

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

**SPRAWOZDANIE
(CZĘŚCIOWE)**

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, wrzesień 2008

Spis treści

1. Podstawa pracy	3
2. Cel pracy.....	3
3. Program pracy	3
4. Weryfikacja dotychczasowych i poszukiwania nowych systemów oceny skuteczności zastosowania dodatku włókien do mieszanek mineralno-asfaltowych (Zadanie 1).....	6
5. Zgromadzenie materiałów do badań oraz podstawowe badania materiałów wyjściowych (Zadanie 2 i 3).....	13
6. Opracowanie składów mieszanek mineralno-asfaltowych przy uwzględnieniu różnej zawartości włókna i lepiszcza (Zadanie 4)	14
6.1. Mieszanka BAWMS16 (Recepta)	14
6.2. Mieszanki BAWMS16 z dodatkiem włókna	16
7. Metodyka badania.....	18
7.1. Koleinowanie	18
7.2. Odporność na zmęczenie	19
7.3. Moduł sztywności.....	22
7.4. Wodoodporność.....	24
7.5. Odporność na pękanie niskotemperaturowe.....	25
7.6. Symulacja starzenia krótko- i długoterminowego.....	27
8. Wyniki badań	28
8.1. Koleinowanie (Zadanie 5.1)	28
8.2. Odporność na zmęczenie (Zadanie 5.2).....	31
8.3. Moduł sztywności (Zadanie 5.3)	36
8.4. Wodoodporność (Zadanie 5.4)	40
8.5. Odporność na pękanie niskotemperaturowe (Zadanie 5.5)	41
9. Kontynuacja pracy w dalszych etapach	46
10. Literatura.....	46

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.

Próby wzmacnianie nawierzchni drogowych, za pomocą różnego rodzaju materiałów i technologii, w dobie nasilającego się ciężkiego transportu samochodowego są wielkim wyzwaniem dla wykonawców, 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. Niniejsze sprawozdanie dotyczy Etapu I przewidzianego do realizacji w roku 2008, którego program przedstawiono poniżej.

Program Etapu 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).

Termin realizacji /etap I-zadania 1-4, 5.1/: wrzesień 2008 r.

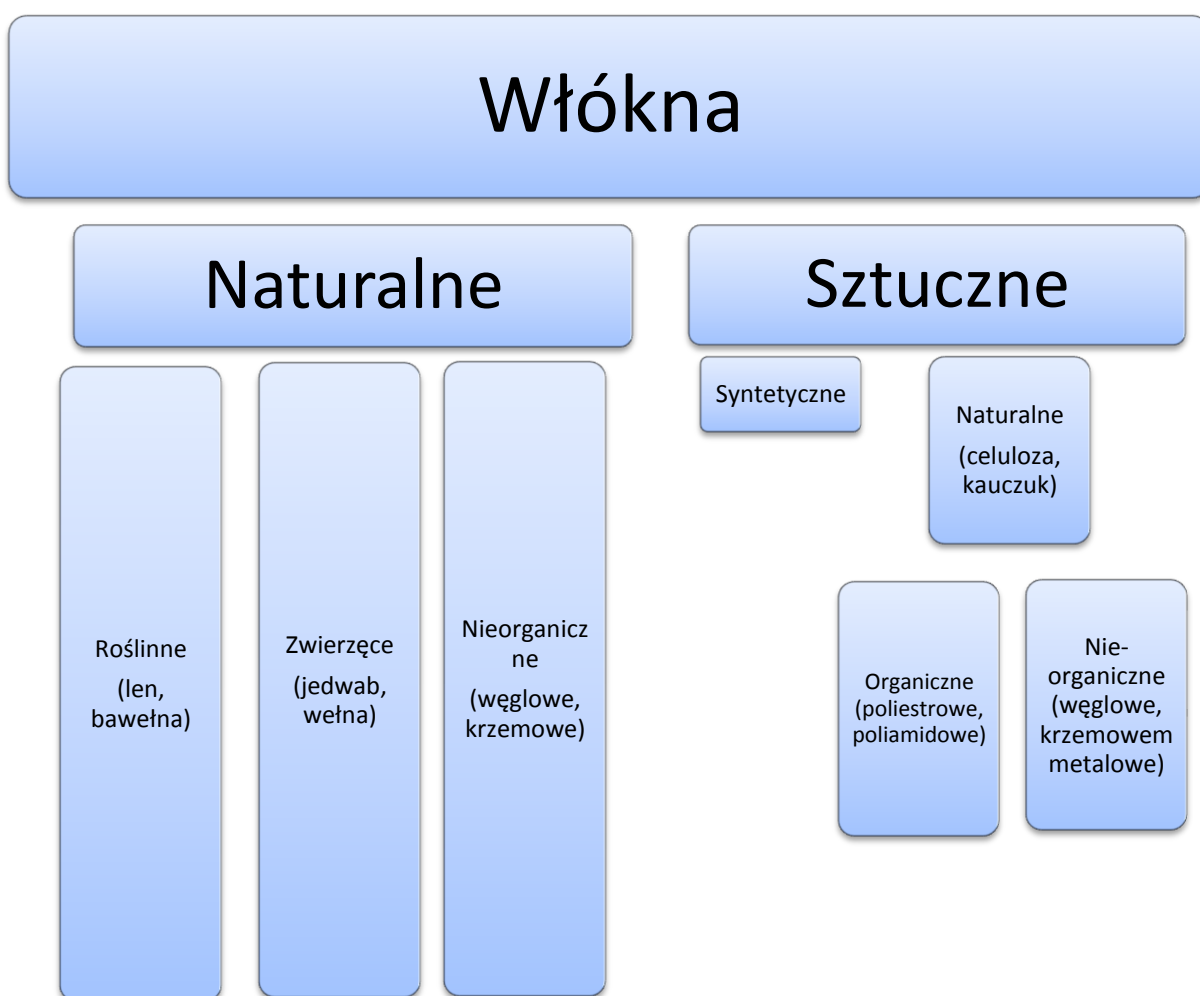
Termin realizacji /etap I-zadania 5.2 – 5.5/: listopad 2008 r.

Sposób zakończenia: sprawozdanie częściowe

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 [1, 2]. 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, wzmocnianych kordem tekstylnym, takich jak opony samochodowe, taśmy transporterów, odyskiwany 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.

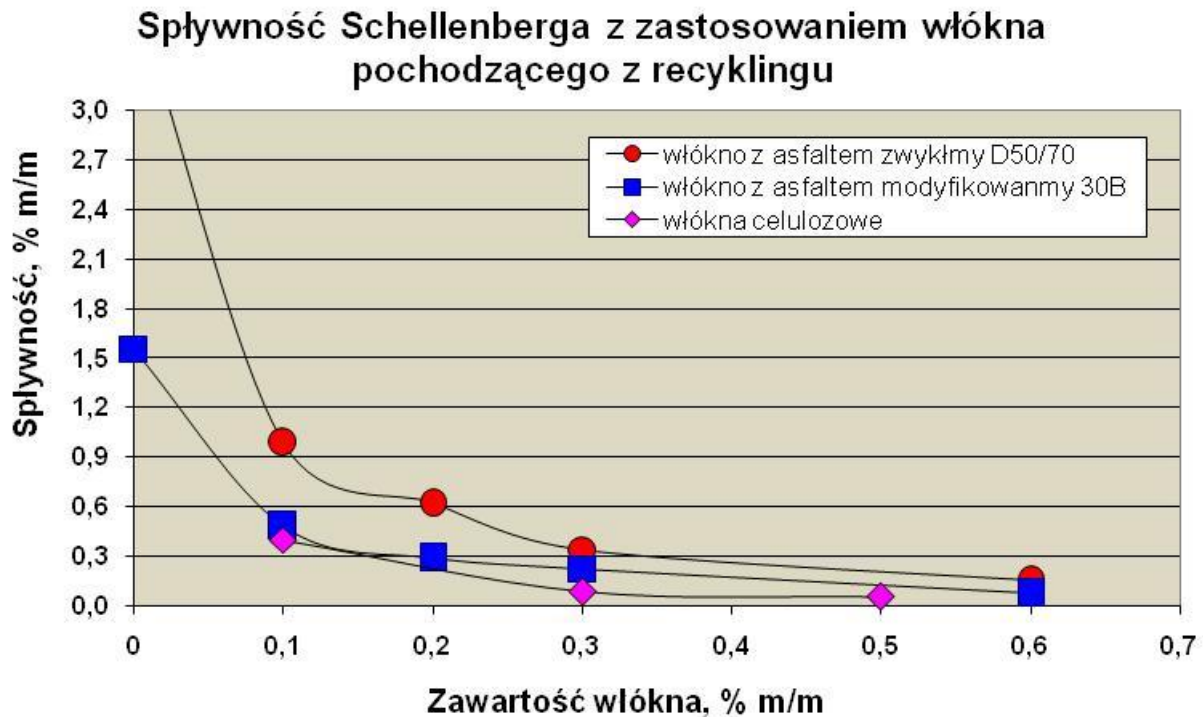
Włókna wiskozowe, oznaczane na oponach jako Rayon, są właściwie włóknami celulozowymi, ale o zdecydowanie zmienionych i poprawionych właściwościach.

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 [3]. Oznaczono spływność mastyksu w mieszance SMA metodą Schellenberga. Do badań

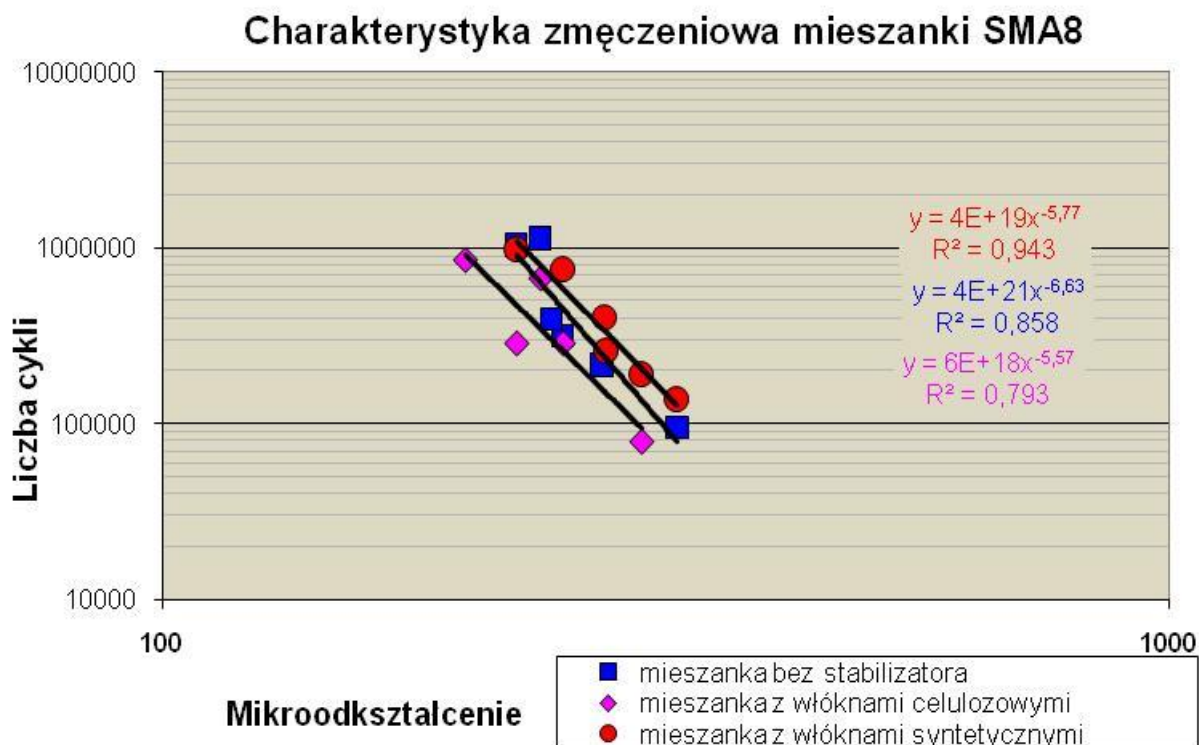
przygotowano próbki z mieszanek SMA8 zarówno z dodatkiem włókien syntetycznych, jak również włókien celulozowych, z asfaltami zwykłym i modyfikowanym.

