

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

## **SPRAWOZDANIE**

Temat TN-236 (etap III)

# **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  
dr inż. Wojciech Bańkowski  
Krzysztof Mirski

### **Technicy:**

Teresa Gawenda  
Jadwiga Migdalska  
Tomasz Michalski

Warszawa, listopad 2006 r.

## SPIS TREŚCI:

	<b>stronica</b>
1 Podstawa pracy.....	3
2 Cel pracy .....	3
3 Program pracy.....	3
4 Metodyka badań.....	4
4.1 Rozciąganie pośrednie.....	4
4.2 Zespolony moduł sztywności - metoda belki czteropunktowo zginanej.....	5
4.3 Trwałość zmęczeniowa - metoda belki czteropunktowo zginanej .....	6
4.4 Zasada badań ugięcia wykonywanego FWD .....	7
5 Opis przeprowadzonych prac.....	8
6 Odcinki doświadczalne.....	9
6.1 Metoda na miejscu (DK50).....	12
6.2 Metoda stacjonarna w mobilnej wytwórni KMA 150 (DK3) .....	12
7 Próbkę do badań - oznakowanie i przygotowanie .....	13
8 Projekty mieszanek MCAS i MCE .....	15
9 Projekt mieszanki z asfaltem spienionym MCAS-S (DK3).....	16
10 Projekt mieszanki z asfaltem spienionym MCAS-M (DK50) .....	19
11 Projekt mieszanki typu MCE-M (DK50) .....	21
12 Wyniki badań.....	24
12.1 Stabilność.....	24
12.2 Rozciąganie pośrednie.....	24
12.3 Zespolony moduł sztywności.....	28
12.4 Trwałość zmęczeniowa .....	33
12.5 Badanie ugięć – ocena nośności.....	36
12.6 Zdjęcia skaningowe.....	45
13 Analiza badań porównanie wyników mieszanek MCAS i MCE .....	46
14 Zakończenie.....	48

### Wykaz załączników:

- Załącznik 1 Projekt MCAS-S (DK3)
- Załącznik 2 Projekt MCAS-M (DK50)
- Załącznik 3 Projekt MCE-M (DK50)
- Załącznik 4 Zdjęcia z mikroskopu optycznego i skaningowego
- Załącznik 5 Zdjęcia z wykonywanych odcinków doświadczalnych
- Załącznik 6 Opracowanie typowych konstrukcji nawierzchni z podbudową MCAS
- Załącznik 7 Zalecenia stosowania technologii recyklingu na zimno z asfaltem spienionym MCAS

## 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. Z uwagi na problemy z pozyskaniem zgody na wykonanie odcinków doświadczalnych podpisano aneks ze zmianą terminu realizacji pracy. Przyczyny niewykonania odcinków próbnych w Etapie II oraz opóźnienia w Etapie III (tak jak przewidywał program pracy) były niezależne od IBDiM.

Zgodnie z programem pracy szczegółowa analiza oraz niezbędne porównania zostały przewidziane do realizacji w ETAPIE III pracy (w 2006 r.). W 2006 roku przewidziano więc wykonanie zaległego odcinka doświadczalnego wg nowych recept na MCE i MCAS, jak również powtórzenie badań zmęczeniowych.

Praca miała na celu sprawdzenie laboratoryjne i w 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 MCE i asfaltu spienionego MCAS. 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 III przewidziany do realizacji w 2006 r. obejmował następujące zadania:

Powtórzenie zadań z Etapu II:

### 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 8.

Wykonanie badań modułu sztywności mieszanek MCAS i MCE.

### Zadanie 9.

Analiza wyników badań i porównanie właściwości mieszanek MCAS i MCE.

### Etap III:

### Zadanie 10.

Wykonanie badania ugięć pod kątem oceny nośności

### Zadanie 11.

Obserwacja odcinków testowych

### Zadanie 12.

Opracowanie typowych konstrukcji nawierzchni z podbudową MCAS

**Zadanie 13.**

Opracowanie zaleceń stosowania alternatywnej technologii recyklingu na zimno z zastosowaniem asfaltu spienionego

Dodatkowo zostały wykonane zdjęcia struktury próbek z asfaltem spienionym i cementem MCAS pod mikroskopem optycznym i skaningowym.

**4 Metodyka badań****4.1 Rozciąganie pośrednie**

Oznaczenie odporności na działanie wody wykonano wg PN-EN 12697-12:2004 (U) – metoda zmodyfikowana [1].

Badanie wytrzymałości na rozciąganie pośrednie przeprowadzono na próbkach o średnicy 100 mm. Badanie wykonuje się na próbkach suchych i nasączonych wodą, co pozwala na określenie odporności mieszanki MCAS na działanie wody.

Próbki do badania wytrzymałości mieszanki MCAS na rozciąganie pośrednie zostały zagęszczone ubijakiem Marshalla po 75 uderzeń z każdej ich strony. Po zagęszczeniu próbki pozostawiono w formach na 24 godziny w temperaturze pokojowej, tj. około 20 °C. Po wyjęciu z form, próbki przetrzymywano w komorze termicznej o temperaturze 40 °C przez 72 godziny. Po tym okresie pielęgnacji i po ostudzeniu próbek do temperatury pokojowej, wykonuje się badanie wytrzymałości na rozciąganie pośrednie (próbki suche). Próbki do badania wytrzymałości na rozciąganie pośrednie w stanie nasycenia wodą, są po okresie pielęgnacji nasączone wodą przez 24 godziny, a następnie poddawane badaniom wytrzymałości na rozciąganie pośrednie w opisany powyżej sposób.

Oznaczenie wytrzymałości na rozciąganie pośrednie przeprowadza się w temperaturze 25°C. Badanie to polega na ścisaniu próbek  $\varnothing 100 \pm 3$  mm, po tworzącej walca z prędkością 50 mm/min., przy czym nacisk jest przekazany przez listwy o szerokości 12 mm i o krzywiznie równej promieniowi próbki.

Wytrzymałość pojedynczej próbki na rozciąganie pośrednie oblicza się wg równania 2:

$$ITS_{S(N)} = \frac{P}{\Pi rh}$$

w którym:

$ITS_{S(N)}$  wytrzymałość na rozciąganie pośrednie, [kPa]

P maksymalna siła niszcząca, [kN]

h wysokość próbki, [cm]

r promień próbki, [cm]

Natomiast odporność na działanie wody (wskaźnik zmiany wytrzymałości) określono na podstawie wzoru:

$$TSR = 100 \times \frac{ITS_N}{ITS_S}$$

w którym:

TSR wskaźnik zmiany wytrzymałości

$ITS_N$  wytrzymałość na rozciąganie pośrednie próbek nasączonych wodą, [kPa]

$ITS_S$  wytrzymałość na rozciąganie pośrednie próbek w stanie powietrzno-suchym, [kPa]

Im jest on bliższy wartości 100 % tym mieszanka jest bardziej odporna na wpływ czynników zewnętrznych.

## 4.2 Zespolony moduł sztywności - metoda belki czteropunktowo zginanej

Badanie zespolonego modułu sztywności przeprowadza się zgodnie z procedurą IBDiM opracowaną na podstawie normy AASHTO TP8-94 [ 2 ] oraz zgodnie z PN-EN 12697-26:2005 (U) [ 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:

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

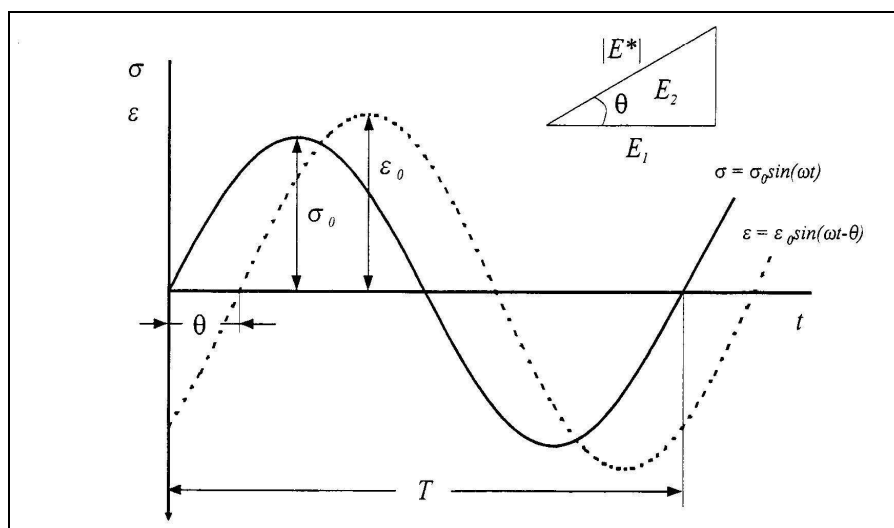
w którym:

$\varphi$  - 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 1). Jako kryterium oceny lepkosprężystych właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych przyjmuje się wartość tangensa kąta przesunięcia fazowego:

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



**Rysunek 1** Ilustracja kąta przesunięcia fazowego

#### 4.3 Trwałość zmęczeniowa - metoda belki czteropunktowo zginanej

Badania zmęczeniowe zostały przeprowadzone wg procedury IBDiM opartej na normie AASHTO TP8-94 [2] oraz zgodnej z PN-EN 12697-24:2005 (U) [4]. Metoda polega na cyklicznym, czteropunktowym zginaniu próbki belkowej umieszczonej 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 [5] i częstotliwości 10 Hz. Na podstawie wyników badań poszczególnych próbek danej mieszanki przy różnych odkształceniach obliczana jest charakterystyka zmęczeniowa mieszanki wyrażona równaniem:

$$N = A \cdot (1/\varepsilon)^b \quad \text{Równanie 5}$$

w którym:

N – odporność zmęczeniowa wyrażona liczbą cykli do zniszczenia,

$\varepsilon$  – mikroodkształcenie [ $\mu\text{mm}/\text{mm}$ ],

A, b – współczynniki materiałowe uzyskane metodą regresji liniowej.

Na podstawie parametrów charakterystyki zmęczeniowej wyznaczany jest parametr  $\varepsilon_6$  określający odkształcenie w badaniu zmęczeniowym, przy którym trwałość zmęczeniowa wynosi 1 mln cykli. Wartość  $\varepsilon_6$  można obliczyć z równania:

$$\varepsilon_6 = 10^{\frac{\log \frac{1000000}{A}}{b}} \quad \text{Równanie 6}$$

#### 4.4 Zasada badań ugięcia wykonywanego FWD

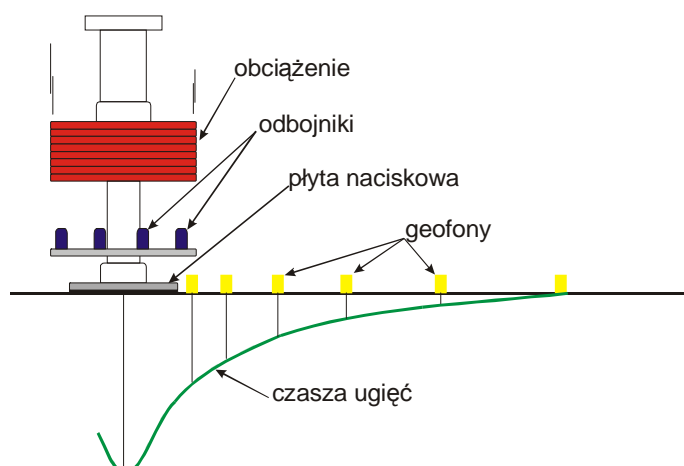
Ugięciomierz dynamiczny FWD (Falling Weight Deflectometer, rysunek 2) jest aparatem, za pomocą którego mierzone jest ugięcie nawierzchni pod wpływem zadanego obciążenia przez zestawu czujników ugięć (geofonów). Umieszczone są one w centrum nacisku (płyta naciskowa z jednym czujnikiem) oraz w pewnych odległościach od punktu centralnego (np. 300, 600, 900, 1200, 1500 i 1800 mm). Schemat działania urządzenia przedstawiono na rysunku 3.

Aparat FWD ma możliwość maksymalnego nacisku do 120 kN, symuluje nacisk wywierany przez samochód ciężarowy poruszający się z prędkością 35 - 40 km/h.



Rysunek 2 Ugięciomierz FWD

Sterowanie tym urządzeniem jest automatyczne. Kierowca będący jednocześnie operatorem przy pomocy dodatkowych urządzeń (dystansomierz, kamera) dokonuje wyboru miejsca oraz kontroluje przebieg procesu pomiarowego. Aparat FWD jest sterowany przez procesor pokładowy a poprawność wyników uzyskiwanych w trakcie pomiarów kontrolowana jest na bieżąco przez komputer pokładowy.



Rysunek 3 Schemat działania ugięciomierza

## 5 Opis przeprowadzonych prac

Według zapisów umowy nr 695/2004 z dn. 14.04.2004 r., termin zakończenia pracy przewidziany był na dzień 30.06.2006 r. nastąpiły jednak okoliczności, które nie pozwoliły na ukończenie pracy w tym terminie. Decydującym powodem opóźnienia były problemy związane z pozyskaniem i wykonaniem odcinka doświadczalnego z wykorzystaniem nowej technologii recyklingu na zimno z zastosowaniem asfaltu spienionego MCAS.

Od momentu rozpoczęcia tej pracy nawiązaliśmy liczne kontakty z firmami gotowymi do wykonania odcinków doświadczalnych. Były to min. firmy: BETPOL z Bydgoszczy, BUDIMEX-DROMEX, Budownictwo Drogowe BUDAR Sp. z o.o oraz z firmami wspomagającymi np.: Wirtgen, Nynas. Kontakty nawiązane przez instytut w 2004 r z firmą: BETPOL umożliwiły wypożyczenie i przewiezienie do laboratorium Instytutu mobilnego laboratorium WLB 10 firmy Wirtgen oraz mieszadła HOBART, które jest niezbędne do przygotowania próbek laboratoryjnych z MCE oraz określenia parametrów spieniania asfaltu.

Równolegle prowadziliśmy starania w kierunku określenia lokalizacji i pozyskania zgody na wykonanie odcinka doświadczalnego w różnych oddziałach GDDKiA (np. Kielce, Szczecin, Bydgoszcz, Zielona Góra). Dzięki współpracy z firmami: Wirtgen Polska Sp. z o.o., Nynas Sp. z o.o. oraz firmą wykonawczą Budownictwo Drogowe BUDAR Sp. z o.o., 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 olbrzymiego zaawansowania, z powodów niezależnych od Instytutu do wykonania odcinka ostatecznie nie doszło, a termin wykonania kolejnego odcinka przesunięty został na wiosnę 2006 roku.

W dalszej kolejności nawiązaliśmy współpracę z dwoma niezależnymi przedsiębiorstwami drogowymi, w których przewidziano wykonanie odcinków próbnych w terminie lipiec – sierpień 2006 r. Były to firmy:

- 1/ BILFINGER BERGER INFRASTRUKTURA z Wrocławia oraz firma BALTOM - współpraca z oddziałem GDDKiA w Zielonej Górze i czeską firmę NIEVELT-Labor Praha (odcinek drogi DK-3),
- 2/ Przedsiębiorstwo Budowy Dróg i Mostów z Mińska Mazowieckiego przy pomocy Loudon International z Afryki Południowej - współpraca z oddziałem GDDKiA w Warszawie (odcinek drogi DK-50).

Współpraca ta ostatecznie doprowadziła do wykonania dwóch odcinków doświadczalnych, które pozwoliły porównać:

- zastosowaniem innych technologii wytwarzania mieszanki MCAS,
- dwie znacznie różniące się składem mineralnym mieszanki MCAS, zarówno pod względem uziarnienia jak i zawartości cementu,
- właściwości dwóch wykonywanych mieszanek z zastosowaniem asfaltu spienionego i cementu MCAS do właściwości mieszanki cementowo-emulsyjnej MCE.

Wobec zaistniałej sytuacji program badań z części drugiej sprawozdania TN-236 został powtórzony w 2006 r. (dla dwóch odcinków doświadczalnych), a wyniki z 2005 r. są traktowane jako porównawcze.



