,3 % m/m w stosunku do asfaltu).

B. Krzywa uziarnienia i uziarnienie mieszanki mineralnej

Tablica 5 Uziarnienie mieszanki mineralnej

Sito #, mm	Skład frakcyjny (%)	Pozostaje na sicie (%)	Przechodzi przez sito (%)	Krzywe graniczne Wg PN-S-96025:2000	
				Dolna	Górna
20			100,00	100	100
16		0,63	99,37	90	100
12,5		7,94	91,43	80	100
9,6		12,46	78,97	70	88
8,0		6,7	72,27	63	80
6,3		9,53	62,74	55	70
4,0		14,04	48,70	44	58
2,0	67,00	15,7	33,00	30	42
0,85		10,13	22,87	18	28
0,42		7,66	15,21	12	20
0,3		3,04	12,17	10	18
0,18		3,22	8,95	8	15
0,15		0,42	8,53	7	14
0,075	26,18	1,71	6,82	6	9
<0,075	6,82	6,82	-	-	-
	100	100			



Rysunek 10 Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej BAWMS16 do warstwy wiążącej

C. Właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej, o składzie optymalnym

Tablica 6 Zbadane właściwości mieszanki BAWMS16, o składzie optymalnym zawartość asfaltu $A_m=5,2$ % m/m

Lp.	Właściwości	Wyniki	Wymagania wg Zeszytu 70
1	Gęstość objętościowa mieszanki-mineralnej, g/cm^3	2,908	-
2	Gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm^3	2,649	-
3	Gęstość strukturalna mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm^3	2,582	-
4	Wolna przestrzeń w mieszanke mineralno-asfaltowej, % v/v	2,5	od 1,0 do 4,0
5	Wypełnienie asfaltem wolnej przestrzeni, % v/v	84,2	74 do 90
6	Stabilność wg Marshalla w 60°C , kN	12,3	
7	Odkształcenie wg Marshalla w 60°C , mm	3,7	
8	Moduł sztywności pełzania pod obciążeniem statycznym w 40°C , MPa	40,7	$\geq 21,0$

6.2. Mieszanki BAWMS16 (wg Zeszytu 70) z dodatkiem włókna

Wstępnie ustalono skład mieszanki porównawczej BAWMS16 – bez dodatku włókien (pkt. 6.1). Następnie zostały sprawdzone warianty mieszanki BAWMS16 o takim samym składzie mineralnym z różną zawartością włókien oraz z inną zawartością asfaltu. Badane mieszanki:

BAWMS16 - o zawartość asfaltu 5,0%

BAWMS16 – porównawcza o zawartość asfaltu 5,2%

BAWMS16 –z dodatkiem 0,2% włókien, o zawartość asfaltu 5,2%,

BAWMS16 – z dodatkiem 0,3% włókien, o zawartość asfaltu 5,2%

BAWMS16 – z dodatkiem 0,5% włókien, o zawartość asfaltu 5,2%

BAWMS16 – z dodatkiem 0,5% włókien, o zawartość asfaltu 5,4%

Zestawienie wyników badań powyższych mieszanek zawiera tablica 7.

Na podstawie uzyskanych wyników do dalszych prac wytypowane zostały mieszanki:

BAWMS16 – porównawcza o zawartość asfaltu 5,2% (oznaczenie „P”)

BAWMS16 – z dodatkiem 0,3% włókien, o zawartość asfaltu 5,2% (oznaczenie „W”)

Tablica 7 Zbiorcze zestawienie zbadanych właściwości mieszanki porównawczej oraz mieszanek z różną zawartością włókna i lepiszcza

Opis Skład Właściwości	Rodzaj mieszanki	BAWMS16	BAWMS16 porównawcza	BAWMS16 z dodatkiem WŁÓKNA			Wymagania wg Zeszytu 70
Zawartość asfaltu Am		5,0	5,2	5,2	5,2	5,2	5,4
Zawartość włókna		-	-	0,2	0,5	0,3	0,5
Rodzaj asfaltu	20/30						
Gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm ³		2,658	2,649	2,635	2,626	2,632	2,617
Gęstość strukturalna mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm ³		2,576	2,582	2,559	2,519	2,542	2,533
Wolna przestrzeń w mieszance mineralno-asfaltowej, % v/v		3,1	2,5	2,9	4,0	3,3	3,2
Wypełnienie asfaltem wolnej przestrzeni, % v/v		80,5	84,2	81,9	75,5	79,7	80,5
Stabilność wg Marshalla w 60°C, kN		12,5	12,3	11,5	10,9	11,8	11,5
Odkształcenie wg Marshalla w 60°C, mm		3,6	3,7	4,2	3,6	4,4	4,1
Moduł sztywności pełzania pod obciążeniem statycznym w 40°C, MPa			40,7	31,2	26,95	35,1	28,2
			MMA porównawcza do dalszych badań „P”			MMA z włóknem do dalszych badań „W”	

6.3. Mieszanka ACWMS 16 20/30L (wg WT-2)

A. Informacje ogólne

Przeznaczenie: temat badawczy TN-251, kategoria ruchu KR5-KR6

Podstawa projektu: WT-2 Nawierzchnie Asfaltowe 2008

B. Składniki mieszanki

Lp.	Symbol	Rodzaj	
1	Mączka wapienna	wypełniacz	
2	Granit 0/2 mm	kruszywo drobne granitowe	
3	Bazalt 2/5 mm	Grys	
4	Bazalt 5/8 mm	Grys	
5	Bazalt 8/11 mm	Grys	
6	Bazalt 11/16 mm	Grys	
7	Asfalt 20/30	asfalt drogowy z LOTOS Asfalt – Gdańsk	
8	WETFIX BE	Środek adhezyjny	Akzo Nobel

C. Uziarnienie materiałów mineralnych

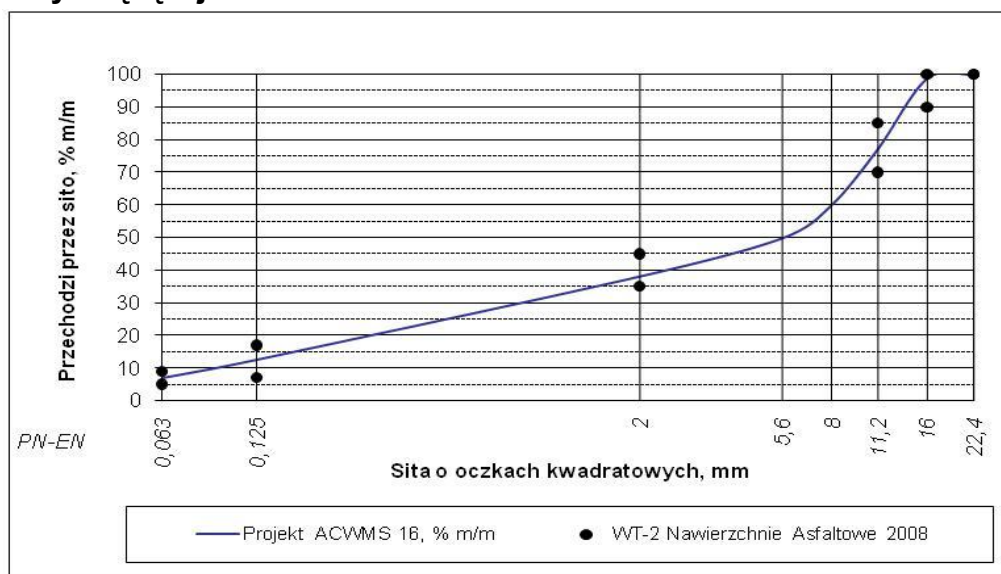
Wymiar oczek sita # [mm]	Mączka wapienna	Granit 0/2 mm	Bazalt 2/5 mm	Bazalt 5/8 mm	Bazalt 8/11 mm	Bazalt 11/16 mm
16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,9
11,2	0,0	0,0	0,0	0,0	6,6	81,3
8	0,0	0,0	0,0	3,3	68,7	12,9
5,6	0,0	0,0	1,6	71,9	20,5	0,6
2	0,0	9,8	94,4	24,3	2,8	0,1
0,125	2,23	69,5	3,8	0,3	0,9	0,0
0,063	13,05	13,5	0,1	0,1	0,2	0,1
<0,063	84,72	7,2	0,1	0,1	0,3	0,1
Łącznie	100	100	100	100	100	100

D. Skład mieszanki mineralnej (MM) i mineralno-asfaltowej (MMA)

Lp.	Składniki	Mieszanka mineralna, % m/m	Mieszanka mineralno-asfaltowa, % m/m
1	Mączka wapienna	5,0	4,78
2	Granit 0/2 [mm]	36,0	34,38
3	Bazalt 2/5 [mm]	6,0	5,73
4	Bazalt 5/8 [mm]	8,0	7,64
5	Bazalt 8/11 [mm]	20,0	19,1
6	Bazalt 11/16 [mm]	25,0	23,87
7	Asfalt 20/30	-	4,49
8	WETFIX BE	-	0,01
	Razem	100,0	100,0

W mieszance zastosowano środek adhezyjny: WETFIX BE (0,3 % m/m w stosunku do asfaltu).

E. Krzywa uziarnienia i uziarnienie mieszanki mineralnej ACWMS 16 20/30L do warstwy wiążącej



Rysunek 11 Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej ACWMS 16 20/30L

F. Uziarnienie mieszanki mineralnej

Sito #, Mm	Pozostaje na sicie, (%)	Przechodzi przez sito, (%)	Uziarnienie wg WT-2 2008 wobec ACWMS 16	
			Dolne	Górne
22,4		100,0	100	100
16	1,22	98,8	90	100
11,2	21,65	77,13	70	85
8	17,23	59,9	-	-
5,6	10,1	49,8	-	-
2	11,72	38,08	35	45
0,125	25,56	12,52	7	17
0,063	5,59	6,93	5	9
< 0,063	6,93		-	-
	100			

G. Zbadane właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej ACWMS 16 20/30L, o składzie optymalnym dla zawartości asfaltu $A_m=4,5$ % m/m

Lp.	Właściwości	Wyniki	Wymagania wg WT-2
1	Gęstość objętościowa mieszanki-mineralnej, g/cm ³	2,873	-
2	Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm ³	2,656	-
3	Gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm ³	2,579	-
4	Zawartość wolnych przestrzeni, %v/v	2,9	$V_{min}2,0$ $V_{max}4,0$
5	Wypełnienie asfaltem wolnej przestrzeni, % v/v	79,7	
6	Odporność na deformacje trwałe (metoda B w powietrzu, 60°C, 10000 cykli)	0,38	$WTS_{AIR} 0,1$
		9,8	$PRD_{AIR} 3,0$
7	Odporność na działanie wody, przechowywanie w 40°C z jednym cyklem zamrażania, badanie w 15°C	85,9	$ITSR_{80}$

6.4. Mieszanka AC WMS16 20/30L/W (wg WT-2) z włóknem

A. Informacje ogólne

Przeznaczenie: temat badawczy TN-251, kategoria ruchu KR5-KR6
Podstawa projektu: WT-2 Nawierzchnie Asfaltowe 2008

B. Składniki mieszanki

Lp.	Symbol	Rodzaj	
1	Mączka wapienna	wypełniacz	
2	Granit 0/2 mm	kr. dr. gran.	
3	Bazalt 2/5 mm	Grys	
4	Bazalt 5/8 mm	Grys	
5	Bazalt 8/11 mm	Grys	
6	Bazalt 11/16 mm	Grys	
7	Asfalt 20/30	asfalt drogowy z LOTOS Asfalt – Gdańsk	
8	WETFIX BE	Środek adhezyjny	Akzo Nobel
9	Włókno polimerowe		

C. Uziarnienie materiałów mineralnych

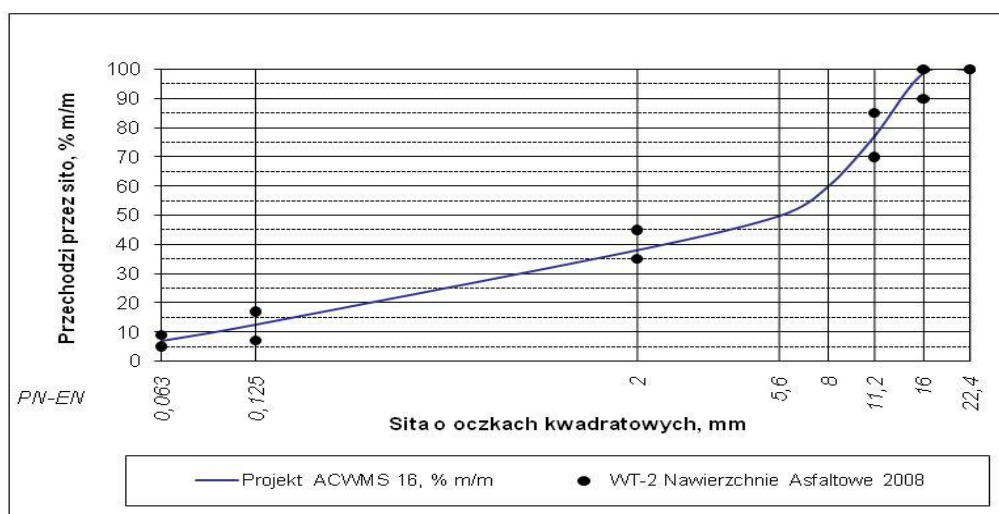
Wymiar oczek sita # [mm]	Mączka wapienna	Granit 0/2 mm	Bazalt 2/5 mm	Bazalt 5/8 mm	Bazalt 8/11 mm	Bazalt 11/16 mm
16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,9
11,2	0,0	0,0	0,0	0,0	6,6	81,3
8	0,0	0,0	0,0	3,3	68,7	12,9
5,6	0,0	0,0	1,6	71,9	20,5	0,6
2	0,0	9,8	94,4	24,3	2,8	0,1
0,125	2,23	69,5	3,8	0,3	0,9	0,0
0,063	13,05	13,5	0,1	0,1	0,2	0,1
<0,063	84,72	7,2	0,1	0,1	0,3	0,1
Łącznie	100	100	100	100	100	100

D. Skład mieszanki mineralnej (MM) i mineralno-asfaltowej (MMA)

Lp.	Składniki	Mieszanka mineralna, % m/m	Mieszanka mineralno-asfaltowa, % m/m
1	Mączka wapienna	5,0	4,78
2	Granit 0/2 [mm]	36,0	34,38
3	Bazalt 2/5 [mm]	6,0	5,73
4	Bazalt 5/8 [mm]	8,0	7,64
5	Bazalt 8/11 [mm]	20,0	19,1
6	Bazalt 11/16 [mm]	25,0	23,87
7	Asfalt 20/30	-	4,49
8	WETFIX BE	-	0,01
	Razem	100,0	100,0

W mieszance zastosowano środek adhezyjny: WETFIX BE (0,3 % m/m w stosunku do asfaltu) oraz włókna polimerowego (0,3 % m/m w stosunku do MM)

E. Krzywa uziarnienia i uziarnienie mieszanki mineralnej ACWMS 16 20/30L/W do warstwy wiążącej



Rysunek 12 Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej ACWMS 16 20/30L/W do warstwy wiążącej

F. Uziarnienie mieszanki mineralnej

Sito #, Mm	Pozostaje na sicie, (%)	Przechodzi przez sito, (%)	Uziarnienie wg WT-2 2008 wobec ACWMS 16	
			Dolne	Górne
22,4		100,0	100	100
16	1,22	98,8	90	100
11,2	21,65	77,13	70	85
8	17,23	59,9	-	-
5,6	10,1	49,8	-	-
2	11,72	38,08	35	45
0,125	25,56	12,52	7	17
0,063	5,59	6,93	5	9
< 0,063	6,93		-	-
	100			

G. Zbadane właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej ACWMS 16 20/30L/W, o składzie optymalnym dla zawartości asfaltu $A_m=4,5$ % m/m

Lp.	Właściwości	Wynik	Wymagania wg WT-2
1	Gęstość objętościowa mieszanki-mineralnej, g/cm ³	2,852	-
2	Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm ³	2,639	-
3	Gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm ³	2,549	-
4	Zawartość wolnych przestrzeni, %v/v	3,4	$V_{min}2,0$ $V_{max}4,0$
5	Wypełnienie asfaltem wolnej przestrzeni, % v/v	76,7	
6	Odporność na deformacje trwałe (metoda B w powietrzu, 60°C, 10000 cykli)	0,1	$WTS_{AIR} 0,1$
		4,6	$PRD_{AIR} 3,0$
7	Odporność na działanie wody, przechowywanie w 40°C z jednym cyklem zamrażania, badanie w 15°C	85,6	$ITSR_{80}$

7. Metodyka badania

7.1. Koleinowanie (duży aparat)

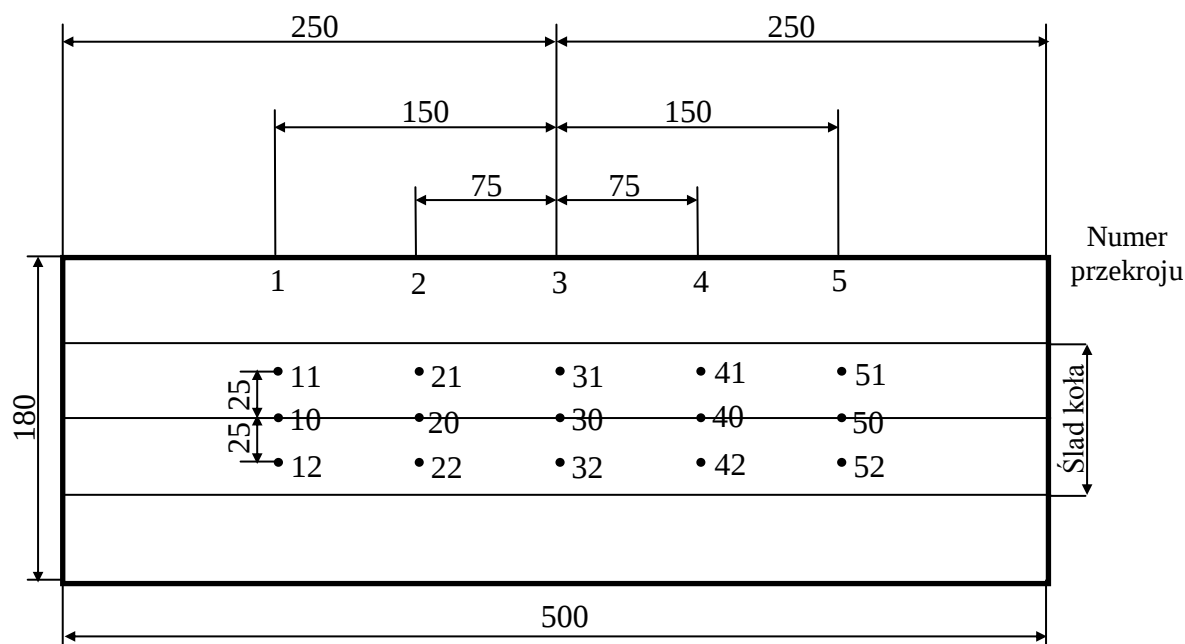
Określanie odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na deformacje trwałe przy pomocy aparatu LCPC (zwanego w normie PN-EN 12697-22 [7] aparatem dużym) polega na poddaniu zagęszczonej próbki z mieszanki mineralno-asfaltowej wielokrotnym przejazdowi znormalizowanego koła ogumionego, w znormalizowanych warunkach temperatury, nacisku i liczby przejazdów koła po próbce. Po zakończeniu badania jest mierzona głębokość koleiny utworzonej na próbce przez koło.

Warunki badania:

- długość przejazdu koła $410 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$,
- częstotliwość ruchu koła: $1 \text{ Hz} \pm 0,1 \text{ Hz}$,
- ciśnienie w oponie: $6 \pm 0,1 \text{ bar}$ (na początku badania),
- obciążenie ruchome $5000 \pm 50 \text{ N}$, pomierzone statycznie na środku próbki, odchylenie osi śladu od osi teoretycznej próbki $< 5 \text{ mm}$,
- brak kąta załomu,
- temperatura badania $+ 60 \pm 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- liczba cykli obciążających kołem wynosi 30 000.

Do badania przygotowuje się dwie próbki o wymiarach (dł. 500 mm * szer. 180 mm * wys. 100 mm). Formy z próbkami umieszcza się na płycie aparatu. Próbkę poddaje się 1000 cyklom wstępnego obciążenia ruchomego, w temperaturze zawartej pomiędzy 15 a 25 °C. Po wstępnej fazie dostosowania, wykonuje się pomiar zerowy m_{i0j} ($j = 1 \div 15$) zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 13. Dokonuje się ustawienia temperatury pomiaru w komorze na +60 °C mierzonej w otworze wywierconym w próbce. Próbka jest przechowywana w tych warunkach, co najmniej przez 12 h przed wykonaniem badania. Następnie próbkę obciąża się obciążeniem ruchomym od kół. Po zatrzymaniu koła odczytuje się wartość temperatury próbki. Następnie wykonuje się pomiary głębokości koleiny m_{ij} , w punktach i w kolejności zaznaczonej na rysunku 13.

Dla każdej próbki wykonuje się pomiary w pięciu przekrojach, po trzy odczyty.



Rysunek 13 Schemat pomiaru głębokości koleiny w aparacie LCPC

Głębokość koleiny P_i pojedynczej próbki oblicza się wg równania:

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^{15} (m_{ij} - m_{ij0})}{15 \times E} \times 100, \% \text{ (mm/mm)} \quad \text{Równanie 1}$$

j – punkt pomiaru 1 ÷ 15,

E – grubość badanej próbki, mm,

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

m_{ij0} – odczyty zerowe w śladzie koła w poszczególnych punktach, mm.

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

7.2. Koleinowanie (mały aparat)

Mały koleinomierz wykorzystywany jest do oceny odporności mieszanki mineralno-asfaltowej na deformacje trwałe. Badanie przeprowadza się zgodnie z normą PN-EN 12697-22 [7]. Odpowiednio obciążone koło, z gumową oponą, porusza się cyklicznie po próbce z mieszanki mineralno-asfaltowej z określoną prędkością. W komorze utrzymywana jest temperatura 60°C. Próbki poddane badaniom mogą być przygotowane w zagęszczarce walcowej i mieć kształt płyty o wymiarach 260 na 320 mm oraz grubości od 30 do 120 mm, ewentualnie mogą być odwierconymi rdzeniami o średnicy 200 mm. Podczas typowego badania koło dociskane jest do próbki z siłą $700 \pm$

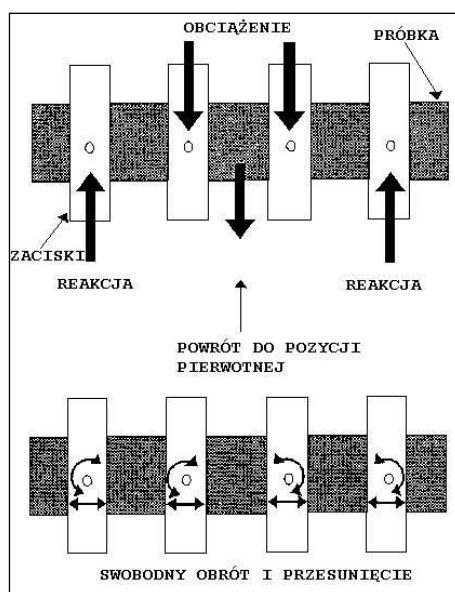
10 N, temperatura badania wynosi $60^{\circ}\text{C} \pm 1,0^{\circ}\text{C}$, a przyrost koleiny jest stale monitorowany, za pomocą elektromagnetycznego czujnika w 35 punktach z dokładnością do 0,01 mm. Poniżej przedstawiono aparat do koleinowania użyty w poniższych badaniach.



