

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

SPRAWOZDANIE

Temat TN-236 (etap II)

Zastosowanie asfaltu spienionego w technologii recyklingu nawierzchni na zimno

Kierownik Zakładu TN:

prof. dr hab. inż. Dariusz SYBILSKI

Zespół:

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

Technicy:

Teresa Gawenda
Jadwiga Migdalska
Tomasz Michalski

SPIS TREŚCI:

1	Podstawa pracy.....	3
2	Cel pracy	3
3	Program pracy.....	3
4	Opis przeprowadzonych prac.....	4
5	Projekty mieszanek MCE i MCAS	4
5.1	Projekt mieszanki typu MCE	5
5.2	Projekt mieszanki z asfaltem spienionym MCAS	8
6	Przygotowanie próbek do badań	11
7	Metodyka badań.....	14
7.1	Zespolony moduł sztywności - metoda belki czteropunktowo zginanej	14
7.2	Trwałość zmęczeniowa - metoda belki czteropunktowo zginanej	15
8	Wyniki badań.....	16
8.1	Zespolony moduł sztywności.....	16
8.2	Trwałość zmęczeniowa	21
9	Porównanie wyników mieszanek MCAS i MCE.....	23
9.1	Analiza wyników zespolonego modułu sztywności.....	23
9.2	Analiza wyników badania zmęczenia	24
10	Zakończenie.....	24

1 Podstawa pracy

Badania wykonano na podstawie umowy nr 695/2004 (temat TN-236) z dnia 14.04.2004r. zawartej pomiędzy Generalną Dyрекcją Dróg Krajowych i Autostrad w Warszawie, a Instytutem Badawczym Dróg i Mostów w Warszawie.

2 Cel pracy

Praca nt. „Zastosowanie asfaltu spienionego w technologii recyklingu nawierzchni na zimno” została przewidziana do realizacji w okresie od kwietnia 2004 r. do czerwca 2006 r. i została podzielona na trzy etapy.

Całość pracy ma na celu sprawdzenie laboratoryjne i na odcinkach testowych metody recyklingu nawierzchni na zimno z zastosowaniem asfaltu spienionego. W pracy przewidziano porównanie właściwości nawierzchni wykonanych metodą recyklingu na zimno z użyciem emulsji asfaltowej i asfaltu spienionego. W rezultacie przewidziano opracowanie zaleceń stosowania alternatywnej technologii recyklingu na zimno z zastosowaniem asfaltu spienionego.

3 Program pracy

Program pracy zgodnie z założeniami umowy nr 695/2004 (temat TN-236) został podzielony na trzy etapy realizacji. Etap II przewidziany do realizacji w 2005 r. obejmował następujące zadania:

Zadanie 5.

Wykonanie odcinków testowych z zastosowaniem mieszanki MCAS.

Zadanie 6.

Przygotowanie do badań próbek mieszanek MCAS i MCE.

Zadanie 7.

Wykonanie badania zmęczenia mieszanek MCAS i MCE.

Zadanie 7.

Wykonanie badań modułu sztywności mieszanek MCAS i MCE.

Zadanie 9.

Analiza wyników badań i porównanie właściwości mieszanek MCAS i MCE.

4 Opis przeprowadzonych prac

Kontakty nawiązane przez instytut w 2004 r. z firmą: BETPOL, która wypożyczyła i umożliwiła przewiezienie do laboratorium Instytutu mobilnego laboratorium WLB 10 firmy Wirtgen oraz mieszadła HOBART oraz firmą BUDIMEX-DROMEX nie umożliwiły wykonania odcinka testowego. Dlatego w bieżącym roku poszerzono zakres firm współpracujących z IBDiM przy wdrożeniu w Polsce technologii recyklingu nawierzchni na zimno z zastosowaniem asfaltu spienionego. Instytut podjął współpracę z następującymi firmami: Wirtgen Polska Sp. z o.o., Nynas Sp. z o.o. oraz firmą wykonawczą Budownictwo Drogowe BUDAR Sp. z o.o. Dzięki współpracy z wymienionymi firmami, za zgodą Kieleckiego oddziału Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w dniu 11 października 2005 r. na drodze krajowej nr 74 odcinek Grębenice – Jacentów miał zostać wykonany próbny odcinek z zastosowaniem MCAS (w ciągu warstwy podbudowy wykonywanej w technologii MCE). Mimo wysłanych w dniu 30.09.2005 r. do zainteresowanych osób (w tym przedstawicieli GDDKiA) zaproszeń, z powodów niezależnych od Instytutu do wykonania odcinka ostatecznie nie doszło, a termin wykonania kolejnego odcinka przesunięty został na wiosnę przyszłego roku (2006 r.). Ten nieprzewidywalny zwrot wydarzeń uniemożliwił pobranie próbek mieszanek z wykonanego odcinka.

Wobec zaistniałej sytuacji badania, których wyniki przedstawione są w dalszej części sprawozdania wykonane zostały jedynie na próbkach mieszanek MCAS i MCE wykonanych w laboratorium i są traktowane jako porównawcze. Przy wykonaniu ostatecznych odcinków próbnych w 2006 r. badania te zostaną powtórzone.

5 Projekty mieszanek MCE i MCAS

Celem niniejszej pracy jest porównanie technologii recyklingu nawierzchni na zimno z zastosowaniem asfaltu spienionego oraz technologii obecnie stosowanej z emulsją asfaltową. Mając to na uwadze, we współpracy z firmą BUDAR uzgodniono, że najlepszym sposobem na porównanie obu materiałów jest wykonanie ich w jednym ciągu drogi, z zastosowaniem jednakowych mineralnych materiałów wyjściowych (destruk, cement oraz mieszanka doziarniająca) oraz różnych typów lepiszcza (emulsji asfaltowej oraz asfaltu spienionego). Wykonano najpierw receptę mieszanki MCE, którą następnie przystosowano do nowego rodzaju lepiszcza, jakim jest asfalt spieniony.

5.1 Projekt mieszanki typu MCE

Podstawowym materiałem do wykonania tej mieszanki był destrukc pochodzący z frezowania istniejącej nawierzchni, jego skład przedstawiony jest w tablicy 1.

Tablica 1 Uziarnienie destruktu z frezowanej nawierzchni drogi DK 74

Destrukt z frezowania	
Wymiar sita #	Przesiew %
25	2,8
20,0	4,3
16,0	5,3
12,8	8,2
10	9,4
8,0	4,8
6,3	9,3
4,0	11,4
2,0	10,7
0,85	9,5
0,42	6,4
0,30	5,7
0,18	5,2
0,15	3,4
0,075	1,7
< 0,075	1,9
Suma	100,0

Poza uziarnieniem mieszanki mineralnej określono zawartość starego asfaltu w destrukcie na poziomie 5,4 %.

Jako materiał doziarniający użyto kruszywa 0/31 mm z kamieniołomu Laskowa. Uziarnienie tego materiału podano w tablicy 2.

Tablica 2 Uziarnienie kruszywa doziarniającego 0/31 mm, Laskowa

Kruszywo 0/31 Laskowa	
Wymiar sita #	Przesiew %
31,5	1,3
25,0	6,3
20,0	8,7
16,0	7,6
12,8	12,5
10,0	7,9
8,0	8,2
6,3	7,5
4,0	6,5
2,0	4,8
0,85	4,4
0,42	3,0
0,30	4,9
0,18	4,3
0,15	0,2
0,075	2,7
< 0,075	9,2
Suma	100,0

Jako spoiwo hydrauliczne w mieszance MCE użyty został cement klasy 32,5 MPa wyprodukowany przez firmę Lafarge w Małogoszczy. Cement ten charakteryzuje się składem podanym w tablicy 3.