## 6 Odcinki doświadczalne

Recykling na zimno można wykonać w technologii z zastosowaniem asfaltu spienionego lub emulsji asfaltowej (technologie mieszane przewidują dodatek cementu do tych wariantów). Rozwiązania te mogą być wykonywane przy zastosowaniu mieszania na miejscu lub w bazie roboczej.

W celu osiągnięcia dobrego rezultatu recyklingu na zimno niezbędna jest precyzyjna informacja o stanie technicznym odcinków naprawianej drogi, wykonanie niezbędnych testów laboratoryjnych oraz wybór metody naprawy (pod względem rodzaju i sposobu). Poprzez mieszanie frakcjonowanej mieszanki mineralnej odzyskanej po granulacji asfaltu i tłuczni z dodatkami wiążącymi —asfaltem spienionym i cementem, uzyskuje się bardzo wytrzymałą warstwę nośną związaną bitumicznie i hydraulicznie.

Ostatecznie wykonane zostały dwa odcinki doświadczalne z zastosowaniem dwóch wariantów technologii recyklingu na zimno z asfaltem spienionym i cementem (tablica 1).

Przygotowanie mieszanki i wykonanie warstwy podbudowy z MCAS odbywało się na dwa sposoby:

- na miejscu budowy (asfalt spieniony, cement, kruszywo doziarniające i desrtukt z warstw nawierzchni i tłuczni mieszano bezpośrednio na miejscu budowy odcinka, przy pomocy frezarki stabilizacyjnej WR 2500 S) – załącznik 2,
- w bazie roboczej (wytwarzanie mieszanki MCAS gotowej do rozłożenia odbywało się w mobilnej wytwórni mieszanek na zimno KMA 150, z wykorzystaniem wcześniej sfrezowanego składowanego materiału, asfaltu spienionego, cementu i kruszywa doziarniającego) – załącznik 1.

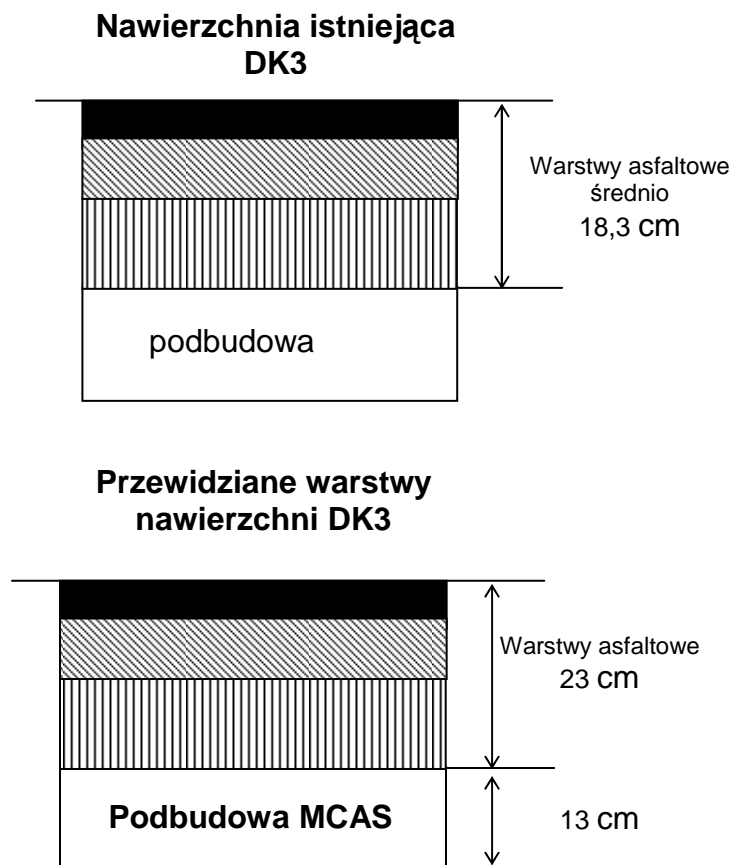
**Tablica 1.** Ogólne informacje o wykonanych odcinkach doświadczalnych

Lp.	Opis	DROGA NUMER:	
		DK3	DK-50
1	Odcinek	Ociosna - Skwierzyna	Strachówka –Łochów
2	Lokalizacja	od km 206+400 do km 208+400	Odcinek 1 km 247+400 do 248+470 Odcinek 2 km 248+470 do 249+935
3	Szerokość drogi	12,5 m	Odcinek 1 7,4 m Odcinek 2 6m
4	Termin wykonania	10.08.2006r. początek prac	09.08.2006r. prezentacja
5	Technologia	Mobilna wytwórnia KMA 150	Wykonanie na miejscu przy pomocy urządzenia WR 2500
6	Wykonawca	BILFINGER BERGER INFRASTRUKTURA z Wrocławia i firma BAL TOM	Przedsiębiorstwo Budowy Dróg i Mostów z Mińska Mazowieckiego
7	Współpraca	1/ Oddział GDDKiA w Zielonej Górze 2/ Czeska firma NIEVELT-Labor Praha	1/ Oddział GDDKiA w Warszawie 2/ Loudon International z Afryki Południowej
8	UWAGI:		wykonany odcinek MCAS stanowi przedłużenie odcinka z zastosowaniem MCE)

**DK3**

Odcinek doświadczalny Drogi Krajowej Nr 3 zaczynał się na granicy miasta Skwierzyna w kierunku Gorzowa Wielkopolskiego (od km 206+400 do km 208+400) szerokość jezdni wynosiła 12,5 m.

Droga Krajowa Nr 3 jest drogą jednojezdniową, dwupasmową z szerokimi poboczami (szerokość pasa 3,75 m, szerokość pobocza 2,5 m), na której występuje ruch ciężki.



**Rysunek 4** Konstrukcja istniejącej nawierzchni oraz projektowana z zastosowaniem MCAS (DK3)

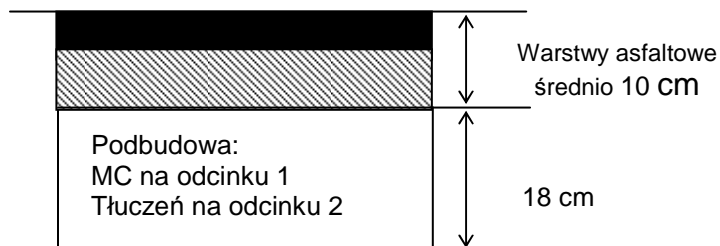
**DK50**

Odcinek doświadczalny Drogi Krajowej Nr 50 zaczynał się około 40 km na północ od Mińska Mazowieckiego w km 247+400 i obejmował dystans 2,535 km, w kierunku Łochowa a kończył się w km 249+935.

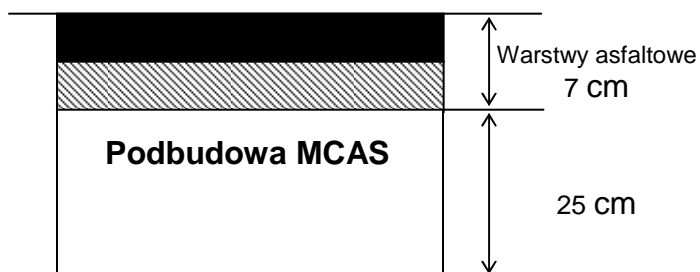
Droga Krajowa Nr 50 jest drogą jednojezdniową - dwupasmową, na której występuje stosunkowo duży ruch ciężki. Z przeprowadzonych obserwacji wynika, iż średnio w ciągu godziny w obu kierunkach, drogą przejeżdża 20 do 25 ciężkich pojazdów.

W południowej części odcinka doświadczalnego na 1,07 km (pomiędzy km 247+400 a km 248+470) szerokość jezdni wynosiła 7,4 m, natomiast jezdni w części północnej (pomiędzy km 248+470 km a 249+935) miała szerokość zaledwie 6,0 m. Nawierzchnia asfaltowa Odcinka 1 — południowego (szerszego) wyglądała na nowszą od nawierzchni Odcinka 2— północnego, o długości 1,465 km. Ponadto Odcinek 1 był w stanie ogólnym lepszym od Odcinka 2.

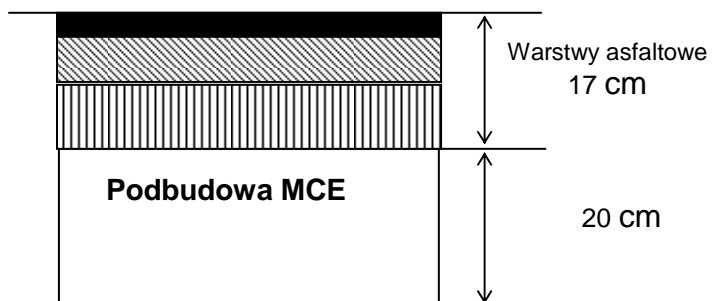
### Nawierzchnia istniejąca DK50



### Przewidziane warstwy nawierzchni DK50



### Przewidziane warstwy nawierzchni DK50



**Rysunek 5** Konstrukcja istniejącej nawierzchni oraz projektowana z zastosowaniem MCAS i MCE (DK50)

Na odcinku 2 (DK50) występowały różne warstwy podbudowy w poboczach (szer. poboczy 1 m): AP i piasek oraz żwir i tłuczeń.

Rys 5 przedstawia konstrukcję istniejącej nawierzchni oraz projektowaną z zastosowaniem MCAS i MCE. Ostatecznie na odcinku od 247+400 do 248+650 zwiększono grubość warstw asfaltowych wykonanych na MCAS z 7 cm do 18 cm (8+6+4), natomiast na odcinku od 248+650 do 249+950 zastosowano 9 cm grubość warstw asfaltowych.

Na podbudowie z MCE wykonano dwie warstwy asfaltowe bez warstwy ścieralnej o grubości 3 cm, o łącznej grubości 14 cm.

## 6.1 Metoda na miejscu (DK50)

W metodzie tej z reguły wykorzystuje się recykler na zimno i stabilizator WR 2500 lub WR4200.

Jest to urządzenie poruszające się na kołach o wysokiej wydajności do uniwersalnego użytku, do stabilizacji gruntów nie mających wytrzymałości nośnej, o głębokości pracy do 50 cm oraz do recyklingu związanych i niezwiązanych warstw dróg. Materiałami dodawanymi mogą być cement, emulsja bitumiczna lub asfalt spieniony i woda. Szczególnie dobre wyniki osiąga się przy zastosowaniu asfaltu spienionego.

Mobilnym recyklerem frezuje się i granuluje istniejącą warstwę drogi, jednocześnie dodaje się i miesza asfalt spieniony, cement i wodę. Zarówno materiał wyjściowy jak i wytwarzana mieszanka nie muszą być transportowane. Nałożenie odzyskanego i uzdatnianego materiału odbywa się zależnie od typu urządzenia w zintegrowanym urządzeniu lub dodatkowym sprzęcie wyrównującym i walującym poruszającym się za recyklerem.

Pierwsza czynność przy wykonaniu recyklingu polega na sfrezowaniu istniejącej nawierzchni poprzez recykling do wcześniej określonej głębokości oraz uzupełnieniu o ewentualne kruszywo doziarniające. Sfrezowany materiał zostaje następnie zagęszczony i ukształtowany zgodnie z nowymi poziomami projektowymi. To może powodować, że pewne obszary mają nadmiar materiału, który należy usunąć w celu utworzenia zapasu. W przypadku obszarów, gdzie brakuje materiału, zostaje on uzupełniony materiałem z zapasu.

Druga czynność przy wykonaniu recyklingu polega na tym, że materiał jest stabilizowany asfaltem spienionym i cementem. Stabilizator gruntu Wirtgen WR 2500 S pobiera środki z dozownika cementu Wirtgen WM 1000 i cysterny z gorącym asfaltem, która posuwała się do przodu. Następnie materiał ten zostaje zagęszczony przed końcowym profilowaniem i wykańczaniem zagęszczonej warstwy.

Ułożenie następnej warstwy asfaltowej może nastąpić następnego dnia po wykonaniu MCAS lub po okresie 2-4 dni, gdy zawartość wilgoci w górnej części nowej warstwy spadnie poniżej 50% optymalnej zawartości.

Na części odcinka zaniechano bezpośredniego układania następnej warstwy asfaltowej na wykonanej podbudowie z MCAS i oddano próbnie ten odcinek do ruchu.

W dobrych warunkach atmosferycznych nie zaobserwowano żadnych zniszczeń, które mogły wystąpić pod wpływem dużego obciążenia ruchem samochodowym (jedynie ciemne pasy w śladach kół). Natomiast deszczowa pogoda w połączeniu z ciężkim ruchem powodowała powstanie bardzo dużych ubytków i dalsze wymywanie warstwy podbudowy wykonanej z MCAS.

## 6.2 Metoda stacjonarna w mobilnej wytwórni KMA 150 (DK3)

W metodzie tej wykorzystuje się recykler na zimno i mieszacz KMA 150 lub KMA 200

Tym urządzeniem produkuje się wysokiej jakości mieszanki ziarniste zarówno z nowych kruszyw, jak i materiału odzyskiwanego np. destruktu z nawierzchni asfaltowych. Dzięki mobilności urządzenia, możliwe jest przygotowanie mieszanki bezpośrednio na miejscu budowy lub w pobliżu miejsca składowania mieszanki.

Używając urządzenia KMA do recyklingu na zimno i mieszania frezowanego granulatu i dodając asfalt spieniony, cement i wodę w tym urządzeniu przygotowuje się mieszankę, która jest następnie dostarczana na plac budowy. Nałożenie odbywa się za pomocą konwencjonalnych maszyn i walców.

Na warstwie wykonanej w technologii z zastosowaniem MCAS, została następnego dnia ułożona następna warstwa asfaltowa.

## 7 Próbki do badań - oznakowanie i przygotowanie

Przyjęto następujące oznakowanie próbek:

**MCAS-S/B** → z asfaltem spienionym w mobilnej wytwórni KMA150 w 2006 r., przeznaczenie DK3 na odcinku Ociosano-Skwierzyna (próbki wykonywano w firmie BALTON)

**MCAS-S** → z asfaltem spienionym wykonywana w mobilnej wytwórni KMA150 w 2006 r., przeznaczenie DK3 na odcinku Ociosano-Skwierzyna (próbki wykonywano w IBDiM)

**MCAS-M** → z asfaltem spienionym z zastosowaniem WR 2500 S, w 2006 r., przeznaczenie DK50 Mińsk Mazowiecki (próbki wykonywano w IBDiM)

**MCE-M** → z emulsją asfaltową wykonywana w 2006 r., przeznaczenie DK50 Mińsk Mazowiecki (próbki wykonywano w IBDiM)

Dodatkowo do wybranych porównań wykorzystano próbki z 2005 r. (sprawozdanie TN-236, etap II):

**MCAS-K** → z asfaltem spienionym z przewidzianym zastosowaniem WR 2500, w 2005r., przeznaczenie DK74 – brak realizacji odcinka w tej technologii (próbki wykonywano w IBDiM)

**MCE-K** → z emulsją asfaltową wykonywana w 2005 r., przeznaczenie DK74 (próbki wykonywano w IBDiM)

W laboratorium IBDiM przygotowano próbki do badań według przewidzianych recept na mieszanki MCAS i MCE. Materiały do wykonania próbek zostały pobrane bezpośrednio z miejsca wykonywania podbudowy. W pracowni TN-1 przygotowano naważki oraz wykonano próbki walcowe o średnicy 100 mm oraz 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 (rysunek 6-7). 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 6 WLB 10 firmy Wirtgen



**Rysunek 7** 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 przy wykonaniu mieszanki należy uwzględnić występowanie tych strat zwiększając odpowiednio zawartość lepiszcza w nawazce.

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



**Rysunek 8** 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 (28) dni przed przystąpieniem do wycięcia z nich próbek potrzebnych do oznaczenia modułu sztywności oraz odporności na zmęczenie. Należy zaznaczyć, że badane mieszanki są znacznie słabiej zespolone w porównaniu do typowej mieszanki MMA, dlatego szczególnie na krawędziach próbek zdarzają się czasami ubytki ziaren.