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki badań spływności lepizcza metodą Schellenberga.



Rysunek 2

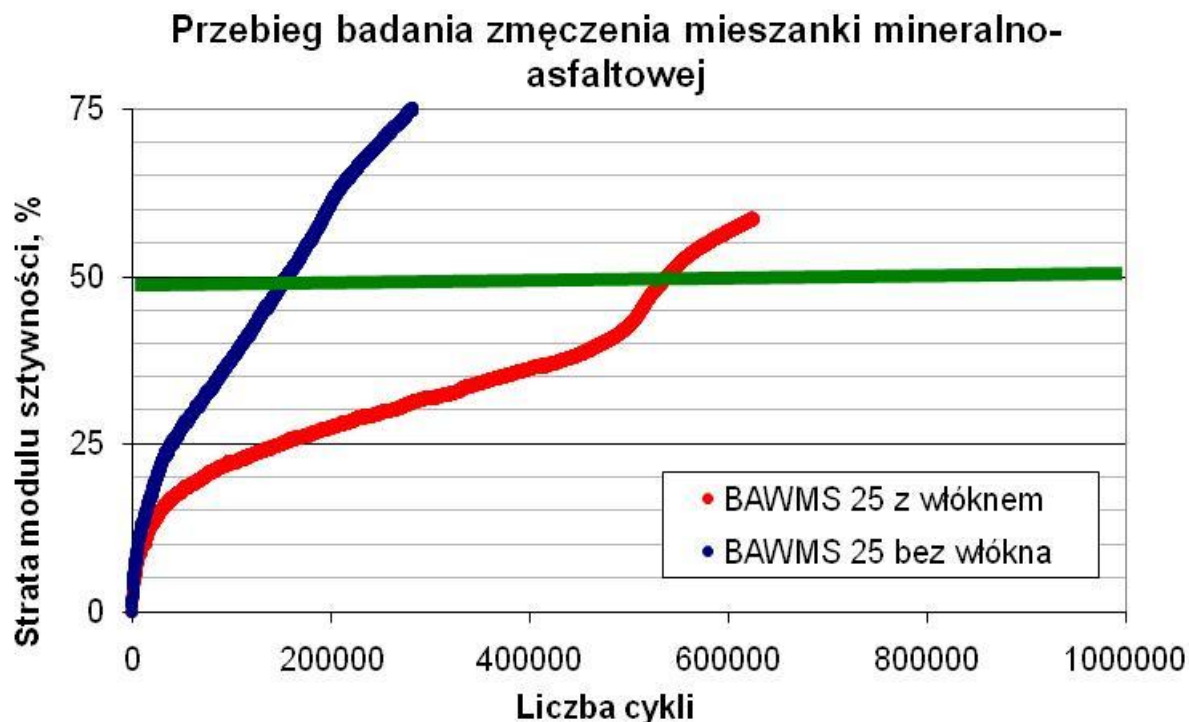
Na podstawie rysunku 2 można stwierdzić, że dzięki zastosowaniu włókien syntetycznych możliwe jest skuteczne ograniczenie spływności mastyksu w mieszankach typu SMA.



Rysunek 3

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

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.

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 Asphalt

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 zgrempowanych 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 lepszca (Zadanie 4)

6.1. Mieszanka BAWMS16 (Recepta)

Projekt mieszanki BAWMS16 do warstwy podbudowy nawierzchni drogowej o kategorii ruchu od KR3 do KR6 wykonano wg PN-S-96025:2000 [4].

A. Skład MM, MMA

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

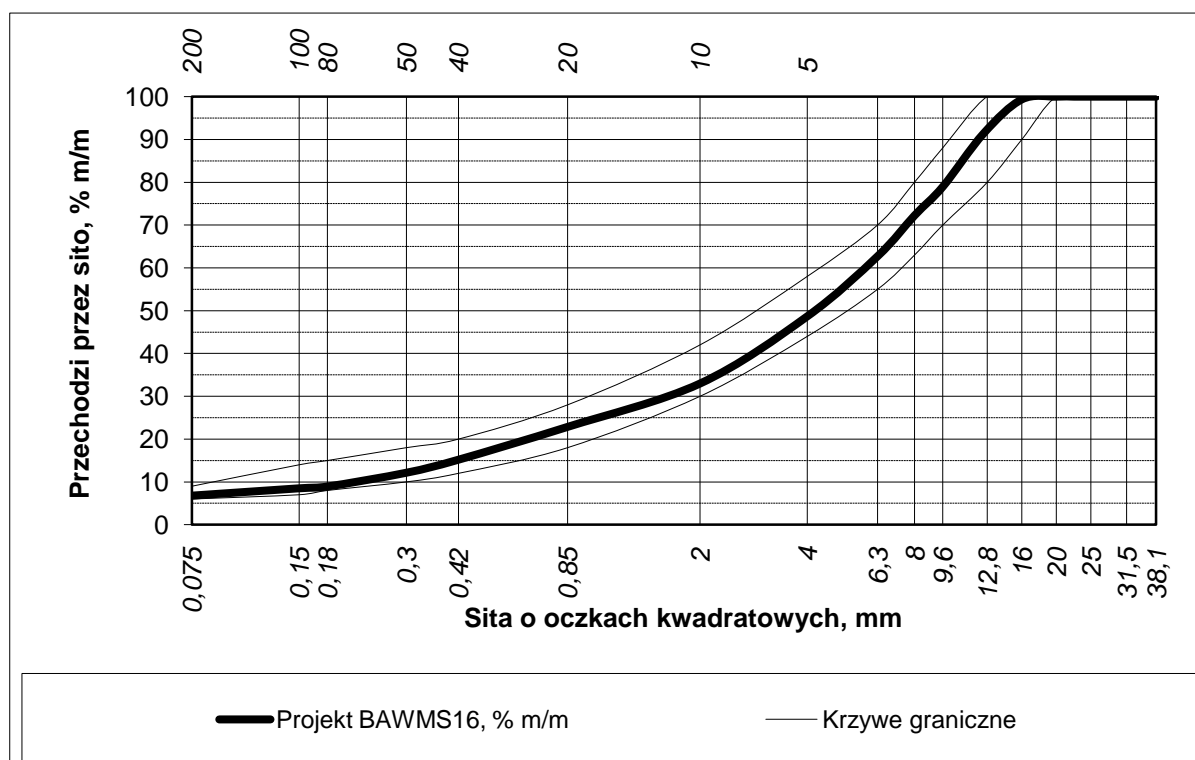
Lp.	Składniki	Mieszanka mineralna % m/m	Mieszanka mineralno-asfaltowa % m/m
1	Mączka wapienna	7,0	6,64
2	Piasek łamany granitowy 0/2 mm	28,0	26,54
3	Bazalt 2/5 mm	17,0	16,12
4	Bazalt 5/8 mm	17,0	16,12
5	Bazalt 8/11 mm	14,0	13,27
6	Bazalt 11/16 mm	17,0	16,12
7	Asfalt drogowy 20/30	-	5,18
8	WETFIX BE	-	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 5 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 mieszance 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 $60^\circ C$, kN	12,3	
7	Odkształcenie wg Marshalla w $60^\circ C$, mm	3,7	
8	Moduł sztywności pełzania pod obciążeniem statycznym w $40^\circ C$, MPa	40,7	$\geq 21,0$

6.2. Mieszanki BAWMS16 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

Skład Właściwości	Rodzaj mieszanki		BAWMS16 z dodatkiem WŁÓKNA				Wymagania wg Zeszytu 70
	BAWMS16	BAWMS16 porównawcza					
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	od 1 do 4
Wypełnienie asfaltem wolnej przestrzeni, % v/v	80,5	84,2	81,9	75,5	79,7	80,5	od 74 do 90
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	> 21,0
		MMA porównawcza do dalszych badań			MMA z włóknem do dalszych badań		

7. Metodyka badania

7.1. Koleinowanie

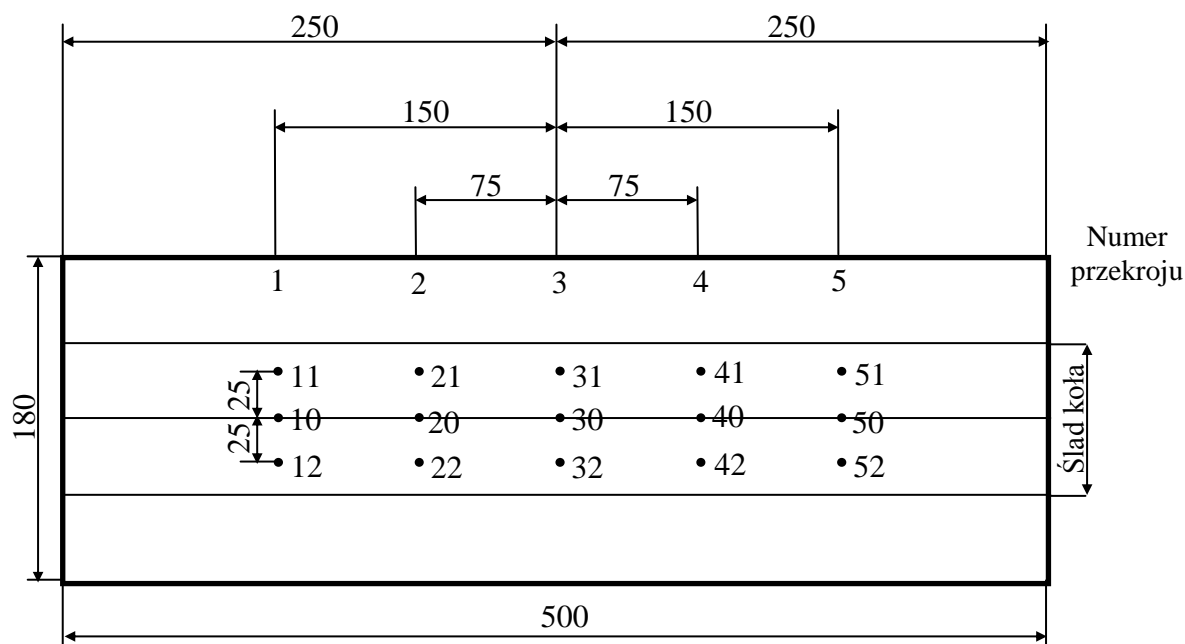
Określanie odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na deformacje trwałe przy pomocy aparatu LCPC (zwanego w normie PN-EN 12697-22 [5] aparatem dużym) polega na poddaniu zagęszczonej próbki z mieszanki mineralno-asfaltowej wielokrotnym przejazdom znormalizowanego koła ogumionego, w znormalizowanych warunkach temperatury, nacisku i liczby przejazdów koła po próbce. Po zakończeniu badania 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. Próbki poddaje się 1000 cyklom wstępnego obciążenia ruchomego, w temperaturze zawartej pomiędzy 15 a 25 °C. Po wstępnej fazie dostosowania, wykonuje się pomiar zerowy $m_i O_j$ ($j = 1 \div 15$) zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 6. 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 6.

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



Rysunek 6 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,

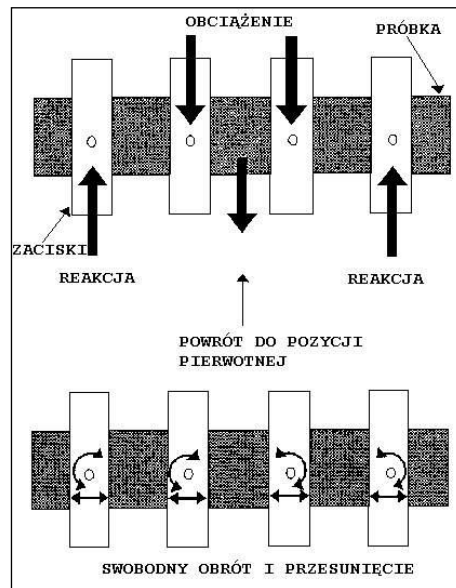
m_{ij0} – odczyty zerowe w śladzie koła w poszczególnych punktach, mm.