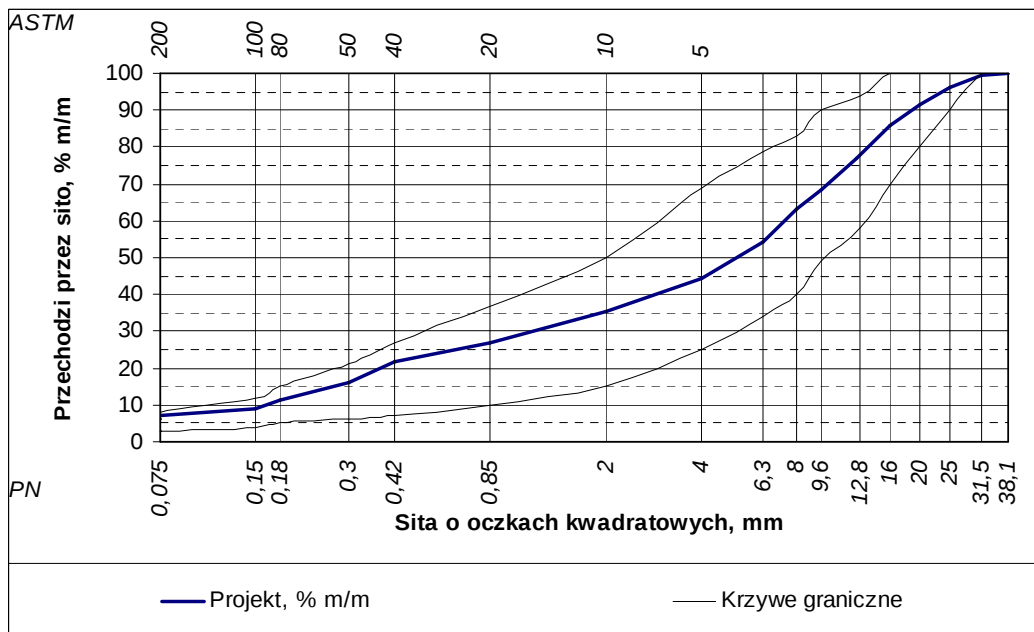
Tablica 3 Uziarnienie cementu klasy 32,5 Lafarge z Małogoszczy

Wymiar sita #	Przesiew %
0,15	0,4
0,075	1,3
< 0,075	98,3
Suma	100,0

Wykorzystując te materiały opracowano projekt mieszanki mineralno-cementowej składającej się z 77% destruktu, 19,3 % kruszywa doziarniającego oraz 3,7 % cementu. Skład mieszanki mineralno-cementowej oraz rzędne krzywych granicznych podane są w tablicy 4. Krzywą uziarnienia wraz z krzywymi granicznymi przedstawiono na rysunku 1.

Tablica 4 Uziarnienie nowej mieszanki mineralno-cementowej do technologii MCE

Mieszanka mineralno-cementowej do MCE			Krzywa graniczna	
Wymiar sita #	Przesiew %	Odsiew %	dolna %	górną %
63,0	-	100	100,0	100,0
31,5	0,3	99,7	100,0	100,0
25	3,4	96,3	90,0	100,0
20,0	5,0	91,3	80,0	100,0
16,0	5,5	85,8	70,0	100,0
12,8	8,7	77,1	58,0	94,0
10	8,8	68,3	49,0	90,0
8,0	5,3	63	40,0	83,0
6,3	8,6	54,4	34,0	79,0
4,0	9,9	44,5	25,0	69,0
2,0	9,2	35,3	15,0	50,0
0,85	8,2	27,1	10,0	37,0
0,42	5,5	21,6	7,0	27,0
0,30	5,3	16,3	6,0	21,0
0,18	4,8	11,5	5,0	15,0
0,15	2,7	8,8	4,0	12,0
0,075	1,9	6,9	3,0	8,0
< 0,075	6,9	0		
Suma	100,0	-	-	-



Rysunek 1 Krzywa uziarnienia mieszanki mineralno-cementowej do technologii MCE

Tak zaprojektowana mieszanka posłużyła do wykonania oznaczenia wilgotności optymalnej w badaniu Proctora. Badanie to zostało wykonane na frakcji 0/10 mm, a otrzymana z niego wilgotność została następnie przeliczona na całą mieszankę mineralno-cementową. Wyniki badania przedstawiono w tablicy 5 i na rysunku 2.

Tablica 5 Wykres gęstości i wilgotności z badania Proctora

Wilgotność [%]	Gęstość szkieletu mieszanki [Mg/m^3]
5,2	2,119
7,0	2,171
8,6	2,138
9,6	2,129



Rysunek 2 Wyniki badania Proctora

Po przeliczeniu na całą mieszankę mineralno-cementową wilgotność optymalna wyniosła $W_{opt}=4,8\%$, natomiast gęstość szkieletu mieszanki wyniosła $\rho_{ds.}=2,264\text{ Mg/m}^3$.

Na podstawie tych danych oraz na podstawie założenia, że docelowa zawartość asfaltu w nowej mieszance ma wynosić 5% ustalono końcowy skład mieszanki MCE. Jest on podany w tablicy 6.

Tablica 6 Skład końcowy mieszanki MCE

Lp.	Składnik	Zawartość składników w MCE [% m/m]
1	Destrukt	72,6
2	Kruszywo doziarniające	18,2
3	Cement	3,5
4	Emulsja wolnorozpadowa K-3	1,5
5	Woda uzupełniająca	4,2

5.2 Projekt mieszanki z asfaltem spienionym MCAS

Obie mieszanki MCE oraz MCAS miały zostać wykonane w jednym ciągu drogi nr DK 74, dlatego podstawowe materiały wykorzystane przy projektowaniu tej recepty musiały być identyczne z wyjątkiem lepiszcza asfaltowego. Początkowo planowano wykonanie mieszanki MCAS z asfaltem spienionym wykonanym z polskiego asfaltu 50/70 lub 70/160. Jednakże w trakcie prób spieniania, wykonywanych w mobilnym laboratorium WLB 10 firmy Wirtgen (rysunek 3). Okazało się, że asfalty te są mało podatne na spienianie. Przeciętnie wskaźnik rozszerzalności przy zawartości wody około 2 % nie przekraczał 12 a czas połowicznego rozpadu oscylował wokół minimalnego wymagania 7 s. Szczególnie czas połowicznego rozpadu ma wartości znacznie odbiegającą od najodpowiedniejszej dla tej technologii wartości 15-20 s, gdy jest liczona od końca iniekcji (pełne dane dotyczące prób spieniania zawiera Załącznik 1). Istnieją środki poprawiające spienianie się asfaltu [1], jednakże ich dodawanie musi zostać poprzedzone odpowiednim programem badań, który nie został uwzględniony w zakresie pracy. W ramach prac IBDiM przyjęto wykonywanie spieniania „zwykłą” dyszą oraz wtrysk do nieogranzonego wstępnie pojemnika o pojemności 10 l. Są to warunki najbardziej zbliżone do występujących w rzeczywistości na drodze. Użycie dyszy z cylindryczną komorą [2], w której dochodzi do zmieszania się wody z gorącym lepiszczem znacznie podnosi współczynnik ekspansji ER, jak i wydłuża czas połowicznego rozpadu $T_{1/2}$.



Rysunek 3 WLB 10 firmy Wirtgen

Uwzględniając powyższe zastrzeżenia oraz niedostępność na polskim rynku autocystem z systemem grzewczym pozwalającym utrzymać temperaturę transportowanego asfaltu w granicach $170 \pm 10^{\circ}\text{C}$ postanowiono do przygotowania ostatecznej mieszanki typu MCAS wykorzystać asfalt produkowany przez firmę Nynas specjalnie do wytwarzania piany o nazwie NYFOAM 80.