**Rysunek 9** Belki z mieszanek MCE i MCAS przeznaczone do badań modułu sztywności oraz odporności na zmęczenie

## 8 Projekty mieszanek MCAS i MCE

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 założono, że najlepszym sposobem na porównanie obu materiałów jest wykonanie ich w jednym ciągu drogi, z zastosowaniem jednakowych mineralnych materiałów wyjściowych (destrukt, cement oraz mieszanka doziarniająca) oraz różnych typów lepiszcza (emulsji asfaltowej oraz asfaltu spienionego).

Ostatecznie zastosowano obie technologie MCAS i MCE w ciągu drogi DK50, jednak różniły się one również w uziarnieniu i pochodzeniu frakcji mineralnej z uwagi na zastosowanie różnego kruszywa doziarniającego.

### **W ciągu drogi DK 3 zastosowano:**

A/ MCAS-S technologia z bazą roboczą (kruszywo doziarniające wapień 0/31,5 mm /19,21%/, cement 4%). Recepta wg załącznika 1.

### **W ciągu drogi DK 50 zastosowano**

A/ MCAS-M technologia na miejscu (kruszywo doziarniające 0/2 mm /19,21%/, cement 1%) wg załącznika 2.

B/ MCE-M (inne kruszywo doziarniające – mieszanka frakcji 0/31,5 mm –Borowce (31%)). Recepta wg załącznika 1.

Uproszczony skład wszystkich sprawdzanych wariantów mieszanek MCAS i MCE badanych w laboratorium IBDiM w 2006 r. i 2005 r. przedstawiono w tabelicy 2.

**Tablica 2.** Uproszczony skład wszystkich sprawdzanych wariantów mieszanek MCAS i MCE w 2005 i 2006 r.

Składnik	Jednostka	Warianty mieszanki MCAS			Warianty mieszanki MCE	
		2005 r. MCAS-K	2006 r. MCAS-S MCAS-S/B Skwierzyna	2006 r.. MCAS-M Mińsk Maz	2005 r. MCE-K	2006 r. MCE-M Mińsk Maz
Przeznaczenie		DK74	DK3	DK50	DK74	DK50
Rodzaj zastosowanego asfaltu lub emulsji		Nyofam 80	70/100	50/70	K-3 wolnoroz- padowa	EK3-60 wolnoroz- padowa
Uziarnienie kruszywa doziarniającego, mm		0/31,5	0/31,5	0/2	0/31,5	0/31,5
Destrukt	% (m/m)	80,0	63,5	80,0	80,0	68,3
kruszywo doziarniające	% (m/m)	20,0	36,5	20,0	20,0	31,7
Destrukt i kruszywo doziarniające	% (m/m)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Cement (32,5 MPa)	% (m/m)	<b>2,0</b>	<b>4,0</b>	<b>1,0</b>	<b>3,5</b>	<b>2,0</b>
Asfalt spieniony	% (m/m)	<b>3,0</b>	<b>2,5</b>	<b>3,0</b>	<b>1,5</b>	<b>2,0</b>
Dodatkowa woda*	% (m/m)	2,6	3,1	4,5	4,2	5,1

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

## 9 Projekt mieszanki z asfaltem spienionym MCAS-S (DK3)

Z uwagi na pilne terminy realizacji zadania w technologii z zastosowaniem asfaltu spienionego MCAS, recepta NR P040/06 wg załącznika 1 została wykonana przez czeską firmę NIEVELT-Labor Praha, która posiada doświadczenia w tego typu pracach, jak również posiada wdrożony system jakości ISO. IBDiM dokonał analizy recepty NR P040/06 przewidzianej na warstwę podbudowy. Po dokonaniu wstępnej analizy recepty nr P040/06 w zakresie zastosowanych materiałów, składu mieszanki MCAS oraz oznaczonych cech fizycznych mieszanki stwierdzono, że przedstawiona recepta jest wykonana wg czeskich standardów (tj. krzywe graniczne, zawartość poszczególnych składników oraz metody badań), co odbiega od typowych założeń. Jednak z uwagi na potwierdzoną wiarygodność firmy jej doświadczenia praktyczne oraz wstępną analizę cech mieszanki przyjęto przedstawioną receptę.

### Informacje ogólne

Symbol projektu:	P040/6
Przeznaczenie:	Podbudowa DK 3
Wykonawca:	BILFINGER BERGER INFRASTRUKTURA Sp. z o.o z Wrocławia oraz firma Baltom
Rodzaj MMA:	MCAS do warstwy podbudowy, dla ruchu od KR3 do KR6

### Składniki

Lp.	Symbol
1	Destrukt z frezowania
2	Kruszywo doziarniające 0/31,5 mm Lafarge - Bielawy
3	Cement 32,5
4	Asfalt 70/100 Nynas
5	Woda Wodociągowa



**Tablica 3.** Analizy sitowe składników mieszanki MCAS-S (DK3)

Wymiar sita #	Cement	Kruszywo doziarniające Wapień 0/31,5 mm	Destrukt
31,5			5,3
25			1,8
20			3,0
16		0,6	4,0
12,5		2,7	5,6
8		8,6	11,9
6,3		7,8	6,6
4		15,4	13,0
2		30,7	12,7
0,85	0,3	25,0	11,2
0,42	0,1	6,1	8,5
0,3	0,1	0,9	4,3
0,15	0,6	1,2	6,2
0,075	5,2	0,5	4,2
< 0,075	93,7	0,5	1,7
	100	100	100

Zawartość asfaltu w destrukcie wynosiła 5,87 %.

Składy mieszanki mineralnej oraz mineralno-asfaltowej przedstawiono w tablicy 4.

**Tablica 4.** Skład mieszanki mineralnej i mineralno-asfaltowej MCAS-S

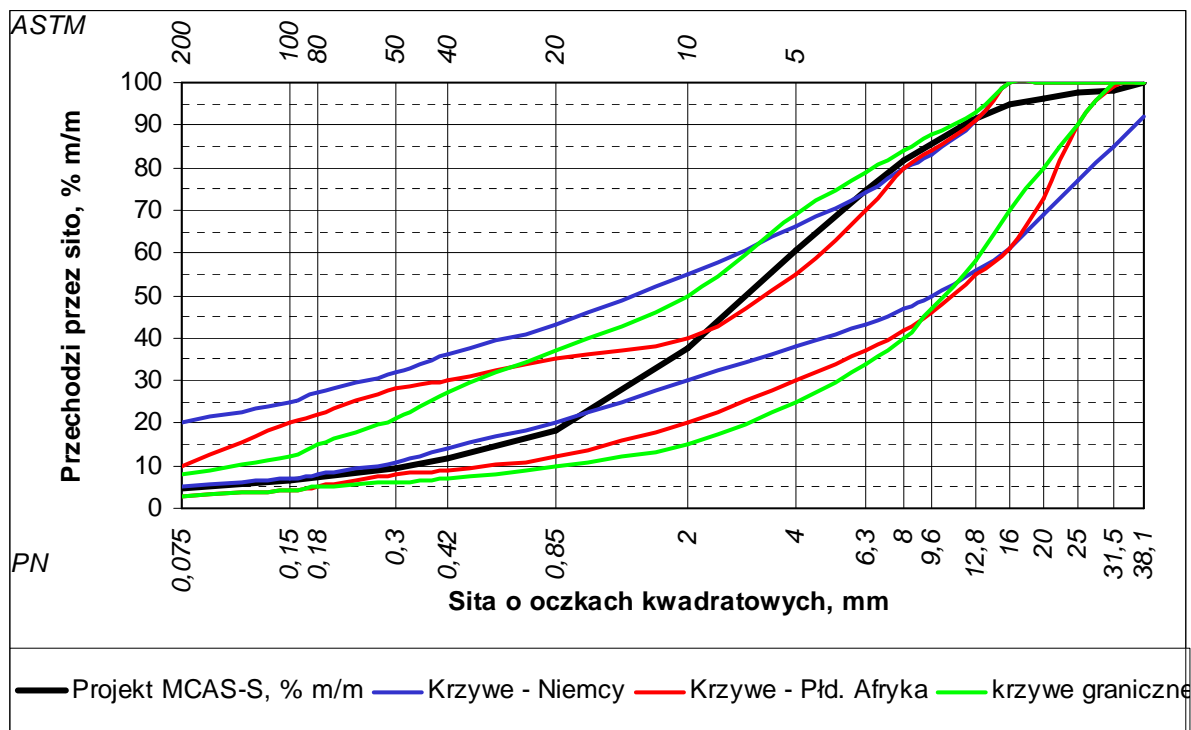
Lp.	Materiały	Mieszanka mineralna MM % (m/m)	Mieszanka mineralno-asfaltowa % (m/m)
1	Destrukt	61	59,5
2	Kruszywo doziarniające 0/31,5 mm	35	34,1
3	Cement 32,5	4	3,9
4	Asfalt spieniony	-	2,5
5	Woda	-	3,1
Łącznie, % (m/m)		-	105,1

Optymalna wilgotność 6,2% mm

Skład mieszanki mineralno-cementowej oraz rzędne krzywych granicznych podane zostały w tablicy 5. Krzywą uziarnienia wraz z różnymi krzywymi granicznymi przedstawiono na rysunku 10.

**Tablica 5.** Uziarnienie mieszanki mineralno-cementowej MCAS-S

Mieszanka mineralno-cementowa MCAS-S			Krzywa graniczna	
Wymiar sита #	Przesiew %	Odsiew %	dolna %	górna %
38,1		100,0	100	100
31,5	1,9	98,1	100	100
25	0,6	97,5	90	100
20	1,1	96,5	80	100
16	1,8	94,7	70	100
12,5	3,6	91,1	58	93
8	9,4	81,7	40	84
6,3	7,1	74,6	35	78
4	13,9	60,7	25	68
2	23,2	37,5	15	50
0,85	19,2	18,3	10	37
0,42	6,7	11,6	8	28
0,3	2,1	9,6	5	19
0,15	2,9	6,6	4	12
0,075	2,0	4,6	3	8
< 0,075	4,6			
Suma	100,0	-	-	-

**Rysunek 10** Krzywa uziarnienia mieszanki mineralno-cementowej do technologii MCAS-S

## 10 Projekt mieszanki z asfaltem spienionym MCAS-M (DK50)

Obie mieszanki MCE oraz MCAS miały zostać wykonane w jednym ciągu drogi nr DK 50, dlatego podstawowe materiały wykorzystane przy projektowaniu tych recept powinny być identyczne z wyjątkiem lepiszcza asfaltowego jednak z uwagi na specyfikę mieszanki MCAS zastosowano w niej kruszywo doziarniające drobne o frakcji 0/2 mm. Natomiast w mieszance MCE zastosowano kruszywo doziarniające grube o frakcji 0/31,5 mm. Wykonano mieszankę MCAS z asfaltem spienionym z zastosowaniem polskiego asfaltu 50/70 z Orlen Asfalt, Płock. Chociaż w trakcie prób spieniania, wykonywanych w mobilnym laboratorium WLB 10 firmy Wirtgen, parametry spieniania kształtowały się na dolnym poziomie warunków dopuszczalnych, to podniesienie temperatury asfaltu do 180°C zdaniem specjalistów z Płd. Afryki pozwala na zastosowanie tego asfaltu. Dane dotyczące wcześniejszych prób spieniania zawiera Załącznik 1, sprawozdanie TN-236, część II.

Uwzględniając powyższe zastrzeżenia oraz niedostępność na polskim rynku autocystern z systemem grzewczym pozwalającym utrzymać temperaturę transportowanego asfaltu w granicach  $170 \pm 10^{\circ}\text{C}$  postanowiono podgrzewać asfalt na wytwórni mas bitumicznych do uzyskania odpowiedniej temperatury.

Dodatkowe informacje o projekcie zawiera załącznik 2.

### Informacje ogólne

Symbol projektu:	Projekt pilotażowy MCAS-M
Przeznaczenie:	Podbudowa DK 50
Wykonawca:	PBDiM z Mińska Mazowieckiego przy współpracy z Loudon International z Afryki Południowej
Rodzaj MMA:	MCAS do warstwy podbudowy, dla ruchu od KR3 do KR6

### Składniki

Lp.	Symbol
1	Destrukt z frezowania
2	Kruszywo doziarniające 0/2 mm
3	Cement Portl. 32,5
4	Asfalt 50/70
5	Woda - wodociągowa

**Tablica 6.** Analizy sitowe składników mieszanki MCAS-M DK50

Wymiar sita #	Kruszywo doziarniające 0/2 mm	Destrukt	Destrukt MC
63	0,0	0,0	11,5
31,5	0,0	0,0	2,8
25	0,0	0,0	1,8
20	0,0	1,5	2,2
16	0,0	10,3	9,3
12,5	0,0	17,8	8,7
8	0,0	9,8	5,4
6,3	0,0	9,9	5,6
4	0,3	13,7	7,3
2	18,5	14,8	6,6

0,85	29,0	10,5	5,1
0,42	13,6	4,2	4,3
0,3	5,3	1,3	3,6
0,15	9,8	1,8	2,7
0,075	8,8	1,8	8,0
< 0,075	14,7	2,6	15,1
	100	100	100

Składy mieszanki mineralnej oraz mineralno-asfaltowej przedstawiono w tablicy 7.

**Tablica 7.** Skład mieszanki mineralnej i mineralno-asfaltowej MCAS-M

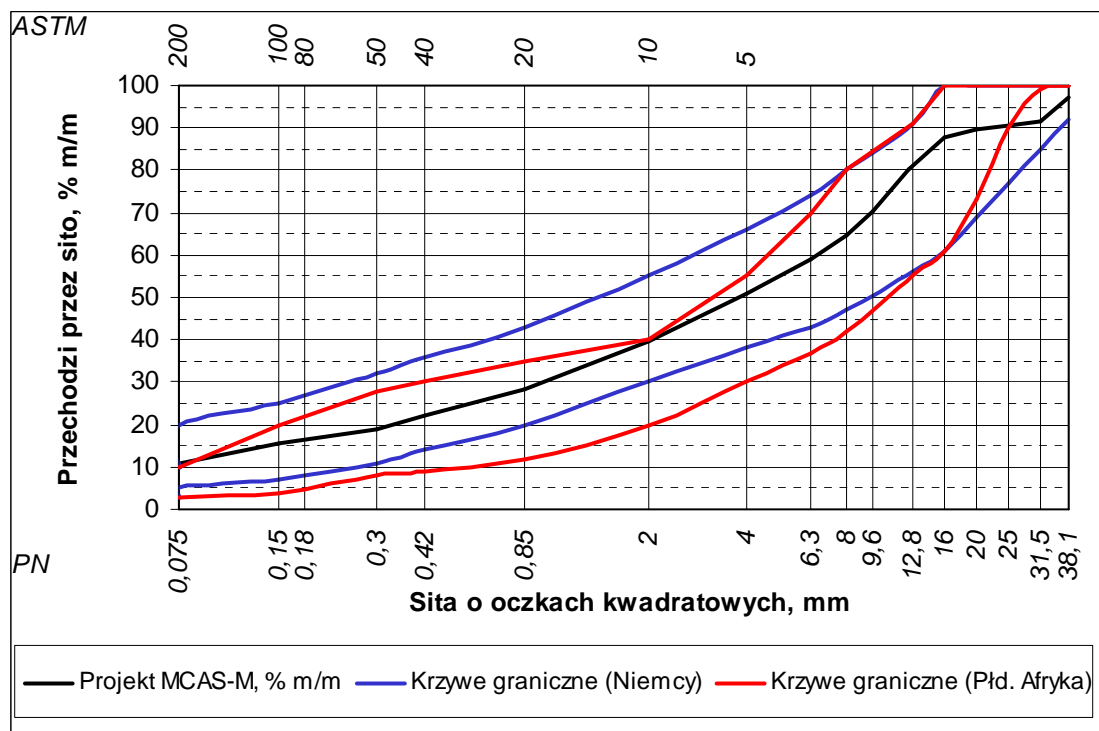
Lp.	Materiały	Mieszanka mineralna MM % (m/m)	Mieszanka mineralno-asfaltowa % (m/m)
1	Destrukt w tym 48%	32	30,8
2	Destrukt MC	48	46,1
3	Kruszywo doziarniające 0/2 mm	20	19,2
4	Cement 32,5	-	1,0
5	Asfalt spieniony	-	2,9
	Woda	-	4,5
	Łącznie, % (m/m)	-	104,5

Optymalna wilgotność 6,1% mm

Skład mieszanki mineralno-cementowej oraz rzędne krzywych granicznych podane są w tablicy 8. Krzywą uziarnienia wraz z krzywymi granicznymi przedstawiono na rys. 11.