Rysunek 14 Mały koleinomierz w IBDiM

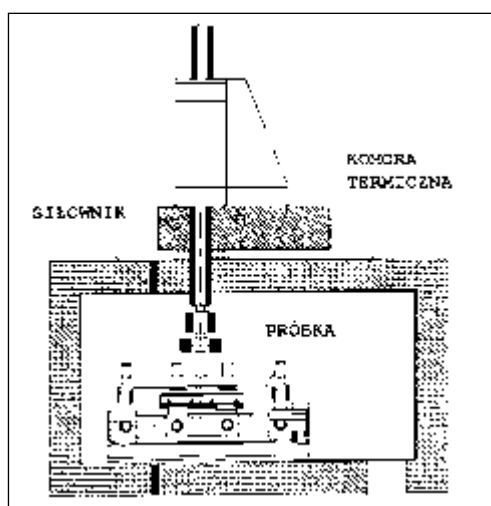
7.3. Odporność na zmęczenie

Badania zmęczeniowe przeprowadzono metodą belki 4-punktowo zginanej (4PB) wg normy PN-EN 12697-24. Badanie prowadzone jest pod obciążeniem cyklicznym na próbkach belkowych prostopadłościennych umocowanych w specjalnym aparacie za pomocą czterech uchwytów. Belki poddawane są cyklicznemu zginaniu pod obciążeniem sinusoidalnym w warunkach swobodnego obrotu i przesunięcia w miejscach podparcia i obciążenia belki (rys. 15). Obciążenie jest przykładane do dwóch środkowych uchwytów w kierunku prostopadłym do podstawy belki. Podczas badania rejestrowana jest siła obciążająca, ugięcie belki oraz kąt przesunięcia fazowego w funkcji liczby cykli obciążenia.



Rysunek 15 Umocowanie próbki w aparacie zmęczeniowym

Badania prowadzi się na próbkach belkowych wyciętych z większych płyt zagęszczonych w laboratorium o wymiarach: 380 ± 3 mm (długość), 50 ± 3 mm (wysokość), 63 ± 3 mm (szerokość). Wszystkie powierzchnie są ścięte, gładkie i wzajemnie prostopadłe. Wycięte próbki są suszone do uzyskania stałej masy (nie więcej niż 0,25% na 24h), a następnie wymiarowane. Przed rozpoczęciem badania próbki są przez minimum dwie godziny termostатовane w aparacie zmęczeniowym umieszczonym w komorze termicznej (rys.16).



Rysunek 16 Schemat aparatu zmęczeniowego w komorze termicznej

Badania zmęczenia przeprowadzono w następujących warunkach:

- częstotliwość 10 Hz,

- obciążenie sinusoidalne,
- tryb kontrolowanych odkształceń,
- temperatura badania - temperatura równoważna ze względu na zmęczenie nawierzchni, która w Polsce wynosi 10°C [8].

W trakcie badania zmęczenia rejestrowana jest siła obciążająca, ugięcie belki oraz kąt przesunięcia fazowego w funkcji liczby cykli obciążenia. System komputerowy na bieżąco wyświetla rejestrowane wielkości oraz sztywność zastępcza próbki. Zgodnie z założeniami normy badanie powinno być prowadzone do momentu konwencjonalnego zniszczenia próbki, czyli do chwili, kiedy moduł sztywności próbki zmniejszy się o połowę. Dla potrzeb pracy badanie było w większości przypadków kontynuowane do momentu, aż moduł sztywności zmniejszy się o około 60%. Następnie wyznaczono trwałość zmęczeniową według kryterium konwencjonalnego i kryterium energetycznego. W badaniach laboratoryjnych trwałość zmęczeniowa próbki określana jest jako liczba cykli obciążenia do spełnienia kryterium zmęczeniowego wyznaczającego moment zniszczenia próbki.

Według powszechnie stosowanego konwencjonalnego kryterium zmęczeniowego próbka uznawana jest za zniszczoną w momencie, kiedy moduł sztywności osiągnie 50% wartości początkowej. Drugim zastosowanym kryterium jest kryterium zmęczeniowe według metody energetycznej. Koncepcja nowej definicji trwałości zmęczeniowej (oznaczanej jako N1) oparta na energii rozproszonej została przedstawiona przez Hopmana na sympozjum EUROBITUME w Madrycie w roku 1989 [9]. Podczas badania zmęczenia można zaobserwować nagłą zmianę w wykresie energii rozproszonej [10], co wskazuje na rozpoczęcie końcowej fazy badania, czyli gwałtownej degradacji próbki [11]. Według definicji trwałości zmęczeniowej oznaczanej N1, jest to liczba cykli, po której następuje odchylenie wykresu współczynnika energii rozproszonej od linii prostej [11]. W pracy wykorzystano metodę wyznaczania N1 opracowaną Rowe'a [12].

7.4. Moduł sztywności

Badanie modułu sztywności przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12697-26. Polega ona na zginaniu próbki belkowej umieszczonym w aparacie zmęczeniowym przy stałej amplitudzie odkształcenia. Podczas badania rejestrowana jest siła, ugięcie belki, kąt przesunięcia fazowego, liczba cykli, obliczany jest moduł sztywności oraz naprężenia i odkształcenia rozciągające.

Warunki badania zespolonego modułu sztywności przyjęto następujące:

- temperatura: 0, 10, 20, 30°C,
- częstotliwość: 1, 2, 5, 8, 10 Hz,
- odkształcenie: 50 μmm/mm.

Badania modułu sztywności metodą 4PB będą kontynuowane w pozostałych temperaturach w ramach kontynuacji zadania 5 w etapie II wg zatwierdzonego programu pracy.

Wynikiem badania jest moduł sztywności i kąt przesunięcia fazowego. Zespolony moduł sztywności E^* jest liczbą zespoloną, którą można opisać równaniem:

$$E^* = E' + iE'' \quad \text{Równanie 2}$$

w którym:

$$E' = |E^*| \cos \varphi \quad \text{Równanie 3}$$

$$E'' = |E^*| \sin \varphi \quad \text{Równanie 4}$$

E' – część rzeczywista (sprężysta),

E'' – część urojona (lepka).

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

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{E''}{E'} \quad \text{Równanie 5}$$

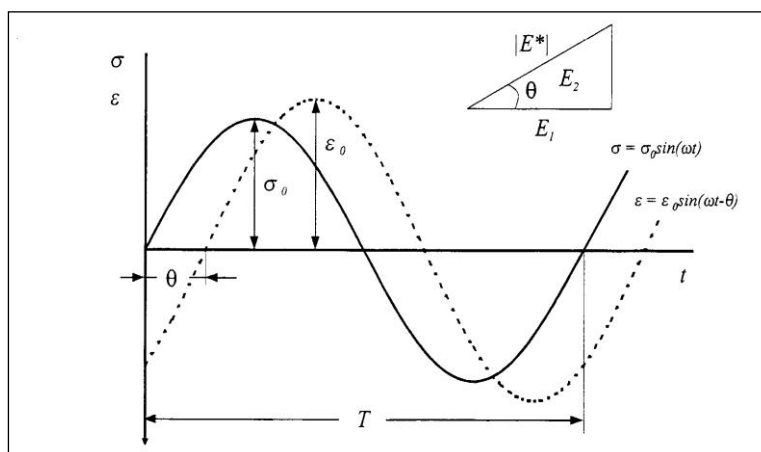
w którym:

φ - kąt przesunięcia fazowego, °.

Moduł sztywności jest wartością bezwzględną zespolonego modułu sztywności. Kąt przesunięcia fazowego stanowi informację o przewadze właściwości lepkich lub sprężystych w materiale: niższa jego wartość tym materiał bardziej sprężysty. Wartość kąta przesunięcia fazowego może wynosić od 0 (stal) do 90° (ciecze).

Kąt przesunięcia fazowego wynika z faktu, iż w ciałach lepkosprężystych odkształcenie pojawia się z pewnym opóźnieniem w stosunku do obciążenia (rys.17). Jako kryterium oceny lepkosprężystych właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych przyjmuje się wartość tangensa kąta przesunięcia fazowego [13]:

- w materiałach lepkich $\varphi = 90^\circ$, $\tan \varphi = \infty$,
- w materiałach sprężystych $\varphi = 0^\circ$, $\tan \varphi = 0$,
- w materiałach lepkosprężystych $0^\circ < \varphi < 90^\circ$, $0 < \tan \varphi < \infty$.



Rysunek 17 Ilustracja kąta przesunięcia fazowego

Materiały bitumiczne są materiałami, których właściwości reologiczne zależą od czasu obciążenia (badanie statyczne) lub częstotliwości obciążenia (badanie dynamiczne) oraz temperatury [14,15]. Czas (częstotliwość) obciążenia i temperatura są wielkościami wymiennymi. Oznacza to, że modułowi sztywności w wysokiej temperaturze i krótkim czasie obciążenia odpowiada równoważny pod względem wartości moduł w niższej temperaturze i dłuższym czasie obciążenia. Moduł sztywności (lub kąt przesunięcia fazowego) wyznaczony w danej temperaturze i czasie obciążenia może być więc transponowany do innej temperatury:

$$E(T,t) = E(T_0, \frac{t}{a_T}),$$

Równanie 6

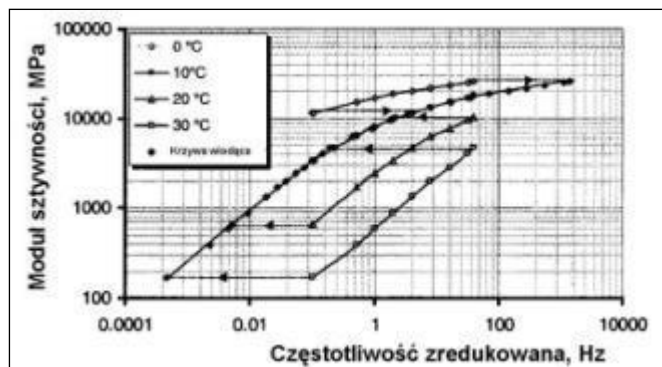
w którym:

$E(T,t)$ – moduł sztywności w temperaturze T i czasie obciążenia t ,

$E(T_0, t/a_T)$ – moduł sztywności w temperaturze T_0 i zredukowanym czasie obciążenia t/a_T ,

a_T – współczynnik przesunięcia temperaturowego.

Dysponując wynikami badań modułu w różnych warunkach i stosując zasadę superpozycji można wyniki sprowadzić do jednej krzywej nazywanej krzywą wiodącą (ang. master curve) (rysunek 18). Znane są różne metody graficzne i analityczne umożliwiające przeprowadzenie takiej transpozycji [16,17].



Rysunek 18 Przykład opracowania krzywej wiodącej

7.5. Wodoodporność

Określanie wrażliwości próbek asfaltowych na wodę wykonano zgodnie z normą PN-EN 12697-12. Do badania każdej mieszanki 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 wypełnionej 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 czyli określono wytrzymałość próbek na rozciąganie pośrednie.

Wskaźnik wytrzymałości na rozciąganie pośrednie ITSR obliczono według poniższego wzoru:

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

Równanie 7

w którym:

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

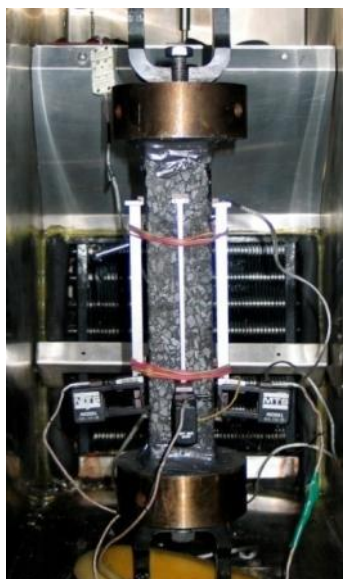
ITS_w – średnia wytrzymałość wyznaczona dla grupy próbek mokrych, w (kPa),

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

7.6. Odporność na pękanie niskotemperaturowe

Badania odporności na pękanie niskotemperaturowe przeprowadzono metodą TSRST, którego koncepcja została opracowana przez Monismitha i in. [18], później zastosowana przez Fabba [19] i udoskonalona przez Aranda [20], który przeprowadził obszerne badania wpływu składu mieszanki mineralno-asfaltowej na jej odporność niskotemperaturową [21]. We współpracy z Arandem dokonano też po raz pierwszy oceny właściwości niskotemperaturowych asfaltów drogowych stosowany w Polsce [22]. Metodyka ta została zaakceptowana w programie badawczym SHARP w USA.

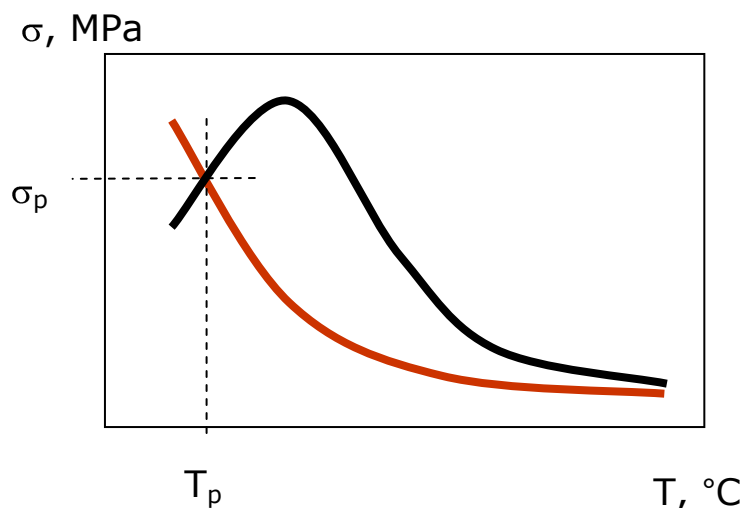
Badania przeprowadzane są zgodnie z normą AASHTO TP10-93 [23] na stanowisku pomiarowym MTS. Próbki do badań mają kształt prostopadłościenny o wymiarach 50 x 50 x 250 mm. Do górnej i dolnej podstawy próbki przykleja się stalowe krążki, które umożliwiają zamocowanie w ramie wytrzymałościowej (rys. 19). Do bocznych krawędzi próbki przykleja się ekstensometry do pomiaru odkształceń wzdłużnych. Całość zamykana jest w komorze termicznej. Temperatura początkowa badania wynosi 5°C, a następnie jest obniżana z prędkością 10°C/h. Zadaniem ramy wytrzymałościowej jest niedopuszczenie do odkształcenia (skurczu) próbki. W takich warunkach w próbce indukowane są termiczne naprężenia rozciągające. 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.



Rysunek 19 Umocowanie próbki w badaniu TSRST

Spękania niskotemperaturowe należą do spękań indukowanych termicznie. Obniżenie temperatury do wartości ujemnych powoduje zeszywnienie warstwy, przejście ze stanu lepkoplastycznego 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 (rys. 20).

Z powyższych zależności wynika, że mieszanka mineralno-asfaltowa jest tym bardziej odporna na spękania niskotemperaturowe, im w niższej temperaturze osiąga wytrzymałość na rozciąganie. Pojawienie się pęknięcia na powierzchni nawierzchni przyczynia się do powstania tzw. zjawiska karbu i koncentracji naprężeń oraz następuje propagacja pęknięcia.



Rysunek 20 - Schemat przebiegu pęknięcia niskotemperaturowego nawierzchnia asfaltowej: czerwona linia – naprężenie rozciągające termiczne, czarna linia – wytrzymałość na rozciąganie mieszanki mineralno-asfaltowej, σ_p – naprężenie niszczące, T_p – temperatura niszcząca

7.7. Symulacja starzenia krótko- i długoterminowego

Do badań przygotowano próbki mieszanki w stanie oryginalnym (tzn. bez starzenia, oznaczenie próbek i mieszanek „O”), po starzeniu krótkoterminowym STOA (oznaczenie „K”) oraz po starzeniu długoterminowym LTOA (oznaczenie „D”). Procedury starzenia przedstawiono poniżej.

Starzenie krótkoterminowe STOA

Mieszanke mineralno-asfaltową wytwarza się w mieszarce, w temperaturze ok. 150°C. Mieszanke w stanie luźnym (bez zagęszczenia) poddaje się procesowi starzenia krótkoterminowego STOA. Na metalowej formie rozkłada się mieszanke tak, aby grubość warstwy stanowiła około 1,5 cm. Następnie formę umieszcza się w suszarce z wymuszonym obiegiem, w temperaturze 135°C±1°C. Mieszanke poddaje się starzeniu w suszarce przez 4 godziny, cyklicznie mieszając co ok. 50 minut. Po wyjęciu z suszarki mieszanke podgrzewa się do temperatury zagęszczania i formuje próbki

Starzenie długoterminowe LTOA

Starzenie długoterminowe wykonuje się na próbkach zagęszczonych i poddanych wcześniej starzeniu krótkoterminowemu STOA. Starzenie

długoterminowe polega na umieszczeniu zagęszczonych próbek Marshalla w suszarce z wymuszonym obiegiem, w temperaturze $85^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ i wygrzewaniu przez okres 120 godzin.

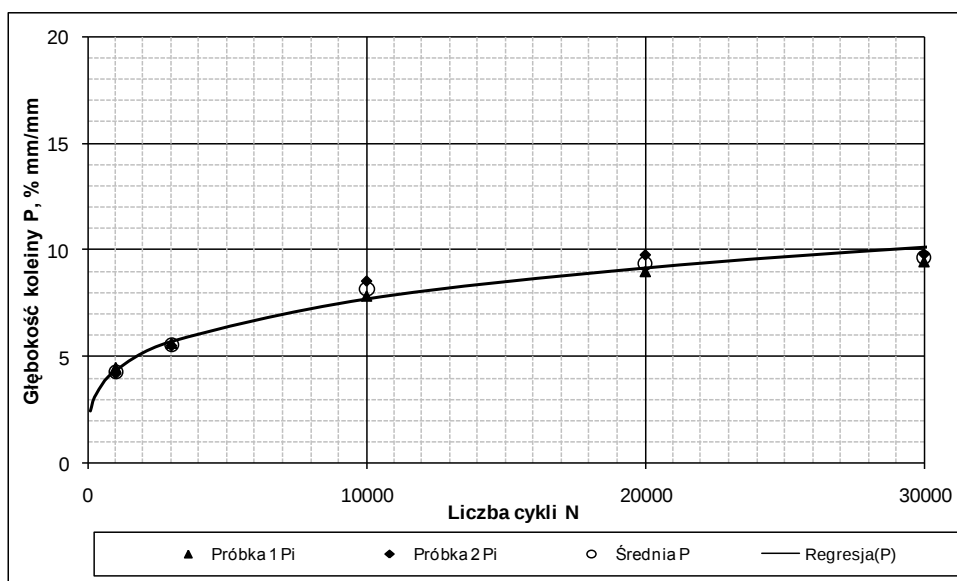
8. Wyniki badań

8.1. Koleinowanie (Zadanie 5.1)

W tablicach 8 - 9 oraz na rysunkach 21 - 22 przedstawiono wyniki badania koleinowania w dużym aparacie mieszanek z włóknem oraz mieszanki porównawczej w stanie bez starzenia.

Tablica 8 Wyniki badań zmęczenia koleinowania mieszanki porównawczej w dużym aparacie (P O)

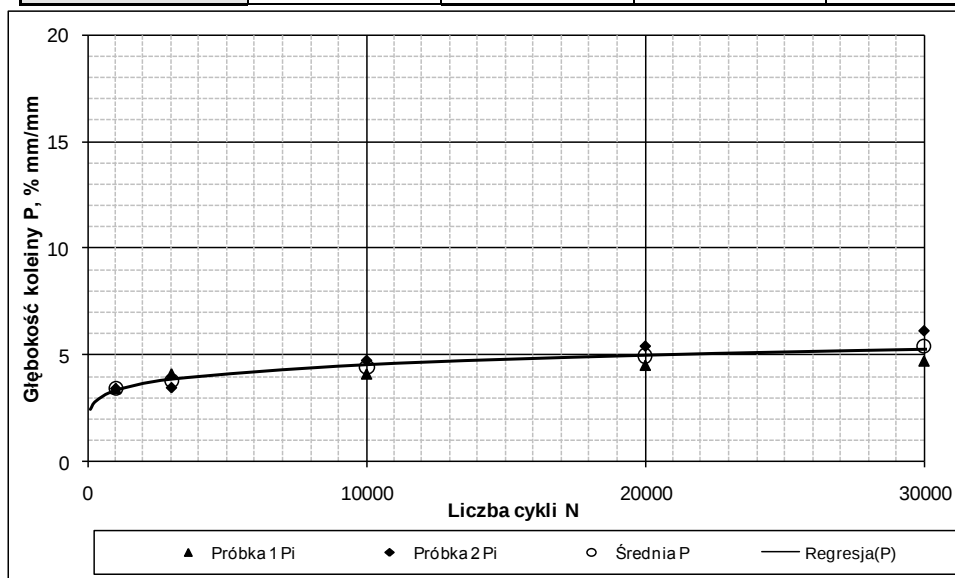
Liczba cykli	1 000	3 000	10 000	20 000	30 000
Próbka 1, Pi	4,5 %	5,6 %	7,8 %	9,0 %	9,4 %
Próbka 2, Pi	4,2 %	5,5 %	8,5 %	9,8 %	9,8 %
Średnia, P	4,3 %	5,5 %	8,2 %	9,4 %	9,6 %



Rysunek 21 Przebieg badania koleinowania w dużym aparacie mieszanki porównawczej (P O)

Tablica 9 Wyniki badań zmęczenia koleinowania mieszanki z włóknem w dużym aparacie (W O)

Liczba cykli	1 000	3 000	10 000	20 000	30 000
Próbka 1, Pi	3,4 %	4,1 %	4,1 %	4,5 %	4,7 %
Próbka 2, Pi	3,4 %	3,5 %	4,7 %	5,4 %	6,1 %
Średnia, P	3,4 %	3,8 %	4,4 %	4,9 %	5,4 %

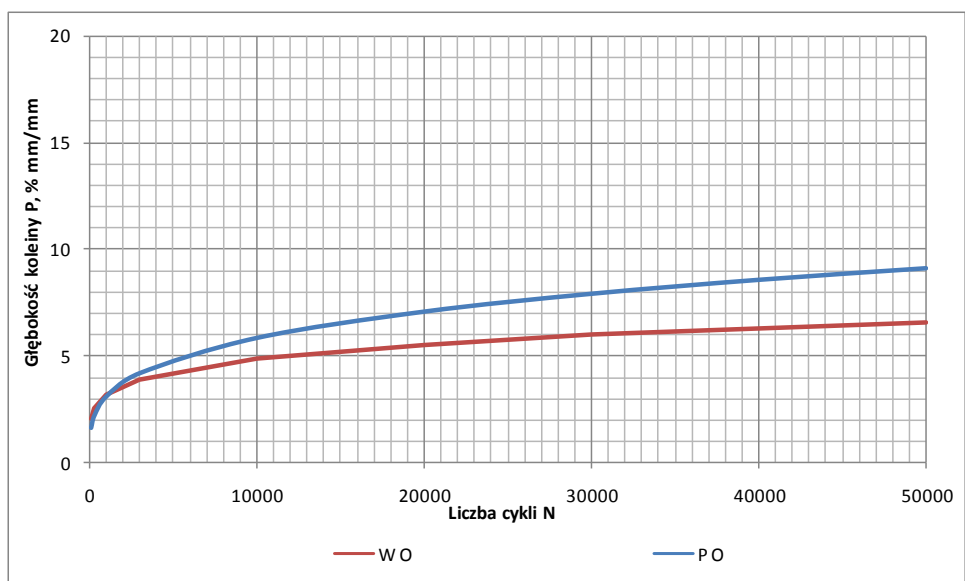


Rysunek 22 Przebieg badania koleinowania w dużym aparacie mieszanki z włóknem (W O)

Dla celów porównawczych i poznawczych przeprowadzono również dodatkowo w stosunku do założeń programu pracy badanie koleinowania w małym aparacie wg normy PN-EN 12697-22 w warunkach badania określonych w PN-EN 13108-20. Wyniki przedstawiono w tablicy 10 i na rysunku 23. Nachylenie wykresu koleinowania WTS_{AIR} wyniosło 0,07 w przypadku mieszanki z włóknem i 0,14 w przypadku mieszanki porównawczej.