Do badań wybrano 4 warianty składu mieszanki mineralno-asfaltowej. Jako podstawa służyła mieszanka mineralna skomponowana z 80 % destruktu oraz 20 % kruszywa doziarniającego (ich uziarnienia przedstawione są odpowiednio w tablicy 1 oraz tablicy 2). Masę tych dwóch składników przyjęto jako 100 % dodając odpowiednio 1% lub 2 % cementu oraz 2 % lub 3 % asfaltu spienionego. Uproszczony skład czterech wariantów podany jest w tablicy 7.

Tablica 7 Uproszczony skład 4 wariantów mieszanki MCAS

Składnik	Jednostka	Warianty mieszanki MCAS			
		W1	W2	W3	W4
Destrukt i kruszywo doziarniające	% (m/m)	100	100	100	100
Cement	% masy (dest + krusz)	1,0	1,0	2,0	2,0
Asfalt spieniony	% masy (dest + krusz)	2,0	3,0	2,0	3,0
Dodatkowa woda*	% masy (dest + krusz)	3,2	3,1	3,0	2,6

*Wartości te wyznaczono jako dopełnienie do wartości optymalnej otrzymanej podczas badania Proctora przy uwzględnieniu oznaczonej wilgotności naturalnej partii destruktu.

Z przygotowanych mieszanek przygotowano próbki w ubijaku Marshalla. Posłużyły one do oznaczenia średniej gęstości strukturalnej, objętościowej oraz zawartości wolnej przestrzeni. Zestawienie tych parametrów podano w tablicy 8.

Tablica 8 Cechy 4 wariantów mieszanki MCAS

Cecha	Jednostka	Warianty mieszanki MCAS			
		W1	W2	W3	W4
Gęstość strukturalna	g/cm ³	2,070	2,056	2,089	2,081
Gęstość objętościowa	g/cm ³	2,376	2,346	2,351	2,381
Wolna przestrzeń*	% (v/v)	12,8	12,3	11,1	12,8

*otrzymane wyniki spełniają wymagania niemieckie wynoszące od 4 do 14 % [V]

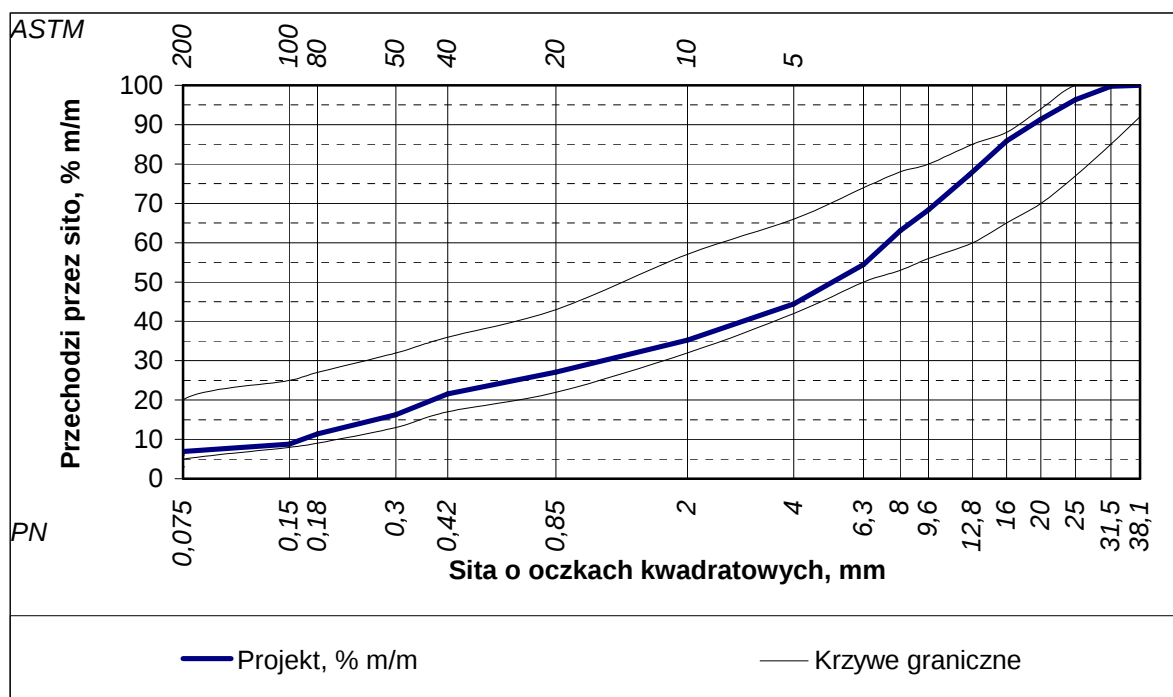
Następnie połowa próbek była pielęgnowana w powietrzu, a druga połowa w wodzie. Przeprowadzono badania wytrzymałości na rozciąganie pośrednie w temperaturze 25 °C. Wyniki badań przedstawiono w tablicy 9.

Tablica 9 Średnia wytrzymałość na rozciąganie pośrednie mieszanki MCAS

Próbki	Jednostka	Warianty mieszanki MCAS			
		W1	W2	W3	W4
Pielęgnowane w powietrzu*	MPa	0,44	0,46	0,51	0,44
Pielęgnowane w wodzie	MPa	0,37	0,42	0,48	0,48
Współczynnik TSR*	-	0,84	0,92	0,93	1,09

*Według instrukcji wydanej przez firmę Wirtgen pod tytułem „Cold Recycling Manual” wymagania wobec tych wartości wynoszą odpowiednio od 0,25 do 0,6 (wszystkie próbki spełniają to wymaganie) oraz od 0,8 do 1,0 (również wszystkie próbki spełniają to wymaganie) wartość >1 była nieoczekiwana, ale świadczy o doskonałych właściwościach materiału).

Na podstawie wyników badań jako najlepsze wybrano warianty W2 i W4. Ostatecznie do badań laboratoryjnych wybrano wariant W4. Uziarnienie wybranego wariantu przedstawione zostało na rysunku 4.



Rysunek 4 Krzywa uziarnienia mieszanki mineralno-cementowej do technologii MCAS

6 Przygotowanie próbek do badań

W laboratorium IBDiM przygotowano próbki do badań według wybranych recept na mieszankę MCE i MCAS. Materiały do wykonania próbek zostały pobrane bezpośrednio z miejsca wykonywania podbudowy od firmy BUDAR. Pobrana została około 200 kg próbka destruktu z frezowanej nawierzchni, 50 kg próbka kruszywa doziarniającego oraz około 5 l emulsji wolnorozpadowej K-3.

W pracowni TN-1 przygotowano naważki oraz wykonano płyty o wymiarach 18*50*10 cm. Mieszankę MCE przygotowano w tradycyjnym mieszalniku, natomiast mieszankę MCAS wykonano w przystosowanym do współpracy z mobilnym laboratorium WLB 10 mieszadłem HOBART, o pojemności 20 l. W laboratorium przed przystąpieniem do formowania płyt z mieszanek kruszywo zostało wysuszone, aby w prostszy sposób określić ilość wody niezbędnej do uzyskania wilgotności optymalnej.



Rysunek 5 Mieszadło laboratoryjne HOBART o pojemności 20l

Objętość pojemnika do mieszania składników na mieszankę MCAS spowodowała, że materiał niezbędny do wykonania jednej płyty był wykonywany w dwóch partiach po około 11 kg każda. Należy również zaznaczyć, że konstrukcja mieszadła powoduje osadzanie się pewnej ilości asfaltu na łopatkę mieszalnika, a więc zawartość lepiszcza w mieszance MCAS jest nieco mniejsza niż wynika to z recepty.