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. Odporność na zmęczenie

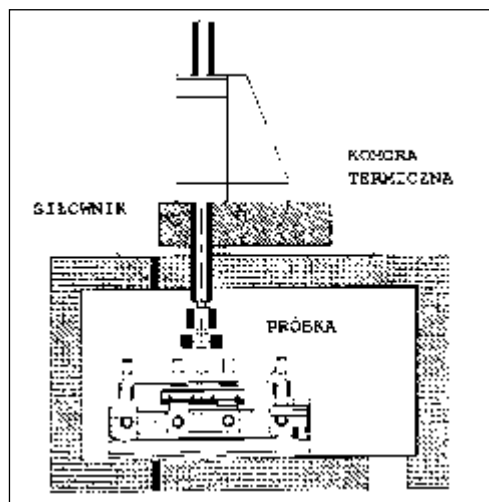
Badania zmęczeniowe przeprowadzono metodą belki 4-punktowo zginanej (4PB) wg normy PN-EN 12697-24. Badanie prowadzone jest pod obciążeniem cyklicznym na próbkach belkowych prostopadłościennych umocowanych w specjalnym aparacie za pomocą czterech uchwytów. Belki poddawane są cyklicznemu zginaniu pod obciążeniem sinusoidalnym w warunkach swobodnego obrotu i przesunięcia w miejscach podparcia i obciążenia belki (rys. 7). Obciążenie jest przykładane do dwóch środkowych uchwytów w kierunku prostopadłym do podstawy belki. Podczas badania

rejestrwana jest siła obciążająca, ugięcie belki oraz kąt przesunięcia fazowego w funkcji liczby cykli obciążenia.



Rysunek 7 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 termostatowane w aparacie zmęczeniowym umieszczonym w komorze termicznej (rys.8).



Rysunek 8 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 [6].

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 [7]. Podczas badania zmęczenia można zaobserwować nagłą zmianę w wykresie energii rozproszonej [8], co wskazuje na rozpoczęcie końcowej fazy badania, czyli gwałtownej degradacji próbki [9]. Według definicji trwałości zmęczeniowej oznaczanej N1, jest to liczba cykli, po której następuje odchylenie wykresu współczynnika energii rozproszonej od linii prostej [9]. W pracy wykorzystano metodę wyznaczania N1 opracowaną Rowe'a [10].

7.3. 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:

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

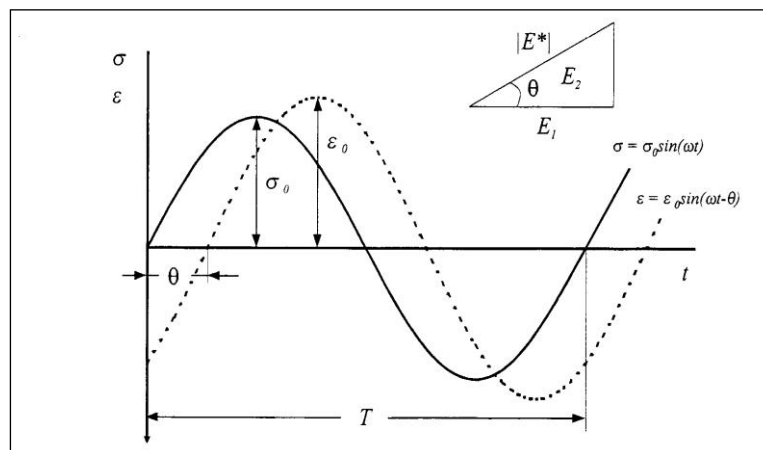
w którym:

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.9). Jako kryterium oceny lepkosprężystych właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych przyjmuje się wartość tangensa kąta przesunięcia fazowego [11]:

- w materiałach lepkich $\varphi = 90^\circ$, $\text{tg } \varphi = \infty$,
- w materiałach sprężystych $\varphi = 0^\circ$, $\text{tg } \varphi = 0$,
- w materiałach lepkosprężystych $0^\circ < \varphi < 90^\circ$, $0 < \text{tg } \varphi < \infty$.



Rysunek 9 Ilustracja kąta przesunięcia fazowego

Materiały bitumiczne są materiałami, których właściwości reologiczne zależą od czasu obciążenia (badanie statyczne) lub częstotliwości obciążenia (badanie dynamiczne) oraz temperatury [12,13]. Czas (częstotliwość) obciążenia i temperatura są wielkościami wymiennymi. Oznacza to, 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

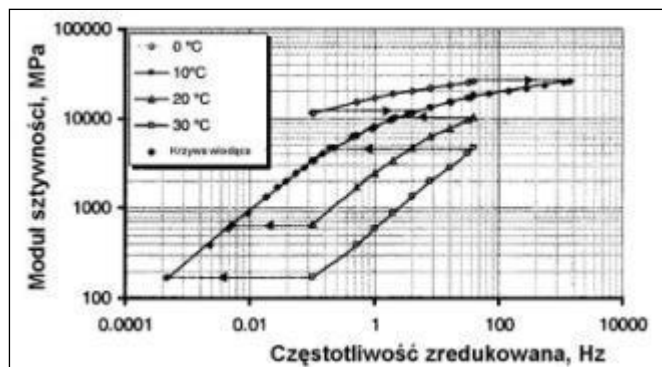
w którym:

$E(T,t)$ – 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 10). Znane są różne metody graficzne i analityczne umożliwiające przeprowadzenie takiej transpozycji [14,15].



Rysunek 10 Przykład opracowania krzywej wiodącej

7.4. 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 (%),

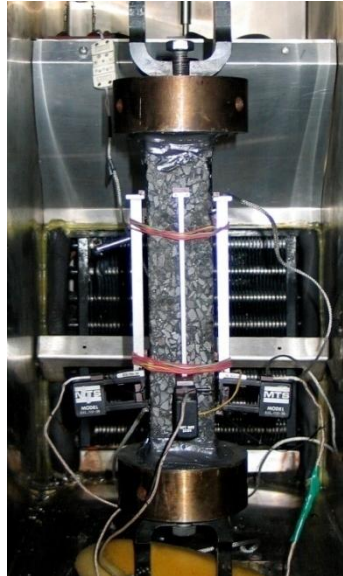
ITS_w średnia wytrzymałość wyznaczona dla grupy próbek mokrych, w (kPa),

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

7.5. Odporność na pękanie niskotemperaturowe

Badania odporności na pękanie niskotemperaturowe przeprowadzono metodą TSRST, którego koncepcja została opracowana przez Monismitha i in. [16], później zastosowana przez Fabba [17] i udoskonalona przez Aranda [18], który przeprowadził obszerne badania wpływu składu mieszanki mineralno-asfaltowej na jej odporność niskotemperaturową [19]. We współpracy z Arandem dokonano też po raz pierwszy oceny właściwości niskotemperaturowych asfaltów drogowych stosowany w Polsce [20]. Metodyka ta została zaakceptowana w programie badawczym SHARP w USA.

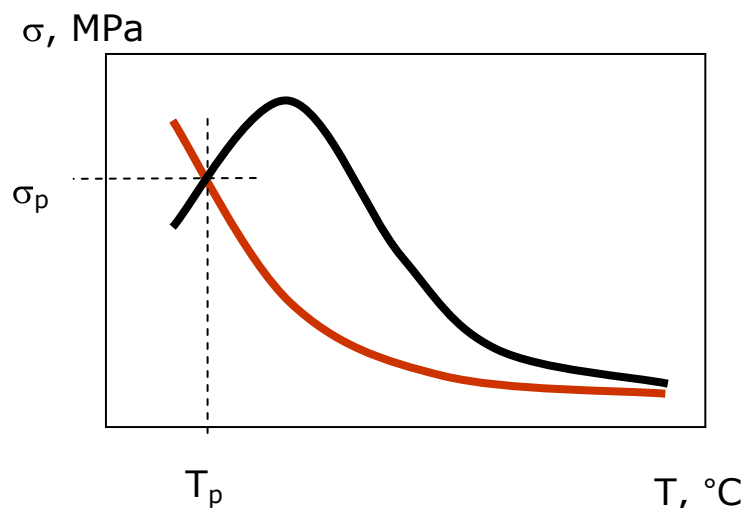
Badania przeprowadzane są zgodnie z normą AASHTO TP10-93 [21] na stanowisku pomiarowym MTS. Próbki do badań mają kształt prostopadłościenny o wymiarach 50 x 50 x 250 mm. Do górnej i dolnej podstawy próbki przykleja się stalowe krążki, które umożliwiają zamocowanie w ramie wytrzymałościowej (rys. 11). 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 11 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. 12).

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 12 - 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

7.6. 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

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

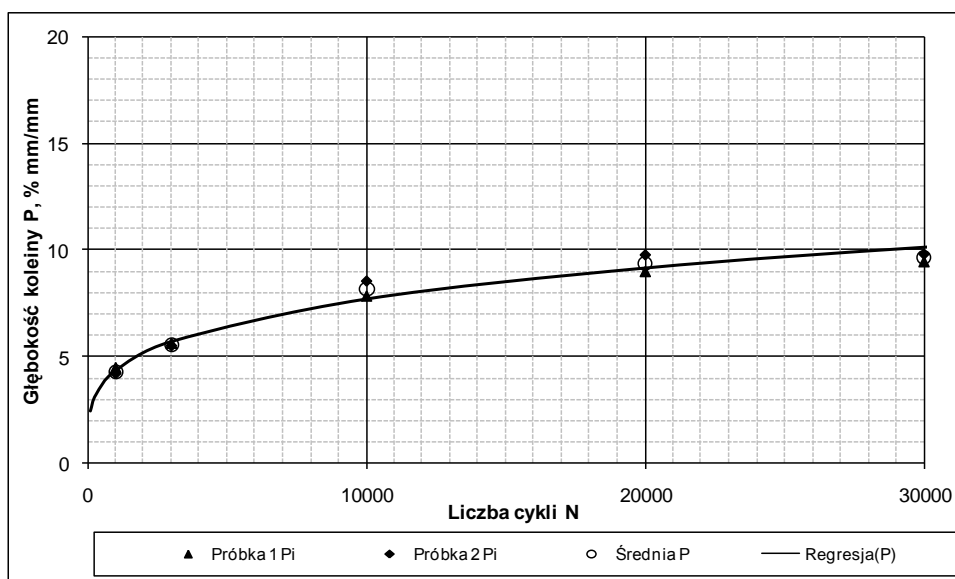
8. Wyniki badań

8.1. Koleinowanie (Zadanie 5.1)

W tablicach 8 - 9 oraz na rysunkach 13 - 14 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)

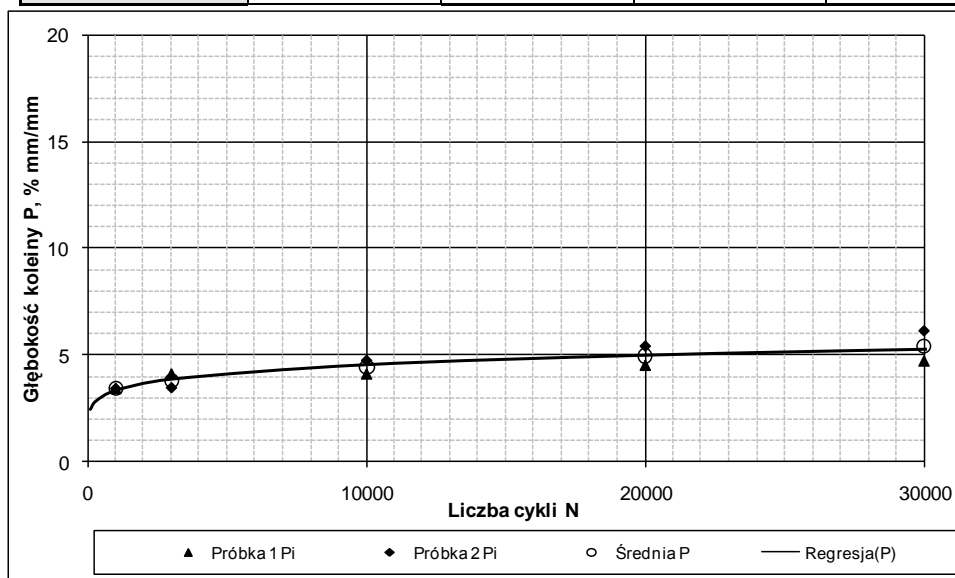
Liczba cykli	1 000	3 000	10 000	20 000	30 000
Próbka 1, Pi	4,5 %	5,6 %	7,8 %	9,0 %	9,4 %
Próbka 2, Pi	4,2 %	5,5 %	8,5 %	9,8 %	9,8 %
Średnia, P	4,3 %	5,5 %	8,2 %	9,4 %	9,6 %