Tablica 10 Wyniki badań zmęczenia koleinowania mieszanki porównawczej oraz mieszanki z włóknem w małym aparacie (głębokość koleiny, %)

Liczba cykli	100	300	1000	3000	10000 (PRD_{AIR})	20000	30000	40000	50000
P O	1,4 %	1,9 %	3,1 %	4,3 %	5,9 %	7,0 %	7,9 %	8,5 %	9,1 %
W O	1,3 %	1,9 %	3,0 %	4,1 %	5,0 %	5,5 %	5,8 %	6,0 %	6,1 %



Rysunek 23 Przebieg badania koleinowania w małym aparacie mieszanki z włóknem oraz mieszanki porównawczej

8.2. Odporność na zmęczenie (Zadanie 5.2)

W ramach realizacji etapu I przeprowadzono badania zmęczeniowe metodą belki czteropunktowo zginanej w temperaturze 10°C na mieszance porównawczej i mieszance z włóknem. Wyniki badań przedstawiono w tablicach 11 - 16 i na rysunkach 24 - 29.

Tablica 11 Wyniki badań zmęczenia mieszanki porównawczej bez starzenia (P O)

Próbka	B, mm	H, mm	E ₀ , MPa	ε, μm/m	N	N1
P O 1	63,2	50,2	16 736	127,7	4 636 778	4 215 181
P O 2	62,2	50,1	14 674	127,4	> 6 000 000	> 6 000 000
P O 3	63,4	50,1	16 171	187,6	366 297	335 197
P O 5	63,7	50,2	15 631	187,4	438 200	398 000
P O 6	63,6	50,3	15 129	187,8	369 401	345 221
P O 7	63,6	50,2	14 670	187,2	437 401	394 401
P O 8	63,6	50,2	15 092	187,7	319 801	294 881
			średnia	127,5	> 5 000 000	> 5 000 000
			średnia	187,5	386 220	353 540

Tablica 12 Wyniki badań zmęczenia mieszanki z włóknem bez starzenia (W O)

Próbka	B, mm	H, mm	E ₀ , MPa	ε, μm/m	N	N1
W O 1	63,4	50,5	14 512	188,1	359 598	326 938
W O 3	63,6	50,4	15 036	128,7	10 419 134	9 505 542
W O 4	63,6	50,4	13 373	189,5	419 499	369 899
W O 5	63,5	50,1	15 151	188,7	575 396	532 697
W O 7	63,6	50,2	13 647	188,5	849 599	774 300
			średnia	128,7	10 419 134	9 505 542
			średnia	188,7	551 023	500 959

Tablica 13 Wyniki badań zmęczenia mieszanki porównawczej po starzeniu krótkoterminowym (P K)

Próbka	B, mm	H, mm	E ₀ , MPa	ε, μm/m	N	N1
P K 1	63,3	48,5	18 590	187,4	189 199	172 399
P K 2	63,6	50,4	17 617	188,5	216 099	192 399
P K 3	63,5	50,3	18 671	187,6	183 399	160 999
P K 4	63,3	50,4	18 022	187,6	142 199	126 899
			średnia	187,8	182 724	163 174

Tablica 14 Wyniki badań zmęczenia mieszanki z włóknem po starzeniu krótkoterminowym (W K)

Próbka	B, mm	H, mm	E ₀ , MPa	ε, μm/m	N	N1
W K 1	63,3	50,1	16 829	189,6	723 496	654 596
W K 2	63,4	50,1	17 024	189,3	453 297	407 097
W K 3	63,3	50,1	17 068	188,6	366 497	315 697
W K 4	63,4	50,3	17 362	187,4	280 798	249 898
			średnia	188,7	456 022	406 822

Tablica 15 Wyniki badań zmęczenia mieszanki porównawczej po starzeniu długoterminowym (P D)

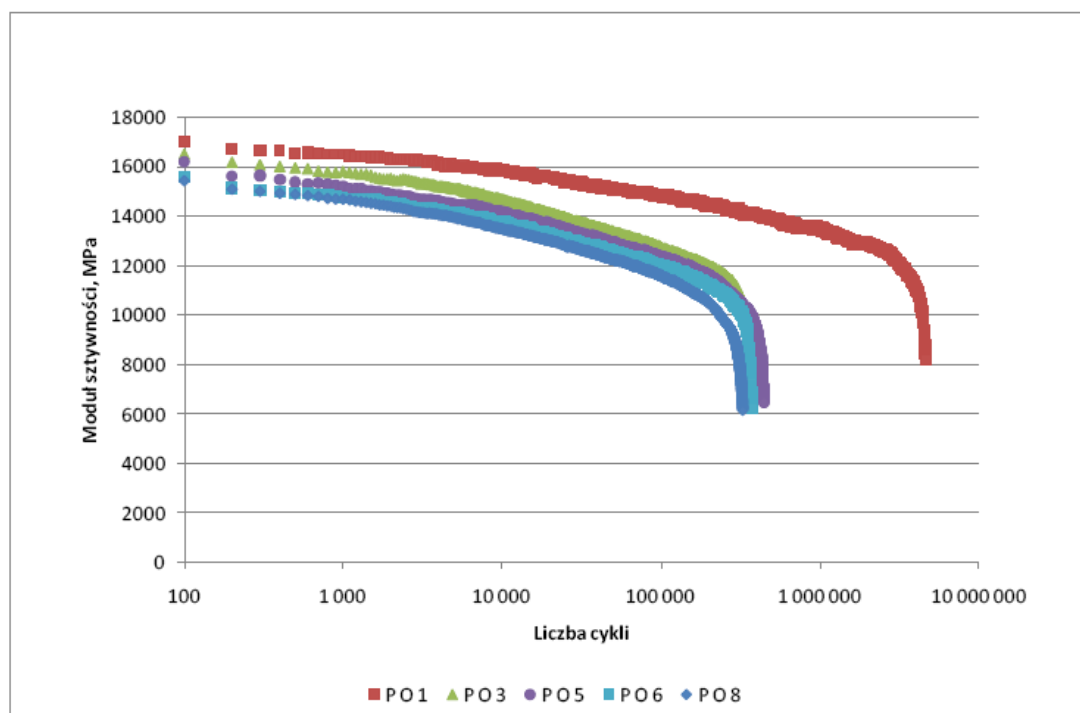
Próbka	B, mm	H, mm	E_0 , MPa	ϵ , $\mu\text{m/m}$	N	N1
P D 1	63,7	63,6	18 466	187,3	205 399	175 799
P D 2	63,5	63,6	18 144	186,4	257 599	227 899
P D 3	63,5	63,5	19 392	184,8	242 699	222 799
P D 4	63,6	63,5	18 193	186,0	402 298	360 298
P D 6	63,2	63,1	16 757	186,7	378 582	342 981
P D 8	63,0	63,1	12 229	185,0	426 896	373 797
			średnia	186,0	318 912	283 929

Tablica 16 Wyniki badań zmęczenia mieszanki z włóknem po starzeniu długoterminowym (W D)

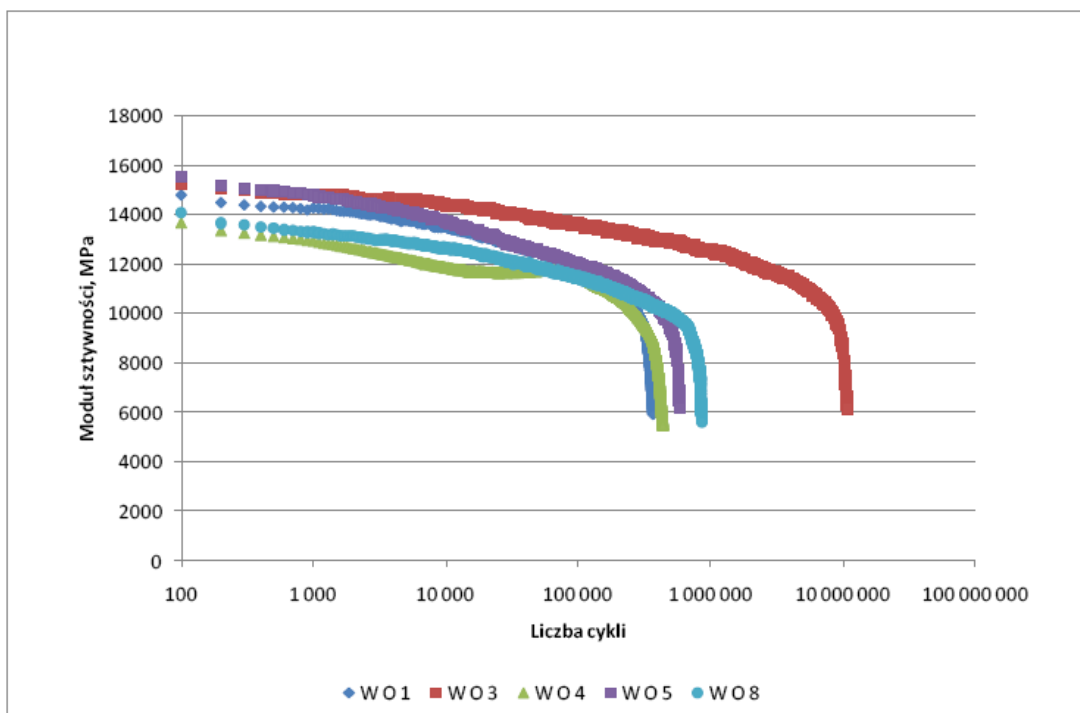
Próbka	B, mm	H, mm	E_0 , MPa	ϵ , $\mu\text{m/m}$	N	N1
W D 1	63,4	50,2	19 338	186,6	341 899	297 899
W D 2	63,5	50,3	19 537	186,3	227 499	192 999
W D 3	63,3	50,4	19 513	186,1	306 798	272 798
W D 4	63,4	50,5	18 964	184,6	238 798	211 298
W D 5	63,0	50,3	18 639	185,2	199 599	172 099
W D 6	63,2	50,1	18 784	186,7	212 899	189 499
W D 7	63,2	50,2	18 359	185,3	368 797	317 297
			średnia	185,8	270 898	236 270

Oznaczenia w tablicach:

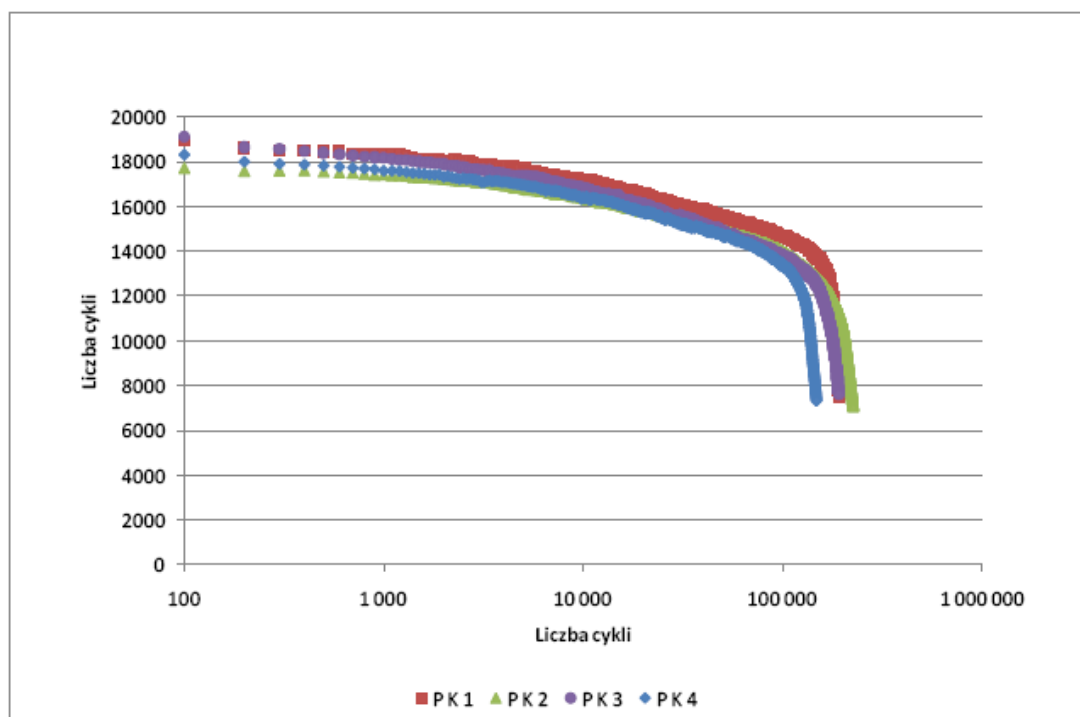
B – szerokość, H – wysokość, E_0 – początkowy moduł sztywności, ϵ – odkształcenie, N – trwałość zmęczeniowa, N1 – trwałość zmęczeniowa metodą energetyczną



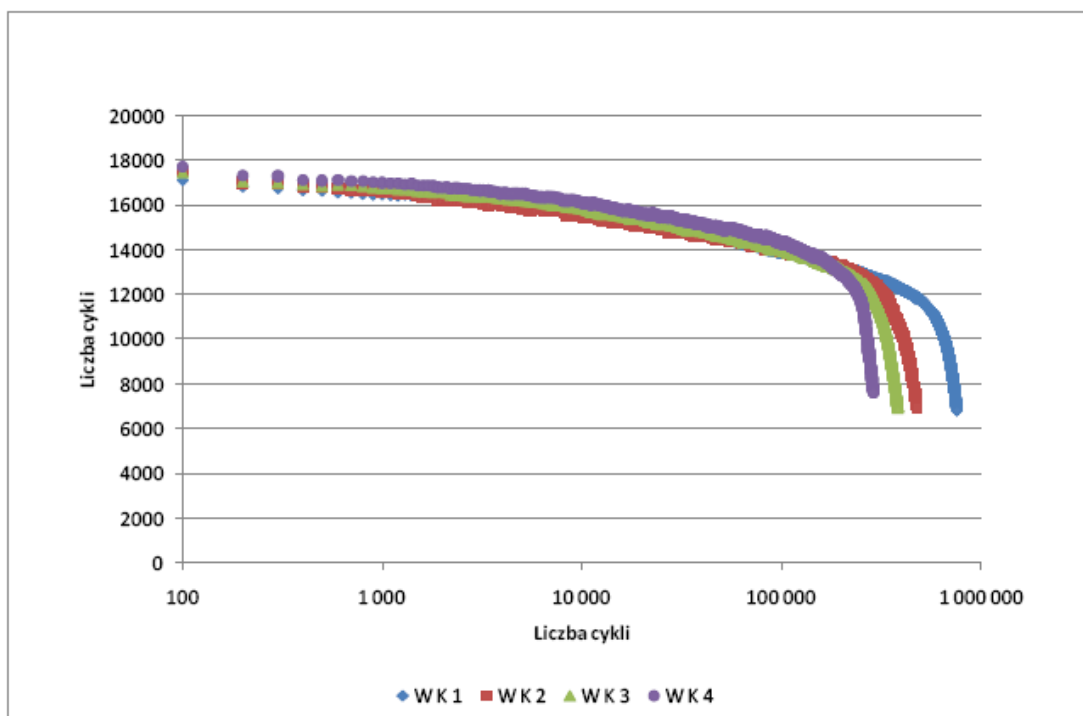
Rysunek 24 Przebieg badania zmęczenia mieszanki porównawczej bez starzenia (P O)



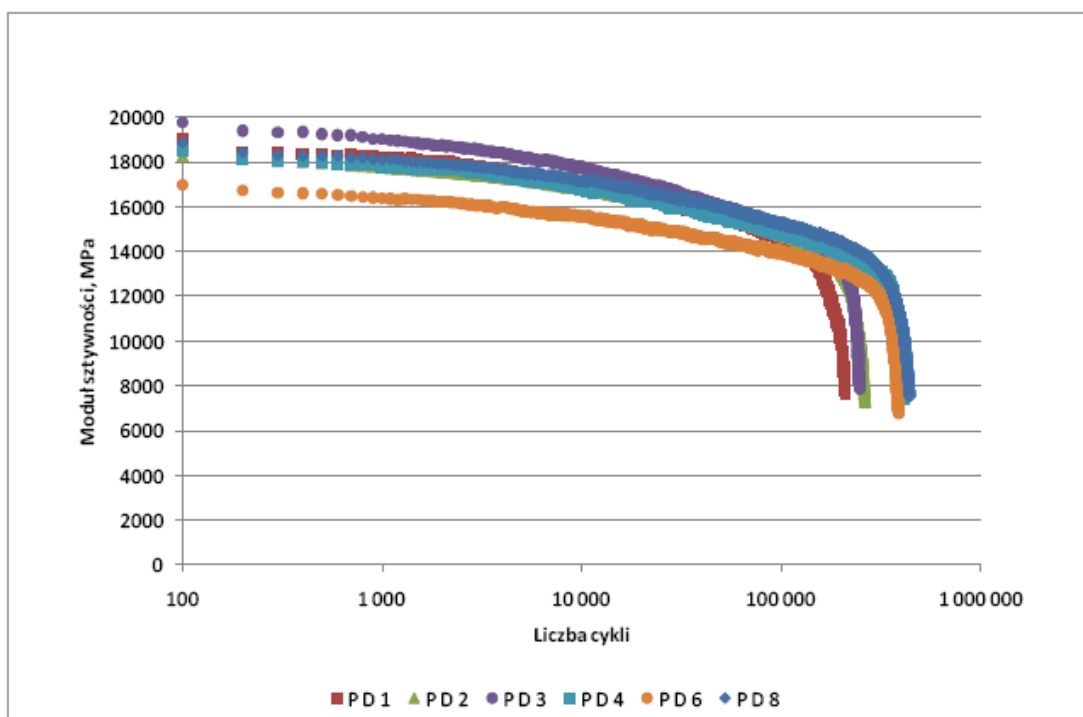
Rysunek 25 Przebieg badania zmęczenia mieszanki z włóknem bez starzenia (W O)



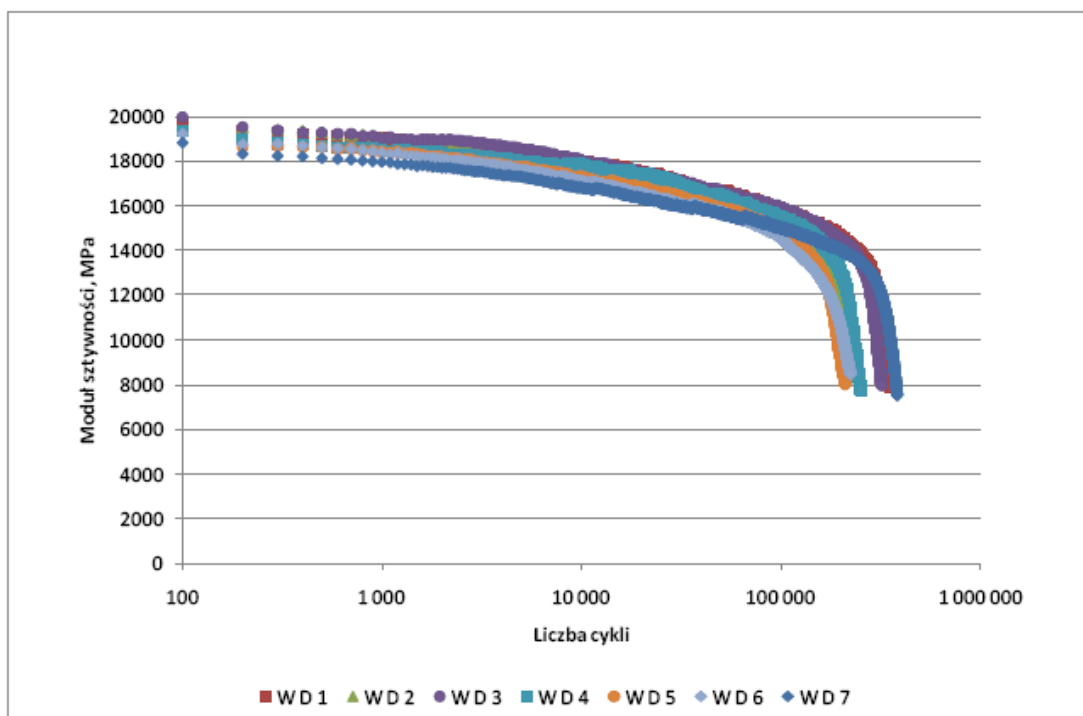
Rysunek 26 Przebieg badania zmęczenia mieszanki porównawczej po starzeniu krótkoterminowym (P K)



Rysunek 27 Przebieg badania zmęczenia mieszanki z włóknem po starzeniu krótkoterminowym (W K)



Rysunek 28 Przebieg badania zmęczenia mieszanki porównawczej po starzeniu długoterminowym (P D)



Rysunek 29 Przebieg badania zmęczenia mieszanki z włóknem po starzeniu długoterminowym (W D)

8.3. Moduł sztywności (Zadanie 5.3)

W ramach realizacji etapu I przeprowadzono badania modułu sztywności metodą belki czteropunktowo zginanej w temperaturze 10°C na mieszanke porównawczej i mieszanke z włóknem. Wyniki badań przedstawiono w tablicach 17 - 22.