Płyty były zagęszczane w zagęszczarce w sposób identyczny z płytami przeznaczonymi do badań koleinowania w koleinomierzu LCPC.



Rysunek 6 Zagęszczanie płyt MCE i MCAS

W przypadku obu mieszanek nie podgrzewano składników mieszanki, jedynie asfalt spieniony, ze swej natury był gorący podczas wtrysku do mieszadła. W przypadku mieszanki MCE oraz MCAS wszystkie składniki mieszanki mineralnej były wstępnie mieszane (około 5s) a następnie dodawano do nich wodę, a na końcu lepiszcze: odpowiednio emulsję asfaltową lub asfalt spieniony. Mieszanki były zagęszczane w formach bezpośrednio po wymieszaniu wszystkich składników. Po wykonaniu płyta pozostawała w formie minimum przez 48 h przed rozformowaniem. Po wyjęciu z form, gotowe płyty były przetrzymywane w temperaturze pokojowej przez 7 dni przed przystąpieniem do wycięcia z nich próbek potrzebnych do oznaczenia modułu sztywności oraz odporności na zmęczenie. Należy zaznaczyć, że obie badane mieszanki są znacznie słabiej zespolone w porównaniu do typowej mieszanki MMA, dlatego szczególnie na krawędziach próbek zdarzają się czasami ubytki ziaren.



Rysunek 7 Belki z mieszanek MCE i MCAS przeznaczone do badań modułu sztywności oraz odporności na zmęczenie

7 Metodyka badań

7.1 Zespolony moduł sztywności - metoda belki czteropunktowo zginanej

Badanie zespolonego modułu sztywności przeprowadza się zgodnie z procedurą IBDiM opracowaną na podstawie normy AASHTO TP8-94 [3]. Metoda polega na cyklicznym, czteropunktowym 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 zginania oraz naprężenia i odkształcenia rozciągające. Warunki badania zespolonego modułu sztywności przyjęto następujące:

- temperatura: 10, 20, 30 i 40°C,
- częstotliwość: 0,1; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20
- odkształcenie: 50 μmm/mm.

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

$$E^* = E' + iE'' \quad \text{Równanie 1}$$

w którym:

$$E' = |E^*| \cos \varphi \quad \text{Równanie 2}$$

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

E' – część rzeczywista (sprężysta),

E'' – część urojona (lepka).

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

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{E''}{E'} \quad \text{Równanie 4}$$

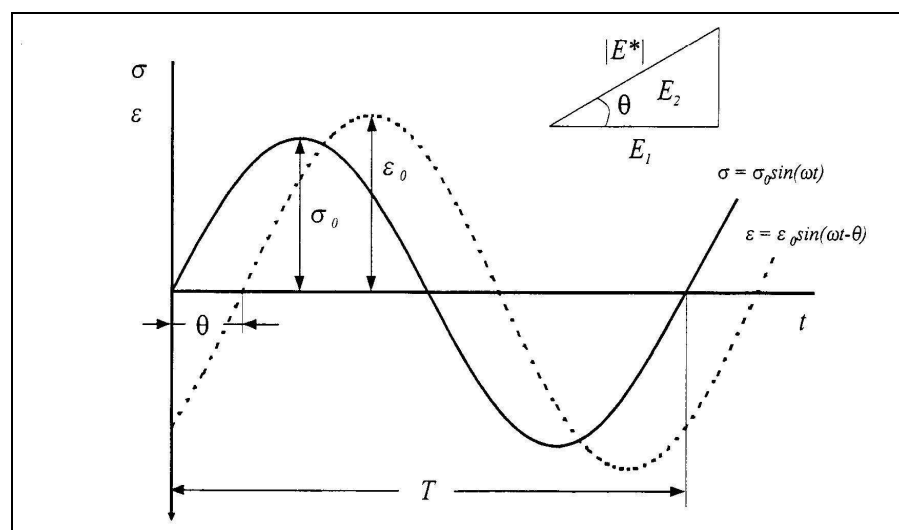
w którym:

φ - kąt przesunięcia fazowego, °.

Moduł sztywności jest wartością bezwzględną zespolonego modułu sztywności. Kąt przesunięcia fazowego stanowi informację o przewodze 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 (rysunek 8). Jako kryterium oceny lepkosprężystych właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych przyjmuje się wartość tangensa kąta przesunięcia fazowego:

- 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 8 Ilustracja kąta przesunięcia fazowego

7.2 Trwałość zmęczeniowa - metoda belki czteropunktowo zginanej

Badania zmęczeniowe zostały przeprowadzone wg procedury IBDiM opartej na normie AASHTO TP8-94 [3]. Metoda polega na cyklicznym, czteropunktowym 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. Wynikiem pojedynczego badania jest liczba cykli, po której sztywność belki obniży się do 50% wartości początkowej. Badanie przeprowadzono w

temperaturze równoważnej ze względu na zmęczenie, która w Polsce wynosi 10°C [4], odkształceniu 150µm/m i częstotliwości 10 Hz.