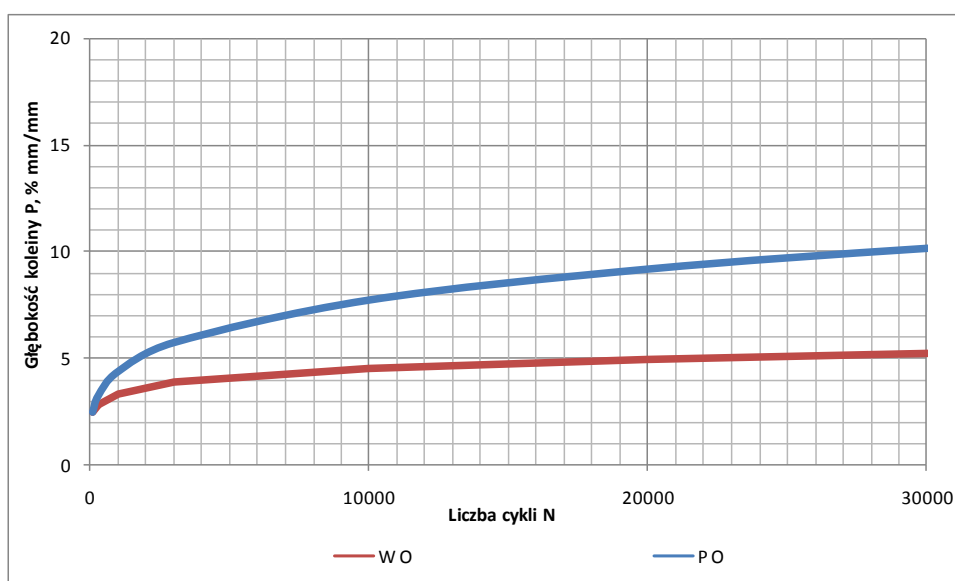
Rysunek 13 Przebieg badania koleinowania w dużym aparacie mieszanki porównawczej (P O)

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

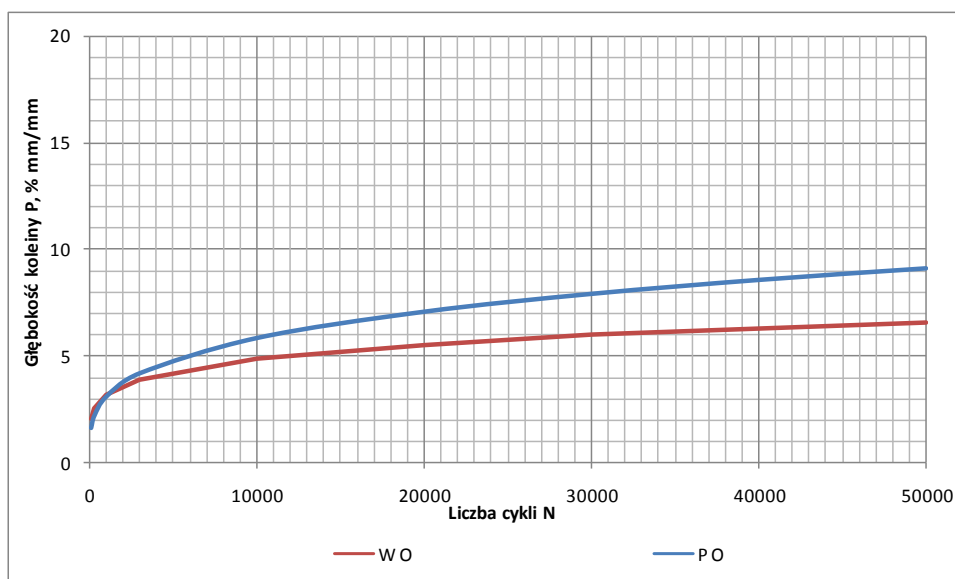


Rysunek 15 Porównanie przebiegu koleinowania w dużym aparacie mieszanki z włóknem oraz mieszanki porównawczej

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 punkt D.1.6.. Wyniki przedstawiono w tablicy 10 i na rysunku 16. 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 16 Porównanie przebiegu 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 17 - 23.

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)

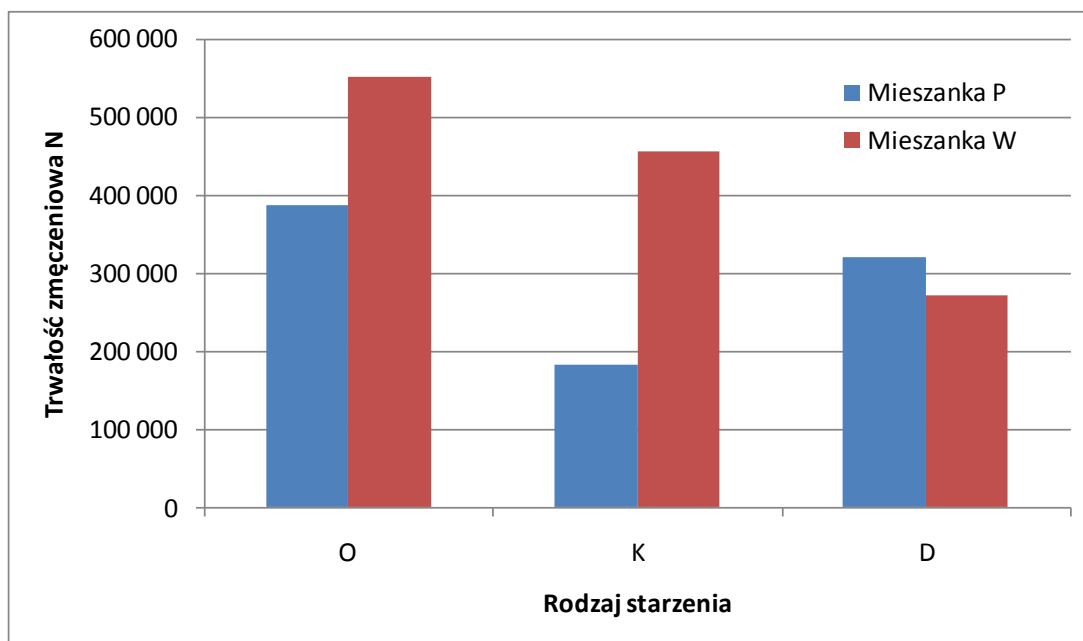
Próbka	B, mm	H, mm	E ₀ , MPa	ε, μm/m	N	N1
P D 1	63,7	63,6	18 466	187,3	205 399	175 799
P D 2	63,5	63,6	18 144	186,4	257 599	227 899
P D 3	63,5	63,5	19 392	184,8	242 699	222 799
P D 4	63,6	63,5	18 193	186,0	402 298	360 298
P D 6	63,2	63,1	16 757	186,7	378 582	342 981
P D 8	63,0	63,1	12 229	185,0	426 896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

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

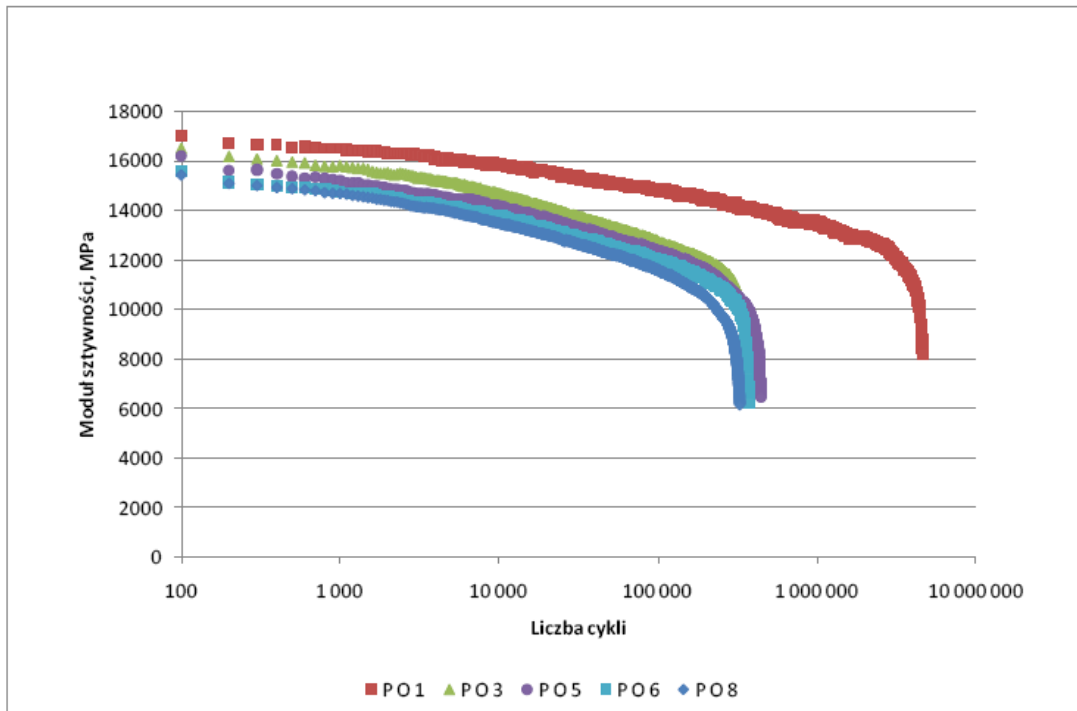
Próbka	B, mm	H, mm	E ₀ , MPa	ε, μm/m	N	N1
W D 1	63,4	50,2	19 338	186,6	341 899	297 899
W D 2	63,5	50,3	19 537	186,3	227 499	192 999
W D 3	63,3	50,4	19 513	186,1	306 798	272 798
W D 4	63,4	50,5	18 964	184,6	238 798	211 298
W D 5	63,0	50,3	18 639	185,2	199 599	172 099
W D 6	63,2	50,1	18 784	186,7	212 899	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:

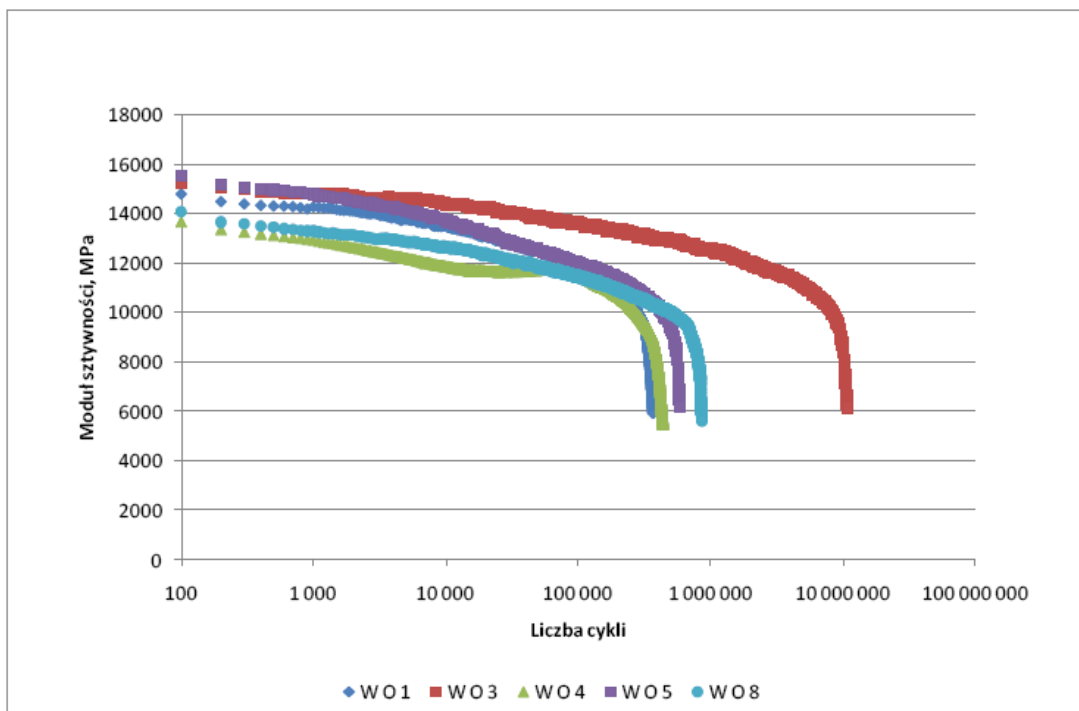
B – szerokość, H – wysokość, E₀ – początkowy moduł sztywności, ε – odkształcenie, N – trwałość zmęczeniowa, N1 – trwałość zmęczeniowa metodą energetyczną