**Tablica 8.** Uziarnienie mieszanki mineralno-cementowej MCAS-M

Mieszanka mineralno-cementowa MCAS-M			Krzywa graniczna	
Wymiar sita #	Przesiew %	Odsiew %	dolna %	górna %
38,1		100,0		
31,5	8,3	91,7	100	100
25	1,3	90,4	87	100
20	0,9	89,5	76	100
16	1,5	88,0	66	93
12,5	7,8	80,2	57	86
9,6	9,9	70,3	42	71
8	5,7	64,6	36	64
6,3	5,9	58,7	27	53
4	7,9	50,8	19	40
2	11,2	39,6	12	28
0,85	11,4	28,2	8	20
0,42	6,1	22,1	6	17
0,3	3,1	19,0	5	13
0,15	3,6	15,4	5	12
0,075	4,4	11,0	4	8
< 0,075	11,0			
	100			



**Rysunek 11** Krzywa uziarnienia mieszanki mineralno-cementowej do technologii MCAS-M

## 11 Projekt mieszanki typu MCE-M (DK50)

Szczegółowa recepta nr 1/MCE/2006 przedstawiona została w załączniku 3. Podstawowym materiałem do wykonania tej mieszanki był destruk pochodzący z frezowania istniejącej nawierzchni, jego skład przedstawiony został w tabelicy 9.

### Informacje ogólne

Symbol projektu:	MCE Nr REC 1/MCE/2006
Przeznaczenie:	Podbudowa DK 50
Wykonawca:	PBDiM Mińsk Mazowiecki
Rodzaj MMA:	MCE31,5 mm do warstwy podbudowy, dla ruchu od KR3 do KR6
Podstawa projektu:	Zeszyt 61- IBDiM

### Składniki

Lp.	Symbol	Rodzaj	Materiał	Pochodzenie
1	Destruk	frezowany		
2	Kruszywo doziarniające 0/31,5 mm	grys	37/ks/06	Borowce
3	Cement 32,5			Ożarów
4	Emulsja kationowa wolnorozpadowa EK3-60		AT/2003-04-1535	Marcelin
5	Woda			Wodociągowa

**Tablica 9.** Uziarnienie destruktu z frezowanej nawierzchni drogi DK 50

<b>Destrukt z frezowania</b>	
Wymiar sita #	Przesiew %
63,0	100
31,5	99,6
25	98,2
20,0	95,1
16,0	90,8
12,8	83,6
8,0	62,0
6,3	51,0
4,0	34,1
2,0	18,7
0,85	8,1
0,42	3,8
0,30	2,4
0,15	0,9
0,075	0,2
< 0,075	-
Suma	100,0

Zawartość asfaltu w destrukcie wynosiła 6,1 %. Jako materiał doziarniający użyto kruszywo 0/31 mm z Bobrowiec o uziarnieniu wg tablicy 10.

**Tablica 10.** Uziarnienie kruszywa doziarniającego 0/31 mm, Bobrowiec

<b>Kruszywo 0/31 Bobrowiec</b>	
Wymiar sita #	Przesiew %
63,0	100
31,5	98,4
25	88,0
20,0	77,1
16,0	59,6
12,8	50,9
8,0	39,2
6,3	38,9
4,0	34,9
2,0	30,8
0,85	22,2
0,42	13,6
0,30	9,6
0,15	4,3
0,075	2,9
< 0,075	-
Suma	100,0

Skład mieszanki mineralno-cementowej oraz rzędne krzywych granicznych podane są w tablicy 12. Krzywą uziarnienia wraz z krzywymi granicznymi przedstawiono na rysunku 12.

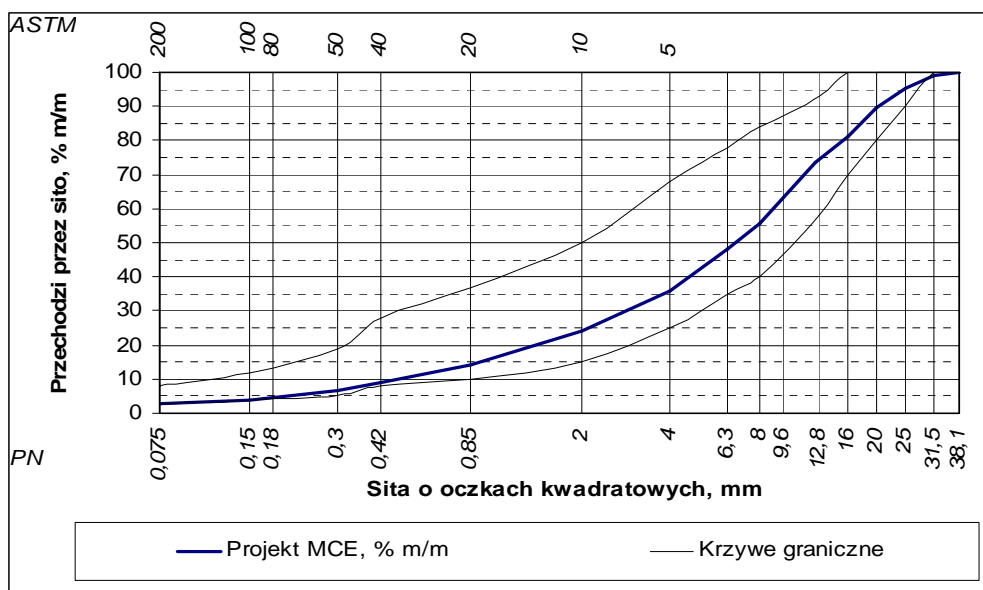
Składy mieszanki mineralnej oraz mineralno-emulsyjnej przedstawiono w tablicy 11.

**Tablica 11.** Skład mieszanki mineralnej i mineralno-emulsyjnej MCE 31,5 mm

Lp.	Materiały	Mieszanka mineralna MM % (m/m)	Mieszanka mineralno-asfaltowa % (m/m)
1	Destrukt	67	65,7
2	Kruszywo doziarniające 0/31,5 mm	31	30,4
3	Cement 32,5	2	2,0
4	Emulsja kationowa wolnorozpadowa EK3-60	-	2,0
5	Woda	-	5,1
Łącznie, % (m/m)		-	105,1

**Tablica 12.** Uziarnienie nowej mieszanki mineralno-cementowej do technologii MCE

Wymiar sita #	Mieszanka mineralno-cementowej do MCE		Krzywa graniczna	
	Przesiew %	Odsiew %	dolna %	górna %
38,1		100,0	100	100
31,5	0,8	99,2	100	100
25	4,2	95,1	90	100
20	5,5	89,6	80	100
16	8,3	81,3	70	100
12,5	7,5	73,8	58	93
8	18,1	55,7	40	84
6,3	7,5	48,2	35	78
4	12,6	35,7	25	68
2	11,6	24,1	15	50
0,85	9,8	14,3	10	37
0,42	5,5	8,8	8	28
0,3	2,2	6,6	5	19
0,15	2,6	3,9	4	12
0,075	0,9	3,0	3	8
< 0,075	3,0			
Suma	100,0		-	-



**Rysunek 12** Krzywa uziarnienia mieszanki mineralno-cementowej do technologii MCE

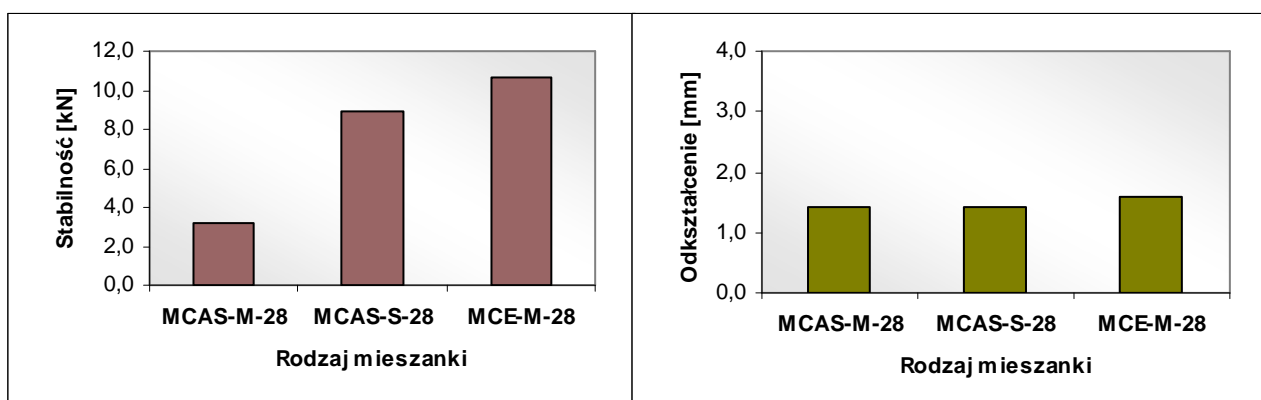
## 12 Wyniki badań

### 12.1 Stabilność

W tablicy 13 (rys. 13) zestawione zostały wyniki stabilności i odkształcenia wg Marshalla, oznaczone po 28 dniach przechowywania próbek z MCAS i MCE.

**Tablica 13.** Stabilność i odkształcenie wg Marshalla po 28 dniach MCAS i MCE

Próbki	Gęstość strukturalna, g/cm <sup>3</sup>	Stabilność, kN	Odkształcenie, mm	Sztywność
<b>po 28 dniach</b>				
<b>MCAS-M-28</b>	2,206	3,2	1,4	2,2
<b>MCAS-S-28</b>	2,192	8,9	1,4	6,2
<b>MCE-M-28</b>	2,275	10,7	1,6	6,7



**Rysunek 13** Stabilność i odkształcenie wg Marshalla po 28 dniach w zależności od rodzaju mieszanki

### 12.2 Rozciąganie pośrednie

Trwałość próbek, tj. odporność na niszczące działanie wody została oceniona na podstawie wskaźnika odporności TSR. Badania zostały przeprowadzone po 7 i 28 dniach przechowywania próbek wg PN-EN 12697-12:2004 (U) – metoda zmodyfikowana.

W tablicach 14-15 (rys. 14-15) przedstawiono wartości wytrzymałości na rozciąganie pośrednie próbek suchych i próbek pielęgnowanych - nasyconych.

**Tablica 14.** Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie próbek suchych i pielęgnowanych MCAS-S (Skwierzyna – próbki po 7 i 28 dniach)

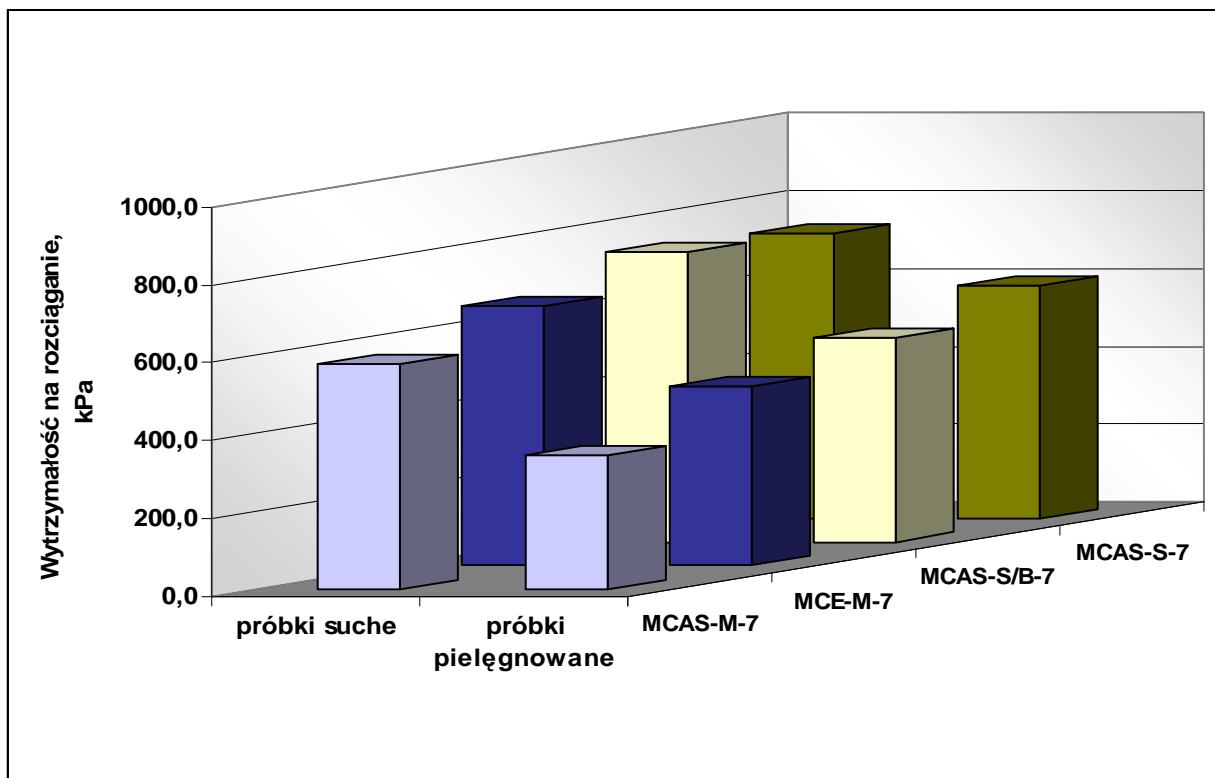
Próbki	Stan próbek	Wysokość próbki, mm	Odkształcenie, mm		Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie, kPa	
			Pojedyncze	Średnia	Pojedyncze	Średnia
<b>po 7 dniach</b>						
<b>MCAS-/BS-7 z Baltomu</b>	Próbki nasycone (pielęgnowane)	63,2	1,10	1,15	555	<b>525,3</b>
		63,0	1,30		496	
	Próbki suche	63,2	0,90	1,2	675	<b>745,6</b>