Tablica 17 Wyniki badań modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego mieszanki porównawczej w stanie oryginalnym PO

Próbka	Moduł sztywności, MPa					Kąt przesunięcia fazowego, °				
	10 Hz	8Hz	5Hz	2Hz	1Hz	10 Hz	8Hz	5Hz	2Hz	1Hz
P O 1	16606	15954	14880	12942	11485	11,7	12,3	13,0	14,6	15,7
P O 2	15091	14618	13554	11694	10383	12,1	12,4	13,0	14,8	16,2
P O 3	17258	16704	15623	13596	12019	11,1	11,6	12,3	13,8	15,2
P O 4	16501	15848	14723	12874	11420	11,6	12,1	12,7	14,1	15,4
P O 5	16162	15593	14509	12561	11161	12,2	12,5	13,1	14,8	16,2
P O 6	16052	15537	14469	12565	11143	12,0	12,4	13,1	14,6	16,1
P O 7	14415	13882	12954	11220	10003	10,4	11,2	12,1	13,8	15,0
P O 8	15793	14922	13873	11895	10442	12,9	13,4	14,1	15,8	17,3
średnia	15985	15382	14323	12418	11007	11,8	12,2	12,9	14,5	15,9
odch. st.	895	879	835	770	674	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7

Tablica 18 Wyniki badań modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego mieszanki z włóknem w stanie oryginalnym WO

Próbka	Moduł sztywności, MPa					Kąt przesunięcia fazowego, °				
	10 Hz	8Hz	5Hz	2Hz	1Hz	10 Hz	8Hz	5Hz	2Hz	1Hz
W O 1	15218	14688	13648	12006	10681	11,3	11,8	12,4	13,7	14,7
W O 2	16814	16153	15168	13278	11907	11,2	11,5	12,2	13,5	14,7
W O 3	15470	14884	13831	12007	10678	12,0	12,4	13,1	14,4	15,6
W O 4	14087	13596	12691	10915	9597	12,6	13,1	13,9	15,7	17,1
W O 5	15350	14804	13747	12026	10793	11,4	11,7	12,2	13,6	14,8
W O 6	17462	16694	15575	13639	12243	10,8	11,0	11,7	13,0	14,1
W O 7	17235	16615	15525	13658	12376	11,0	11,2	11,8	13,0	14,2
W O 8	14195	13678	12744	10985	9782	12,5	12,8	13,4	14,8	16,0
średnia	15729	15139	14116	12314	11007	11,6	11,9	12,6	13,9	15,2
odch. st.	1308	1226	1169	1101	1066	0,7	0,8	0,8	1,0	1,0

Tablica 19 Wyniki badań modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego mieszanki porównawczej po starzeniu krótkoterminowym PK

Próbka	Moduł sztywności, MPa					Kąt przesunięcia fazowego, °				
	10 Hz	8Hz	5Hz	2Hz	1Hz	10 Hz	8Hz	5Hz	2Hz	1Hz
P K 1	17642	17220	16422	14995	13883	8,2	8,3	8,5	9,4	10,1
P K 2	18014	17641	16829	15284	14011	8,2	8,8	9,1	9,8	10,4
P K 3	18251	17825	17086	15334	14193	8,6	8,9	9,2	9,8	10,4
P K 4	18501	18014	17172	15660	14180	8,2	8,5	8,7	9,6	10,1
średnia	18102	17675	16877	15318	14067	8,3	8,6	8,9	9,6	10,3
odch. st.	366	340	337	272	148	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2

Tablica 20 Wyniki badań modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego mieszanki z włóknem po starzeniu krótkoterminowym WK

Próbka	Moduł sztywności, MPa					Kąt przesunięcia fazowego, °				
	10 Hz	8Hz	5Hz	2Hz	1Hz	10 Hz	8Hz	5Hz	2Hz	1Hz
W K 1	19662	19060	17926	16089	14910	8,9	9,1	9,5	10,3	11,1
W K 2	17772	17359	16592	15115	13808	8,7	9,1	9,6	10,4	11,1
W K 3	19439	19096	18084	16297	14963	8,6	8,8	9,2	10,0	10,8
W K 4	18266	17703	16811	15213	14033	9,0	9,2	9,4	10,3	11,2
średnia	18785	18305	17353	15678	14429	8,8	9,0	9,4	10,2	11,0
odch. st.	911	904	761	601	594	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Tablica 21 Wyniki badań modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego mieszanki porównawczej po starzeniu długoterminowym PD

Próbka	Moduł sztywności, MPa					Kąt przesunięcia fazowego, °				
	10 Hz	8Hz	5Hz	2Hz	1Hz	10 Hz	8Hz	5Hz	2Hz	1Hz
P D 1	17223	16465	15555	13992	12628	9,0	9,7	10,1	11,3	12,1
P D 2	19991	19472	18302	16479	15001	9,0	9,3	9,7	10,6	11,3
P D 3	19439	18947	17679	15876	14651	9,4	9,5	9,7	10,7	11,6
P D 4	19233	18719	17653	16134	14853	8,7	8,8	9,1	9,8	10,6
P D 5	17878	17325	16443	14879	13710	8,8	9,0	9,3	10,2	11,0
P D 6	18870	18138	17035	15356	14160	7,4	8,0	8,9	9,8	10,6
P D 7	18579	17966	16944	15137	13940	9,1	9,3	9,6	10,5	11,5
średnia	18745	18147	17087	15407	14135	8,8	9,1	9,5	10,4	11,2
odch. st.	947	1022	907	842	819	0,6	0,6	0,4	0,5	0,6

Tablica 22 Wyniki badań modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego mieszanki z włóknem po starzeniu długoterminowym WD

Próbka	Moduł sztywności, MPa					Kąt przesunięcia fazowego, °				
	10 Hz	8Hz	5Hz	2Hz	1Hz	10 Hz	8Hz	5Hz	2Hz	1Hz
W D 1	19719	19347	18237	16804	15400	6,9	7,1	7,3	8,0	8,4
W D 2	19760	19240	18412	16784	15655	7,8	7,9	8,2	8,8	9,2
W D 3	19669	19080	18125	16724	16724	8,2	8,4	8,4	9,2	9,2
W D 4	19408	19239	18165	16416	15478	8,6	8,6	8,6	9,4	9,9
W D 5	19671	19124	18178	16531	15415	7,5	7,7	8,0	8,4	9,0
W D 6	20140	19528	18616	17034	15975	7,5	7,7	7,8	8,4	9,0
W D 7	19282	18870	18042	16527	15410	7,6	7,7	8,0	8,7	9,3
średnia	19664	19204	18253	16689	15722	7,7	7,9	8,0	8,7	9,2
odch. st.	274	209	197	211	488	0,6	0,5	0,4	0,5	0,4

8.4. Wodoodporność (Zadanie 5.4)

Badania wodoodporności przeprowadzono na mieszance porównawczej i mieszance z włóknem w stanie bez starzenia oraz po starzeniu krótko- i długoterminowym. Wyniki badań przedstawiono w tablicy 23.

Tablica 23 Zestawienie wyników badań wodoodporności

Mieszanka	ITS _w	ITS _d	ITSR
	kPa	kPa	%
P O	1219,6	1294,5	94,2
W O	1315,0	1296,4	101,4
P K	1407,8	1511,0	93,2
W K	1444,1	1653,6	87,3
P D	1298,0	1524,4	85,2
W D	1393,0	1460,4	95,4

8.5. Odporność na pękanie niskotemperaturowe (Zadanie 5.5)

W ramach realizacji Etapu I przeprowadzono badania odporności na pękanie niskotemperaturowe metodą TSRST na mieszance porównawczej i mieszance z włóknem. Wyniki badań przedstawiono w tablicach 24 - 26 i na rysunkach 30 - 35.

Tablica 24 Wyniki badań TSRST mieszanki porównawczej i mieszanki z włóknem w stanie oryginalnym

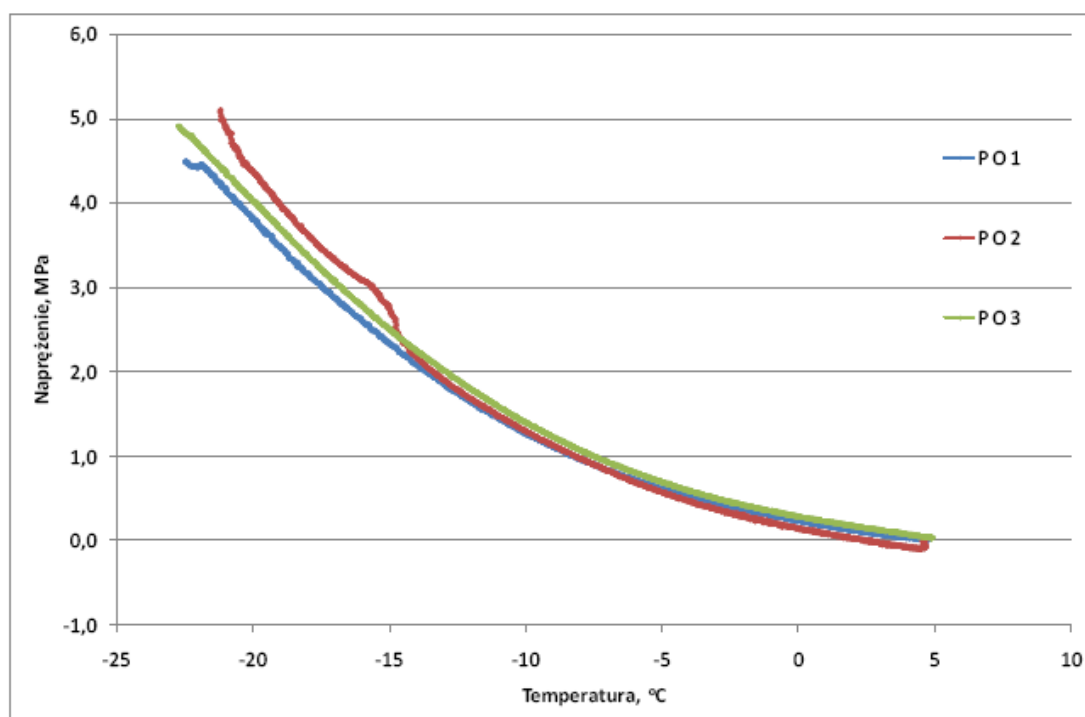
Próbka	Temperatura pęknięcia, °C	Napężenie przy pęknięciu, MPa	Próbka	Temperatura pęknięcia, °C	Napężenie przy pęknięciu, MPa
P O 1	-22,5	4,5	W O 1	-17,6	3,7
P O 2	-22,7	4,9	W O 2	-22,7	4,6
P O 3	-21,2	5,1	W O 3	-19,4	4,1
średnia	-22,1	4,8	średnia	-19,9	4,2

Tablica 25 Wyniki badań TSRST mieszanki porównawczej i mieszanki z włóknem po starzeniu krótkoterminowym

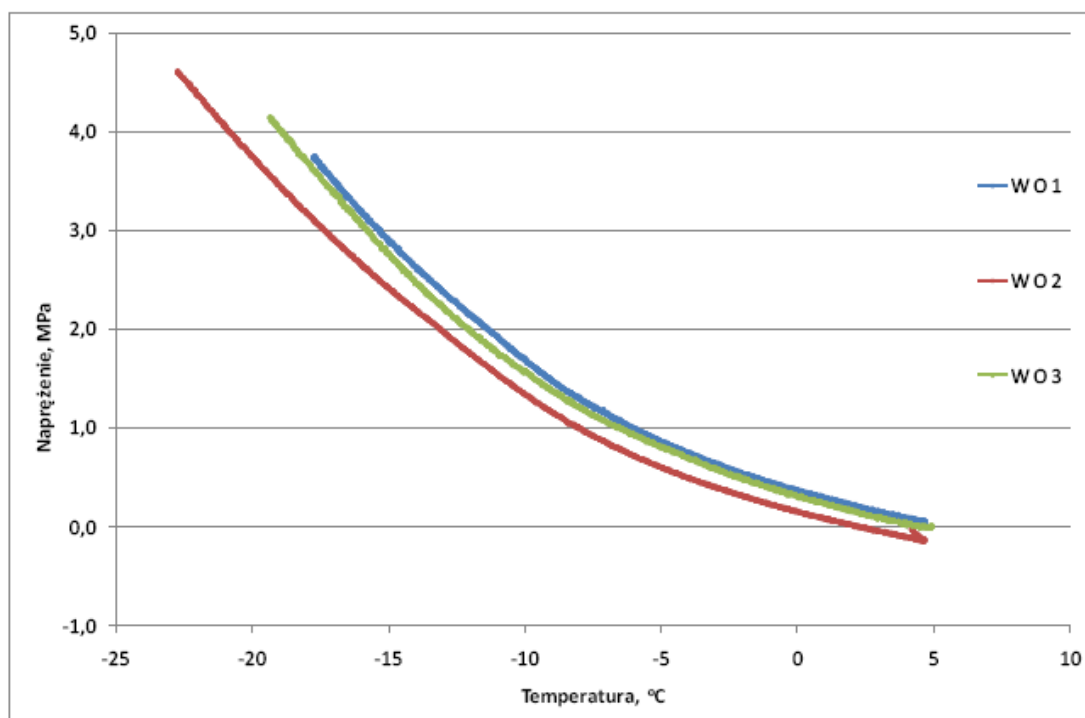
Próbka	Temperatura pęknięcia, °C	Napężenie przy pęknięciu, MPa	Próbka	Temperatura pęknięcia, °C	Napężenie przy pęknięciu, MPa
P K 1	-19,8	4,9	W K 1	-18,1	4,2
P K 2	-20,0	5,0	W K 2	-20,0	4,7
P K 3	-18,9	5,1	W K 3	-19,9	5,0
P K 4	-18,3	4,3	W K 4	-18,5	4,4
średnia	-19,3	4,8	średnia	-19,1	4,6

Tablica 26 Wyniki badań TSRST mieszanki porównawczej i mieszanki z włóknem po starzeniu długoterminowym

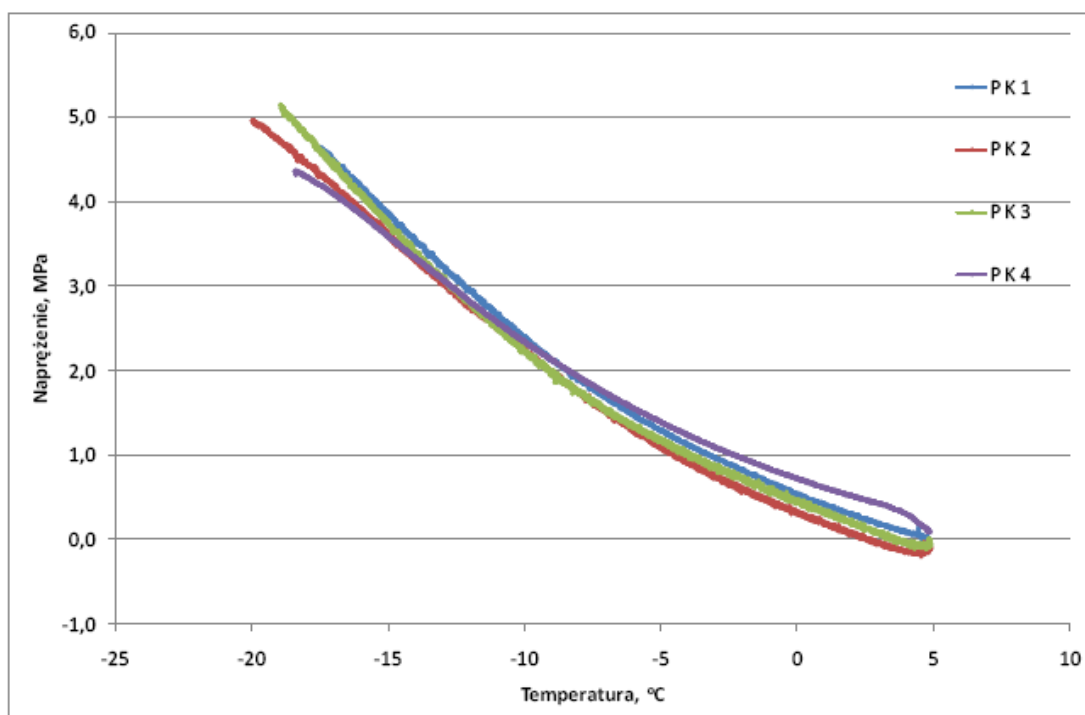
Próbka	Temperatura pęknięcia, °C	Napężenie przy pęknięciu, MPa	Próbka	Temperatura pęknięcia, °C	Napężenie przy pęknięciu, MPa
P D 1	-19,8	5,2	W D 1	-17,1	4,6
P D 2	-20,1	4,9	W D 2	-18,4	4,8
P D 3	-18,7	5,3	W D 3	-16,9	4,4
P D 4	-18,8	5,0	W D 4	-18,5	4,5
średnia	-19,4	5,1	średnia	-17,7	4,6



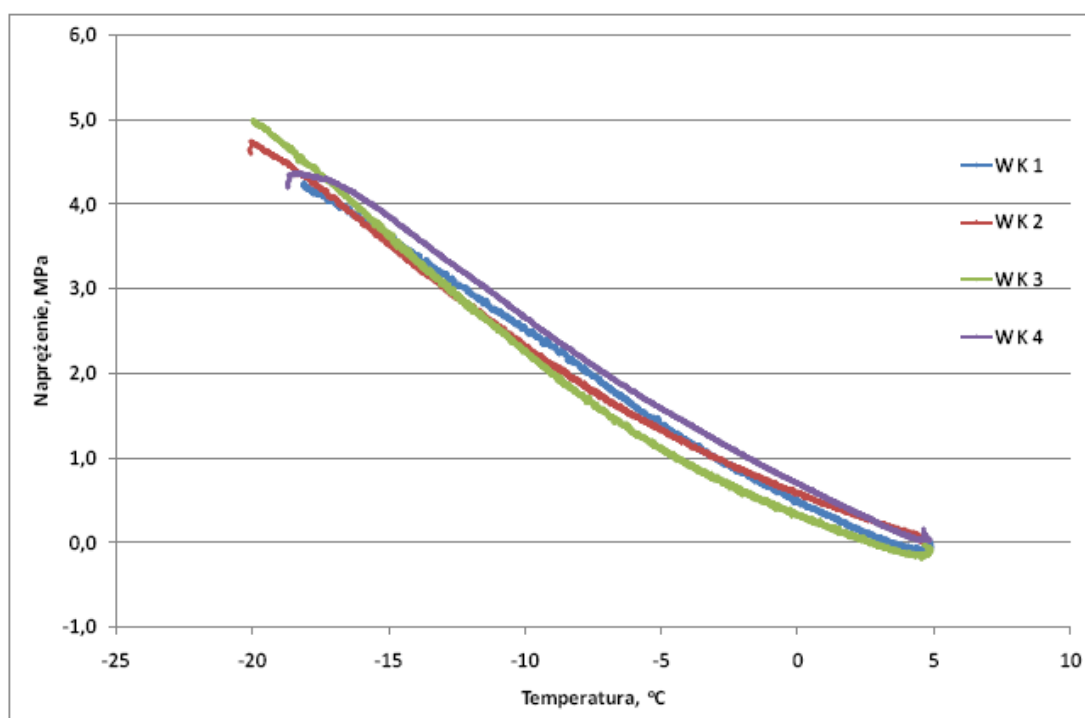
Rysunek 30 Przebieg badania TSRST mieszanki porównawczej w stanie oryginalnym (P O)



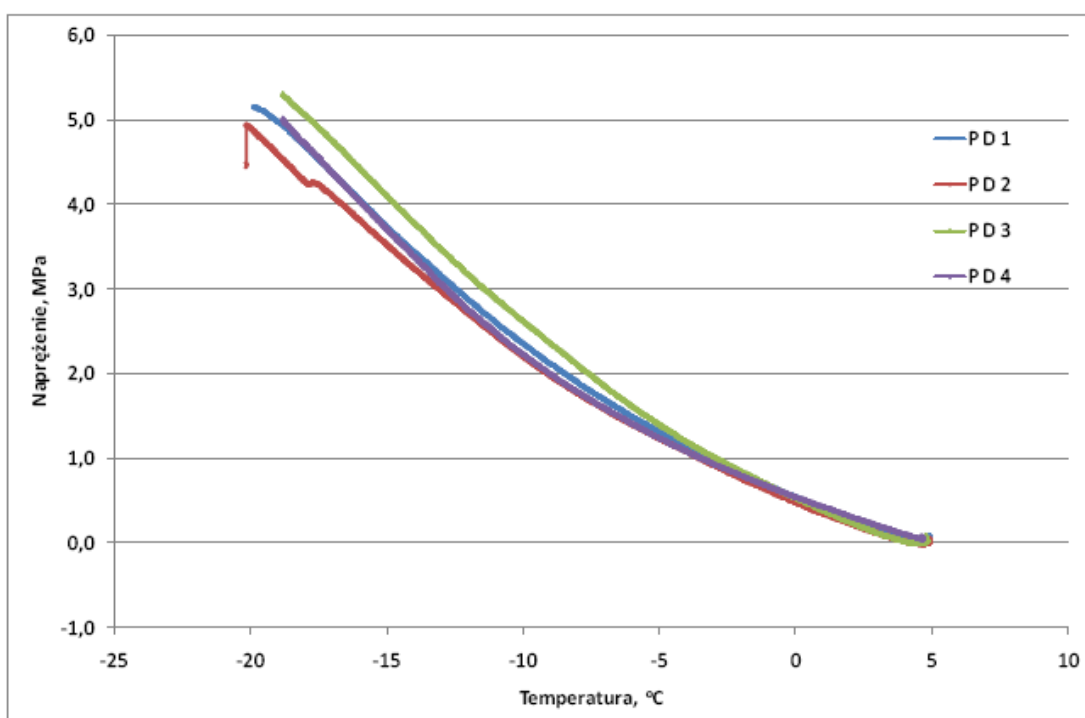
Rysunek 31 Przebieg badania TSRST mieszanki z włóknem w stanie oryginalnym (W O)



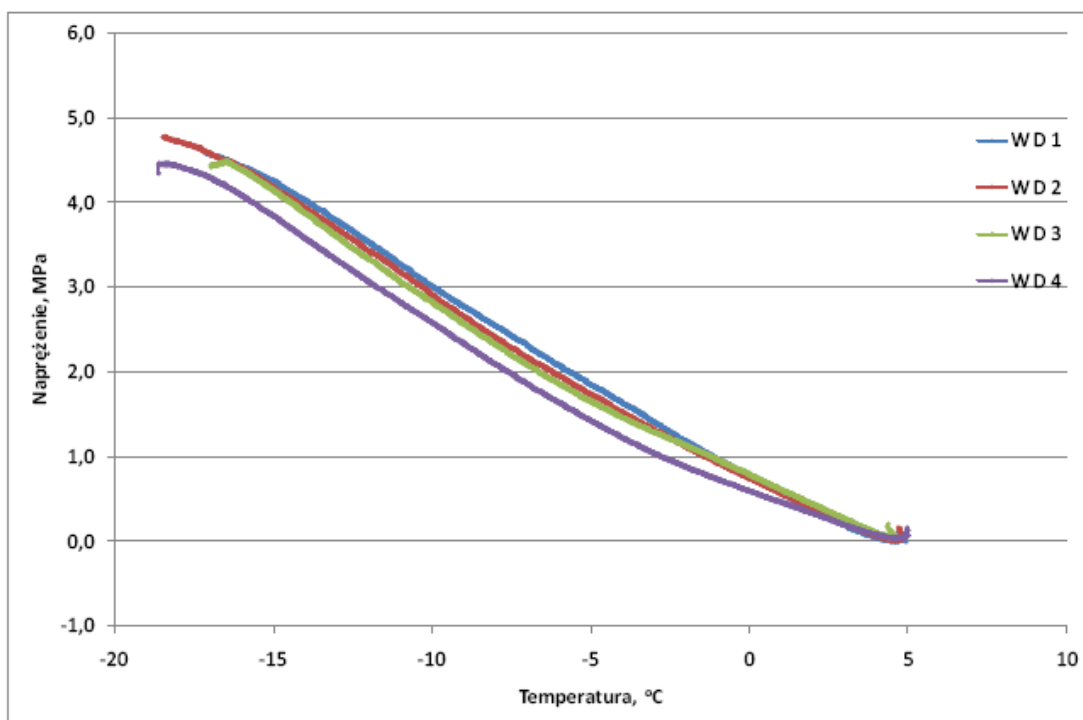
Rysunek 32 Przebieg badania TSRST mieszanki porównawczej po starzeniu krótkoterminowym (P K)



Rysunek 33 Przebieg badania TSRST mieszanki z włóknem po starzeniu krótkoterminowym (W K)



Rysunek 34 Przebieg badania TSRST mieszanki porównawczej po starzeniu długoterminowym (P D)



Rysunek 35 Przebieg badania TSRST mieszanki z włóknem po starzeniu długoterminowym (W D)

9. Analiza wyników (zadanie 6)

9.1. BAWMS 16 20/30 wg recept TN/251/08-1 i TN/251/08-2

9.1.1. Właściwości podstawowe

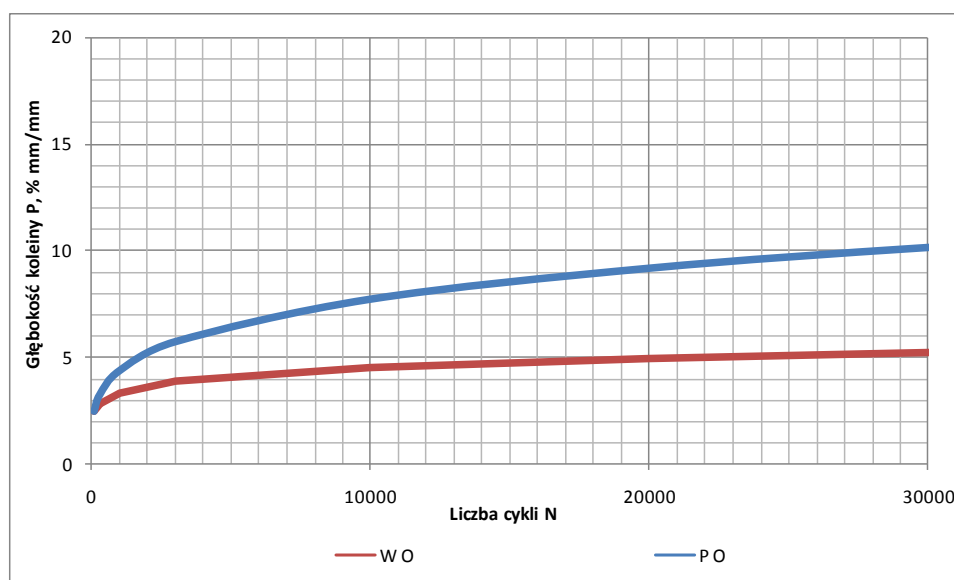
Zaprojektowano dwa składy betonu asfaltowego wysokim module sztywności BAWMS 16 20/30. Mieszanki wykonane zostały z tych samych materiałów składowych (asfalt i kruszywo). Charakteryzowały się taką samą zawartością asfaltu 5,2 % m/m i takim samym uziarnieniem mieszanki mineralnej. Różnica pomiędzy mieszankami polegała na dodaniu włókna polimerowego w ilości 0,3 % m/m w stosunku do mieszanki. Dodanie włókna spowodowało zwiększenie zawartości wolnych przestrzeni z 2,5 do 3,3 % v/v. Wypełnienie wolnych przestrzeni jest 4,5 % mniejsze w przypadku mieszanki z włóknem. Wyniki badania Marshalla są na porównywalnym poziomie. Moduł sztywności pełzania mieszanki porównawczej jest większy od modułu mieszanki z włóknem. Jednak obydwie wartości są bardzo wysokie, prawie dwukrotnie wyższe niż wartość wymagana w Zeszycie 70 [24].