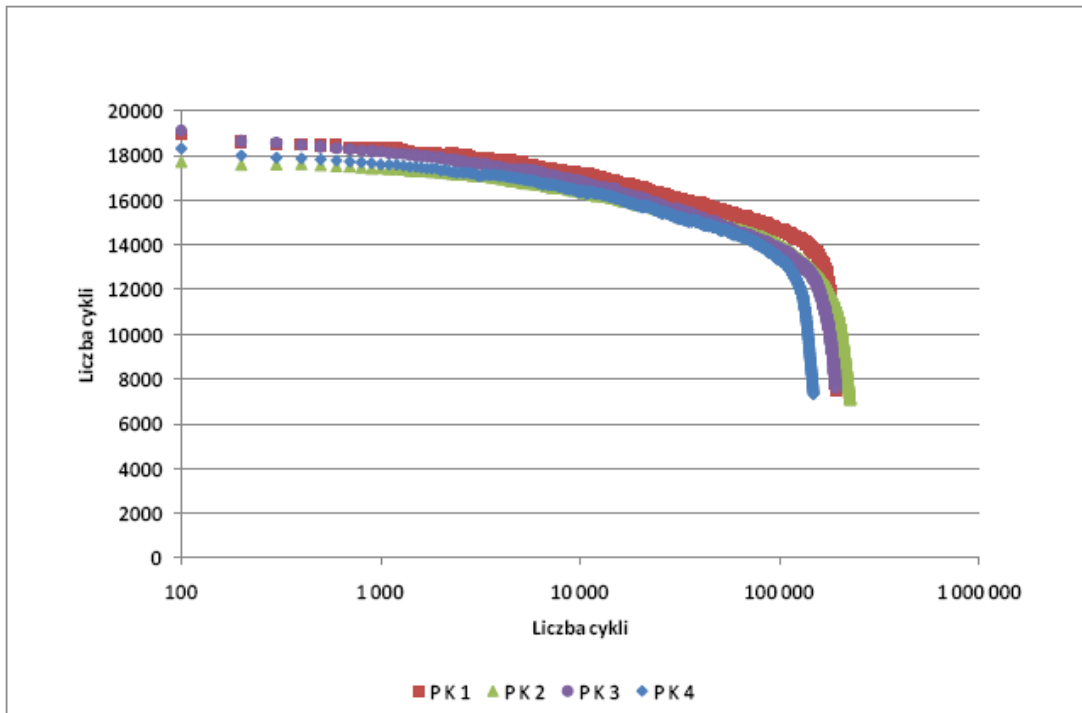
Rysunek 17 Porównanie trwałości zmęczeniowej mieszanki porównawczej oraz mieszanki z włóknem



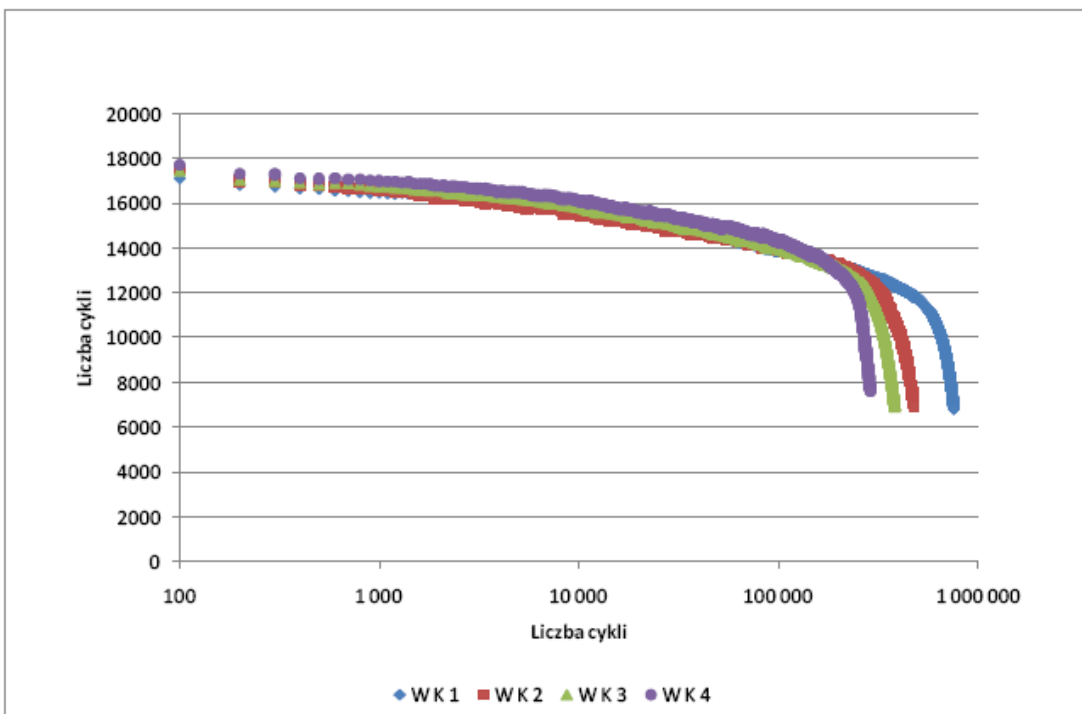
Rysunek 18 Przebieg badania zmęczenia mieszanki porównawczej bez starzenia (P O)



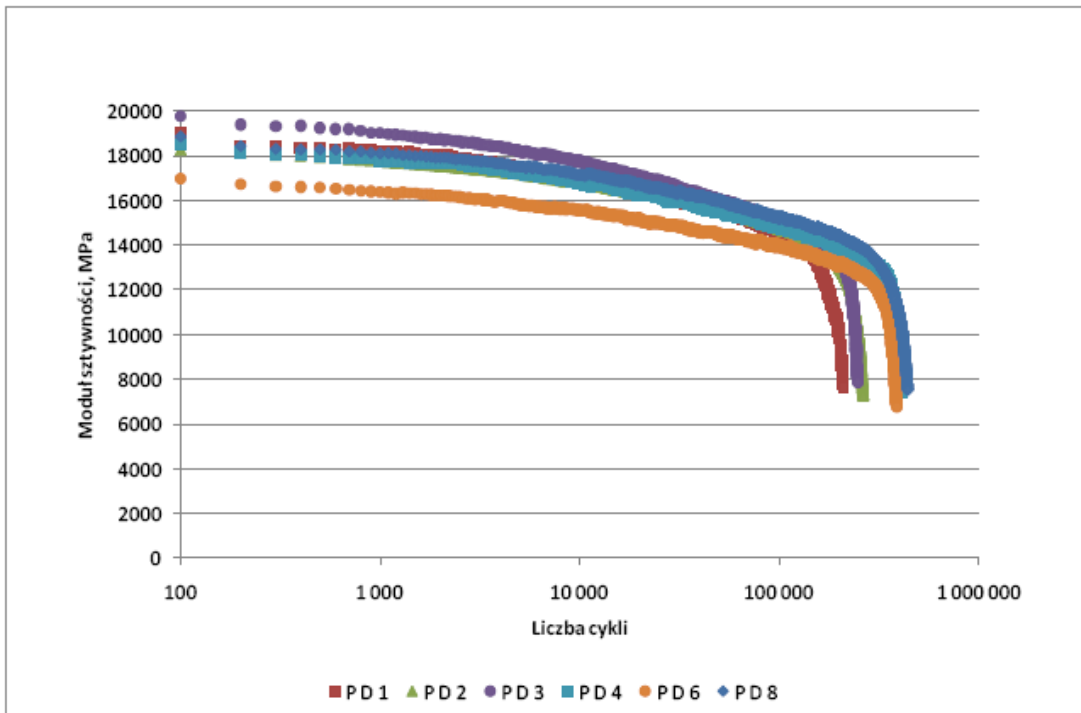
Rysunek 19 Przebieg badania zmęczenia mieszanki z włóknem bez starzenia (W O)



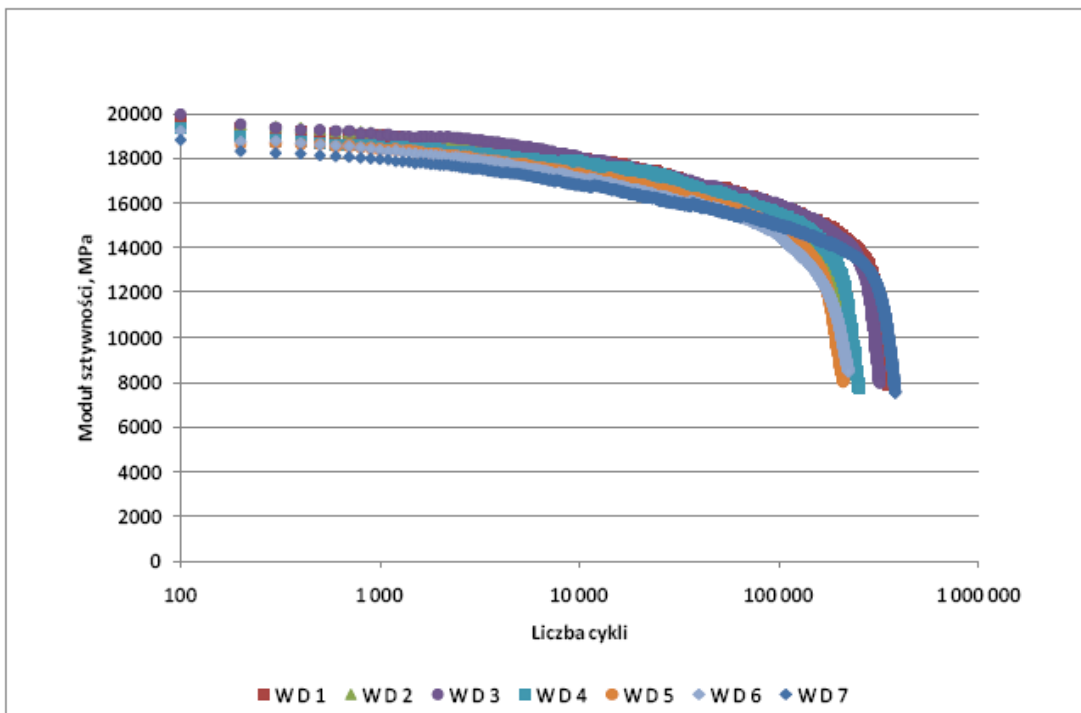
Rysunek 20 Przebieg badania zmęczenia mieszanki porównawczej po starzeniu krótkoterminowym (P K)



Rysunek 21 Przebieg badania zmęczenia mieszanki z włóknem po starzeniu krótkoterminowym (W K)



Rysunek 22 Przebieg badania zmęczenia mieszanki porównawczej po starzeniu długoterminowym (P D)



Rysunek 23 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 mieszance porównawczej i mieszance z włóknem. Wyniki badań przedstawiono w tablicach 17 - 22 i na rysunkach 24 - 25.