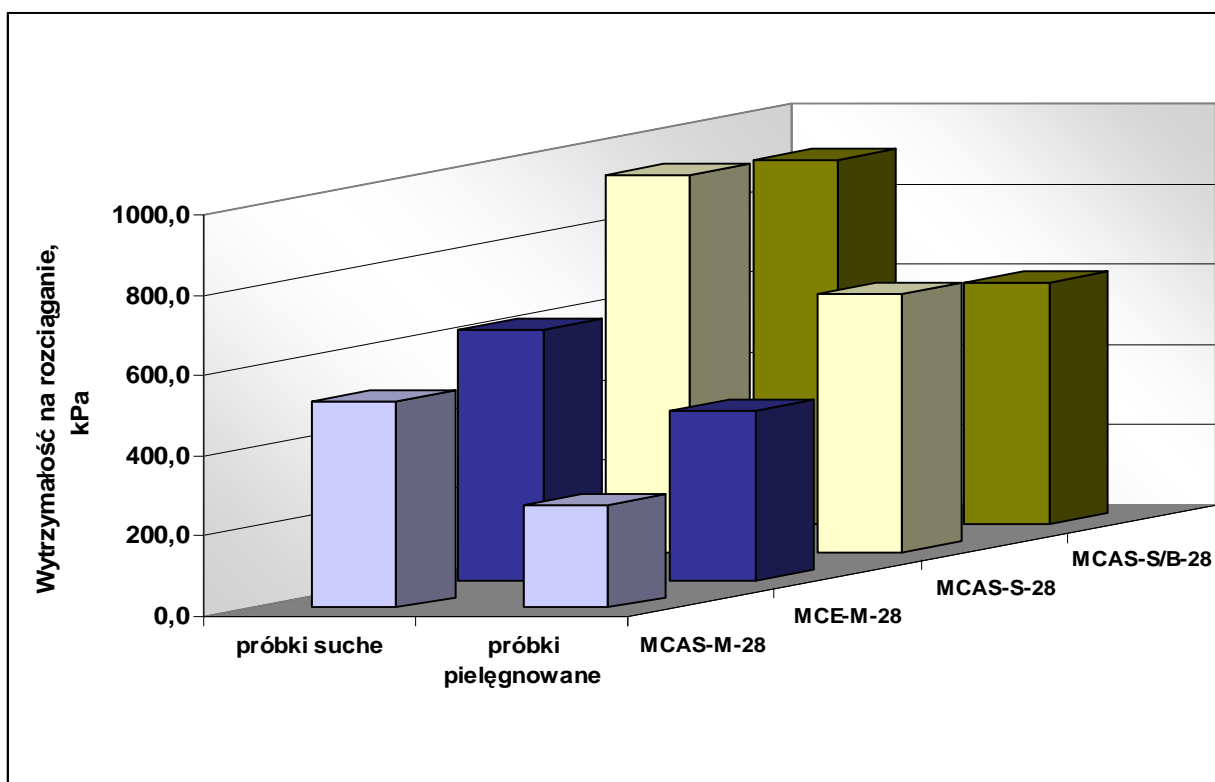
		63,1	1,40		816	
<b>MCAS-S-7</b> wykonane w IBDiM	Próbki nasycone (pielęgnowane)	63,3	1,0	0,95	573,0	<b>598,6</b>
		61,8	0,9		624,2	
	Próbki suche	61,3	0,9	0,9	713,4	<b>732,2</b>
		62,3	0,9		751,0	
<b>po 28 dniach</b>						
<b>MCAS-S/B-28</b> z Baltomu	Próbki nasycone (pielęgnowane)	63,2	1,1	1,1	606	<b>603,6</b>
		63,8	1,3		601	
	Próbki suche	62,1	1,1	1,2	913	<b>908,7</b>
		62,6	1,1		904	
<b>MCAS-S-28</b> wykonane w IBDiM	Próbki nasycone (pielęgnowane)	62,3	0,90	0,8	583,9	<b>646,0</b>
		62	0,70		708,1	
	Próbki suche	62	1,00	1,0	950,9	<b>940,8</b>
		62	1,00		930,7	

**Tablica 15.** Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie próbek suchych i pielęgnowanych MCAS-M i MCE-M (Mińsk Mazowiecki – próbki po 7 i 28 dniach)

Próbki	Stan próbek	Wysokość próbki, mm	Odkształcenie, mm		Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie, kPa	
			Pojedyncze	Średnia	Pojedyncze	Średnia
<b>po 7 dniach</b>						
<b>MCAS-M-7</b>	Próbki nasycone (pielęgnowane)	60,4	0,70	0,7	361,7	<b>342,3</b>
		59,9	0,70		323,0	
	Próbki suche	60,5	0,60	0,65	639,6	<b>579,9</b>
		60,0	0,70		520,1	
<b>MCE-M-7</b>	Próbki nasycone (pielęgnowane)	58,6	0,60	0,75	449,5	<b>461,6</b>
		59,6	0,90		473,6	
	Próbki suche	59,2	0,80	0,8	720,4	<b>668,5</b>
		59,0	0,80		616,6	
<b>po 28 dniach</b>						
<b>MCAS-M-28</b>	Próbki nasycone (pielęgnowane)	60,9	0,80	0,75	329,1	<b>256,9</b>
		61,1	0,70		184,7	
	Próbki suche	61,3	0,70	0,65	592,7	<b>512,5</b>
		60,9	0,60		432,3	
<b>MCE-M-28</b>	Próbki nasycone (pielęgnowane)	59,1	0,50	0,5	424,5	<b>423,1</b>
		59,5	0,50		421,7	
	Próbki suche	59,1	0,60	0,55	636,8	<b>625,6</b>
		59,2	0,50		614,5	



**Rysunek 14** Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie po 7 dniach w zależności od rodzaju mieszanki



**Rysunek 15** Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie po 28 dniach w zależności od rodzaju mieszanki

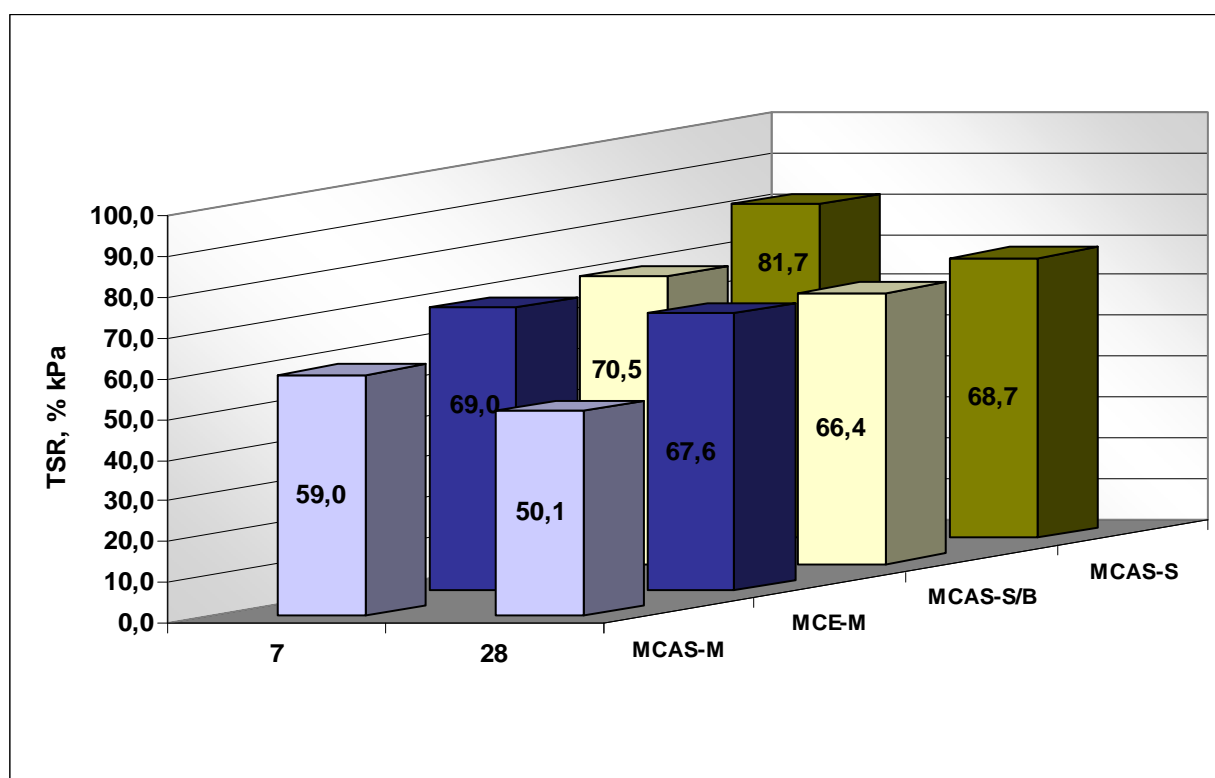
Wskaźnik odporności mieszanki na działanie wody TSR oblicza się jako iloraz wytrzymałości na rozciąganie pośrednie próbek pielęgnowanych w wodzie do

wytrzymałości próbek suchych. Wskaźnik odporności dla mieszanki mineralno-asfaltowej podano w tablicy 16 (rys. 16).

**Tablica 16.** Wskaźnik odporności na działanie wody TSR

Numer próbki	ITS <sub>N</sub> , kPa Próbki nasycone (pielęgnowane)	ITS <sub>S</sub> , kPa Próbki suche	TSR, %
<b>po 7 dniach</b>			
MCAS-S/B-7 z Baltomu	525,3	745,6	<b>70,5</b>
MCAS-S-7 wykonane w IBDiM	598,6	732,2	<b>81,7</b>
MCAS-M-7	342,3	579,9	<b>59,0</b>
MCE-M-7	461,6	668,5	<b>69,0</b>
<b>po 28 dniach</b>			
MCAS-S/B-28 z Baltomu	603,6	908,7	<b>66,4</b>
MCAS-S-28 wykonane w IBDiM	646,0	940,8	<b>68,7</b>
MCAS-M-28	256,9	512,5	<b>50,1</b>
MCE-M-28	423,1	625,6	<b>67,6</b>

Oznaczona wartość wskaźnika TSR wyniosła od 50,1% do 81,7%. Niektóre źródła podają, że obliczony wskaźnik powinien być  $\geq 70\%$  [6], [7].



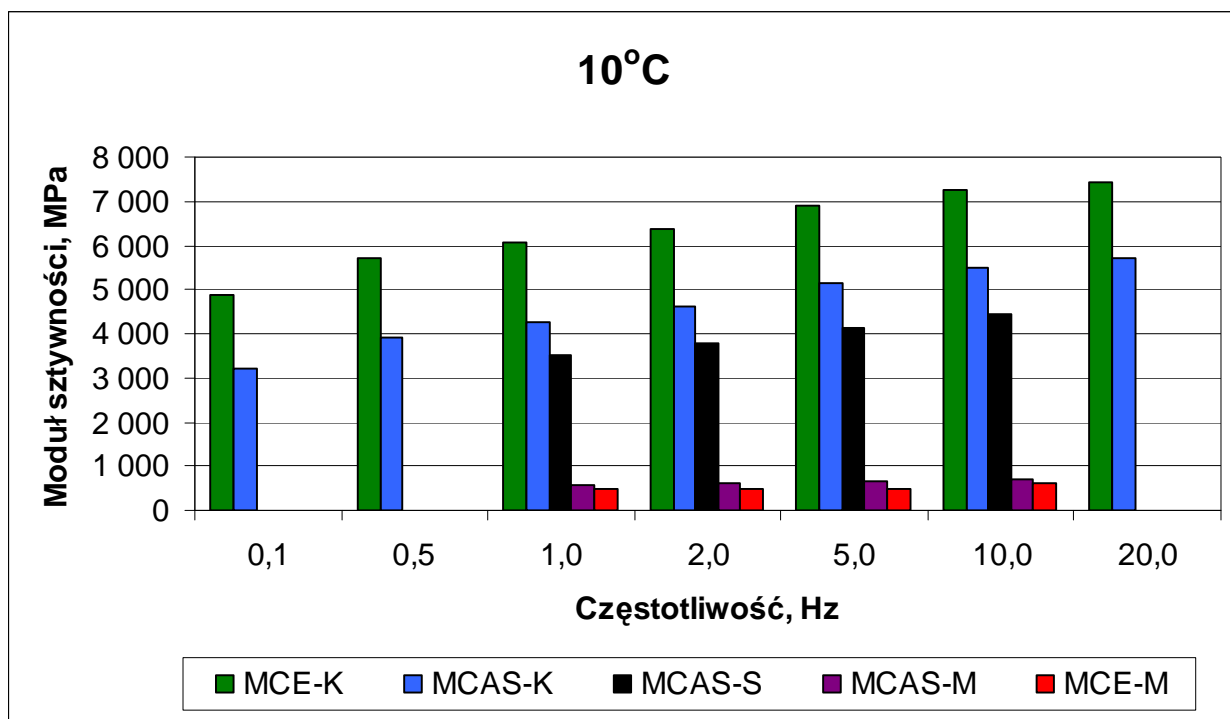
**Rysunek 16** Wskaźnik TSR po 7 i 28 dniach w zależności od rodzaju mieszanki

**12.3 Zespolony moduł sztywności**

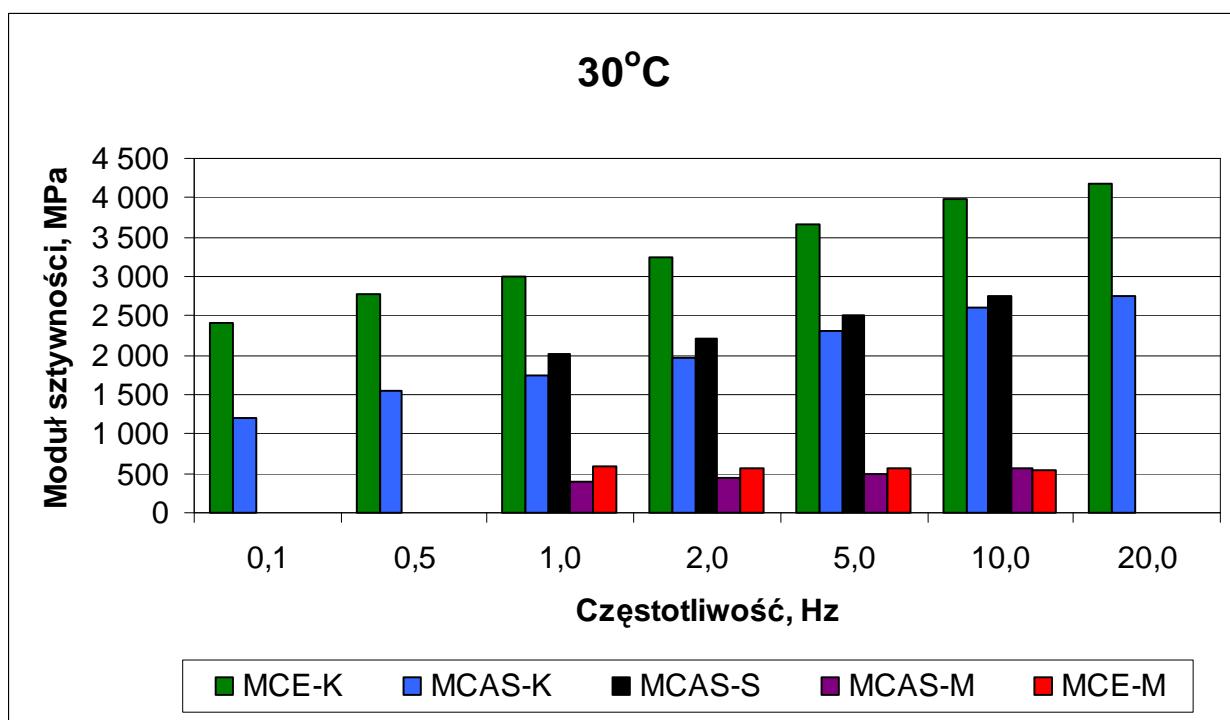
Do badań wykorzystano próbki, które następnie użyto w badaniach zmęczeniowych. W tablicy 17 przedstawiono wyniki badań modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego. Na rysunkach 17-22 przedstawiono graficzne porównanie wyników.