Tablica 27 Zbiorcze zestawienie zbadanych właściwości mieszanki porównawczej oraz mieszanek z różną zawartością włókna i lepiszcza

Rodzaj mieszanki Skład Właściwości	BAWMS16 porównawcza	BAWMS16 z dodatkiem włókna	Wymagania wg Zeszytu 70
Zawartość asfaltu Am	5,2	5,2	
Zawartość włókna	-	0,3	
Rodzaj asfaltu	20/30		
Gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm ³	2,649	2,632	
Gęstość strukturalna mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm ³	2,582	2,542	
Wolna przestrzeń w mieszance mineralno-asfaltowej, % v/v	2,5	3,3	od 1 do 4
Wypełnienie asfaltem wolnej przestrzeni, % v/v	84,2	79,7	od 74 do 90
Stabilność wg Marshalla w 60°C, kN	12,3	11,8	
Odkształcenie wg Marshalla w 60°C, mm	3,7	4,4	
Moduł sztywności pełzania pod obciążeniem statycznym w 40°C, MPa	40,7	35,1	> 21,0

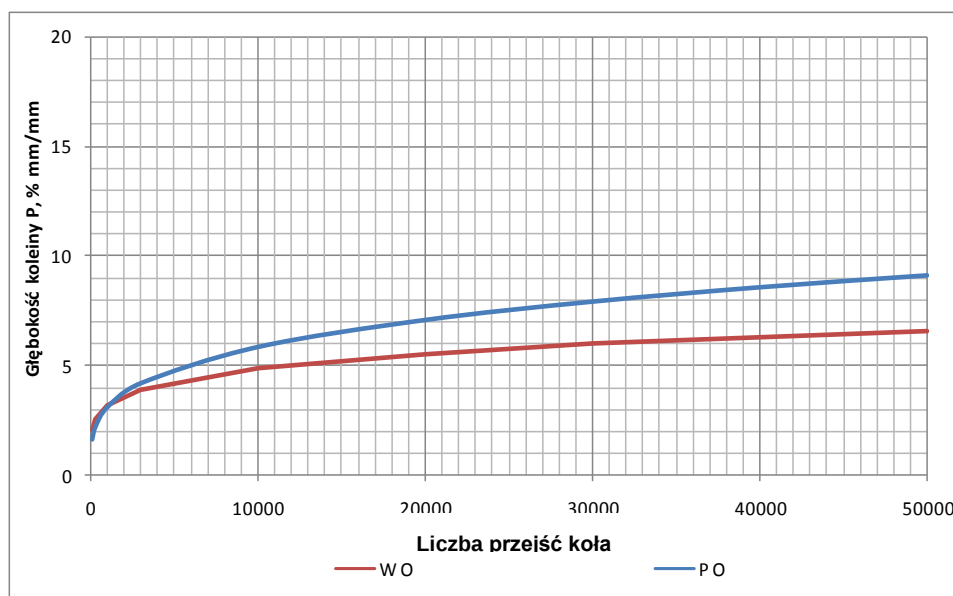
9.1.2. Odporność na koleinowanie

Badania koleinowania wykonano na próbkach nie poddanych starzeniu (w stanie oryginalnym). Na rysunku 36 przedstawiono porównanie przebiegu badania koleinowania w dużym aparacie mieszanki porównawczej i mieszanki z włóknem.



Rysunek 36 Porównanie przebiegu koleinowania w dużym aparacie mieszanki z włóknem oraz mieszanki porównawczej

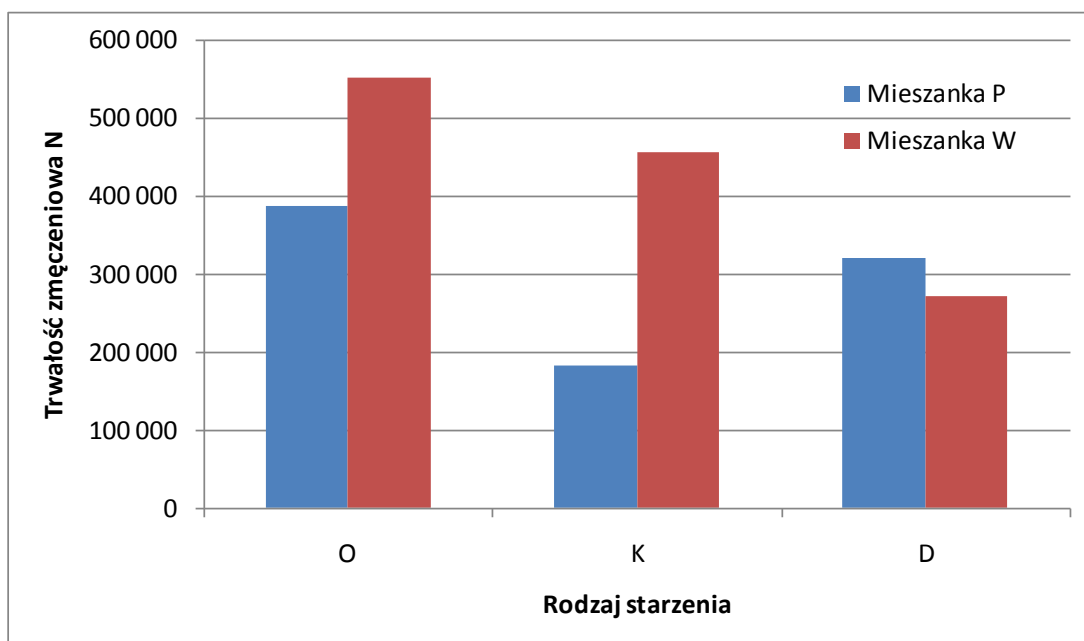
Mieszanka porównawcza uzyskała bardzo słaby wynik koleinowania (względna głębokość koleiny po 30 000 cykli 9,6 %), znacznie przekraczający dopuszczalną granicę 5,0 %. Uzyskanie takiego wyniku wskazuje na konieczność zdecydowanej zmiany składu mma lub zastosowania specjalnych rozwiązań. Zastosowanie włókna polimerowego w znacznym stopniu poprawiła odporność na deformacje trwałe mieszanki BAWMS 16. Wynik koleinowania wynoszący 5,6% stanowi niemal dwukrotną poprawę w stosunku do mieszanki porównawczej i w minimalnym stopniu przekracza minimalna wartość. W tym przypadku niewielka korekta składu mma (np. zmniejszenie zawartości asfaltu) pozwoli uzyskać mieszankę spełniającą wymaganie odporności na koleinowanie. Przeprowadzone dodatkowo badanie koleinowania w małym aparacie potwierdziło znacznie lepszą odporność na koleinowanie mieszanki z włóknem (rysunek 37).



Rysunek 37 Porównanie przebiegu koleinowania w małym aparacie mieszanki z włóknem oraz mieszanki porównawczej

9.1.3. Trwałość zmęczeniowa

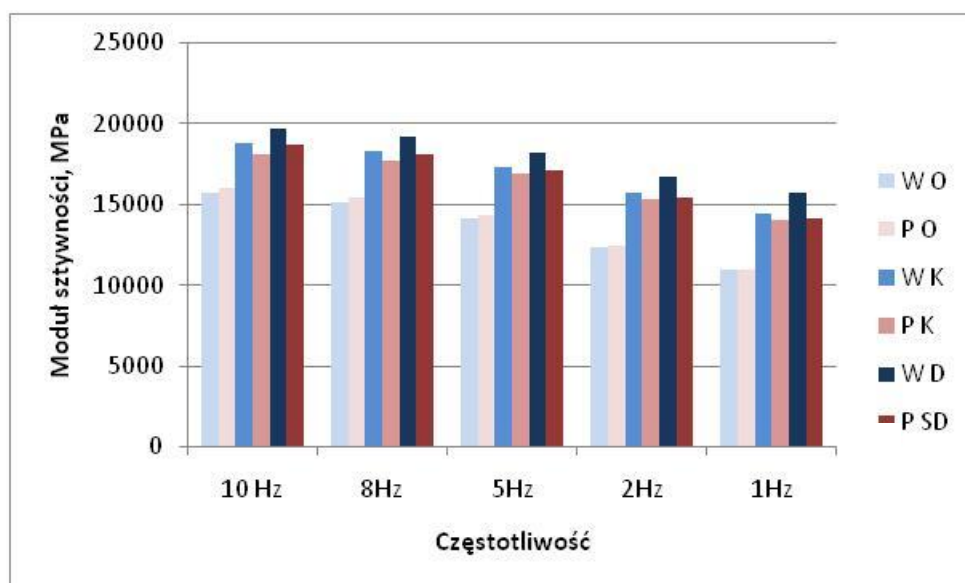
Trwałość zmęczeniowa mieszanki porównawczej i mieszanki z włóknem została określona na podstawie badania metodą belki czteropunktowo zginanej. Badaniom poddano mieszanki w stanie oryginalnym, po starzeniu krótkoterminowym i po starzeniu długoterminowym. Na rysunku 38 przedstawiono porównanie trwałości zmęczeniowej przy odkształceniu $188 \mu\text{m/m}$ w trzech stanach. W przypadku mieszanki BAWMS 16 z włóknem trwałość zmęczeniowa zmniejsza się w kolejnych stanach starzenia. W przypadku mieszanki porównawczej niespodziewanie trwałość mieszanki po starzeniu długoterminowym jest wyższa niż po starzeniu krótkoterminowym. Analizując wyniki zmęczenia można stwierdzić, że dodatek włókna poprawia trwałość zmęczeniową mieszanki w stanie oryginalnym oraz po starzeniu krótkoterminowym. Wyniki po starzeniu długoterminowym wskazują na nieznacznie korzystniejsze wyniki mieszanki porównawczej.



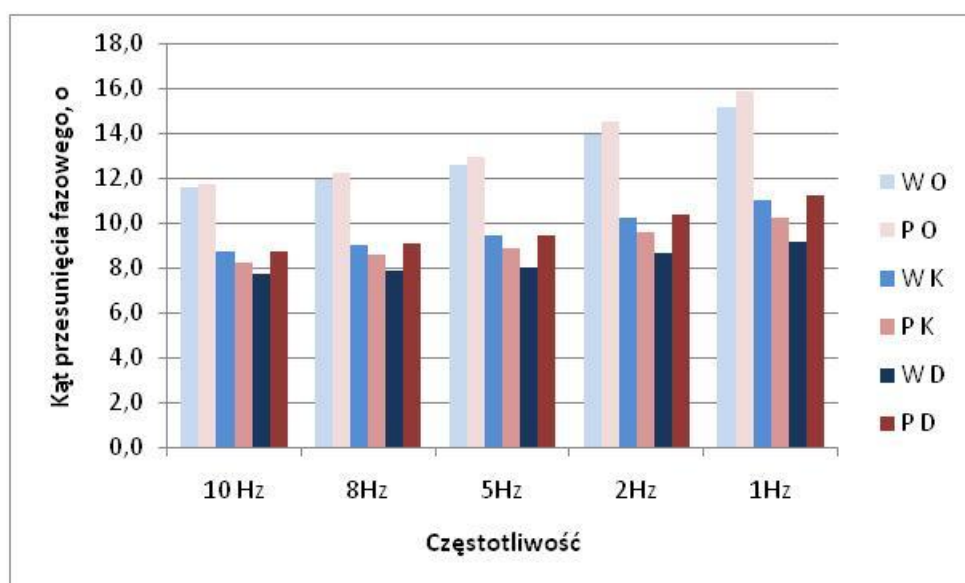
Rysunek 38 Porównanie trwałości zmęczeniowej mieszanki porównawczej oraz mieszanki z włóknem przy odkształceniu 188 $\mu\text{m/m}$

9.1.4. Sztywność

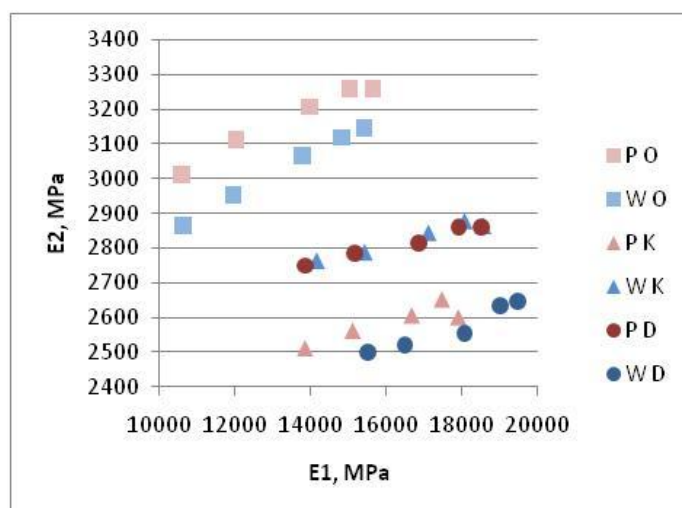
Sztywność mieszanki porównawczej i mieszanki z włóknem została określona w trzech stanach: oryginalnym, po starzeniu krótko i długoterminowym metodą belki czteropunktowo zginanej w temperaturze 10°C w różnym częstotliwościach obciążenia. Uzyskano wyniki modułu sztywności oraz kąta przesunięcia fazowego. Zestawienie porównawcze wyników przedstawiono na rysunku 39 i 40. Analiza uzyskanych wyników modułu sztywności pozwala stwierdzić, że na skutek starzenia krótko i długoterminowego następuje stopniowe zwiększenie sztywności mieszanek. W stanie oryginalnym – bez starzenia, moduły sztywności badanych mieszanek są praktycznie takie same, a obydwie mieszanki spełniają wymaganie dotyczące sztywności wynoszące 14 000 MPa (10°C, 10Hz). Wyniki po starzeniu krótko- i długoterminowym, niezależnie od częstotliwości wskazują, na nieznacznie większą sztywność mieszanki z włóknem. Analizując wyniki kąta przesunięcia fazowego, będącego miarą sprężystości mieszanki, można stwierdzić, że na skutek procesu starzenia następuje zmniejszenie wielkości fazy lepkiej modułu zespolonego – mieszanka staje się bardziej sprężysta. Jest to bardzo widoczne na wykresie Cole-Cole przedstawionym na rysunku 41. W przypadku mieszanki porównawczej udział części lepkiej jest niespodziewanie większy po starzeniu długoterminowym niż po starzeniu krótkoterminowym.



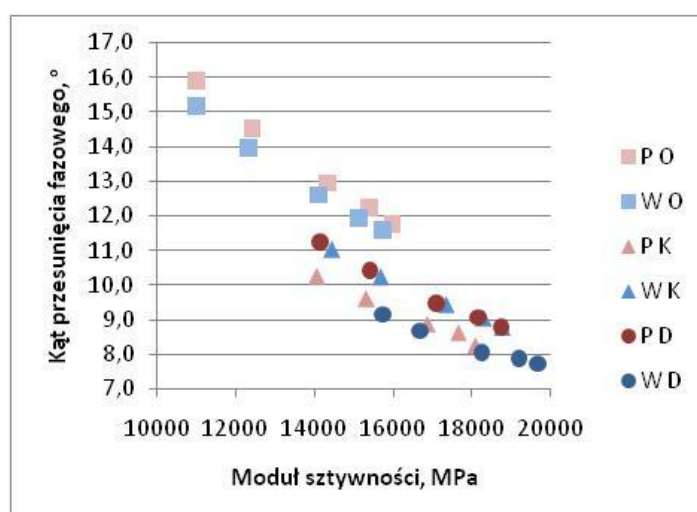
Rysunek 39 Porównanie modułu sztywności mieszanki porównawczej oraz mieszanki z włóknem w różnych częstotliwościach



Rysunek 40 Porównanie kąta przesunięcia fazowego mieszanki porównawczej oraz mieszanki z włóknem w różnych częstotliwościach



Rysunek 41 Wykres Cole-Cole mieszanki porównawczej oraz z włóknem



Rysunek 42 Wykres Blacka mieszanki porównawczej oraz mieszanki z włóknem

Tablica 28 Wzrost modułu sztywności na skutek starzenia

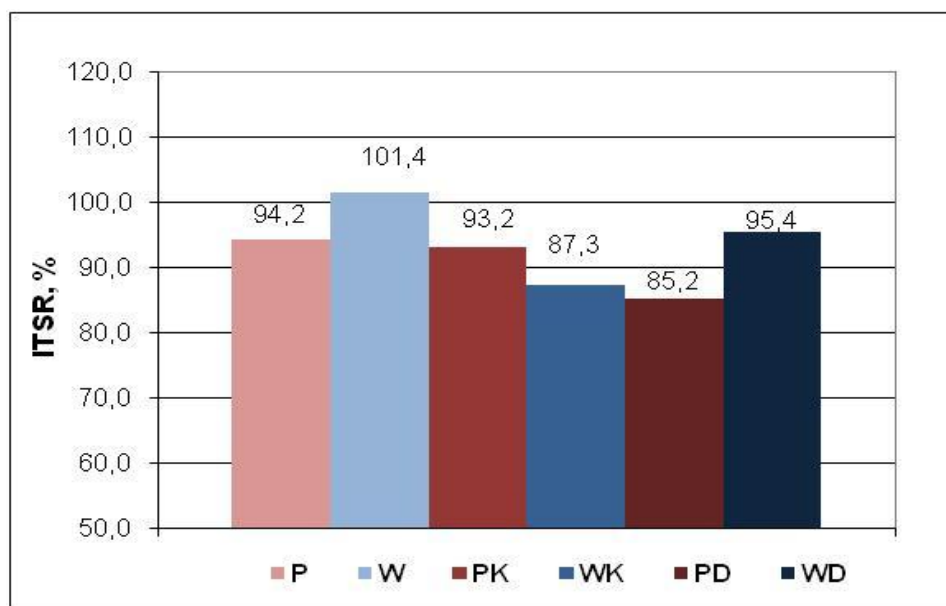
Mieszanka	Częstotliwość				
	10 Hz	8Hz	5Hz	2Hz	1Hz
W K	19%	21%	23%	27%	31%
P K	13%	15%	18%	23%	28%
W D	25%	27%	29%	36%	43%
P D	17%	18%	19%	24%	28%

Tablica 29 Obniżenie części lepkiej modułu zespolonego na skutek starzenia

Mieszanka	Częstotliwość				
	10 Hz	8Hz	5Hz	2Hz	1Hz
W K	10%	18%	18%	15%	14%
P K	25%	23%	23%	21%	20%
W D	19%	18%	20%	17%	15%
P D	23%	21%	20%	16%	13%

9.1.5. Wodoodporność

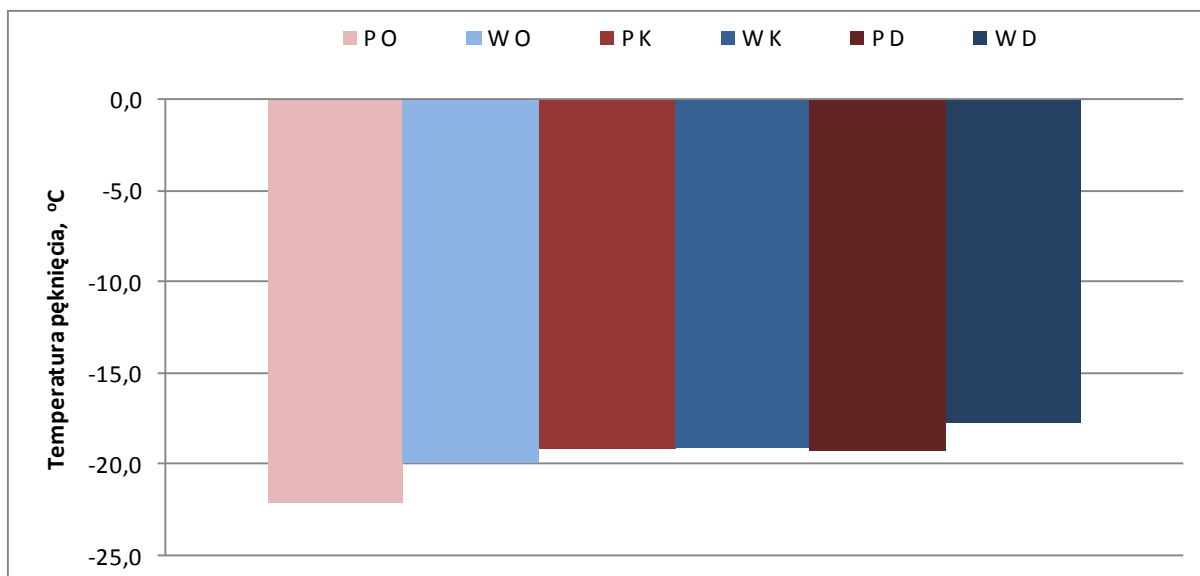
Mieszanki BAWMS 16 porównawcza i z włóknem spełniły wymaganie wodoodporności jak dla betonu asfaltowego o wysokim module sztywności do warstwy podbudowy i wiążącej. Niezależnie od stanu mieszanki pod względem starzenia, w każdym przypadku dodatek włókna poprawił wodoodporność mieszanki. Najniższe wyniki wodoodporności uzyskano na mieszankach poddanych starzeniu długoterminowemu.