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

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

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

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

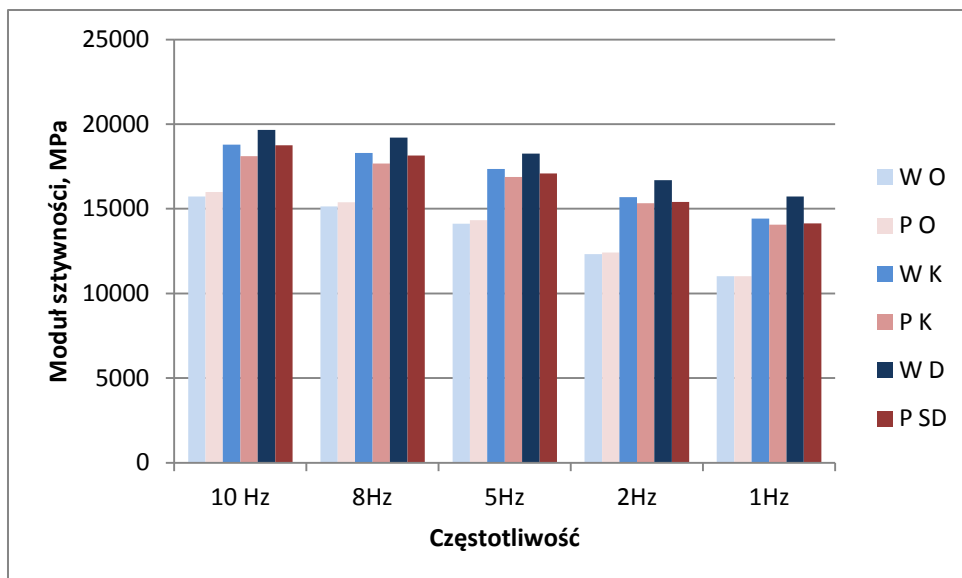
Próbka	Moduł sztywności, MPa					Kąt przesunięcia fazowego, °				
	10 Hz	8Hz	5Hz	2Hz	1Hz	10 Hz	8Hz	5Hz	2Hz	1Hz
W K 1	19662	19060	17926	16089	14910	8,9	9,1	9,5	10,3	11,1
W K 2	17772	17359	16592	15115	13808	8,7	9,1	9,6	10,4	11,1
W K 3	19439	19096	18084	16297	14963	8,6	8,8	9,2	10,0	10,8
W K 4	18266	17703	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

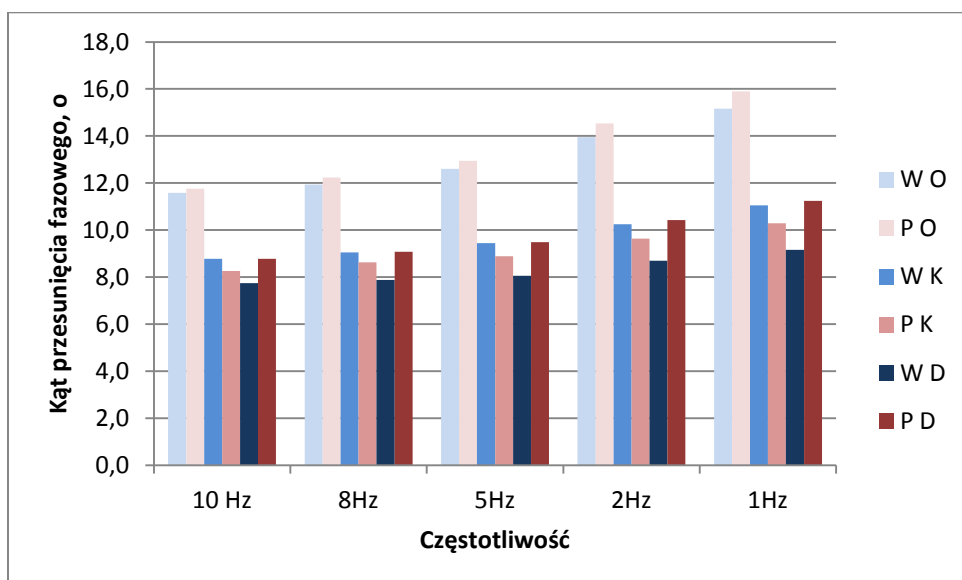
Próbka	Moduł sztywności, MPa					Kąt przesunięcia fazowego, °				
	10 Hz	8Hz	5Hz	2Hz	1Hz	10 Hz	8Hz	5Hz	2Hz	1Hz
P D 1	17223	16465	15555	13992	12628	9,0	9,7	10,1	11,3	12,1
P D 2	19991	19472	18302	16479	15001	9,0	9,3	9,7	10,6	11,3
P D 3	19439	18947	17679	15876	14651	9,4	9,5	9,7	10,7	11,6
P D 4	19233	18719	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

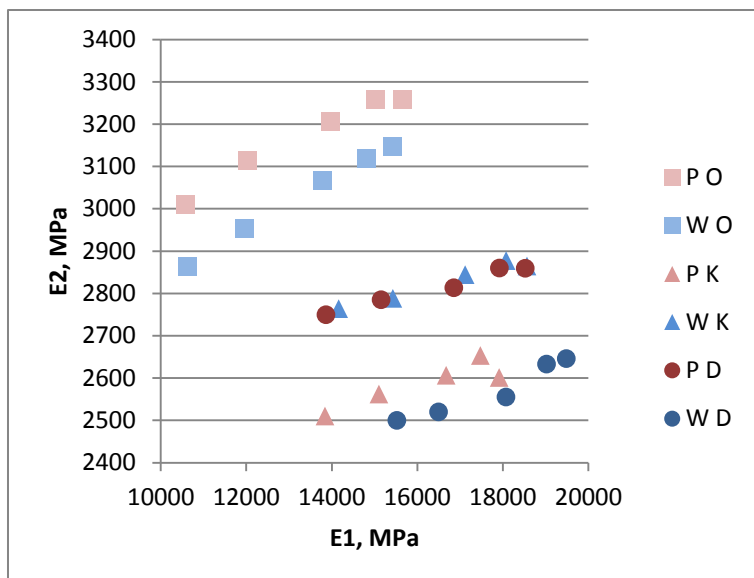
Próbka	Moduł sztywności, MPa					Kąt przesunięcia fazowego, °				
	10 Hz	8Hz	5Hz	2Hz	1Hz	10 Hz	8Hz	5Hz	2Hz	1Hz
W D 1	19719	19347	18237	16804	15400	6,9	7,1	7,3	8,0	8,4
W D 2	19760	19240	18412	16784	15655	7,8	7,9	8,2	8,8	9,2
W D 3	19669	19080	18125	16724	16724	8,2	8,4	8,4	9,2	9,2
W D 4	19408	19239	18165	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



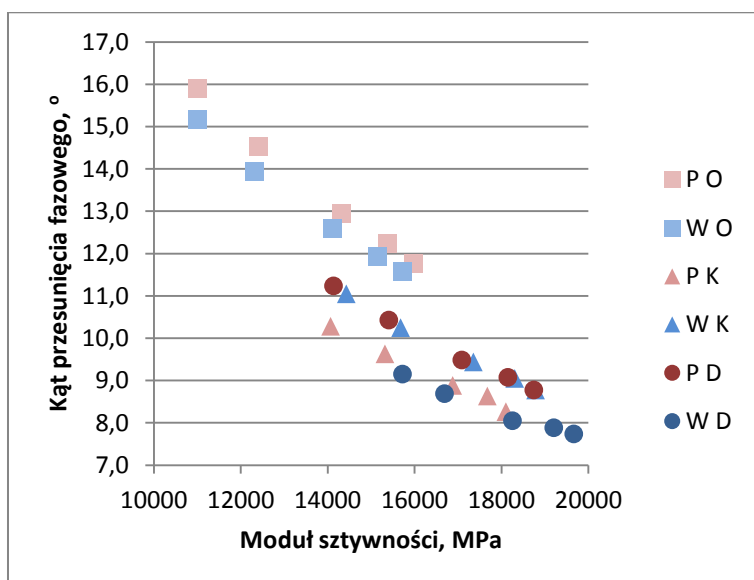
Rysunek 24 Porównanie modułu sztywności mieszanki porównawczej oraz mieszanki z włóknem w różnych częstotliwościach



Rysunek 25 Porównanie kąta przesunięcia fazowego mieszanki porównawczej oraz mieszanki z włóknem w różnych częstotliwościach



Rysunek 26 Wykres Cole-Cole mieszanki porównawczej oraz mieszanki z włóknem



Rysunek 27 Wykres Blacka mieszanki porównawczej oraz mieszanki z włóknem

Tablica 23 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 24 Obniżenie części lepkiej modułu zespolonego na skutek starzenia

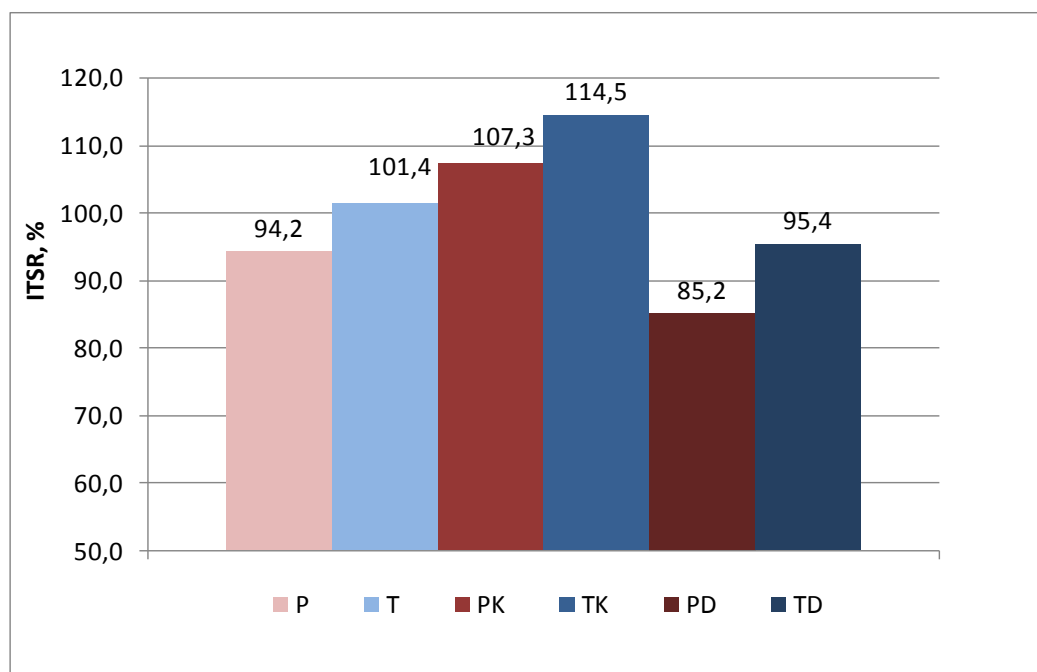
Mieszanka	Częstotliwość				
	10 Hz	8Hz	5Hz	2Hz	1Hz
W K	10%	18%	18%	15%	14%
P K	25%	23%	23%	21%	20%
W D	19%	18%	20%	17%	15%
P D	23%	21%	20%	16%	13%

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 25 i na rysunku 28.

Tablica 25 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



Rysunek 28 Wyniki badań wodoodporności

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 26 - 28 i na rysunkach 29 - 36.