**Tablica 17.** Wyniki badań zespolonego modułu sztywności mieszanek MCE i MCAS w zależności od temperatury i częstotliwości obciążenia

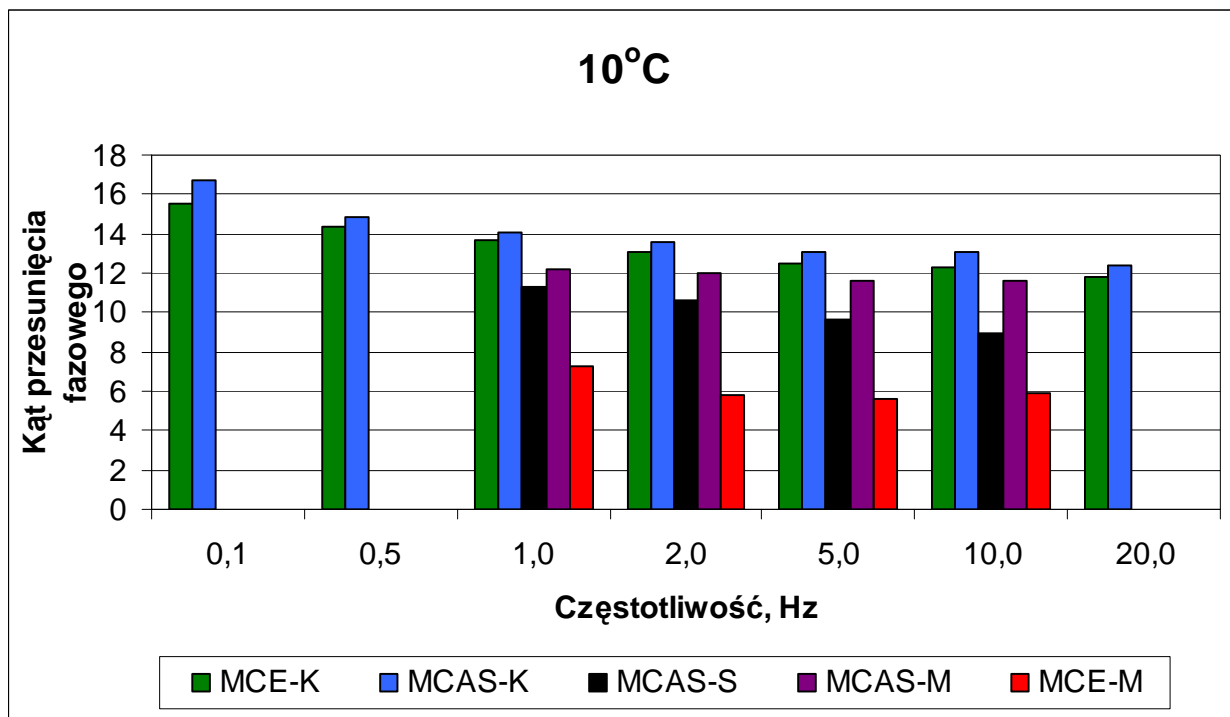
Mieszanka	Moduł sztywności, MPa							Kąt przesunięcia fazowego, °						
	Częstotliwość, Hz													
	0,1	0,5	1	2	5	10	20	0,1	0,5	1	2	5	10	20
Temperatura 0°C														
MCAS-S	-	-	5487	5732	6026	6282	-	-	-	7,2	6,7	6,2	5,9	-
MCAS-M	-	-	1063	1104	1165	1221	-	-	-	10,3	9,9	9,6	9,3	-
MCE-M	-	-	677	643	629	610	-	-	-	10,7	10,4	10,3	10,5	-
Temperatura 10°C														
MCE-K	4901	5699	6048	6388	6893	7244	7410	15,5	14,4	13,7	13,1	12,5	12,3	11,8
MCAS-K	3203	3931	4272	4621	5124	5509	5731	16,7	14,9	14,1	13,6	13,1	13,1	12,4
MCAS-S	-	-	3500	3764	4117	4425	-	-	-	11,3	10,6	9,7	9,0	-
MCAS-M	-	-	570	619	664	702	-	-	-	12,2	12,0	11,6	11,6	-
MCE-M	-	-	476	485	489	620	-	-	-	7,3	5,8	5,6	5,9	-
Temperatura 20°C														
MCE-K	2719	3782	4098	4428	4939	5307	5536	20,0	20,3	19,7	19,2	18,4	18,1	17,3
MCAS-K	1854	2410	2686	2995	3446	3809	4039	21,2	20,2	19,4	18,9	18,2	17,9	17,0
MCAS-S	-	-	2808	3079	3452	3756	-	-	-	14,3	13,7	12,8	11,9	-
MCAS-M	-	-	804	853	928	1023	-	-	-	14,4	13,5	13,2	12,7	-
MCE-M	-	-	528	519	538	525	-	-	-	12,1	11,6	11,2	11,0	-
Temperatura 30°C														
MCE-K	2400	2768	2999	3235	3663	3994	4183	16,2	19,0	19,8	20,4	20,6	20,7	20,4
MCAS-K	1210	1559	1747	1964	2315	2606	2760	21,4	22,5	22,3	22,2	22,0	21,9	20,9
MCAS-S	-	-	2025	2215	2509	2761	-	-	-	15,3	15,3	15,1	14,6	-
MCAS-M	-	-	404	438	495	554	-	-	-	17,0	16,8	16,7	15,8	-
MCE-M	-	-	593	568	570	552	-	-	-	11,8	11,8	11,7	11,4	-
Temperatura 40°C														
MCE-K	2252	2331	2487	2507	2856	3097	3198	13,1	16,0	17,6	18,5	20,4	21,4	21,8
MCAS-K	944	1138	1250	1388	1646	1858	1929	19,5	22,0	22,7	23,5	24,0	24,4	23,6



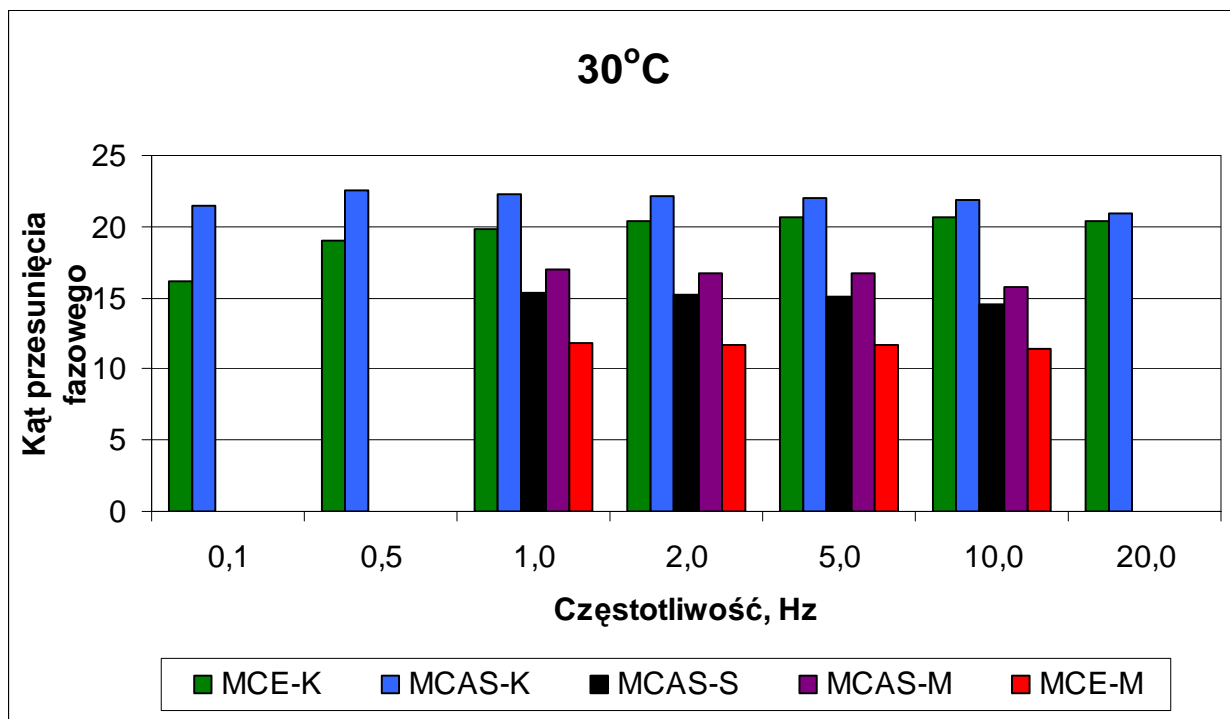
Rysunek 17 Porównanie modułów sztywności w temperaturze 10°C



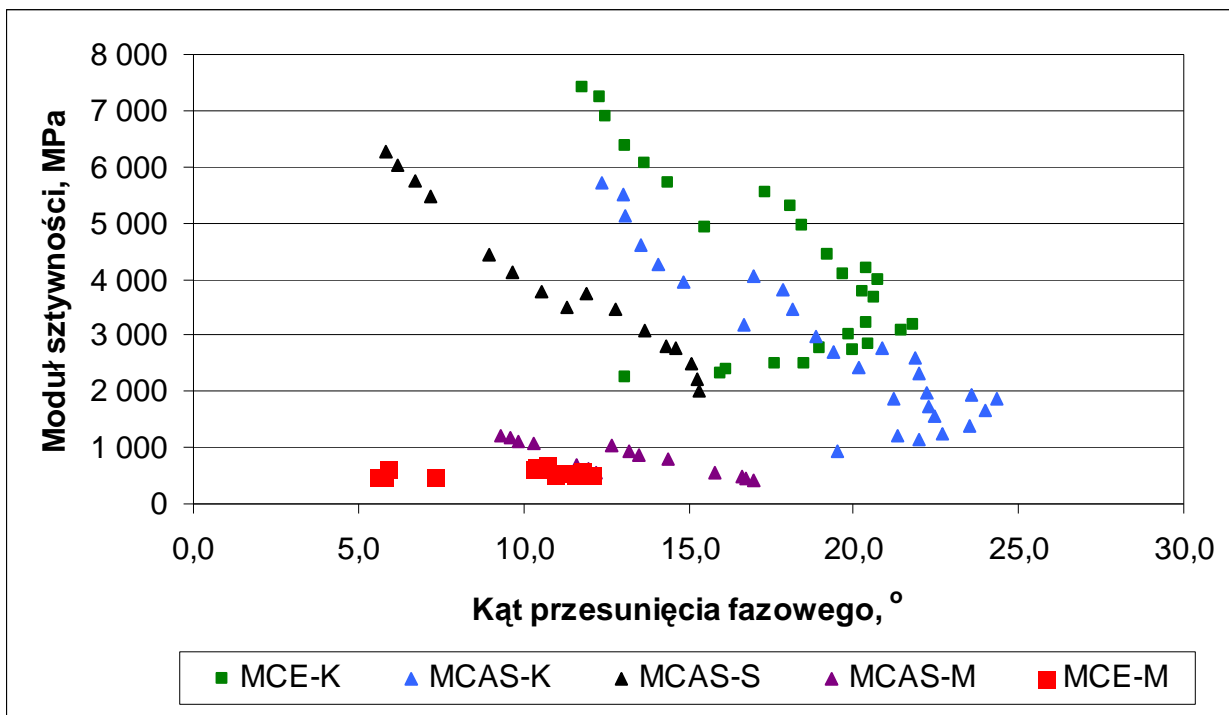
Rysunek 18 Porównanie modułów sztywności w temperaturze 30°C



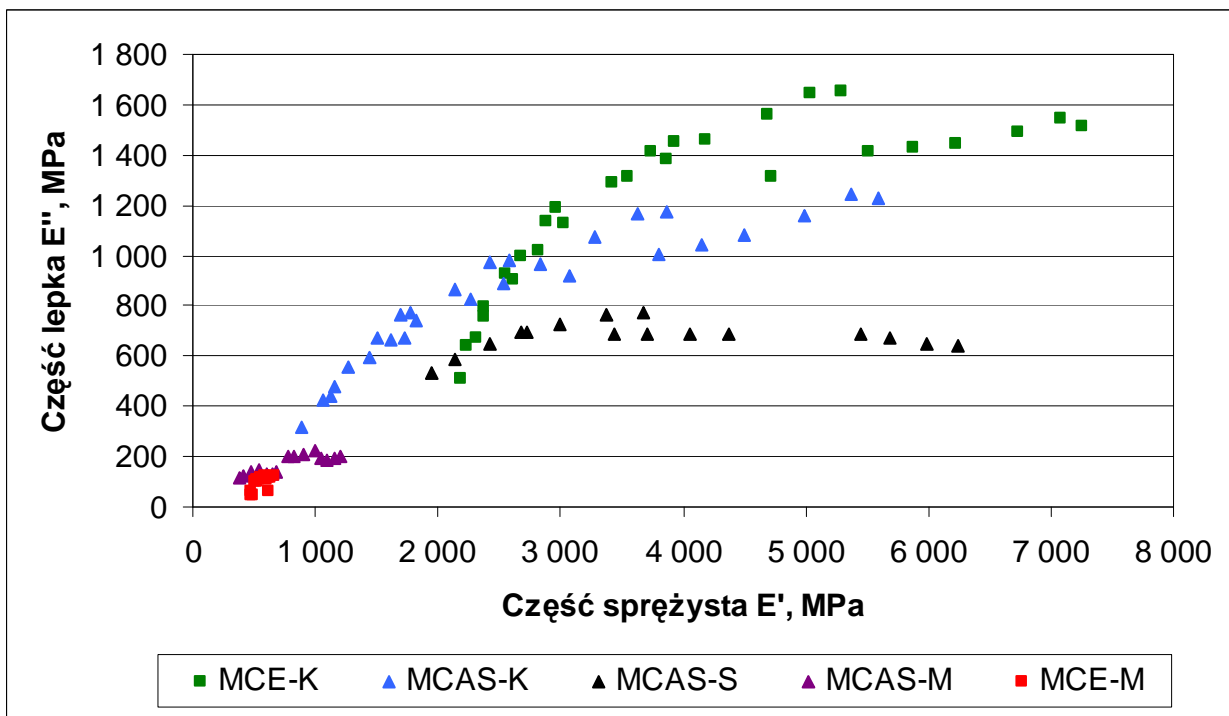
Rysunek 19 Porównanie kąta przesunięcia fazowego w temperaturze 10°C



Rysunek 20 Porównanie kąta przesunięcia fazowego w temperaturze 30°C



Rysunek 21 Wykres Blacka mieszanek MCAS i MCE



Rysunek 22 Wykres Cole-Cole mieszanek MCAS i MCE



### 12.4 Trwałość zmęczeniowa

Do badań przygotowano próbki belkowe z poszczególnych mieszanek. Wyniki badań poszczególnych próbek przedstawiono w tablicach 18 i 19. Rysunki 23 i 24 przedstawiają przebieg badań zmęczeniowych poszczególnych próbek.

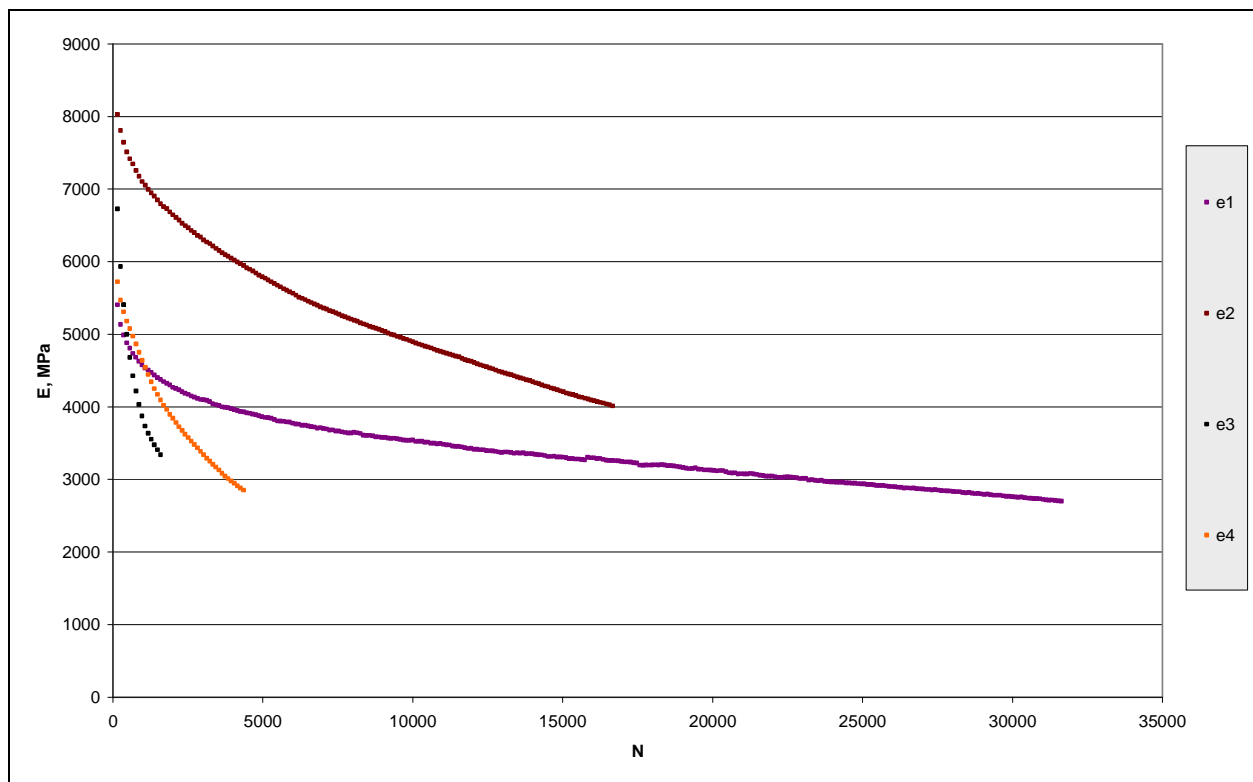
**Tablica 18.** Wyniki badań zmęczenia mieszanki MCE-K