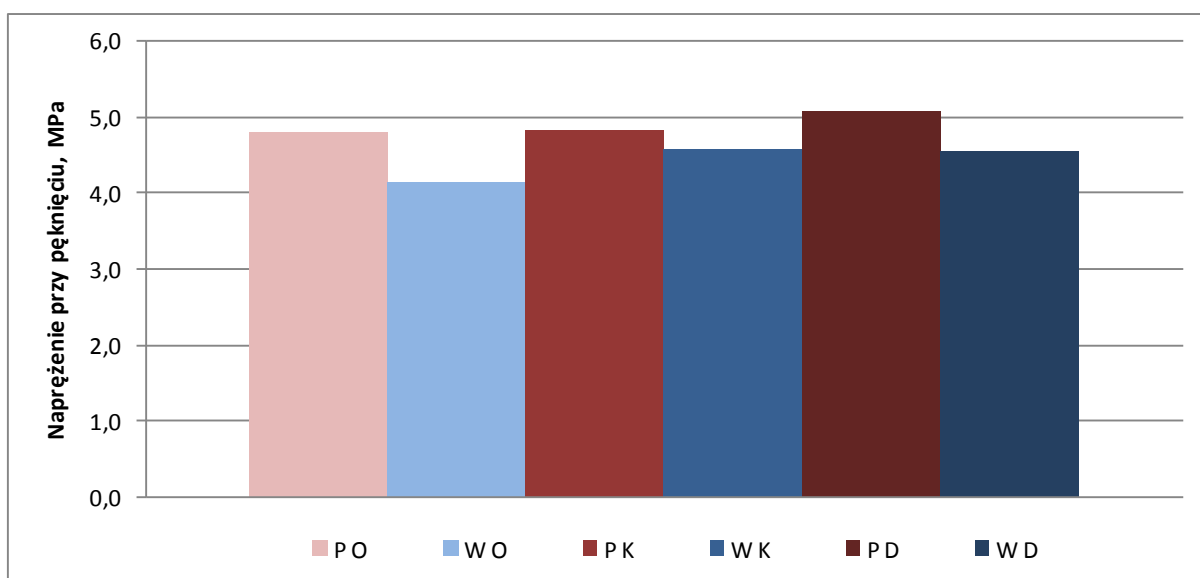
Rysunek 43 Wyniki badań wodoodporności

9.1.6. Odporność na niską temperaturę

Mieszanki BAWMS 16 porównawcza i z włóknem zostały poddane badaniom odporności na pękanie niskotemperaturową metodą TSRST w trzech stanach: oryginalnym – bez starzenia, po starzeniu krótko- i długoterminowym. Wyniki badania, tj. temperaturę pęknięcia i naprężenie przy pęknięciu, zestawiono w formie graficznej na rysunkach 44 i 45. Mieszanka porównawcza charakteryzowała się korzystnie niższą temperaturą pęknięcia, szczególnie w stanie oryginalnym i po starzeniu długoterminowym (różnica około 1,5 – 2,0°C w stosunku do mieszanki z włóknem). W przypadku mieszanek po starzeniu krótkoterminowym różnica ta jest pomijalna (0,2°C). Większe naprężenia przy pęknięciu mieszanki porównawczej w trzech stanach wynikają z niższej temperatury pęknięcia w stosunku do mieszanki z włóknem.



Rysunek 44 Porównanie temperatury pęknięcia mieszanki porównawczej i mieszanki z włóknem



Rysunek 45 Porównanie napężenia przy pęknięciu mieszanki porównawczej i mieszanki z włóknem

9.1.7. Podsumowanie wyników analizy

Na podstawie przedstawionej analizy wyników mieszanki porównawczej BAWMS 16 20/30 oraz mieszanki BAWMS 16 20/30 z dodatkiem włókna można stwierdzić pewne różnice we właściwościach podstawowych i funkcjonalnych tych mieszanek. Dodatek włókna pozwolił zwiększyć zawartość wolnych przestrzeni w mma, zwiększył jej sztywność, znacznie poprawił odporność na deformacje trwałe (koleinowanie) i wodoodporność oraz korzystnie wpłynął na trwałość zmęczeniową.

Słabsze wyniki odporności niskotemperaturowej mieszanki z włóknem mogą wynikać z większej sztywności tych mieszanek i większym udziałem fazy lepkiej modułu zespolonego w stanie oryginalnym i po starzeniu długoterminowym.

9.2. ACWMS 16 20/30 wg recept TN/09/2L i TN/09/2L/W

9.2.1. Właściwości podstawowe

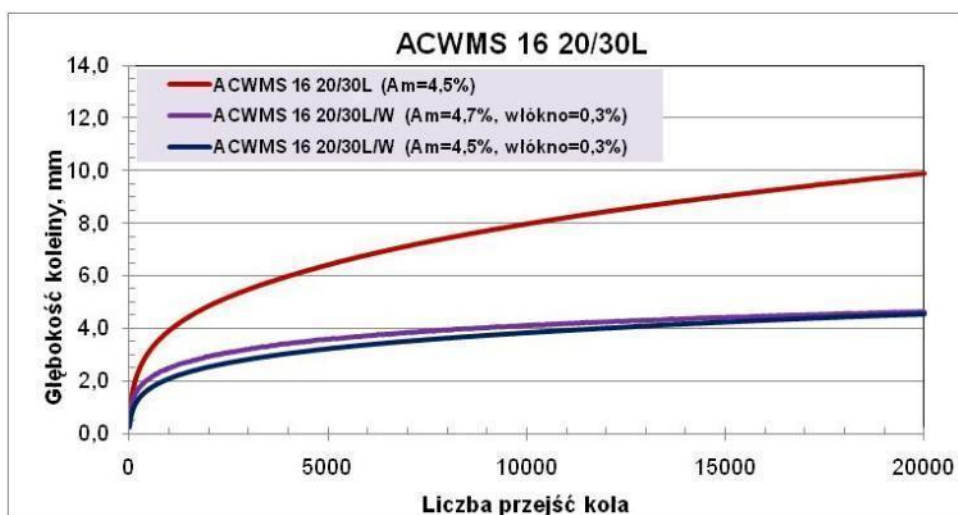
Zaprojektowano dwa składy betonu asfaltowego wysokim module sztywności ACWMS 16 20/30. Mieszanki wykonane zostały z tych samych materiałów składowych (asfalt i kruszywo). Charakteryzowały się taką samą zawartością asfaltu 4,5 % m/m i takim samym uziarnieniem mieszanki mineralnej. Różnica pomiędzy mieszankami polegała na dodaniu włókna polimerowego w ilości 0,3 % m/m w stosunku do mieszanki. Dodanie włókna spowodowało zwiększenie zawartości wolnych przestrzeni z 2,9 do 3,4 % v/v. Wypełnienie wolnych przestrzeni jest 3,0 % mniejsze w przypadku mieszanki z włóknem.

Tablica 30 Porównanie podstawowych wyników mieszanek ACWMS 16 20/30

Lp.	Właściwości	Wyniki ACWMS16 20/30L	Wyniki ACWMS 16 20/30L/W
1	Gęstość objętościowa mieszanki-mineralnej, g/cm ³	2,873	2,852
2	Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej (dawna gęstość objętościowa), g/cm ³	2,656	2,639
3	Gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej (dawna gęstość strukturalna), g/cm ³	2,579	2,549
4	Zawartość wolnych przestrzeni, %v/v	2,9	3,4
5	Wypełnienie asfaltem wolnej przestrzeni, % v/v	79,7	76,7
6	Odporność na deformacje trwałe (metoda B w powietrzu, 60°C, 10000 cykli	0,38	0,1
		9,8	4,6
7	Odporność na działanie wody, przechowywanie w 40°C z jednym cyklem zamrażania, badanie w 15°C	85,9	85,6

9.2.2. Odporność na koleinowanie

Na rysunku 46 przedstawiono porównanie przebiegu badania koleinowania w małym aparacie mieszanki porównawczej i mieszanki z włóknem. Dodatek włókna bardzo poprawia odporność na koleinowanie, nawet przy zwiększonej zawartości asfaltu.



Rysunek 46 Porównanie przebiegu koleinowania w małym aparacie mieszanki z włóknem oraz mieszanki porównawczej ACWMS 16 20/30L

9.2.3. Trwałość zmęczeniowa

W tablicach 31-32 przedstawiono wyniki badania zmęczenia oraz parametry obliczeniowe wraz z przedziałem ufności $p=95\%$ parametru ε_6 mieszanki AC WMS 16 20/30L z włóknem i bez włókna. Charakterystykę zmęczeniową pokazano na rysunku 47.

Tablica 31 Wyniki badań zmęczenia mieszanki ACWMS 16 20/30L/W

próbka	ε , $\mu\text{m/m}$	N
1	225	150 803
2	148	676 218
3	225	42 001
4	147	539 210
5	226	69 901
7	225	101 302
8	225	80 402
9	145	2 256 853
10	145	2 688 453
11	180	433 208
12	180	304 808
13	146	964 221
14	182	228 904
15	147	1 358 621
16	181	303 507
17	226	88 001
18	181	425 209

Tablica 32 Parametry charakterystyki zmęczeniowej ACWMS 16 20/30L/W

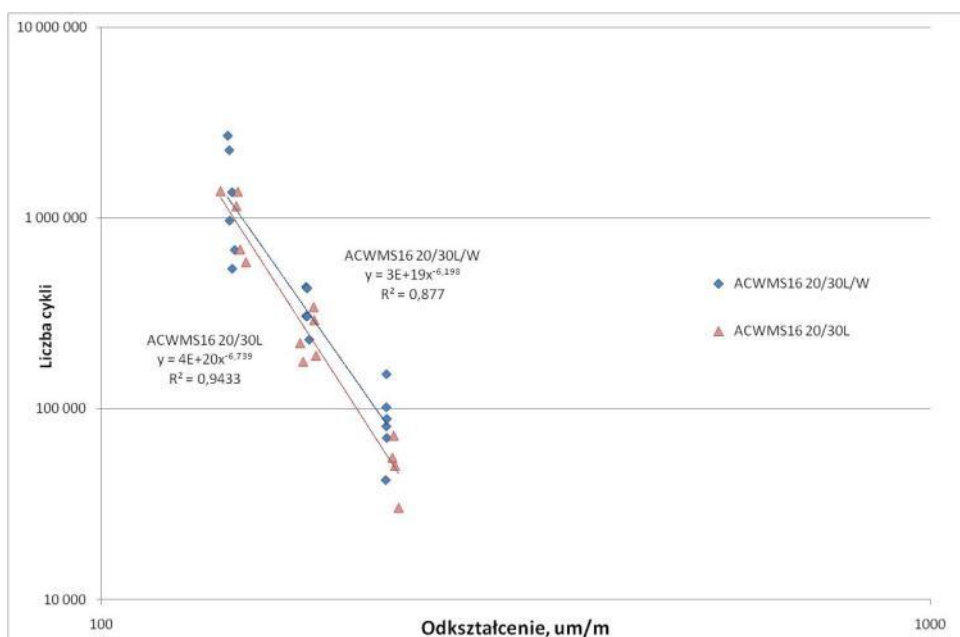
p=95%	ε_6	148	$\mu\text{m/m}$
	$\varepsilon_{6(\text{max})}$	159	$\mu\text{m/m}$
	$\varepsilon_{6(\text{min})}$	140	$\mu\text{m/m}$
	R^2	0,88	

Tablica 33 Wyniki badań zmęczenia mieszanki ACWMS 16 20/30L

próbka	ε , $\mu\text{m/m}$	N
1	175	176 801
2	139	1 383 815
4	174	221 202
5	225	72 501
6	146	1 373 032
7	149	588 014
8	228	30 401
9	180	292 107
10	224	55 601
12	180	341 807
14	147	685 516
15	145	1 153 826
16	226	50 501
17	181	190104

Tablica 34 Wyniki badań zmęczenia mieszanki ACWMS 16 20/30L

p=95%	ε_6	144	$\mu\text{m/m}$
	$\varepsilon_6(\text{max})$	152	$\mu\text{m/m}$
	$\varepsilon_6(\text{min})$	137	$\mu\text{m/m}$
	R^2	0,94	



Rysunek 47 Porównanie charakterystyk zmęczeniowych mieszanek ACWMS16 20/30L i ACWMS16 20/30L/W

9.2.4. Sztywność

W tablicy 35 przedstawiono wyniki badań modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego mieszanek

Tablica 35 Moduł sztywności i kąt przesunięcia fazowego, 10°C, 10Hz

Mieszanka Próbka	ACWMS16 20/30L/W		ACWMS16 20/30L	
	MPa	°	MPa	°
1	16371	9,3	17135	9,7
2	16162	8,6	17059	9,4
3	17172	7,7	17101	10,1
4	17134	8,3	18048	9,7
ŚREDNIA	16709	8,5	17336	9,7
ODCH.ST.	519	0,7	476	0,3

9.2.5. Ocena uzyskanych wyników

Przedstawione wyniki badań pozwalają stwierdzić, że dodatek włókna umożliwia opracowanie składu mieszanki typu AC WMS zaprojektowanej wg wymagań WT-2. Zastosowanie włókna w zdecydowany sposób poprawiło odporność na deformacje trwałe. Pozostałe parametry mieszanki w odniesieniu do mieszanki porównawczej bez włókna są bardzo zbliżone (sztywność, zmęczenie, wodoodporność).

10. Opracowanie składów mieszanek do badań pakietów wielowarstwowych (zadanie 7).

W ramach pracy przewidziano opracowanie składu mieszanki mineralno-asfaltowej antyzmęczeniowej. Niezbędne było również opracowanie składu drugiej mieszanki w celu wykonania próbek stanowiących pakiet warstw odwzorowujący warunki rzeczywistej nawierzchni.

W rezultacie opracowano składy na następujące mieszanki mineralno-asfaltowe:

- **AC8 (80B)** – beton asfaltowy do warstwy antyzmęczeniowej z kruszywem o wymiarze do 8 mm z asfaltem modyfikowanym Modbit 80B,
- **ACWMS16 (20/30)** – beton asfaltowy o wysokim module sztywności z kruszywem o wymiarze do 16 mm z asfaltem 20/30.

Projekty mieszanek mineralno-asfaltowych wykonano wg WT-2 Nawierzchnie Asfaltowe 2008. Szczegółowe składy mieszanek mineralno-asfaltowych oraz ich podstawowe parametry, przedstawiono w dalszej części sprawozdania.

10.1. Mieszanka AC8 (80B) wg rec. TN/251/09-3

10.1.1. Projekt i podstawowe właściwości – AC8 (80B)

Skład mieszanki AC8 został opracowany w laboratorium IBDiM, z wykorzystaniem materiałów własnych tj.: kruszyw, lepiszcza oraz dodatków. Projektowana mieszanka AC8 stanowi beton asfaltowy przeznaczony do warstwy antyzmęczeniowej dla ruchu od KR3 do KR6, z asfaltem modyfikowanym Modbit 80B, (wg WT-2 Nawierzchnie asfaltowe).

A. Informacje ogólne

Przeznaczenie: temat badawczy TN-251, kategoria ruchu KR5-KR6

Podstawa projektu: WT-2 Nawierzchnie Asfaltowe 2008

B. Składniki mieszanki

Lp.	Symbol	Rodzaj	
1	Mączka wapienna	wypełniacz	
2	Granit 0/2 mm	kruszywo drobne granitowe	
3	Bazalt 2/5 mm	Grys	
4	Bazalt 5/8 mm	Grys	
5	Asfalt modyfikowany	Modbit 80B z LOTOS Asfalt – Gdańsk	
6	Włókno	Włókno polimerowe (Tofic)	
7	WETFIX BE	Środek adhezyjny	Akzo Nobel

C. Uziarnienie materiałów mineralnych

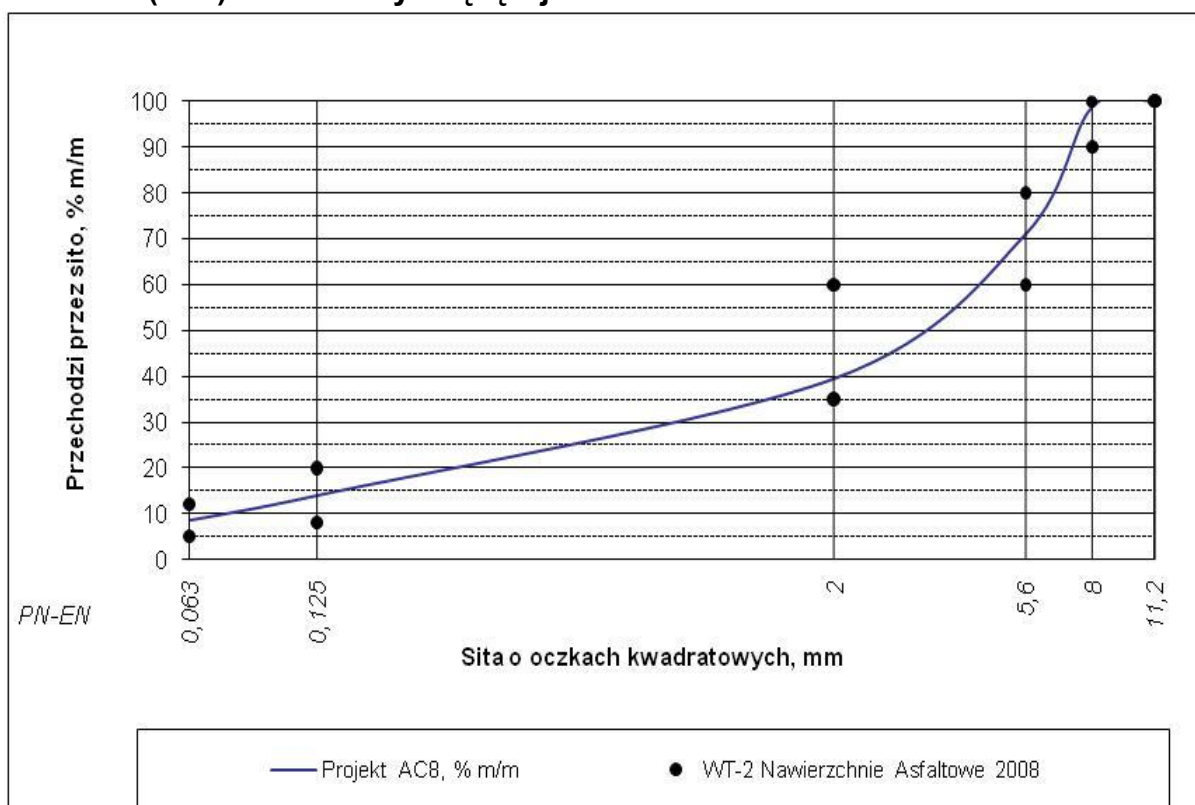
Wymiar oczek sita # [mm]	Mączka wapienna	Granit 0/2 mm	Bazalt 2/5 mm	Bazalt 5/8 mm
16,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11,2	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	3,3
5,6	0,0	0,0	1,6	71,9
2	0,0	9,8	94,4	24,3
0,125	3,20	69,5	3,8	0,3
0,063	8,90	13,5	0,1	0,1
<0,063	87,90	7,2	0,1	0,1
Łącznie	100	100	100	100

D. Skład mieszanki mineralnej (MM) i mineralno-asfaltowej (MMA)

Lp.	Składniki	Mieszanka mineralna, % m/m	Mieszanka mineralno-asfaltowa, % m/m
1	Mączka wapienna	7,0	6,57
2	Granit 0/2 [mm]	35,0	32,83
3	Bazalt 2/5 [mm]	20,0	18,76
4	Bazalt 5/8 [mm]	38,0	35,64
5	Włókno polimerowe	-	0,4
6	Asfalt Modbit 80B	-	5,783
7	WETFIX BE	-	0,017
	Razem	100,0	100,0

W mieszance zastosowano środek adhezyjny: WETFIX BE (0,3 % *m/m* w stosunku do asfaltu) oraz włókno polimerowe TOFIC (0,4 % *m/m* w stosunku do mieszanki mineralno-asfaltowej).

E. Krzywa uziarnienia i uziarnienie mieszanki mineralnej AC8 (80B) do warstwy wiążącej



Rysunek 48 Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej AC8 (80B)

F. Uziarnienie mieszanki mineralnej

Sito #, Mm	Pozostaje na sicie, (%)	Przechodzi przez sito, (%)	Uziarnienie wg WT-2 2008	
			Dolne	Górne
11,2	-	100,00	100	100
8	1,26	98,74	90	100
5,6	27,64	71,10	60	80
2	31,54	39,56	35	60
0,125	25,42	14,14	8	20
0,063	5,41	8,73	5	12
< 0,063	8,73	-	-	-
	100			

G. Zbadane właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej AC8 (80B), o składzie optymalnym dla zawartości asfaltu $A_m=5,8$ % m/m

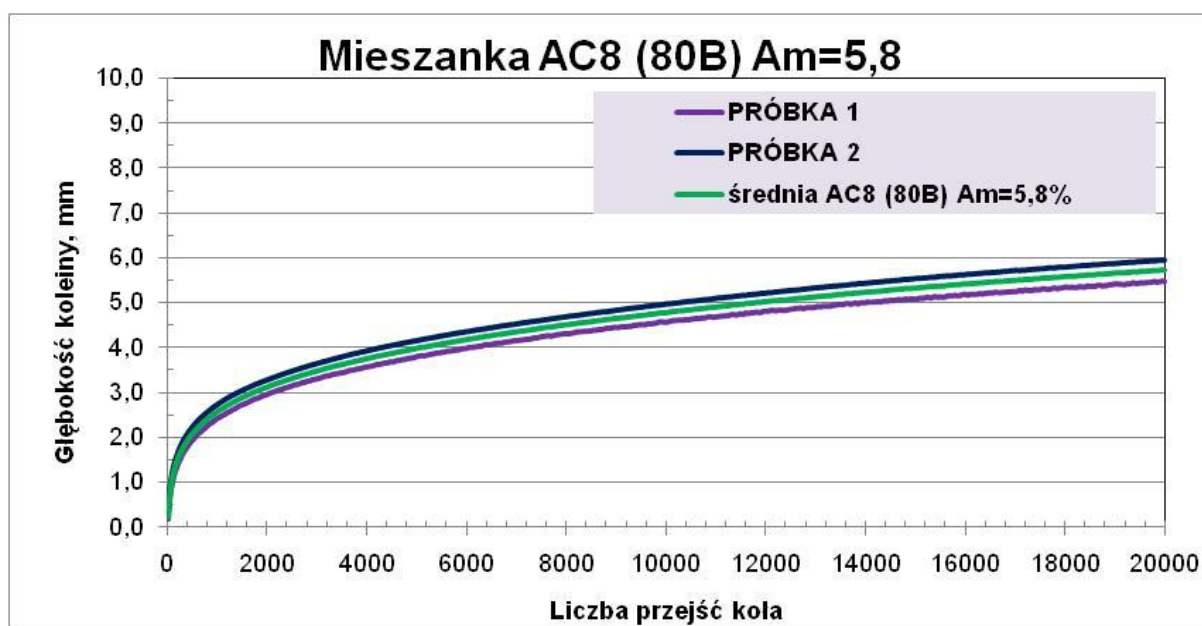
Lp.	Właściwości	Wyniki AC8 (80B) (TN/251/09-3)	Wymagania wg WT-2 2008 wobec AC8 dla ruchu KR1-KR2 (dla ruchu KR3-KR4)*
1	Gęstość objętościowa mieszanki-mineralnej, g/cm ³	2,855	-
2	Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej (dawna gęstość objętościowa), g/cm ³	2,577	-
3	Gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej (dawna gęstość strukturalna), g/cm ³	2,520	-
4	Zawartość wolnych przestrzeni, %v/v	2,2	$V_{min1,0}$ $V_{max3,0}$ ($V_{min2,0}$ $V_{max4,0}$)*
5	Wypełnienie asfaltem wolnej przestrzeni, % v/v	86,9	$VFB_{min}78$ $VFB_{max}89$
6	Odporność na deformacje trwałe (metoda B w powietrzu, 60°C, 10000 cykli)	0,19	(WTS_{AIR} 0,3)*
		11,0	(PRD_{AIR} 5,0)*
7	Odporność na działanie wody, przechowywanie w 40°C z jednym cyklem zamrażania, badanie w 15°C	92,0	$ITSR_{90}$ ($ITSR_{90}$)*

10.1.2. Odporność na koleinowanie - AC8 (80B)

Na rysunku 49 przedstawiono wykres z przebiegu badania koleinowania mieszanki AC8 (80B) przeprowadzone na próbkach przygotowanych w laboratorium IBDiM wg recepty TN/251/09-3.