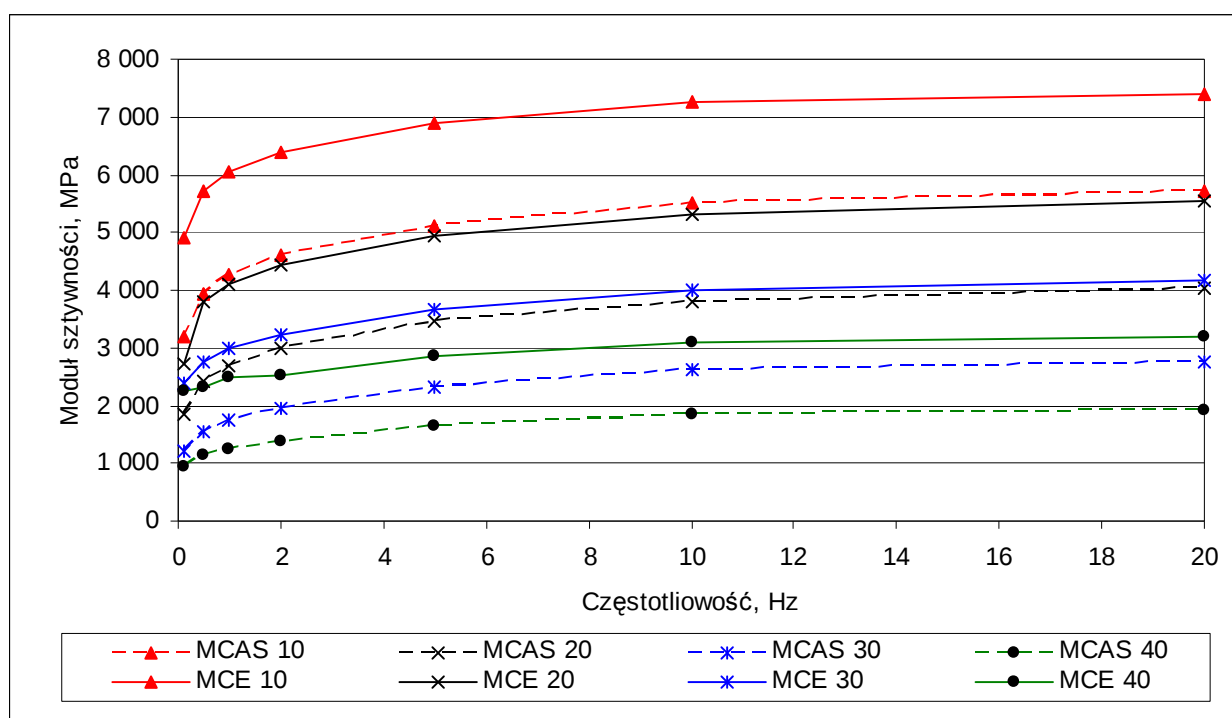
8 Wyniki badań

8.1 Zespolony moduł sztywności

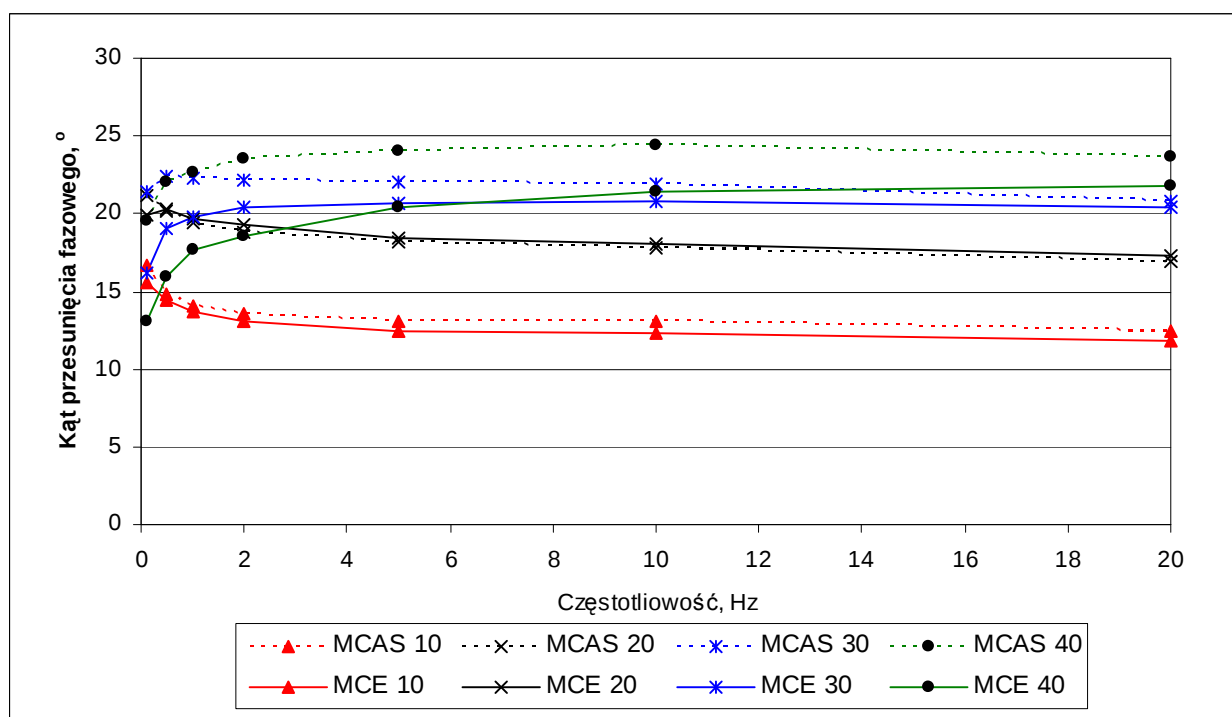
Do badań wykorzystano próbki, które następnie użyto w badaniach zmęczeniowych. W tablicy 10 przedstawiono wyniki badań modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego. Na rysunkach 9-15 przedstawiono graficzne porównanie wyników.

Tablica 10 Wyniki badań zespolonego modułu sztywności mieszanek MCE i MCAS w zależności od temperatury i częstotliwości obciążenia

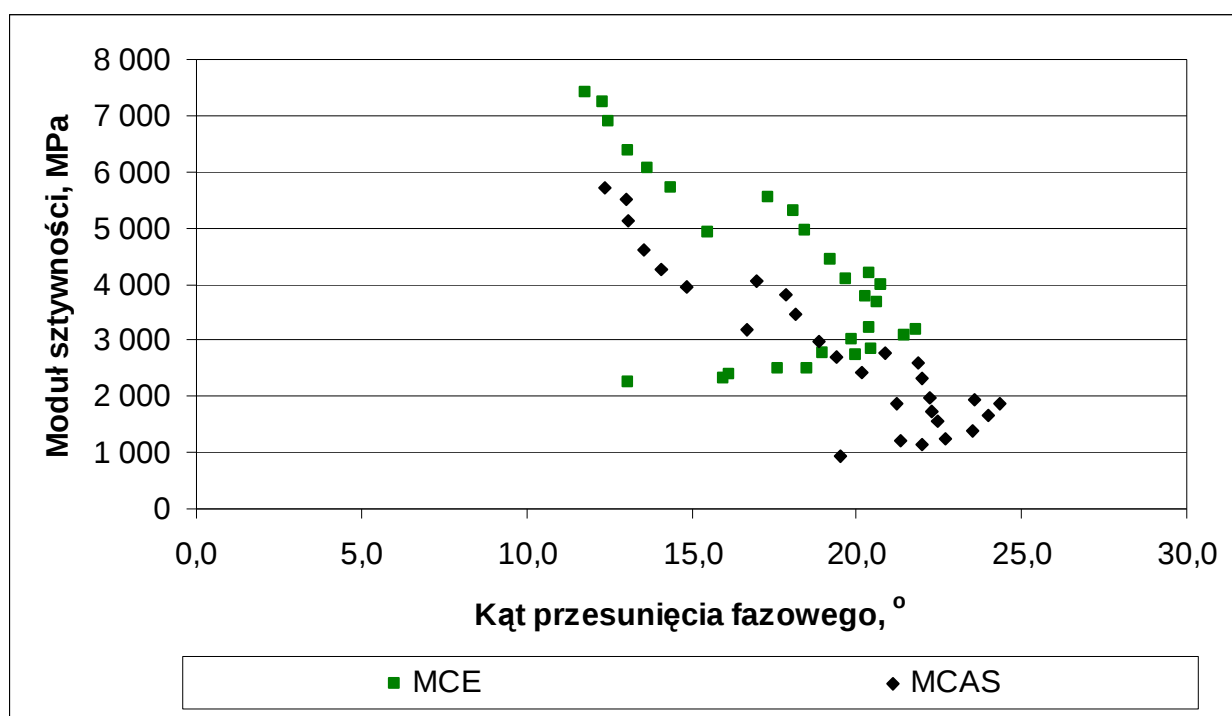
Mieszanka	Moduł sztywności, MPa							Kąt przesunięcia fazowego, °						
	Częstotliwość, Hz													
	0,1	0,5	1	2	5	10	20	0,1	0,5	1	2	5	10	20
Temperatura 10°C														
MCE	4901	5699	6048	6388	6893	7244	7410	15,5	14,4	13,7	13,1	12,5	12,3	11,8
MCAS	3203	3931	4272	4621	5124	5509	5731	16,7	14,9	14,1	13,6	13,1	13,1	12,4
Temperatura 20°C														
MCE	2719	3782	4098	4428	4939	5307	5536	20,0	20,3	19,7	19,2	18,4	18,1	17,3
MCAS	1854	2410	2686	2995	3446	3809	4039	21,2	20,2	19,4	18,9	18,2	17,9	17,0
Temperatura 30°C														
MCE	2400	2768	2999	3235	3663	3994	4183	16,2	19,0	19,8	20,4	20,6	20,7	20,4
MCAS	1210	1559	1747	1964	2315	2606	2760	21,4	22,5	22,3	22,2	22,0	21,9	20,9
Temperatura 40°C														
MCE	2252	2331	2487	2507	2856	3097	3198	13,1	16,0	17,6	18,5	20,4	21,4	21,8
MCAS	944	1138	1250	1388	1646	1858	1929	19,5	22,0	22,7	23,5	24,0	24,4	23,6