Tablica 26 Wyniki badań TSRST mieszanki porównawczej i mieszanki z włóknem w stanie oryginalnym

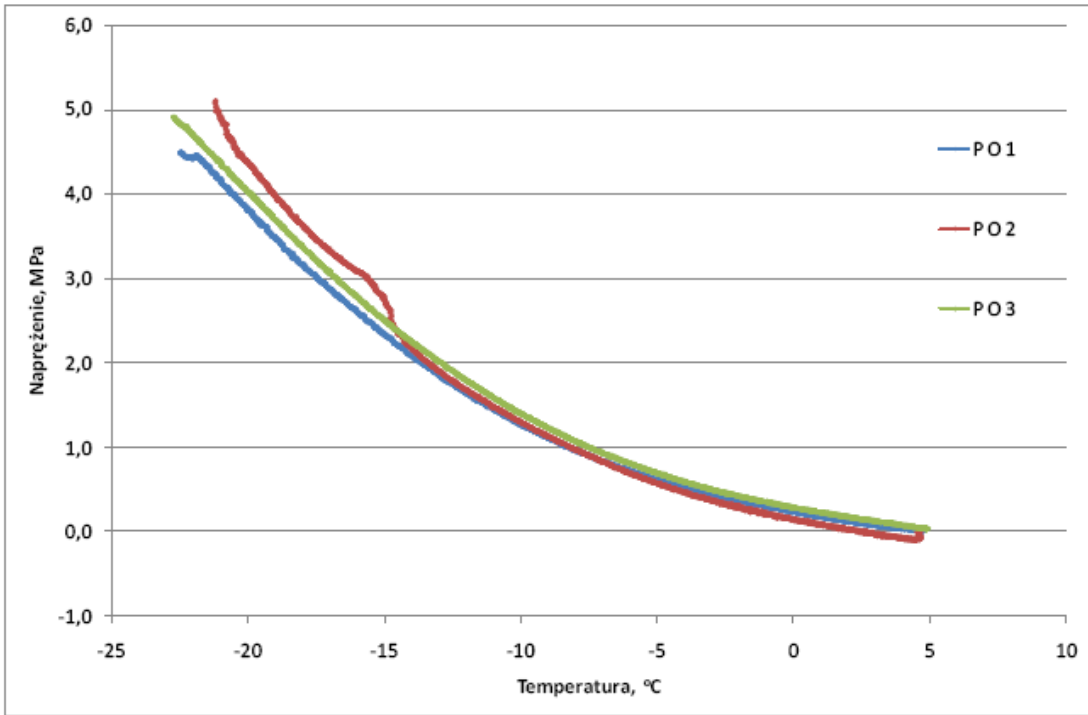
Próbka	Temperatura pęknięcia, °C	Napężenie przy pęknięciu, MPa	Próbka	Temperatura pęknięcia, °C	Napężenie przy pęknięciu, MPa
P O 1	-22,5	4,5	W O 1	-17,6	3,7
P O 2	-22,7	4,9	W O 2	-22,7	4,6
P O 3	-21,2	5,1	W O 3	-19,4	4,1
średnia	-22,1	4,8	średnia	-19,9	4,2

Tablica 27 Wyniki badań TSRST mieszanki porównawczej i mieszanki z włóknem po starzeniu krótkoterminowym

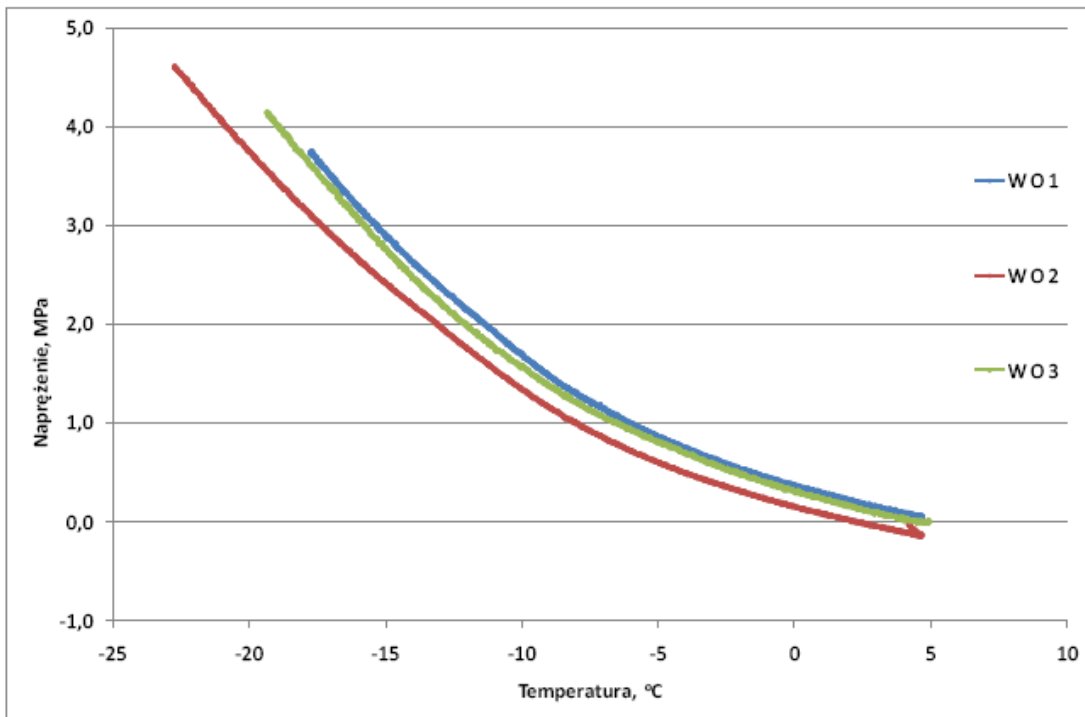
Próbka	Temperatura pęknięcia, °C	Napężenie przy pęknięciu, MPa	Próbka	Temperatura pęknięcia, °C	Napężenie przy pęknięciu, MPa
P K 1	-19,8	4,9	W K 1	-18,1	4,2
P K 2	-20,0	5,0	W K 2	-20,0	4,7
P K 3	-18,9	5,1	W K 3	-19,9	5,0
P K 4	-18,3	4,3	W K 4	-18,5	4,4
średnia	-19,3	4,8	średnia	-19,1	4,6

Tablica 28 Wyniki badań TSRST mieszanki porównawczej i mieszanki z włóknem po starzeniu długoterminowym

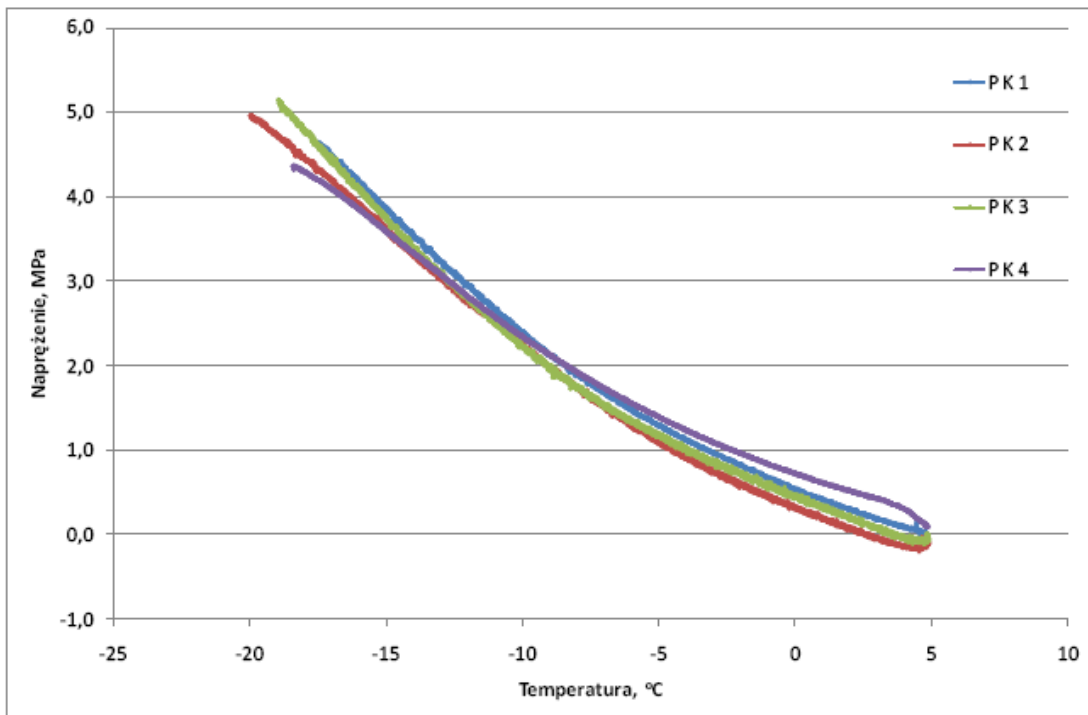
Próbka	Temperatura pęknięcia, °C	Napężenie przy pęknięciu, MPa	Próbka	Temperatura pęknięcia, °C	Napężenie przy pęknięciu, MPa
P D 1	-19,8	5,2	W D 1	-17,1	4,6
P D 2	-20,1	4,9	W D 2	-18,4	4,8
P D 3	-18,7	5,3	W D 3	-16,9	4,4
P D 4	-18,8	5,0	W D 4	-18,5	4,5
średnia	-19,4	5,1	średnia	-17,7	4,6



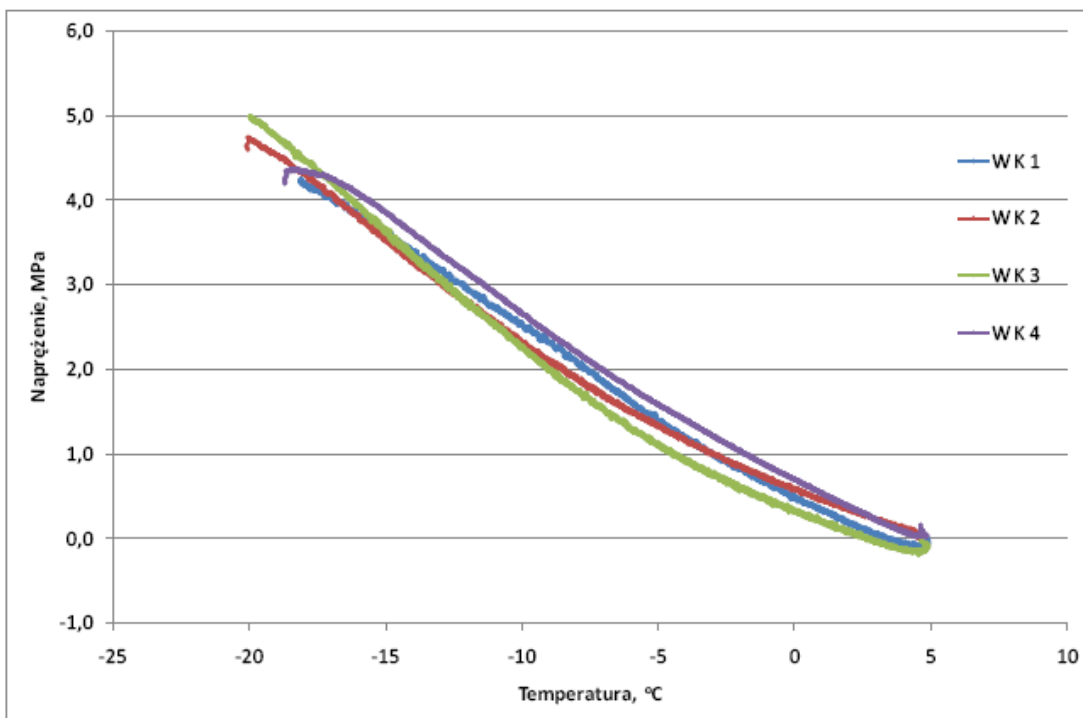
Rysunek 29 Przebieg badania TSRST mieszanki porównawczej w stanie oryginalnym (P O)



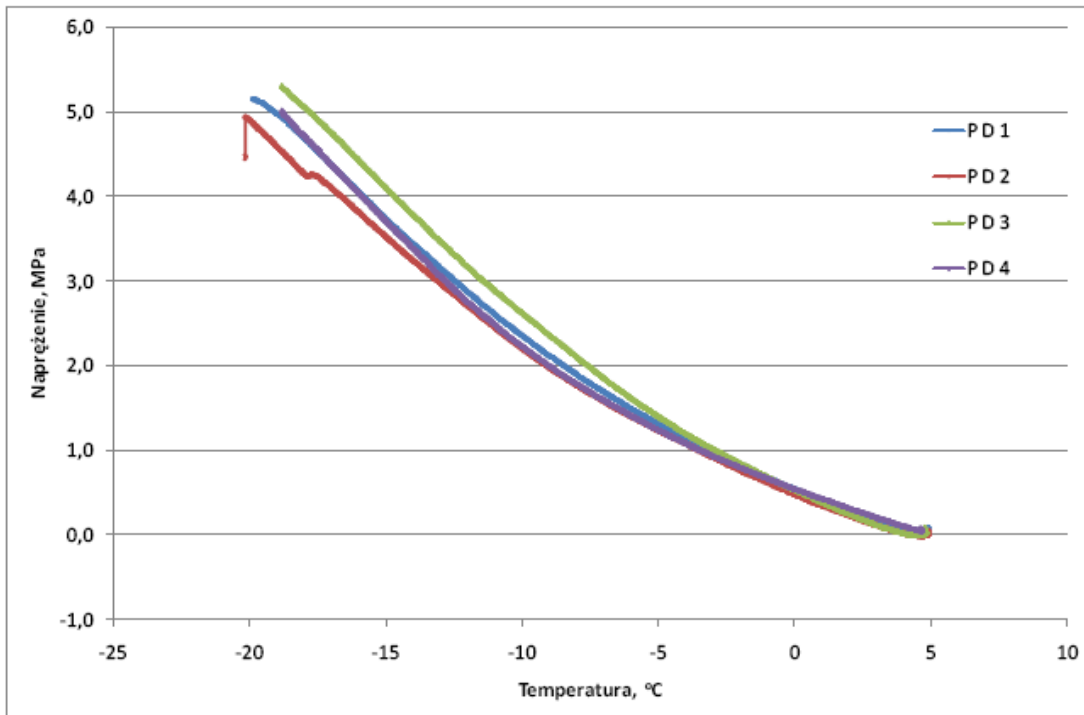
Rysunek 30 Przebieg badania TSRST mieszanki z włóknem w stanie oryginalnym (W O)