Tablica 36 Wyniki badania koleinowania – pojedyncze próbki, mieszanka AC8

AC8 (80B) Próbką 1 – Am=5,8%			
Właściwości \ Cykle (przejścia)	2500 (5000)	5000 (10000)	10000 (20000)
Głębokość koleiny, mm	3,80	4,56	5,47
PRD, %	7,3	8,8	10,5
WTS(d10000-d5000), [mm/1000 cykli]			0,18
AC8 (80B) Próbką 2 – Am=5,8%			
Właściwości \ Cykle (przejścia)	2500 (5000)	5000 (10000)	10000 (20000)
Głębokość koleiny, mm	4,16	4,98	5,96
PRD, %	8,0	9,6	11,5
WTS(d10000-d5000), [mm/1000 cykli]			0,20

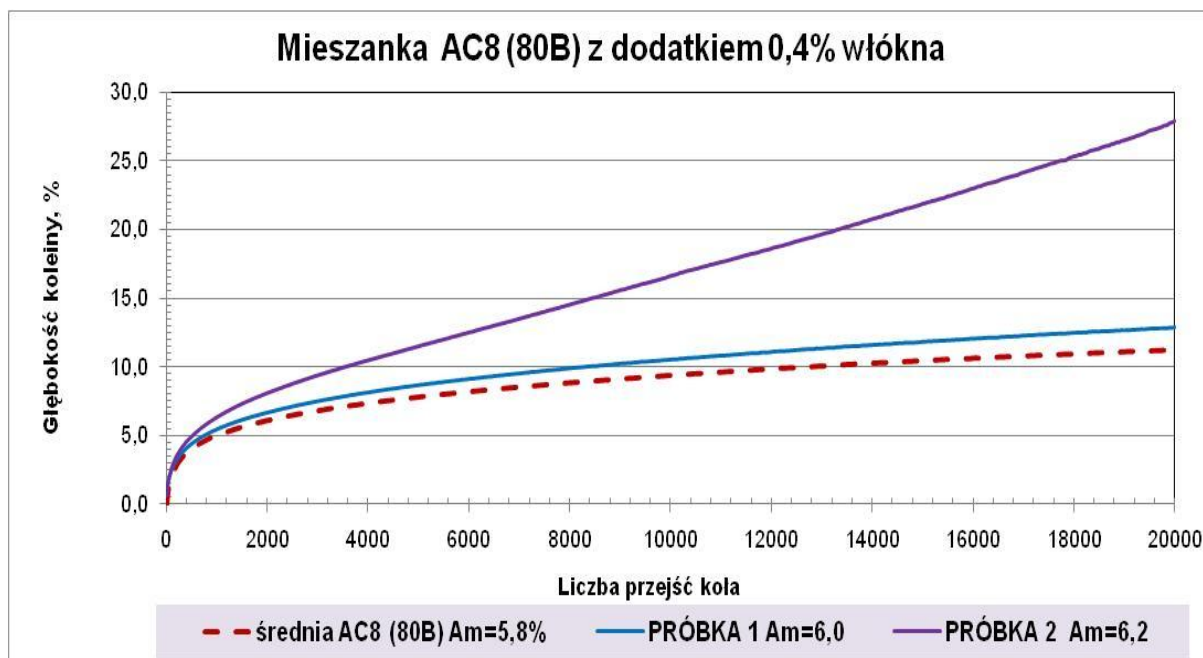


Odporność na deformacje trwałe (metoda B w powietrzu, 60°C, 10000 cykli, % (mm/mm)) AC8 (80B) (wys. próbek 52 mm)			
Właściwości \ Cykle (przejścia)	2500 (5000)	5000 (10000)	10000 (20000)
Głębokość koleiny, mm	3,98	4,77	5,72
PRD, %	7,7	9,2	11,0
WTS(d10000-d5000), [mm/1000 cykli]			0,19

Rysunek 49 Przebieg i wyniki badania koleinowania mieszanki AC8 (80B)

Tablica 37 Zestawienie wyników koleinowania przy uwzględnieniu różnej zawartości lepiszcza

AC8 (80B) Próbka 1 – Am=6,2			
Cykle (przejścia) Właściwości	2500 (5000)	5000 (10000)	10000 (20000)
Głębokość koleiny, mm	4,43	5,38	6,57
PRD, %	8,52	10,35	12,6
WTS(d10000-d5000), [mm/1000 cykli]			0,24
AC8 (80B) Próbka 2 – Am=6,0			
Cykle (przejścia) Właściwości	2500 (5000)	5000 (10000)	10000 (20000)
Głębokość koleiny, mm	5,86	8,47	14,22
PRD, %	11,27	16,29	27,3
WTS(d10000-d5000), [mm/1000 cykli]			1,15
AC8 (80B) Próbk 1, 2 – Am=5,8%			
Cykle (przejścia) Właściwości	2500 (5000)	5000 (10000)	10000 (20000)
Głębokość koleiny, mm	3,98	4,77	5,72
PRD, %	7,7	9,2	11,0
WTS(d10000-d5000), [mm/1000 cykli]			0,19



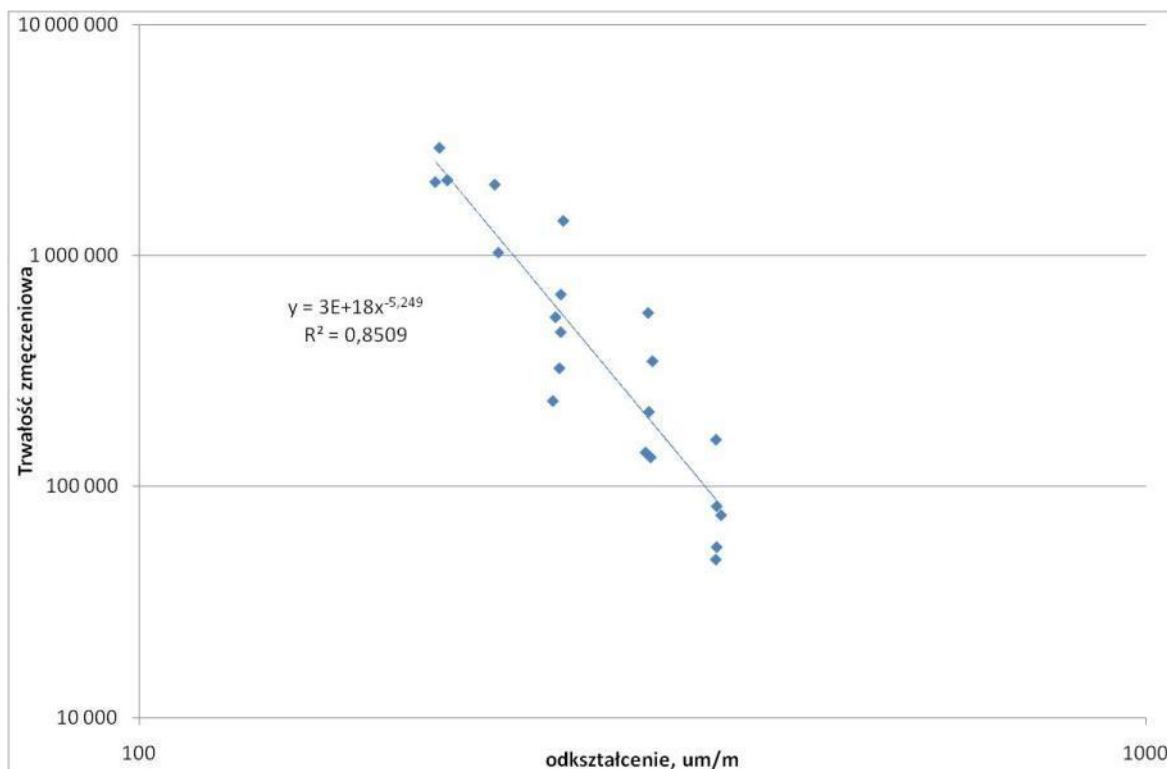
Rysunek 50 Przebieg i wyniki badania koleinowania mieszanki AC8 (80B) z różnymi zawartościami lepiszcza

10.1.3. Odporność na zmęczenie - AC8 (80B)

Przeprowadzono badania zmęczeniowe metodą belki czteropunktowo zginanej w temperaturze 10°C na mieszance z włóknem (antyzmęczeniowej). Wyniki badań przedstawiono w tablicy 38 i na rysunku 51.

Tablica 38 Wyniki badań zmęczenia mieszanki AC8 (80B)

próbka	ε , $\mu\text{m/m}$	N
1	320	567 014
2	264	1 419 229
3	379	75 602
4	374	160 403
5	324	350 508
6	262	468 110
7	319	141 201
8	374	48 600
9	322	134 603
10	259	542 905
11	262	680 714
12	375	55 001
13	262	326 706
14	258	235 702
15	197	2 088 416
16	202	2 126 441
17	202	2 126 441
18	199	2 935 253
19	226	2 036 442
20	321	211 705
21	375	82 602
22	228	1 033 822



Rysunek 51 Charakterystyka zmęczeniowa mieszanki AC8 (80B)

10.1.4. Moduł sztywności - AC8 (80B)

W ramach realizacji etapu III przeprowadzono badania modułu sztywności metodą belki czteropunktowo zginanej w temperaturze 10°C w wybranych częstotliwościach na mieszance z włóknem. Wyniki badań przedstawiono w tablicy 39.

Tablica 39 Wyniki badania modułu sztywności mieszanki AC8 (80B), [MPa]

Częstotliwość Próbka	1 Hz	2 Hz	5 Hz	8 Hz	10 Hz
1	6503	7532	9038	9850	10239
2	6178	7235	8801	9647	10065
3	6742	7871	9451	10291	10718
4	9866	8124	9674	10518	10917
5	6377	7382	8890	9705	10097
6	6808	7820	9308	10107	10464
średnia	7079	7661	9193	10020	10417

10.1.5. Wodoodporność - AC8 (80B)

Badania wodoodporności przeprowadzono na mieszance z włóknem dla zawartości lepiszcza (Modbit 80B) równej 5,8% oraz 6,0%. Wyniki badań przedstawiono w tablicy 40.

Tablica 40 Zestawienie wyników badań wodoodporności – mieszanka AC8 (80B)

Mieszanka	ITS _N [kPa]	ITS _S [Kpa]	ITSR [%]
AC8 (80B) Am=5,8%	2062	2242	92,0
AC8 (80B) Am=6,0%	2023	2108	96,0

10.2. Mieszanka ACWMS16 (20/30) wg rec. TN/251/09-4

10.2.1. Projekt i podstawowe właściwości – ACWMS16 (20/30)

Skład mieszanki ACWMS16 został opracowany w laboratorium IBDiM, z materiałów własnych tj.: kruszyw, lepiszcza oraz dodatków. Projektowana mieszanka ACWMS16 stanowi beton asfaltowy o wysokim module sztywności dla ruchu od KR3 do KR6, z asfaltem 20/30, opracowany wg WT-2 Nawierzchnie asfaltowe.

A. Informacje ogólne

Przeznaczenie: temat badawczy TN-251, kategoria ruchu KR5-KR6

Podstawa projektu: WT-2 Nawierzchnie Asfaltowe 2008

B. Składniki mieszanki

Lp.	Symbol	Rodzaj	
1	Mączka wapienna	wypełniacz	
2	Granit 0/2 mm	kr. dr. gran.	
3	Bazalt 2/5 mm	Grys	
4	Bazalt 5/8 mm	Grys	
5	Bazalt 8/11 mm	Grys	
6	Bazalt 11/16 mm	Grys	
7	Asfalt 20/30	asfalt drogowy z LOTOS Asfalt – Gdańsk	
8	WETFIX BE	Środek adhezyjny	Akzo Nobel

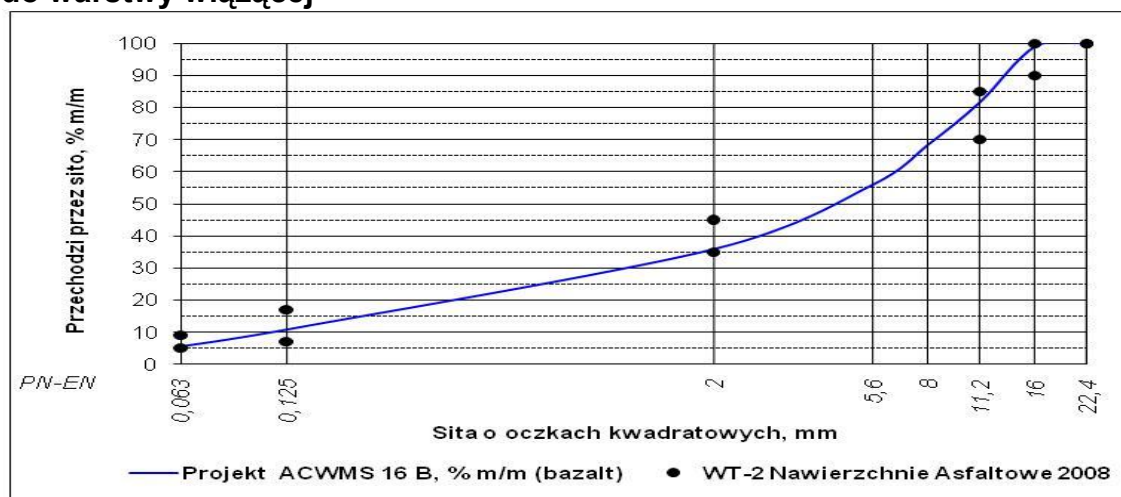
C. Uziarnienie materiałów mineralnych

Wymiar oczek sita # [mm]	Mączka wapienna	Granit 0/2 mm	Bazalt 2/5 mm	Bazalt 5/8 mm	Bazalt 8/11 mm	Bazalt 11/16 mm
16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,9
11,2	0,0	0,0	0,0	0,0	6,6	81,3
8	0,0	0,0	0,0	3,3	68,7	12,9
5,6	0,0	0,0	1,6	71,9	20,5	0,6
2	0,0	9,8	94,4	24,3	2,8	0,1
0,125	2,23	69,5	3,8	0,3	0,9	0,0
0,063	13,05	13,5	0,1	0,1	0,2	0,1
<0,063	84,72	7,2	0,1	0,1	0,3	0,1
Łącznie	100	100	100	100	100	100

D. Skład mieszanki mineralnej (MM) i mineralno-asfaltowej (MMA)

Lp.	Składniki	Mieszanka mineralna, % m/m	Mieszanka mineralno-asfaltowa, % m/m
1	Mączka wapienna	3,5	3,34
2	Granit 0/2 [mm]	35,0	33,43
3	Bazalt 2/5 [mm]	14,0	13,37
4	Bazalt 5/8 [mm]	12,5	11,94
5	Bazalt 8/11 [mm]	15,0	14,32
6	Bazalt 11/16 [mm]	20,0	19,10
7	Asfalt 20/30	-	4,49
8	WETFIX BE	-	0,01
	Razem	100,0	100,0

E. Krzywa uziarnienia i uziarnienie mieszanki mineralnej ACWMS16 (20/30) do warstwy wiążącej



Rysunek 52 Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej ACWMS16 (20/30) do warstwy wiążącej

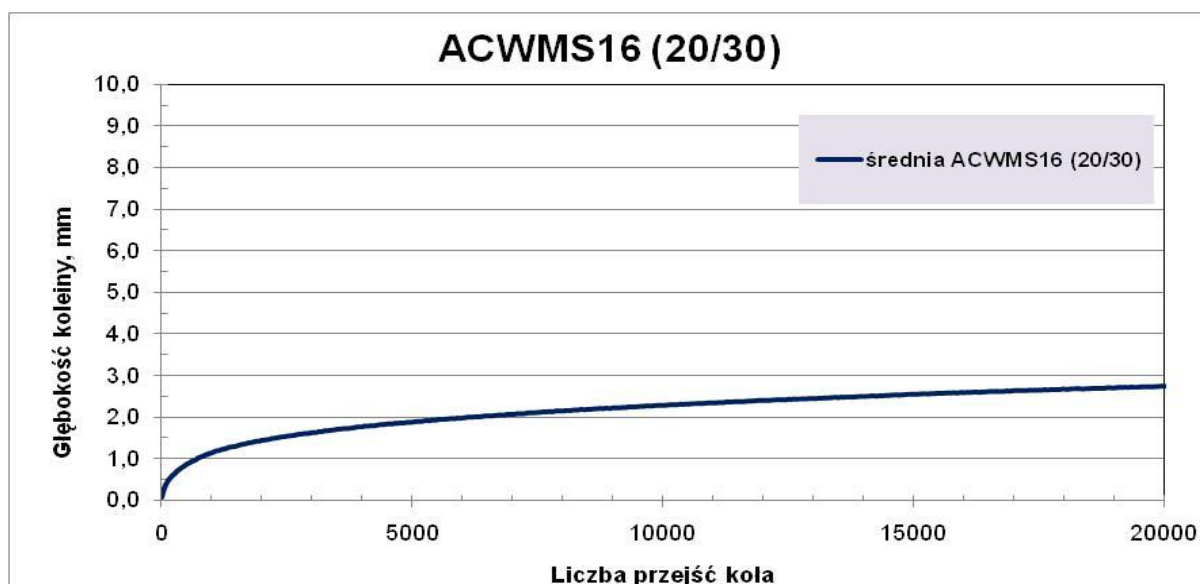
F. Uziarnienie mieszanki mineralnej

Sito #, Mm	Pozostaje na sicie, (%)	Przechodzi przez sito, (%)	Uziarnienie wg WT-2 2008 wobec ACWMS 16	
			Dolne	Górne
22,4	-	100,0	100	100
16	0,98	99,0	90	100
11,2	17,25	81,77	70	85
8	13,29	68,48	-	-
5,6	12,41	56,07	-	-
2	20,12	35,95	35	45
0,125	25,11	10,84	7	17
0,063	5,26	5,58	5	9
< 0,063	5,58	-	-	-
	100			

G. Zbadane właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej ACWMS16 (20/30), o składzie optymalnym dla zawartości asfaltu $A_m=4,5$ % m/m

Lp.	Właściwości	Wyniki	Wymagania wg WT-2 2008
1	Gęstość objętościowa mieszanki-mineralnej, g/cm ³	2,877	-
2	Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm ³	2,656	-
3	Gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm ³	2,569	-
4	Zawartość wolnych przestrzeni, %v/v	3,3	$V_{min}2,0$ $V_{max}4,0$
5	Wypełnienie asfaltem wolnej przestrzeni, % v/v	77,81	
6	Odporność na deformacje trwałe (metoda B w powietrzu, 60°C, 10000 cykli)	0,10	WTS_{AIR} 0,1
		2,9	PRD_{AIR} 3,0
7	Odporność na działanie wody, przechowywanie w 40°C z jednym cyklem zamrażania, badanie w 15°C	85,9	ITSR ₈₀
8	Trwałość zmęczeniowa, $\mu m/m$	144	ϵ_{6-130}
9	Sztywność, MPa	17802	$S_{min}14000$

10.2.2. Odporność na koleinowanie – ACWMS16 (20/30)



Odporność na deformacje trwałe (metoda B w powietrzu, 60°C, 10000 cykli, % (mm/mm)) ACWMS16 (20/30) (wys. próbek 99 mm)			
Właściwości \ Cykle (przejścia)	2500 (5000)	5000 (10000)	10000 (20000)
Głębokość koleiny, mm	1,94	2,35	2,83
PRD, %	2,0	2,4	2,9
$WTS_{(d10000-d5000)}$, [mm/1000 cykli]			0,10

Rysunek 53 Przebieg i wyniki badania koleinowania w małym aparacie mieszanka ACWMS16 (20/30)

10.2.3. Odporność na zmęczenie - ACWMS16 (20/30)

W tablicach 41-42 przedstawiono wyniki badania zmęczenia mieszanki ACWMS16.

Tablica 41 Wyniki badań zmęczenia mieszanki ACWMS16 (20/30)

próbka	ϵ , $\mu\text{m/m}$	N
B1	175	176 801
B2	139	1 383 815
B4	174	221 202
B5	225	72 501
B6	146	1 373 032
B7	149	588 014
B8	228	30 401
B9	180	292 107
B10	224	55 601
B12	180	341 807
B14	147	685 516
B15	145	1 153 826
B16	226	50 501
B17	181	191104

Tablica 42 Wyniki badań zmęczenia mieszanki ACWMS16 (20/30)

p=95%	ϵ_6	144	$\mu\text{m/m}$
	$\epsilon_6(\text{max})$	152	$\mu\text{m/m}$
	$\epsilon_6(\text{min})$	137	$\mu\text{m/m}$
	R^2	0,94	

10.2.4. Moduł sztywności - ACWMS16 (20/30)

W tablicy 43 przedstawiono wyniki badań modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego mieszanki ACWMS16 (20/30).

Tablica 43 Moduł sztywności i kąt przesunięcia fazowego, 10°C, 10Hz

Mieszanka Próbka	ACWMS16 (20/30)	
	MPa	°
1	18044	10,4
2	19322	9,7
3	20031	10,1
4	18048	9,7
5	17101	10,1
6	17059	9,4
7	14683	12,5
8	17135	9,7
9	18671	9,6
10	17071	10,0
11	18073	9,2
12	18080	9,8
13	18398	8,5
14	17508	9,5
ŚREDNIA	17802	9,9
ODCH.ST.	1256	0,9

10.2.5. Wodoodporność - ACWMS16 (20/30)

Wyniki wskaźnika odporności na działanie wody ITSR przedstawiono w tablicy 44. Odporność na działanie wody określono na próbkach przechowywanych w 40°C z jednym cyklem zamrażania, badanie wykonano w temperaturze 15°C.

Tablica 44 Wyniki odporności na działanie wody - mieszanka ACWMS16 (20/30)

Stan próbek	Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie, kPa		ITSR, %
	ITS _S	ITS _N	
ACWMS16 (20/30)			
Próbki suche	3745,5	-	85,9
Próbki pielęgnowane	-	3216,8	

10.3. Ocena zaprojektowanych mieszanek

W tabelicy 45 zestawiono wyniki badań mieszanki z włóknem AC8 i mieszanki AC WMS 16.