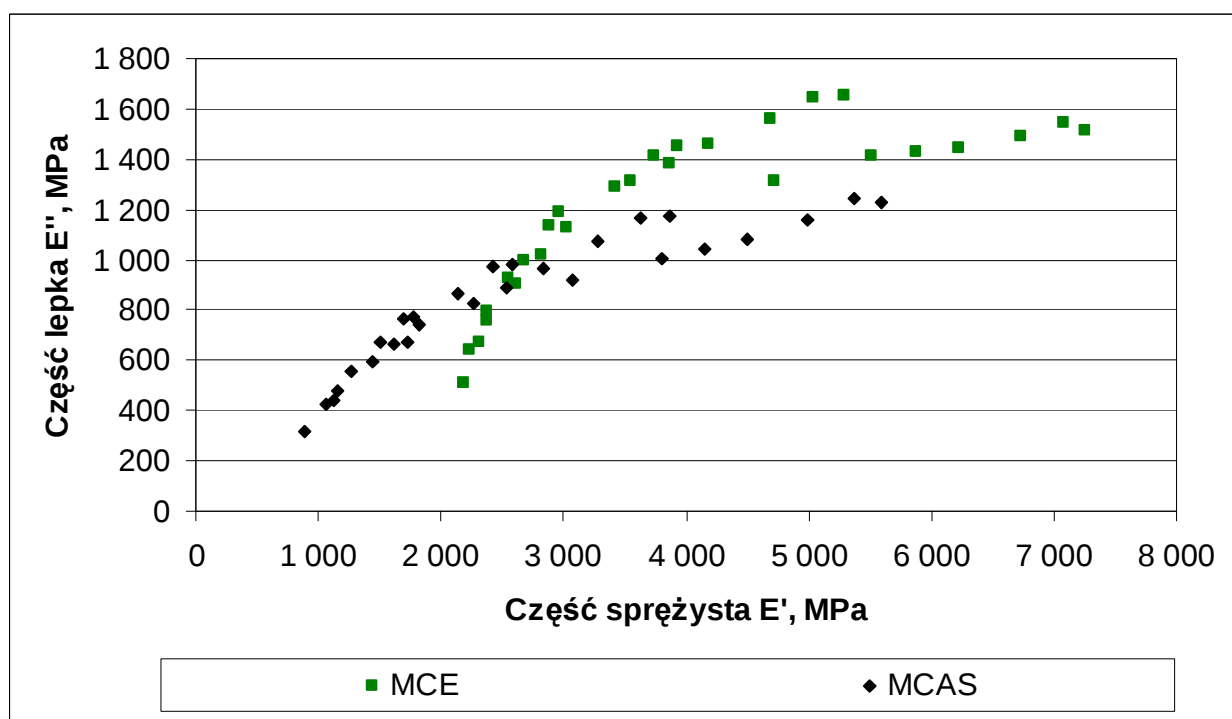
Rysunek 9 Izotermy modułu sztywności mieszanek MCAS i MCE



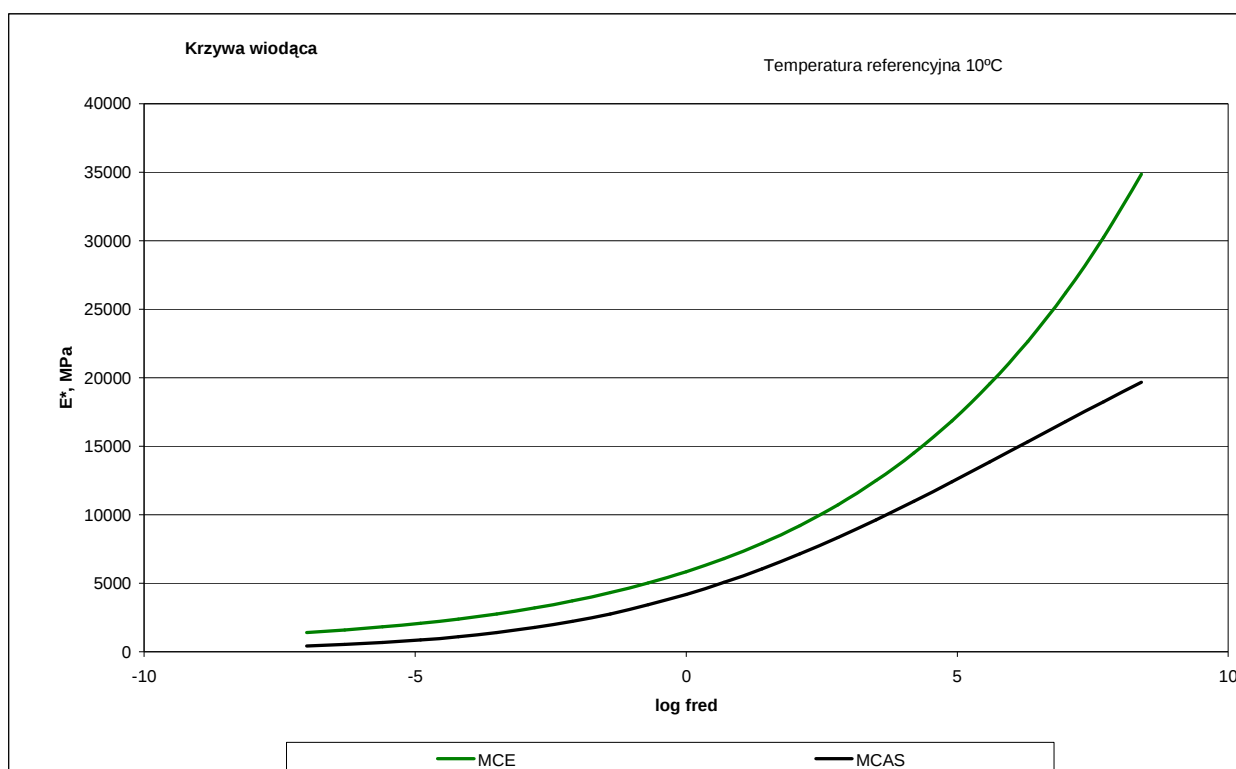
Rysunek 10 Izotermy kąta przesunięcia fazowego mieszanek MCAS i MCE



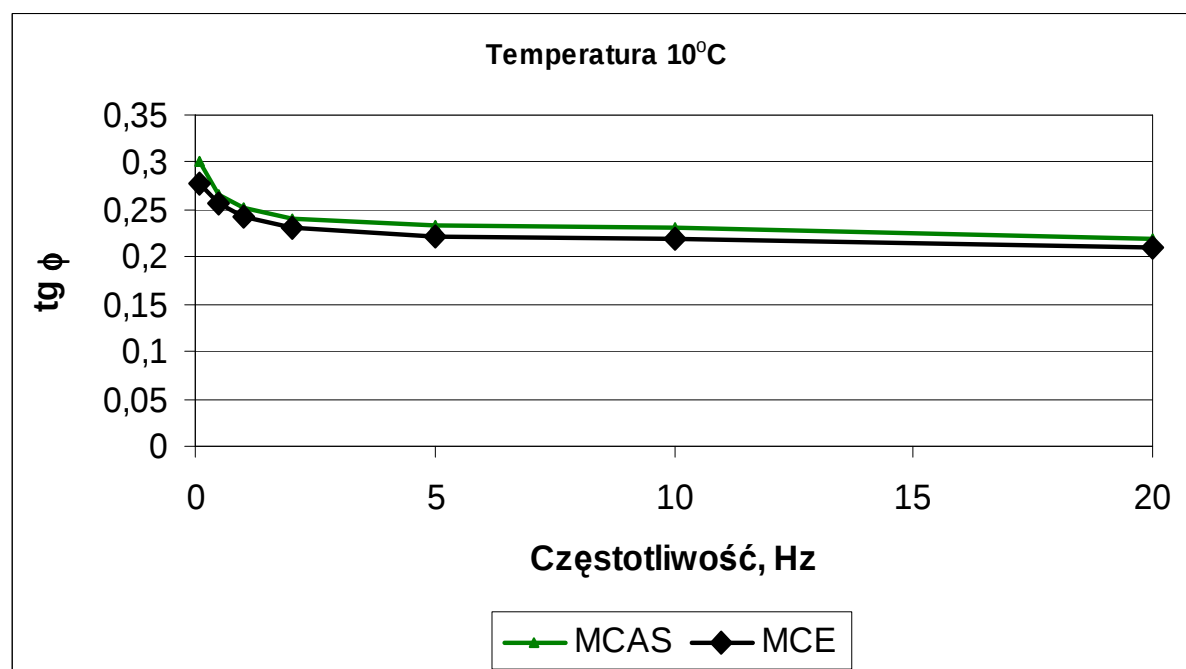
Rysunek 11 Wykres Blacka mieszanek MCAS i MCE