<b>Próbka</b>	<b>h</b>	<b>b</b>	<b>L</b>	<b><math>\epsilon</math></b>	<b>N</b>
	[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

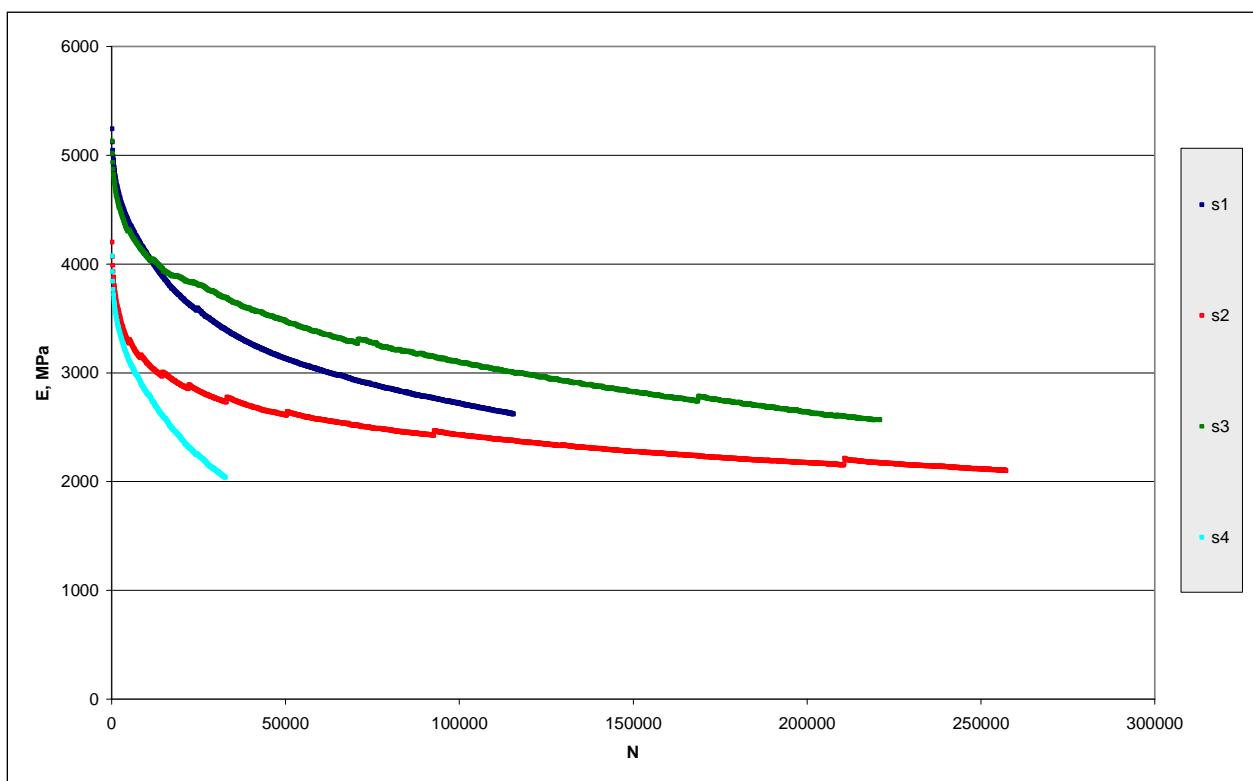
Oznaczenia: h – wysokość, b – szerokość, L – długość próbki,  $\epsilon$  – mikroodkształcenie, N – trwałość zmęczeniowa,

**Tablica 19.** Wyniki badań zmęczenia mieszanki MCAS-K

<b>Próbka</b>	<b>h</b>	<b>b</b>	<b>L</b>	<b><math>\epsilon</math></b>	<b>N</b>
	[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 23 Przebieg badania zmęczenia mieszanki MCE-K



Rysunek 24 Przebieg badania zmęczenia mieszanki MCAS-K

Tablica 20. Wyniki badań zmęczenia mieszanki MCAS-M

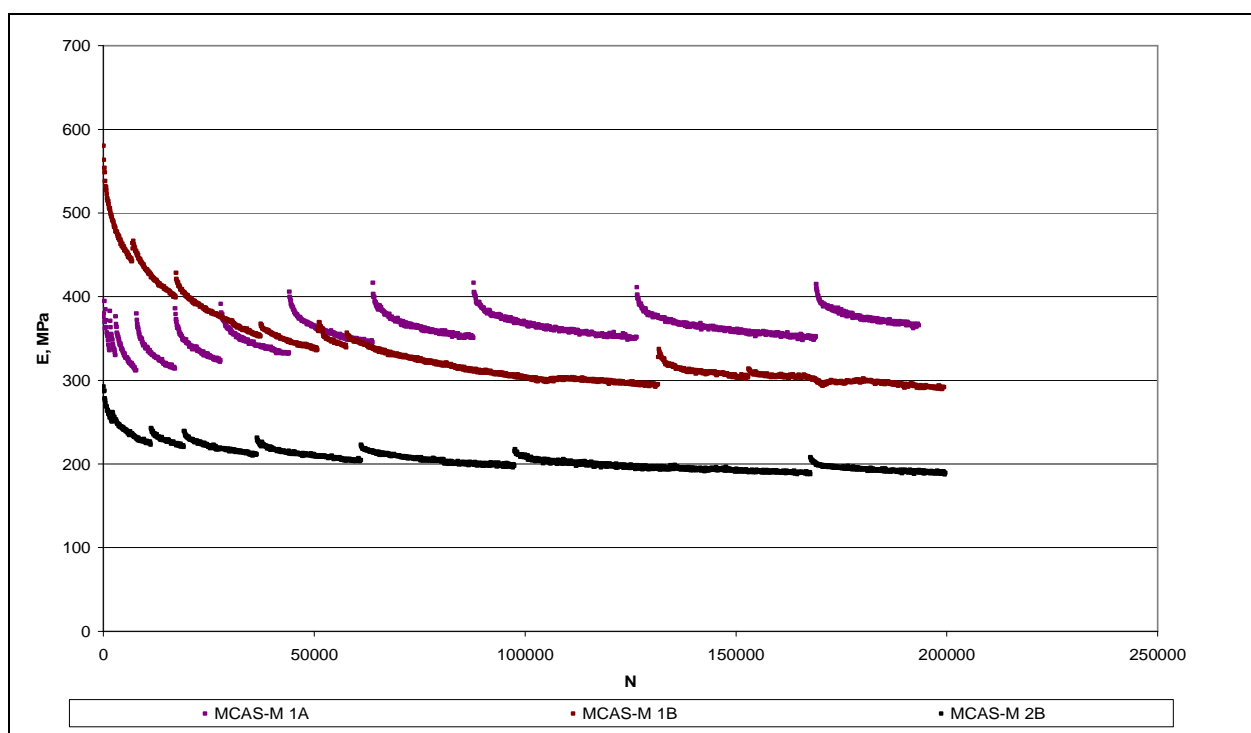
Próbka	h	b	L	$\epsilon$	N
	[mm]	[mm]	[mm]	[ $\mu\text{mm/mm}$ ]	[-]
1a	50,1	63,2	380	150	-
1b	50,0	63,3	380	150	200000
2a	49,9	63,3	380	150	-
2b	50,3	63,5	380	150	-

Oznaczenia: h – wysokość, b – szerokość, L – długość próbki,  
 $\epsilon$  – mikroodkształcenie, N – trwałość zmęczeniowa

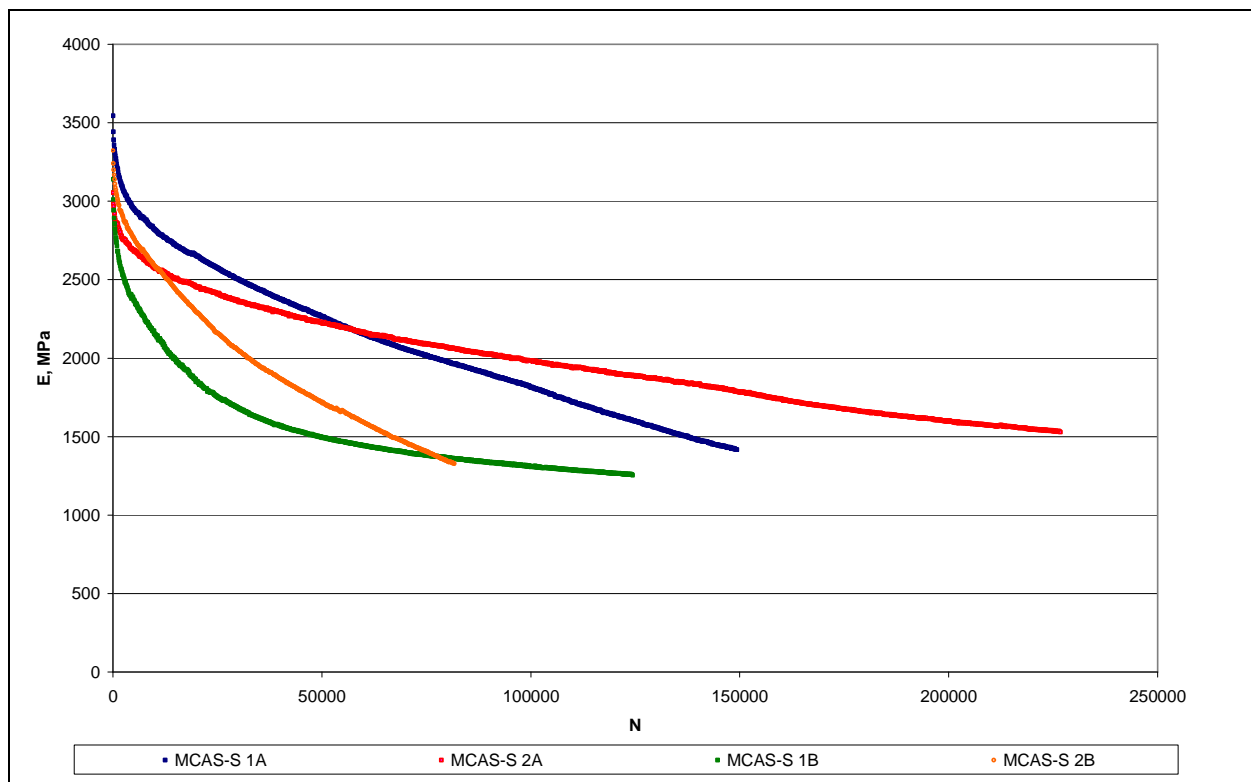
Tablica 21. Wyniki badań zmęczenia mieszanki MCAS-S

Próbka	h	b	L	$\epsilon$	N
	[mm]	[mm]	[mm]	[ $\mu\text{mm/mm}$ ]	[-]
1a	50,2	63,6	380	150	104499
1b	50,3	63,5	380	150	227798
2a	50,1	63,4	380	150	39800
2b	50,2	63,5	380	150	54300

Oznaczenia: h – wysokość, b – szerokość, L – długość próbki,  
 $\epsilon$  – mikroodkształcenie, N – trwałość zmęczeniowa,



Rysunek 25 Przebieg badania zmęczenia mieszanki MCAS-M  
 35/49



**Rysunek 26** Przebieg badania zmęczenia mieszanki MCAS-S

### 12.5 Badanie ugięć – ocena nośności

Badania ugięciomierzem FWD zostały przeprowadzone na remontowanym odcinku drogi DK50 leżącym pomiędzy Mińskiem Mazowieckim a Łochowem. Remontowany tam odcinek został wykonany z zastosowaniem odmiennych technologii wykonywania warstwy podbudowy z wykorzystaniem destruktu ze starej nawierzchni i warstw leżących pod nią. Pierwszy zbadany odcinek (od km 246+350 do 247+400) wykonano z podbudową z mieszanki typu MCE, natomiast na drugim badanym odcinku (od km 247+400 do 249+435) ułożono warstwę podbudowy, pod pakiet warstw z mieszanki mineralno-asfaltowej, z mieszanki z asfaltem spienionym oraz dodatkiem cementu – MCAS.

Badania ugięciomierzem FWD wykonano dwukrotnie, latem i jesienią. Pierwszy pomiar obejmował obydwa odcinki, jednakże z powodu trwających prac budowlanych część odcinka z podbudową MCAS nie mogła zostać zbadana gdyż przygotowana była do układania warstwy wiążącej i pokryta emulsją asfaltową, natomiast odsłonięta warstwa mieszanki MCAS w skutek padającego wcześniej deszczu była nierówna i nie umożliwiała pomiaru. Z przeprowadzonych wówczas badań do dalszej analizy przyjęto pomiary wykonywane na odcinku z podbudową z MCE. Kolejne pomiary wykonano jesienią na odcinku z podbudową MCAS, na którym w okresie poprzedzającym badanie wykonawca zakończył prace remontowe układając na tym całej długości odcinka warstwę asfaltową. Tak uzyskane dane były potraktowane jako podstawa do dalszej analizy tego odcinka.

Pomiary ugięć nawierzchni ugięciomierzem dynamicznym FWD wykonano z częstotliwością co 50 m, na obu pasach ruchu:

Odcinek z podbudowa z MCE – lato 2006 (temperatura warstw asfaltowych mierzona na powierzchni wyniosła 22°C),

Odcinek z podbudową z MCAS – jesień 2006 roku ((temperatura warstw asfaltowych mierzona na powierzchni wyniosła 25C),

W tablicach 22 i 23 przedstawione są odpowiednio pomiary czasy ugięć dla pierwszego i drugiego odcinka.