Tabela 45 Zbiornicze zestawienie wyników badań AC8 i ACWMS 16

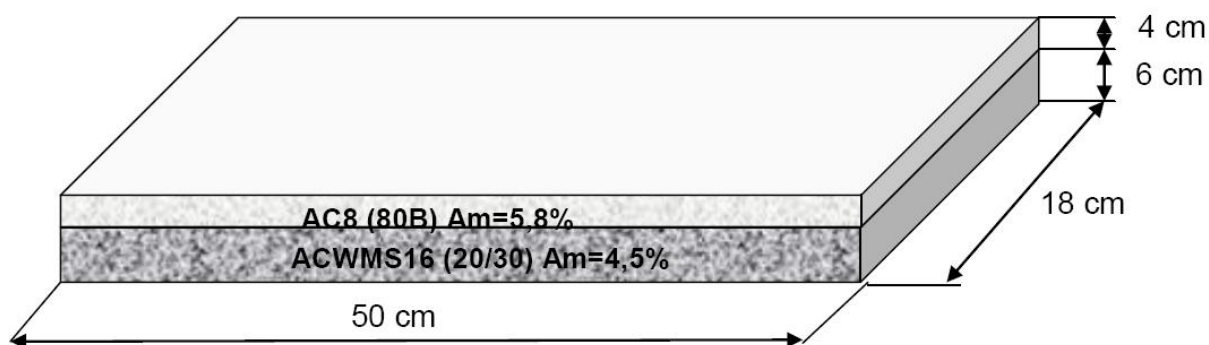
Właściwość	Mieszanka	Jednostka	AC8 80B	ACWMS16 20/30
Asfalt			80B	20/30
Zawartość asfaltu		% m/m	5,8	4,5
Zawartość wolnych przestrzeni		% v/v	2,2	3,3
Odporność na koleinowanie, WTS_{AIR}		mm/1000 cykli	0,19	0,1
Odporność na koleinowanie, WTS_{AIR}		%	11	2,9
Wodoodporność ITSR		%	92	85,9
Zmęczenie, ϵ_6		$\mu m/m$	261	144
Sztywność		MPa	10417	17802
Kąt przesunięcia fazowego		°	16,4	9,9

Wg WT-2 dla mieszanki AC8 dla ruchu KR1-KR2 nie przewidziano wymagań odnośnie odporności na koleinowanie, natomiast dla ruchu KR3-4 przewidziano wymagania $WTS_{AIR} < 0,3$, $WTS_{AIR} < 5,0$. Badania koleinowania wykonane na próbkach z mieszanki antyzmęczeniowej wykazały odporność na koleinowanie $WTS=0,19$, co spełnia postawione w WT-2 (wobec KR3-4), jednak odnotowana procentowa głębokość koleiny PRD jest zbyt wysoka w odniesieniu do wymagań tj. $PRD=11$). Obydwie mieszanki spełniły wymagania w zakresie wodoodporności. Mieszanka AC WMS16 spełniła wymagania w zakresie odporności zmęczeniowej i sztywności. Mieszanka AC8 charakteryzuje się bardzo wysoką trwałością zmęczeniową (niemal dwukrotnie wyższą niż AC WMS 16), przy jednocześnie mniejszym module sztywności i większym udziale fazy lepkiej modułu (większy kąt przesunięcia fazowego).

11. Badania pakietów warstw

11.1. Próbkki do badań

W laboratorium IBDiM przygotowano płyty (rysunek 54) stanowiące pakiet dwóch warstw składający się z 4 cm warstwy mieszanki AC8 (80B) i 6 cm warstwy mieszanki ACWMS16 (20/30) symulujący warunki pracy w rzeczywistej nawierzchni. Płyty o wymiarach 50x18x10cm, przygotowano w technologii „gorące na gorące”. Następnie z płyt wycięto próbki do badań zmęczeniowych o wymiarach 38x6,3x5cm (rysunek 55).



Rysunek 54 Płyta stanowiąca pakiet warstw z mieszank AC8 i ACWMS16



Rysunek 55 Widok belek wyciętych z pakietu warstw

Dodatkowo w stosunku do założeń planu pracy zdecydowano przeprowadzić badania na próbkach warstwowych wyciętych z płyt pochodzących z odcinka testowego realizowanego w ramach projektu badawczego SPENS [25]. W przywołanej pracy badawczej przeprowadzono badania nawierzchni z warstwą antyzmęczenia z włóknem (mieszanka asfaltu piaskowego). Biorąc pod uwagę bardzo zachęcające wyniki tego projektu postanowiono rozszerzyć program niniejszej pracy. Przygotowane próbki belkowe składały się z warstwy antyzmęceniowej APAF grubości 1,5 cm i warstwy ACWMS 16 20/30 grubości 3,5 cm.



Rysunek 56 Widok płyt z odcinka testowego SPENS

11.2. Wyniki badań

W tablicach 46 – 49 przedstawiono wyniki badań zmęzeniowych oraz parametry obliczeniowe wraz z przedziałem ufności $p=95\%$ parametru ε_6 pakietu warstw AC8+ACWMS16 oraz APAF+ACWMS 16.

Tablica 46 Wyniki badań zmęczenia pakietu AC8+ACWMS 16

próbka	ε , $\mu\text{m/m}$	N
1	205,2	346 707
2	179,5	395 507
3	176,8	918 820
4	201,3	196 805
5	301,5	116 103
6	323,3	10 401
7	175,2	1 577 034
8	346,0	16 801
9	152,0	3 061 266
10	296,3	61 402
11	347,8	27 201
12	250,1	46 102
13	350,6	19 701
14	177,7	223 805

Tablica 47 Parametry charakterystyki zmęzeniowej pakietu AC8+ACWMS 16

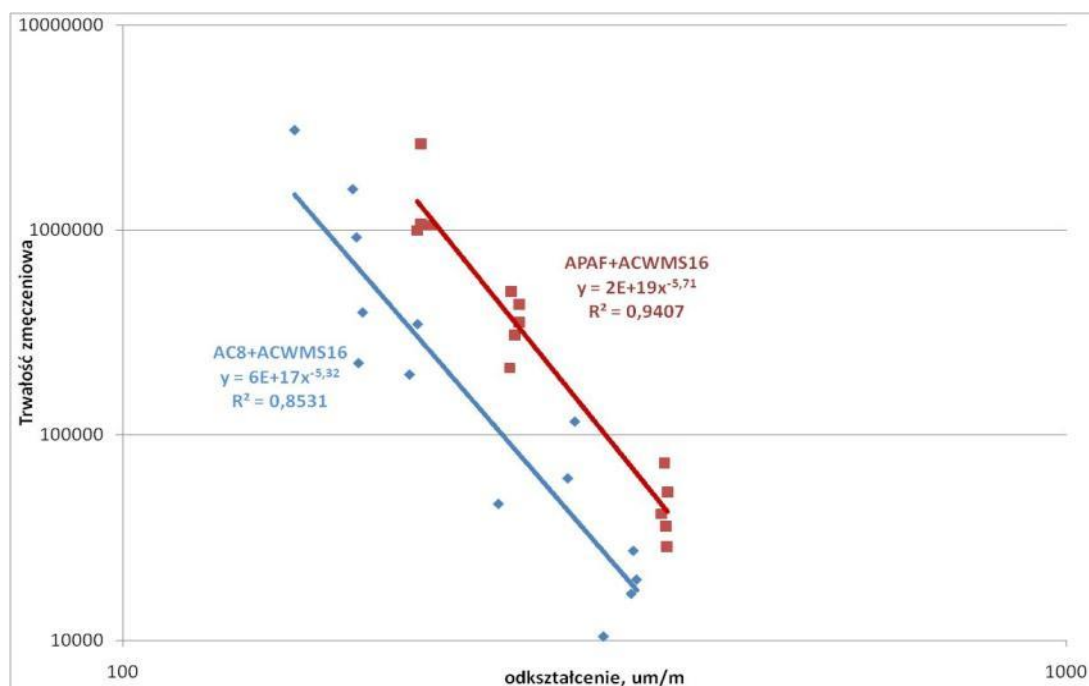
p=95%	ε_6	164	$\mu\text{m/m}$
	$\varepsilon_{6(\text{max})}$	192	$\mu\text{m/m}$
	$\varepsilon_{6(\text{min})}$	140	$\mu\text{m/m}$
	R^2	0,85	

Tablica 48 Wyniki badań zmęczenia pakietu APAF+ACWMS 16

próbka	ε , $\mu\text{m/m}$	N
1	260	308506
2	375	73102
3	257	213103
4	263	434510
5	372	41401
6	258	500615
7	377	28701
8	207	1070421
9	205	997026
10	376	36101
11	207	2637631
12	263	354607
13	212	1055419
14	378	52702
15	261	52702

Tablica 49 Parametry charakterystyki zmęczeniowej pakietu APAF+ACWMS 16

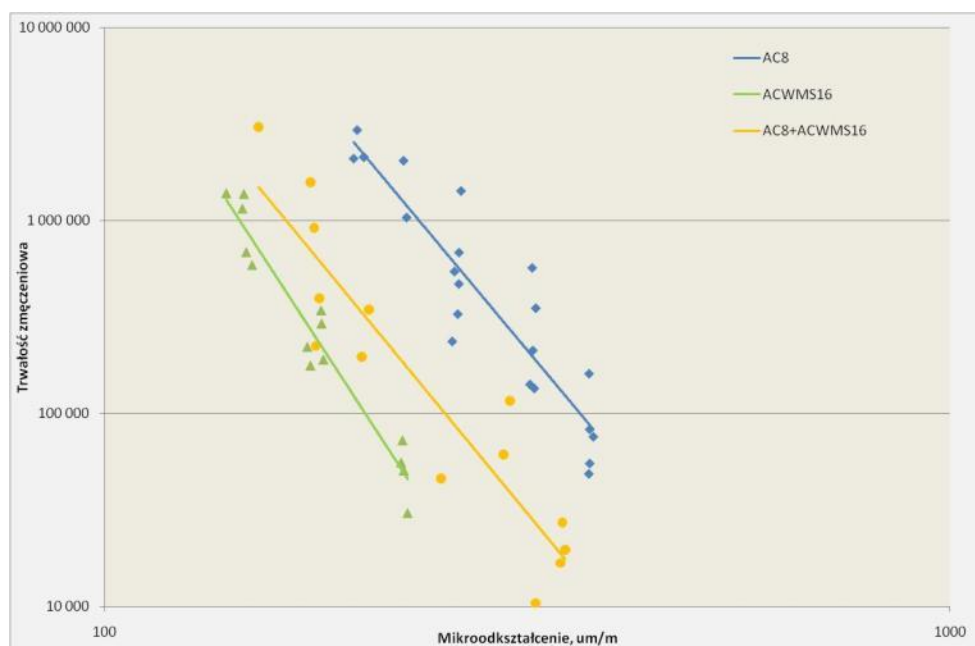
	ε_6	211	$\mu\text{m/m}$
p=95%	$\varepsilon_{6(\text{max})}$	238	$\mu\text{m/m}$
	$\varepsilon_{6(\text{min})}$	187	$\mu\text{m/m}$
	R^2	0,84	



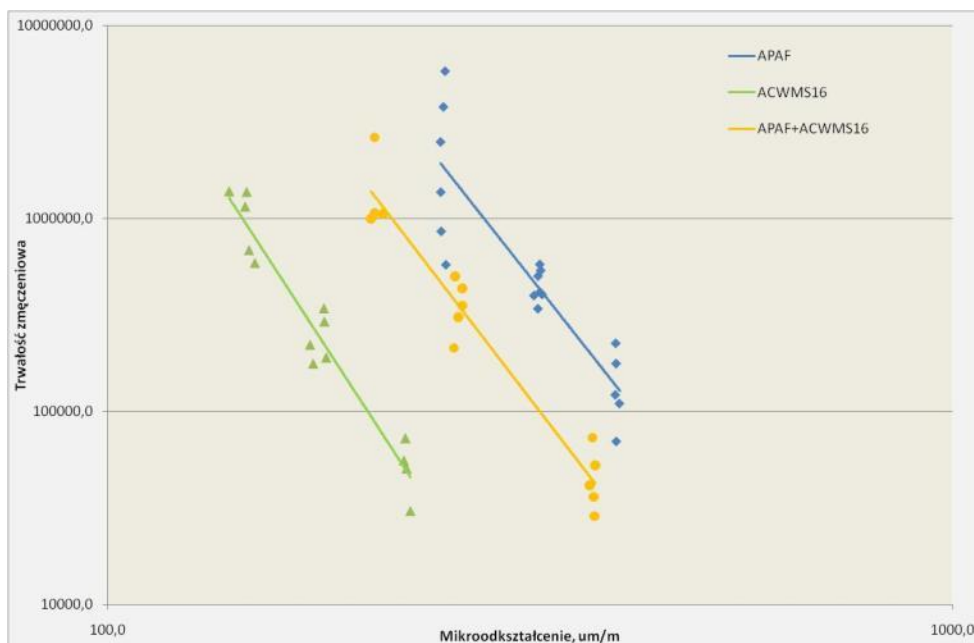
Rysunek 57 Charakterystyki zmęczeniowe układów dwuwarstwowych

11.3. Analiza wyników badań

Na rysunkach 58-59 przedstawiono charakterystyki zmęczeniowe pakietów warstw i charakterystyki zmęczeniowe poszczególnych mieszanek. Można zauważyć, że w obydwu przypadkach wykresy pakietów dwuwarstwowych leżą pomiędzy wykresami dla mieszanki ACWMS16 i mieszanek z włóknem (APAF i AC8). Można na tej podstawie wnioskować, że zastosowana mieszanka ACWMS16 ma gorsze właściwości niż materiał (próbka) kompozytowy z warstwą antyzmęczeniową z włóknem. Na tej podstawie można wnioskować, że zastosowanie warstwy antyzmęczeniowej w spodzie warstw asfaltowych, czyli w miejscu najbardziej narażonym na powstanie (inicjację) spękań zmęczeniowych jest korzystne i powinno poprawić trwałość zmęczeniową całej konstrukcji. Jest to potwierdzenie obserwacji z badań odcinków doświadczalnych w ramach projektu SPENS [25].



Rysunek 58 Charakterystyki zmęczeniowe pakietu AC8+ACWMS16 oraz poszczególnych mieszanek



Rysunek 59 Charakterystyki zmęczeniowe pakietu APAF+ACWMS16 oraz poszczególnych mieszanek

12. Podsumowanie i wnioski

Założeniem niniejszej pracy było określenie w jakim stopniu wpływa dodatek włókien syntetycznych zastosowanych w mieszankach mineralno – asfaltowych. Zagadnienie wzmacniania asfaltowych nawierzchni drogowych jest powszechnie znane, ale zastosowany do tego celu materiał jest niekonwencjonalny. Ze względu na specjalny charakter użytych włókien przeprowadzono bardzo szeroki zakres badań. Wykonano badania mające na celu sprawdzenie działania włókien w różnych warunkach eksploatacji nawierzchni asfaltowej tj. odporności na deformacje trwałe, odporności niskotemperaturowej, odporności na działanie wody oraz właściwości użytkowe czyli zmęczenie.

Analizując otrzymane wyniki badań można stwierdzić, że w przypadku mieszanek z włóknem:

- następuje poprawa odporności na deformacje trwałe. Niezależnie od rodzaju zastosowanego aparatu (mały czy duży koleinomierz) do badania koleinowania uzyskano potwierdzenie, że dodatek włókien znacznie wpływa na zmniejszenie powstawania deformacji por. pkt. 9.1.2.

- zwiększenie trwałości zmęczeniowej. Analizując wyniki badań zmęczenia obserwujemy, że następuje poprawa tej cechy dla mieszanek w stanie oryginalnym i po starzeniu technologicznym, a tylko w przypadku mieszanek postarzonych eksploatacyjnie widzimy nieznaczny spadek zmęczenia por. pkt. 9.1.3.
- sztywność mieszanki MMA kształtuje się praktycznie tym samym poziomie co mieszanki porównawczej. Należałoby to zjawisko tłumaczyć tym, iż zastosowane włókno nie stanowi „swoistej gąbki” chłonej lepiszcze z mieszanki. Działanie tego włókna polega na zatrzymaniu asfaltu na ziarnach kruszywa i stanowi pewien rodzaj stabilizacji por. pkt. 9.1.4.
- odporność na pękanie niskotemperaturowe, niezależnie czy mieszanka była poddana procesowi starzenia czy nie, nieznacznie spada w porównaniu z mieszanką porównawczą por. pkt. 9.1.6.
- wodoodporności mieszanek z włóknem we wszystkich stanach okazały się natomiast lepsze por. pkt. 9.1.5.

Następnym celem stawianym w tej pracy było opracowanie recepty na drobnoziarnistą mieszankę z włóknem, która stanowiłaby warstwę antyzmęczeniową w konstrukcji nawierzchni drogowej. Do tego celu zaprojektowano skład mieszanki AC8 z asfaltem 80B i dodatkiem włókien polimerowych. Parametry i właściwości mieszanki zamieszczono w pkt. 10.1. Jako warstwę wiążącą zaproponowano mieszankę ACWMS16 (20/30), której parametry techniczne zamieszczono w pkt. 10.2. Obydwie mieszanki miały stanowić, w późniejszym okresie, pakiet warstw do dalszych badań. Mieszanka AC8 charakteryzowała się bardzo wysoką trwałością zmęczeniową, prawie dwukrotnie wyższą niż ACWMS16, przy jednocześnie ponad 30 procentowym spadku modułu sztywności w stosunku do ACWMS16. Pakiet warstw mieszanek AC8 i ACWMS16 przygotowywano w płytach, w technologii gorące na gorące, a następnie wycinano beleczki, w których stosunek warstw mieszanki AC8 do ACWMS16 wynosił 15 mm do 35 mm. Przeprowadzone badania zmęczeniowe poszczególnych mieszanek osobno jak i pakietu warstw wykazują, że zastosowanie warstwy antyzmęczeniowej w spodzie warstw asfaltowych, czyli w miejscu najbardziej narażonym na powstanie (inicjację) spękań zmęczeniowych jest korzystne i powinno poprawić trwałość

zmęczeniową całej konstrukcji. Graficzny obraz charakterystyk zmęczeniowych poszczególnych mieszanek przedstawiono na rys. 58 i przeanalizowano w pkt. 11.3.

Dodatkowo do założeń programu pracy zamieszczono wyniki badań próbek, pochodzących ze zrealizowanego projektu badawczego SPENS. Próbki zostały przygotowane w podobny sposób, stosunek warstw mieszanek wynosił 15 mm do 35 mm, z tym że mieszankę AC8 zastąpiono mieszanką APAF. W pkt. 11 i na rys. 59 przedstawiono szczegółowe wyniki badań. Wyniki badań potwierdzają wcześniejsze spostrzeżenia, że stosowanie warstw antyspękaniowych powinno korzystnie wpłynąć na trwałość zmęczeniową całej konstrukcji.

Wyniki badań, które zostały przedstawione w niniejszym opracowaniu są na tyle obiecujące, że należałoby je dalej kontynuować pod kątem modelowania mechanistycznego konstrukcji oraz zaprojektowania i wykonania próbnego odcinka testowego drogi.

Mając na uwadze, że zastosowane włókna poprawiają szereg cech i właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych pojawia się możliwość szerszego zainteresowania projektantów i wykonawców tego typu produktem.

13. Literatura

- 1 Selection of Laboratory Aging Procedures for Asphalt-Aggregate Mixtures, SHRP-A-383
- 2 Corté J.-F., Brûlé B., Bardesi A., Diani E., Gerritsen A., Lefèvre G., Planche J.-P., Sybilski D., Stawiarski A., Verhée F., Watkins S.: Use of modified bituminous binders, special bitumens and bitumens with additives in road pavements. Report of WRA (PIARC/AIPCR) TC8 SG4, Routes, Roads, 303, 7, 1999
- 3 Sybilski D.: Modyfikatory i dodatki do asfaltów drogowych. Część 1: Modyfikatory lepiszcza. *Drogownictwo* 2, 2000, 55, s. 35-42, Część 2: Modyfikatory i dodatki do mieszanek. *Drogownictwo* 3, 2000, 55, s. 67-72
- 4 Sybilski D., Horodecka R., Wróbel A., Bańkowski W.: „Nowe włókno TOFIC® do poprawy właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych” – *Polskie Drogi* 10/2007
- 5 PN-S-96025:2000 Drogi samochodowe i lotniskowe – Nawierzchnie asfaltowe – Wymagania
- 6 Sybilski D., W.Bańkowski; Mularzuk R.: „Zasady wykonywania nawierzchni o zwiększonej odporności na koleinowanie i zmęczenie” – Warszawa 2007
- 7 PN-EN 12697-22 - Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco -- Część 22: Koleinowanie
- 8 Sybilski D., W.Bańkowski: „Wyznaczanie temperatury równoważnej ze względu na zmęczenie”, *Drogownictwo* 6/2004;
- 9 Hopman P.C., Kunst P.A.J.C., Pronk A.C.: „A renewed interpretation method for fatigue measurements-verification of Miner's rule”, Proc. 4-th Eurobitume, Madryt 1989;
- 10 Hopman P., Kunst p., Pronk A.C.: „A renewed interpretation method for fatigue measurement verification of Miner" rule", Eurobitume 1989;
- 11 Pronk A.C.: „Fatigue lives of asphalt beams in 2 and 4 point dynamic bendings tests based on a 'new' fatigue life definition using the dissipated energy concept. Controlled displacement mode” – DWW 1997;
- 12 Rowe G.M., Bouldin M.G. „Improved techniques to evaluate the fatigue resistance of asphalt mixtures”, Eurobitume 2000;
- 13 Pellinen T.K.: „Investigation of the use of dynamic modulus as an indicator of hot-mix asphalt performance,, Arizona State University, 2001
- 14 Kalabińska M., Piłat J.: "Reologia asfaltów i mas mineralno-asfaltowych" – WKŁ, Warszawa 1982
- 15 Sybilski D.: "Wyznaczanie krzywej wiodącej mieszanki mineralno-asfaltowej", IV Międzynarodowa Konferencja "Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe", Kielce 1998;
- 16 Francken L., Vanelstraete A.: „Complex moduli of bituminous materials: A rational method for the interpretation of test results”, Proc. of the 5th International RILEM Symposium, MTBM Lyon,1997;
- 17 Wiliams M.L., Landel R.F., Ferry J.D.: *Journal of Amer.Chem. Soc.*, 77, 1995;
- 18 Monismith C.L., Secor G.A., Secor K.E.: Temperature Induced Stresses and Deformations in Asphalt Concrete. Proc. AAPT 34, 1965
- 19 Fabb T.T.J.: The Influence of Mix Composition, Binder Properties and Cooling Rate on Asphalt Cracking at Low Temperature. Proc. AAPT. 43, 1974

-
- 20 Arand W.: Verhalten von Asphalt bei tiefen Temperaturen. Die Asphaltstrasse 3, 1983.
- 21 Arand W.: Einfluss der Zusammensetzung von Walzasphalt auf das Verhalten bei Kälte. Strasse und Autobahn 8, 1987
- 22 Arand W., Sybilski D.: Wpływ zastosowania polskich asfaltów drogowych na właściwości betonu asfaltowego w niskiej temperaturze. Prace IBDM 3, 1992
- 23 AASHTO TP10-93 : "Standard test method for thermal restrained specimen tensile strenght"
- 24 Zasady wykonywania nawierzchni asfaltowej o zwiększonej odporności na koleinowanie i zmęczenie (ZW-WMS 2007)
- 25 Bańkowski W., Sybilski D., i inni: „Validation of innovative pavement structures on test section with use accelerated loading test”