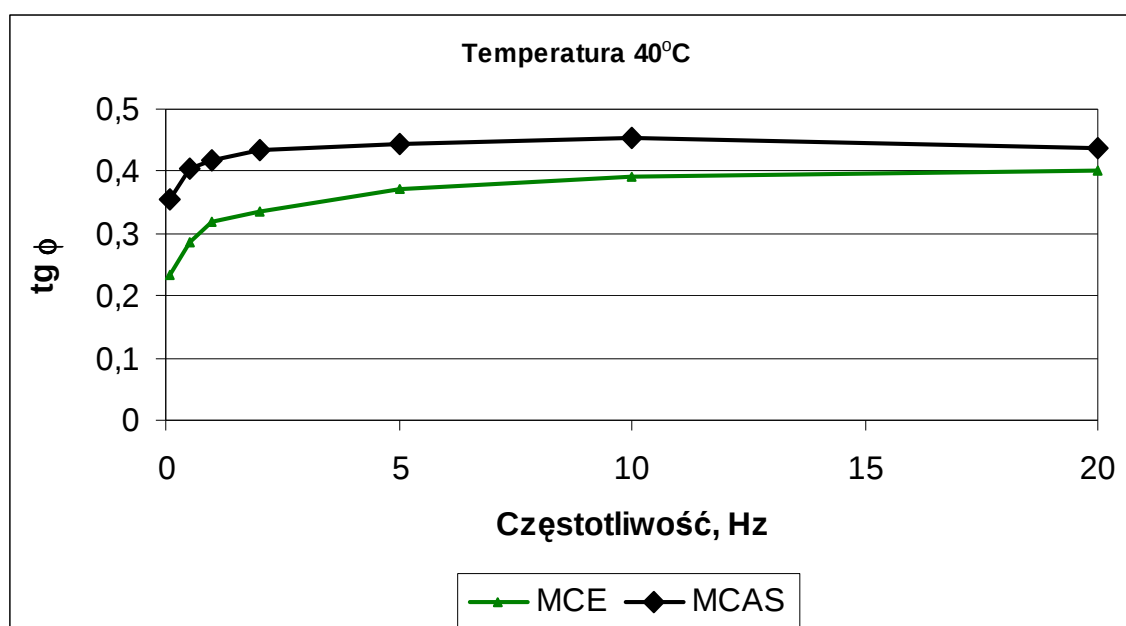
Rysunek 12 Wykres Cole-Cole mieszanek MCAS i MCE



Rysunek 13 Krzywe wodące modułu sztywności mieszanek MCAS i MCE w temperaturze 10°C



Rysunek 14 Porównanie wartości $\text{tg } \phi$ w temperaturze 10°C

Rysunek 15 Porównanie wartości $\text{tg } \phi$ w temperaturze 40°C

8.2 Trwałość zmęczeniowa

Do badań przygotowano próbki belkowe z poszczególnych mieszanek. Wyniki badań poszczególnych próbek przedstawiono w tablicach 11 i 12. Rysunki 16 i 17 przedstawiają przebieg badań zmęczeniowych poszczególnych próbek.

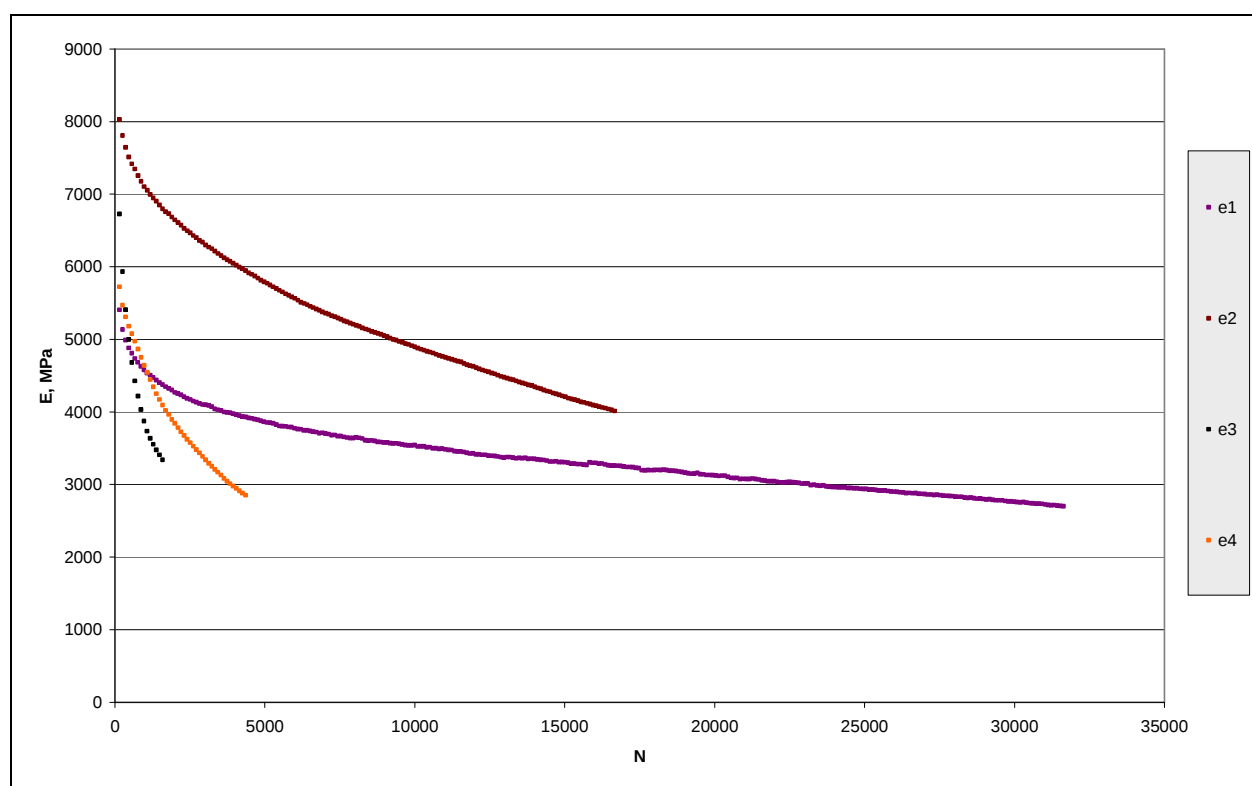
Tablica 11 Wyniki badań zmęczenia mieszanki MCE

Próbka	h	b	L	ϵ	N
	[mm]	[mm]	[mm]	[$\mu\text{mm/mm}$]	[-]
e1	50,3	63,5	380	150	31 632
e2	50,2	63,5	380	150	16 669
e3	50,3	63,4	380	150	1 586
e4	50,3	63,5	380	150	4 355