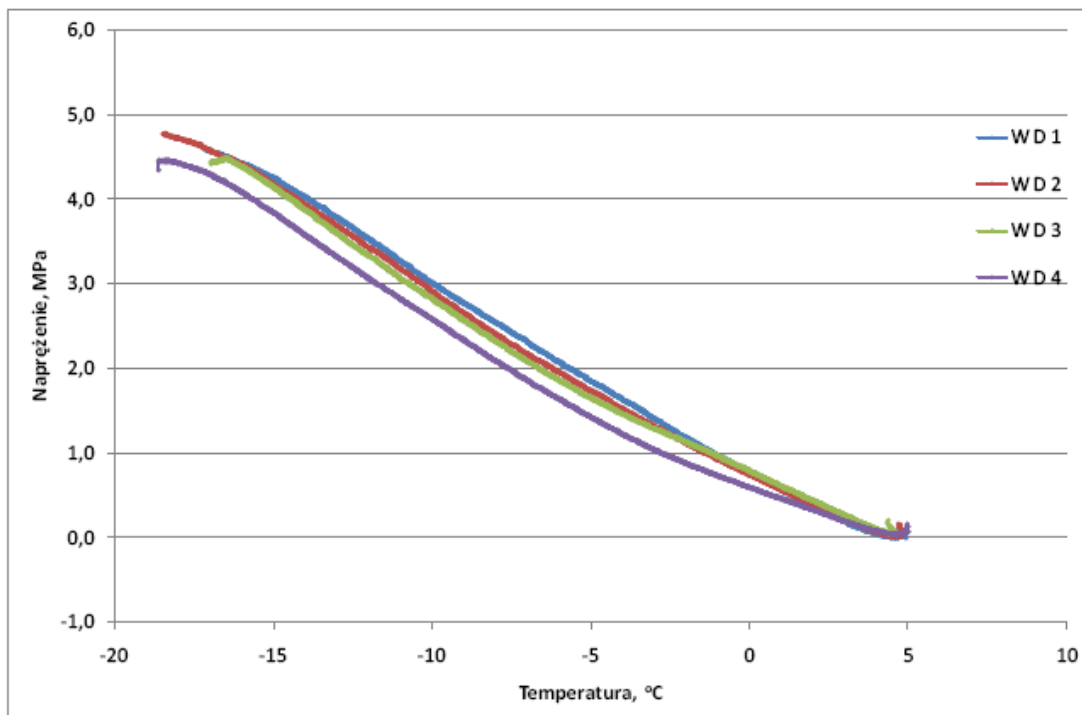
Rysunek 31 Przebieg badania TSRST mieszanki porównawczej po starzeniu krótkoterminowym (P K)



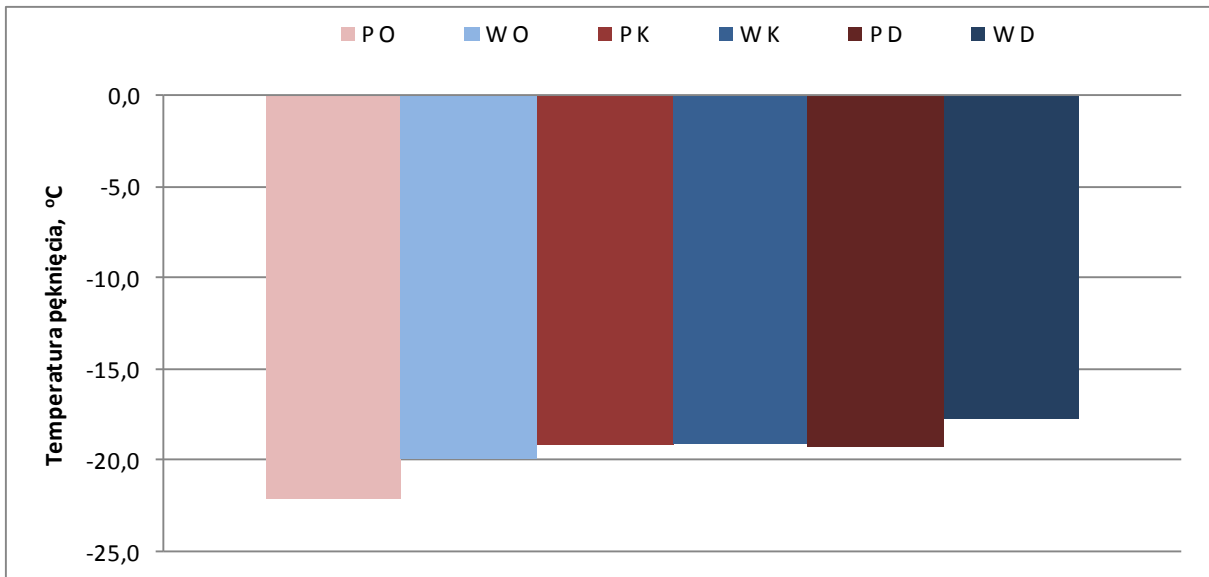
Rysunek 32 Przebieg badania TSRST mieszanki z włóknem po starzeniu krótkoterminowym (W K)



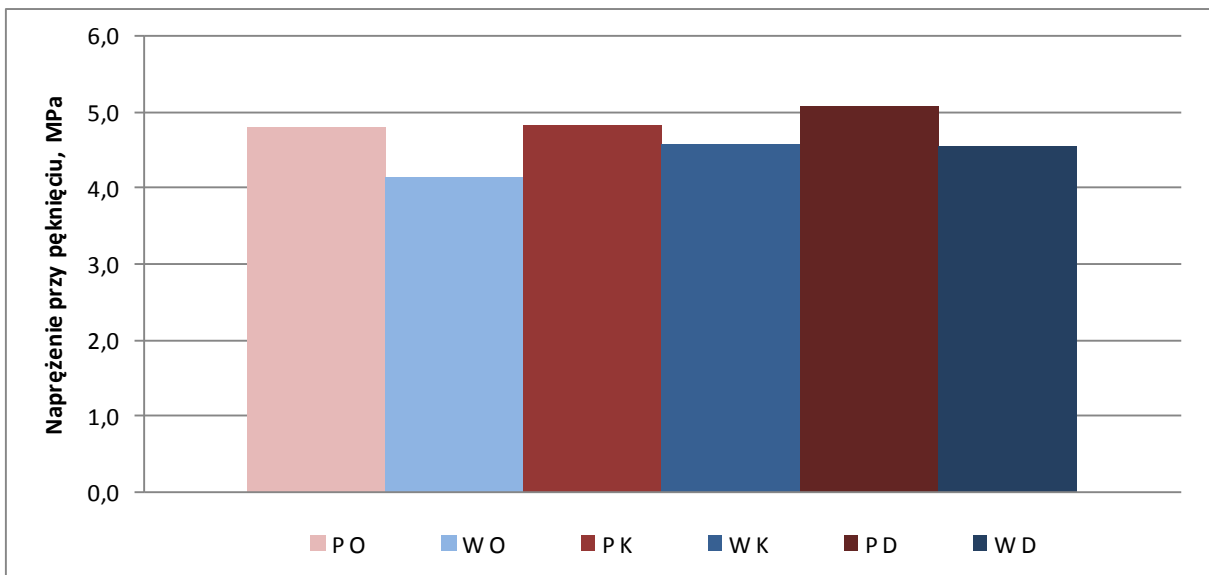
Rysunek 33 Przebieg badania TSRST mieszanki porównawczej po starzeniu długoterminowym (P D)



Rysunek 34 Przebieg badania TSRST mieszanki z włóknem po starzeniu długoterminowym (W D)



Rysunek 35 Porównanie temperatury pęknięcia mieszanki porównawczej i mieszanki z włóknem



Rysunek 36 Porównanie napężenia przy pęknięciu mieszanki porównawczej i mieszanki z włóknem

9. Kontynuacja pracy w dalszych etapach

W Etapie II wg programu pracy kontynuowane będą badania laboratoryjne mieszanek mineralno-asfaltowych, a w szczególności badania modułów sztywności różnymi metodami i w różnych warunkach celem wyznaczenia krzywych wiodących, poszerzone badania zmęczeniowe celem wyznaczenia charakterystyk zmęczeniowych. Przeprowadzona zostanie wstępna analiza wyników, której celem będzie określenie badań które powinny zostać powtórzone lub poszerzone. Następnie realizowane będą zadania 6, 7 i 8 zgodnie z programem pracy.

10. Literatura

- 1 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
- 2 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
- 3 Sybilski D., Horodecka R., Wróbel A., Bańkowski W.: „Nowe włókno TOFIC® do poprawy właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych” – Polskie Drogi 10/2007
- 4 PN-S-96025:2000 Drogi samochodowe i lotniskowe – Nawierzchnie asfaltowe – Wymagania
- 5 PN-EN 12697-22 - Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco -- Część 22: Koleinowanie
- 6 Sybilski D., W.Bańkowski: „Wyznaczanie temperatury równoważnej ze względu na zmęczenie”, Drogownictwo 6/2004;
- 7 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;
- 8 Hopman P., Kunst p., Pronk A.C.: „A renewed interpretation method for fatigue measurement verification of Miner” rule”, Eurobitume 1989;
- 9 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;
- 10 Rowe G.M., Bouldin M.G. „Improved techniques to evaluate the fatigue resistance of asphalt mixtures”, Eurobitume 2000;
- 11 Pellinen T.K.: „Investigation of the use of dynamic modulus as an indicator of hot-mix asphalt performance,,”, Arizona State University, 2001
- 12 Kalabińska M., Piłat J.: ”Reologia asfaltów i mas mineralno-asfaltowych” – WKŁ, Warszawa 1982
- 13 Sybilski D.: ”Wyznaczanie krzywej wiodącej mieszanki mineralno-asfaltowej”, IV Międzynarodowa Konferencja "Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe", Kielce 1998;

-
- 14 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;
 - 15 Williams M.L., Landel R.F., Ferry J.D.: Journal of Amer.Chem. Soc., 77, 1995;
 - 16 Monismith C.L., Secor G.A., Secor K.E.: Temperature Induced Stresses and Deformations in Asphalt Concrete. Proc. AAPT 34, 1965
 - 17 Fabb T.T.J.: The Influence of Mix Composition, Binder Properties and Cooling Rate on Asphalt Cracking at Low Temperature. Proc. AAPT. 43, 1974
 - 18 Arand W.: Verhalten von Asphalt bei tiefen Temperaturen. Die Asphaltstrasse 3, 1983.
 - 19 Arand W.: Einfluss der Zusammensetzung von Walzasphalt auf das Verhalten bei Kälte. Strasse und Autobahn 8, 1987
 - 20 Arand W., Sybilski D.: Wpływ zastosowania polskich asfaltów drogowych na właściwości betonu asfaltowego w niskiej temperaturze. Prace IBDM 3, 1992
 - 21 AASHTO TP10-93 :”Standard test method for thermal restrained specimen tensile strength”