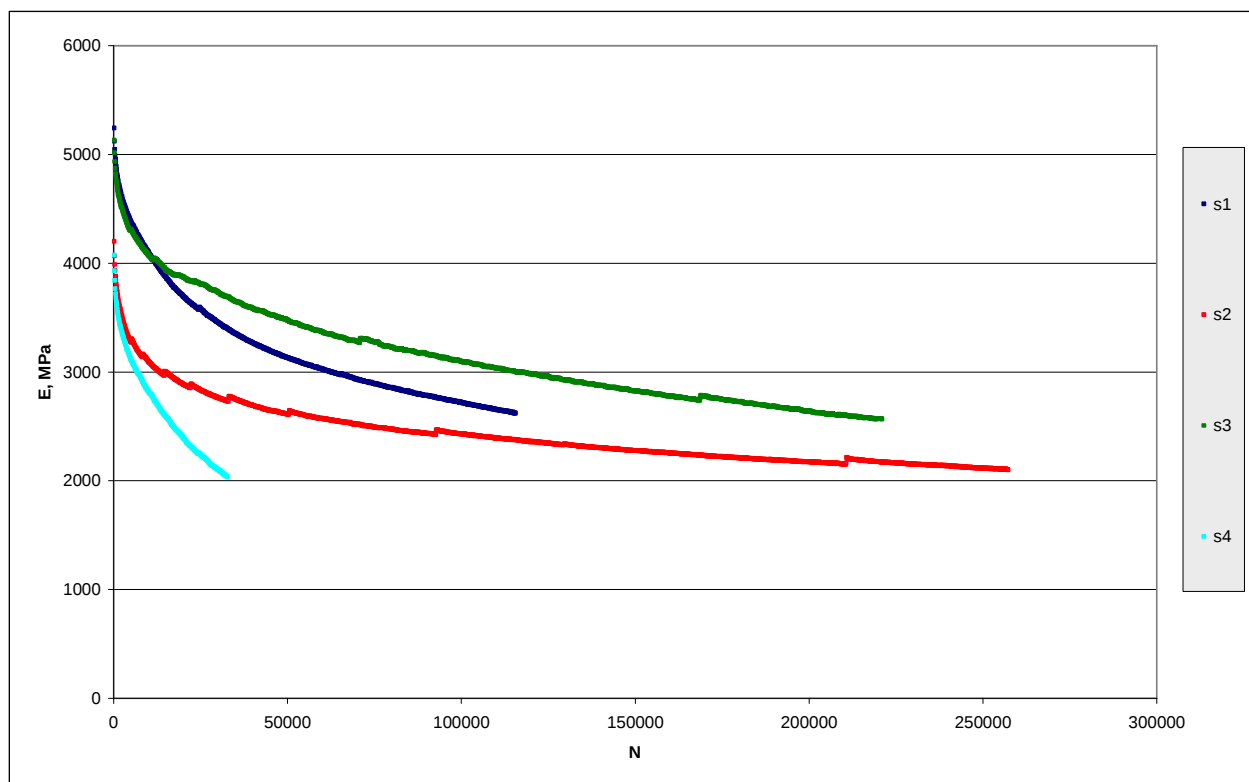
Oznaczenia: h – wysokość, b – szerokość, L – długość próbki, ϵ – mikroodkształcenie, N – trwałość zmęczeniowa,

Tablica 12 Wyniki badań zmęczenia mieszanki MCAS

Próbka	h	b	L	ε	N
	[mm]	[mm]	[mm]	[$\mu\text{mm/mm}$]	[-]
s1	50,3	63,5	380	150	115 573
s2	50,4	63,4	380	150	257 213
s3	50,4	63,3	380	150	221 037
s4	50,3	63,5	380	150	32 754



Rysunek 16 Przebieg badania zmęczenia mieszanki MCE



Rysunek 17 Przebieg badania zmęczenia mieszanki MCAS

9 Porównanie wyników mieszanek MCAS i MCE

9.1 Analiza wyników zespolonego modułu sztywności

Przedstawione wyniki badań świadczą o tym, że mieszanki MCE i MCAS charakteryzują się różnymi właściwościami pod względem modułu zespolonego. Niezależnie od częstotliwości i temperatury badania mieszanka MCE charakteryzuje się wyższym modułem sztywności niż mieszanka MCAS. Jest to widoczne na wykresie izoterm modułu sztywności (rysunek 9) oraz krzywej wiodącej (rysunek 13). Różnica w wartości modułu sztywności wzrasta z temperaturą i maleje wraz z częstotliwością. Przykładowo w temperaturze 10°C i częstotliwości 1 Hz moduł MCE jest większy o około 40% a w temperaturze 40°C o około 100%. Odpowiednio przy częstotliwości 10Hz różnice te wynoszą około 30 i 70%. W zakresie wyników kąta przesunięcia fazowego można stwierdzić, że mieszanka MCAS uzyskała większe wartości kąta przesunięcia fazowego, a różnica ta zwiększa się proporcjonalnie do wzrostu temperatury badania: w temperaturze 10°C różnica ta wynosiła od 0,4 do 1,2° a w temperaturze 40°C już od 2,2 do 6°. Zależności te widoczne są na wykresie izoterm kąta przesunięcia fazowego

(rysunek 10). Większy kąt przesunięcia fazowego świadczy o większym udziale fazy lepkiej, czego miarą jest wartość $\tan \delta$ rysunki 14 i 15.

9.2 Analiza wyników badania zmęczenia

Ogólnie można stwierdzić, że w przypadku każdej z badanych mieszanek uzyskano dużą rozbieżność w wynikach trwałości zmęczeniowej. Przyczyną tego mogą być niedoskonałości mechaniczne wyciętych belek, polegające na drobnych wykruszeniach próbek. Uzyskane wyniki pozwalają jednak stwierdzić, że mieszanka MCAS charakteryzowała się dużo większą trwałością zmęczeniową niż mieszanka MCE. Przewiduje się, że badania będą przeprowadzone w ramach realizacji odcinka próbnego w szerszym zakresie odkształceń w celu określenia charakterystyki zmęczeniowej. Biorąc pod uwagę spodziewany rozrzut wyników zwiększona zostanie liczba badanych próbek.

10 Zakończenie

Opracowanie zawiera opis działań z zakresu ETAPU II pracy, niezbędnych do wykonania odcinków doświadczalnych. Przyczyny niewykonania odcinków próbnych są niezależne od IBDiM.

Zgodnie z programem pracy szczegółowa analiza oraz niezbędne porównania zostały przewidziane do realizacji w ETAPIE III pracy (w 2006 r.). W przyszłym roku zostanie również wykonany zaległy odcinek doświadczalny. W związku z powyższym zostaną wykonane nowe projekty MCE i MCAS, jak również zostaną powtórzone badania zmęczeniowe.

Bibliografia

- 1 Bonvallet J. „La mousse de bitume: une technique emergente”, Revue Gen. Router Aerodromem, 789, 2000, „Fabrication industrielle et controlee d'enrobes a froid avec des mousses de bitume”, Proc. 14th INT. Road Federation Congress, Paris, 2001.
- 2 Jenkins K.J. et al., „Characterisation of foamed bitumen”, 7th Conference on Asphalt Pavement for Southern Africa, Zimbabwe, 1999.
- 3 AASHTO TP8-94 :” Standard test method for determining the fatigue life of compacted hot mix asphalt (HMA) subjected to repeated flexural bending”
- 4 D. Sybilski, W. Bańkowski: „Wyznaczanie temperatury równoważnej ze względu na zmęczenie”, Drogownictwo 6/2004