Tablica 22. Pomiary ugięć na odcinku drogi z podbudowa z MCE

Pikietaż, km	Nacisk, kPa	Ugięcia na poszczególnych geofonach, $\mu\text{m}$						
		1	2	3	4	5	6	7
<b>ODCINEK OD KM 246+350 DO KM 247+350, STRONA LEWA</b>								
247+350	742	274	222	171	125	91	65	48
247+302	720	245	200	159	124	92	68	50
247+251	715	275	191	129	90	66	47	37
247+200	716	135	103	83	61	50	37	29
247+150	711	179	140	102	78	57	43	34
247+102	708	144	108	79	57	42	32	25
247+050	699	229	167	122	88	65	48	37
247+004	701	181	147	115	91	72	56	46
246+950	698	203	172	138	106	79	60	46
246+900	692	228	190	157	128	104	84	67
246+850	690	279	237	191	151	119	96	76
246+800	689	262	213	170	129	99	78	61
246+746	687	286	239	185	139	107	83	66
246+695	686	242	195	153	121	93	73	57
246+651	686	297	244	193	148	113	84	64
246+603	682	288	197	143	105	76	55	40
246+548	670	476	351	248	164	110	72	47
246+500	673	383	256	163	102	66	44	33
246+449	670	401	299	215	152	111	79	61
246+403	674	334	262	193	140	97	69	49
246+348	669	423	286	198	133	91	62	46
<b>ODCINEK OD KM 248+950 DO KM 249+950, STRONA PRAWA</b>								
246+350	686	271	207	145	99	67	48	36
246+399	683	357	243	157	95	60	40	30
246+451	682	309	247	185	136	100	76	60
246+502	684	318	239	167	109	71	46	33
246+552	678	335	261	190	132	89	62	44
246+599	678	231	155	98	64	44	30	23
246+651	675	374	271	195	141	103	74	55
246+701	677	322	264	209	159	120	89	67
246+752	678	267	226	182	141	107	81	64
246+800	675	275	228	179	135	102	77	59
246+850	668	348	275	215	169	129	100	78
246+901	674	397	305	232	173	130	100	77
246+955	675	295	243	188	142	105	79	61
247+003	674	308	236	169	120	85	61	47
247+050	678	333	236	151	98	64	44	33
247+101	681	202	160	116	83	60	44	33
247+151	682	157	125	95	71	53	40	31
247+201	680	161	115	87	65	49	38	30
247+250	677	206	161	119	87	64	47	37
247+301	678	168	140	123	103	84	69	55
247+350	677	223	181	140	106	80	59	45

Tablica 23. Pomiary ugięć na odcinku drogi z podbudową z MCAS

Pikietaż, km	Nacisk, kPa	Ugięcia na poszczególnych geofonach, $\mu\text{m}$						
		1	2	3	4	5	6	7
<b>ODCINEK OD KM 248+950 DO KM 249+950, STRONA LEWA</b>								
249+940	752	422	316	216	153	109	82	63
249+900	743	433	334	243	175	125	89	66
249+852	738	450	310	196	126	84	60	48
249+800	734	446	348	249	176	122	85	58
249+751	734	396	304	212	149	104	75	55
249+701	724	429	321	233	164	119	86	62
249+648	724	492	372	253	172	115	79	55
249+600	717	546	398	272	187	130	92	67
249+550	721	440	336	236	166	120	87	64
249+500	719	486	354	235	155	102	70	48
249+450	721	350	282	206	146	104	72	52
249+398	722	333	264	199	142	102	74	53
249+349	717	382	318	248	186	141	105	77
249+300	713	394	305	213	146	100	71	50
249+249	726	265	199	140	99	71	51	38
249+200	720	351	274	190	134	93	63	47
249+150	712	444	341	243	173	124	89	65
249+100	710	476	355	246	169	117	85	63
249+050	712	429	317	213	144	99	69	50
249+000	718	320	253	184	126	86	60	43
248+950	719	272	219	159	112	77	54	39
<b>ODCINEK OD KM 248+950 DO KM 249+950, STRONA PRAWA</b>								
248+950	722	221	173	130	93	66	46	33
249+001	722	255	200	147	111	80	58	43
249+051	712	413	309	221	159	116	84	61
249+101	715	393	305	217	154	106	78	56
249+151	708	469	367	267	192	138	100	72
249+200	710	392	302	219	161	117	85	61
249+251	715	214	164	124	91	67	50	37
249+300	706	511	362	244	172	118	82	59
249+351	711	405	310	224	167	122	91	67
249+400	713	294	225	170	127	94	69	52
249+451	715	302	231	168	122	89	64	46
249+500	706	476	382	285	211	153	110	78
249+550	708	445	356	263	195	144	107	80
249+601	710	435	326	228	161	116	84	61
249+651	707	457	337	227	154	107	74	53
249+701	704	461	359	251	177	126	92	68
249+750	711	338	294	236	185	139	104	77
249+800	709	353	277	203	143	101	70	49
249+851	712	271	201	142	100	72	53	39
249+900	713	297	245	183	137	102	78	59
249+934	706	308	237	178	138	105	79	60

Na podstawie pomiarów czaszy ugięć nawierzchni oraz danych o konstrukcji obliczono moduły sprężystości (sztywności) warstw konstrukcyjnych nawierzchni. Obliczenia wykonano programem ELMOD, wyniki zestawiono w załączniku. Wyznaczono moduły miarodajne dla obu odcinków. Proponując przyjęto jako wartość miarodajną kwantyl rzędu 0,15 wartości modułów obliczonych z wyników pomiarów na każdym pasie. Oznacza to, że 85% obliczonych dla każdego odcinka wartości jest większych od modułu miarodajnego. Obliczone moduły, w szczególności moduły sztywności pakietu warstw asfaltowych odpowiadają temperaturze pomiaru. Aby przeliczyć moduły warstw asfaltowych do temperatury równoważnej 10°C posłużono się wzorem<sup>1</sup>:

$$E_r = E_t (0,77 + 0,023 T)$$

gdzie:

$E_t$  – moduł w temperaturze pomiaru,

T – temperatura pomiaru.

Nie znane są obecnie wzory przeliczeniowe dla warstwy wykonanej z MCE i MCAS oraz podłoża gruntowego, opracowanie wzorów empirycznych wymagało by wykonania dużej ilości badań, które nie były objęte zakresem niniejszej pracy, dlatego nie zmieniono wartości modułów sztywności przy analizie wartości dla temperatury równoważnej, może to spowodować rozbieżność w odniesieniu do konkretnych wartości, ale nie zmienia uwidocznionych tendencji z proporcji.

W tablicach 24 i 25 przedstawione są wyniki modułów sprężystości wyliczone dla temperatury badania, natomiast w tablicach 26 i 27 przedstawione są wyniki sprowadzone do temperatury równoważnej. Do celów obliczeniowych konstrukcję nawierzchni podzielono na trzy warstwy: E1 – Warstwa składająca się z pakietu warstw asfaltowych, E2 – warstwa podbudowy z MCE lub MCAS oraz E3 – warstwa podłoża gruntowego.

---

<sup>1</sup> Wzór niepublikowany, opracowany przez IBDiM dla potrzeb „Katalogu Wzmocnień i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych”



**Tablica 24.** Obliczone z ugięć moduły sprężystości dla warstwy z podbudową z MCAS (w temperaturze badania 5°C)

Punkt	Warstwy		
	E1,MPa	E2,MPa	E3,MPa
248+950	46009	484	126
248+950	41138	831	165
249+000	31494	514	106
249+001	35442	781	140
249+050	13287	466	91
249+051	14891	498	96
249+100	12608	427	80
249+101	21425	455	92
249+150	17778	373	88
249+151	19568	336	79
249+200	26553	422	107
249+200	19689	498	95
249+249	25166	702	157
249+251	33176	1098	169
249+300	8010	477	80
249+300	21162	433	91
249+349	47001	296	83
249+351	17752	524	91
249+398	31484	479	109
249+400	23369	854	121
249+450	37223	328	104
249+451	24261	662	126
249+500	10200	504	76
249+500	24152	318	72
249+550	25169	342	78
249+550	17675	357	93
249+600	9404	399	74
249+601	14898	408	95
249+648	13743	416	74
249+651	12303	425	87
249+701	19689	297	83
249+701	14693	476	95
249+750	104758	165	83
249+751	20334	443	99
249+800	20540	388	83
249+800	26547	453	102
249+851	21779	719	152
249+852	8135	569	95
249+900	19209	432	91
249+900	55140	359	112
249+934	22549	870	110
249+940	16300	428	104
<b>Średnie E</b>	<b>24898</b>	<b>493</b>	<b>101</b>
<b>Odch. Stand. D</b>	<b>16555</b>	<b>183</b>	<b>25</b>
<b>E-D</b>	<b>8343</b>	<b>310</b>	<b>77</b>
<b>Kwantyl 0,15</b>	<b>13034</b>	<b>400</b>	<b>93</b>

**Tablica 25.** Obliczone z ugięć moduły sprężystości dla warstwy z podbudową z MCE  
(w temperaturze badania 22°C)

Punkt	Warstwy		
	E1,MPa	E2,MPa	E3,MPa
246+348	1460	1204	56
246+350	5225	791	90
246+399	1944	1116	66
246+403	4663	765	63
246+449	2777	740	62
246+451	6356	482	89
246+500	1626	1120	63
246+502	3548	1169	55
246+548	2035	876	39
246+552	4503	764	60
246+599	2844	1656	119
246+603	2309	1752	96
246+651	7473	682	81
246+651	2462	974	70
246+695	8274	741	119
246+701	6688	622	72
246+746	10139	318	100
246+752	11025	507	88
246+800	8467	548	112
246+800	9011	515	90
246+850	4779	627	79
246+850	11252	443	93
246+900	10373	1153	107
246+901	3668	517	74
246+950	15300	619	119
246+955	7930	515	82
247+003	4490	774	78
247+004	11733	1071	157
247+050	2603	933	74
247+050	4492	1390	129
247+101	9003	834	126
247+102	9212	1501	223
247+150	9536	1165	156
247+151	11727	1177	170
247+200	10037	2415	224
247+201	5625	1926	205
247+250	7762	1028	123
247+251	2971	1329	114
247+301	12583	2419	130
247+302	8714	1072	96
247+350	9007	917	107
247+350	7804	891	86
<b>Średnie E</b>	<b>6748</b>	<b>1001</b>	<b>103</b>
<b>Odch. Stand. D</b>	<b>3562</b>	<b>486</b>	<b>43</b>
<b>E-D</b>	<b>3186</b>	<b>515</b>	<b>60</b>
<b>Kwantyl 0,15</b>	<b>5871</b>	<b>907</b>	<b>92</b>

**Tablica 26.** Obliczone z ugięć moduły sprężystości dla warstwy z podbudową z MCE (w temperaturze równoważnej 10°C)

Punkt	Warstwy		
	E1,MPa	E2,MPa	E3,MPa
246+348	1863	1204	56
246+350	6667	791	90
246+399	2481	1116	66
246+403	5950	765	63
246+449	3543	740	62
246+451	8110	482	89
246+500	2075	1120	63
246+502	4527	1169	55
246+548	2597	876	39
246+552	5746	764	60
246+599	3629	1656	119
246+603	2946	1752	96
246+651	9536	682	81
246+651	3142	974	70
246+695	10558	741	119
246+701	8534	622	72
246+746	12937	318	100
246+752	14068	507	88
246+800	10804	548	112
246+800	11498	515	90
246+850	6098	627	79
246+850	14358	443	93
246+900	13236	1153	107
246+901	4680	517	74
246+950	19523	619	119
246+955	10119	515	82
247+003	5729	774	78
247+004	14971	1071	157
247+050	3321	933	74
247+050	5732	1390	129
247+101	11488	834	126
247+102	11755	1501	223
247+150	12168	1165	156
247+151	14964	1177	170
247+200	12807	2415	224
247+201	7178	1926	205
247+250	9904	1028	123
247+251	3791	1329	114
247+301	16056	2419	130
247+302	11119	1072	96
247+350	11493	917	107
247+350	9958	891	86
<b>Średnie E</b>	<b>8611</b>	<b>1001</b>	<b>103</b>
<b>Odch. Stand. D</b>	<b>4545</b>	<b>486</b>	<b>43</b>
<b>E-D</b>	<b>4066</b>	<b>515</b>	<b>60</b>
<b>Kwantyl 0,15</b>	<b>7491</b>	<b>907</b>	<b>92</b>

**Tablica 27.** Obliczone z ugięć moduły sprężystości dla warstwy z podbudową z MCAS (w temperaturze równoważnej 10°C)

Punkt	Warstwy		
	E1,MPa	E2,MPa	E3,MPa
248+950	40718	484	126
248+950	36407	831	165
249+000	27872	514	106
249+001	31366	781	140
249+050	11759	466	91
249+051	13179	498	96
249+100	11158	427	80
249+101	18961	455	92
249+150	15734	373	88
249+151	17318	336	79
249+200	23499	422	107
249+200	17425	498	95
249+249	22272	702	157
249+251	29361	1098	169
249+300	7089	477	80
249+300	18728	433	91
249+349	41596	296	83
249+351	15711	524	91
249+398	27863	479	109
249+400	20682	854	121
249+450	32942	328	104
249+451	21471	662	126
249+500	9027	504	76
249+500	21375	318	72
249+550	22275	342	78
249+550	15642	357	93
249+600	8323	399	74
249+601	13185	408	95
249+648	12163	416	74
249+651	10888	425	87
249+701	17425	297	83
249+701	13003	476	95
249+750	92711	165	83
249+751	17996	443	99
249+800	18178	388	83
249+800	23494	453	102
249+851	19274	719	152
249+852	7199	569	95
249+900	17000	432	91
249+900	48799	359	112
249+934	19956	870	110
249+940	14426	428	104
<b>Średnie E</b>	<b>22034</b>	<b>493</b>	<b>101</b>
<b>Odch. Stand. D</b>	<b>14651</b>	<b>183</b>	<b>25</b>
<b>E-D</b>	<b>7383</b>	<b>310</b>	<b>77</b>
<b>Kwantyl 0,15</b>	<b>11535</b>	<b>400</b>	<b>93</b>

Obliczone wartości modułów miarodajnych, które w dalszej części analiz służyły do wyznaczenia trwałości zmęczeniowej konstrukcji zestawiono w tabeli 28.

**Tablica 28.** Moduły miarodajne warstw konstrukcyjnych

Lokalizacja, km	Moduły miarodajne warstw, MPa		
	w. asfaltowe	podbudowa	podłoże gruntowe
248+950 ÷ 249+950	11535	400	93
246+350 ÷ 247+350	7491	907	92

W celu oszacowania trwałości zmęczeniowej (nośności) istniejącej konstrukcji nawierzchni wykonano obliczenia stanu naprężeń i odkształceń w konstrukcji nawierzchni posługując się programem komputerowym BISAR. W modelu obliczeniowym przyjęto moduły sprężystości warstw wg tabeli 28. Model obliczeniowy obciążano naciskiem 50 kN, rozłożonym na powierzchnię kołową o ciśnieniu kontaktowym 0,65 MPa.

Naprężenia i odkształcenia obliczano w następujących punktach zamodelowanej konstrukcji nawierzchni:

- odkształcenia pionowe (ściskające) w górnej części podłoża gruntowego,
- odkształcenia rozciągające w dolnej strefie pakietu istniejących warstw asfaltowych,

W obliczeniach nośności nawierzchni posłużono się kryteriami zmęczeniowymi zalecanymi do stosowania w „Katalogu Wzmocnień i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych” (KWRNPP). Wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej zestawiono w tabeli 29.

**Tablica 29.** Trwałość zmęczeniowa konstrukcji nawierzchni

Lokalizacja, km	Odkształcenia, $10^{-6}$ m/m		Trwałość, tys. osi 100 kN	
	warstwy asfaltowe	podłoże gruntowe	spękania zmęczeniowe	deformacje strukturalne
248+950 ÷ 249+950	161	579	810	440
246+350 ÷ 247+350	103	410	3540	2070

## 12.6 Zdjęcia skaningowe

Zdjęcia struktury próbek z asfaltem spienionym i cementem MCAS pod mikroskopem optycznym i skaningowym zostały wykonane przez pracownika Politechniki Lubelskiej. Zestawienie tych zdjęć znajduje się w Załącznikach 4 i 5.

### **Próbka MC-2 (MCAS-S DK3)**

W badaniach przy użyciu mikroskopu skaningowego (*zdjęcia czarno-białe*) i mikroskopu optycznego (*zdjęcia kolorowe*) uwidocznili się złożony charakter strukturalny próbek mieszanki MC-2. Wyróżnić można trzy zasadnicze elementy budowy wewnętrznej:

**kruszywo**

– związane w głównej mierze ostrokrawędzistymi fragmentami skał węglanowych (wapieni Mcas2\_2xn – *ten duży różnokolorowy fragment*, niekiedy wapieni zbliżonych do marmurów Mcas2\_3\_xn – *największe ziarno w barwach różowopodobnych*) i dobrze zaokrąglonymi ziarnami kwarcu ( Mcas2\_1n, Mcas2\_2xn – *te różnej intensywności szare ziarna*).

W fragmentach skał wapiennych wyraźnie zaznacza się obecność zatok korozyjnych (Mcas2\_5\_1n) które mogą być efektem reakcji ich kontaktu cementu i asfaltu.

**cement**

drobnoziarnisty charakter nie pozwolił zidentyfikować go przy użyciu mikroskopu optycznego. Dopiero w mikroskopie skaningowy widać wyraźnie igły etryngitu MC-2\_006, MC-2\_002 . Minerale cementowe tworzą również otoczki na fragmentach kruszywa wapiennego i ziarnach kwarcu (MC-2\_001)

**asfalt**

jego obecność związana jest z bezpostaciowymi polewami często wykazującymi formy (działalności korników w drzewie) wyraźnie widocznymi w obrazach SEM MC-2\_002, MC-2\_003 MC-2\_004. W obrazach mikroskopu optycznego obecność asfaltu związana jest z brunatną niekiedy wręcz czarną barwą spoiwa (*widać na wszystkich zdjęciach*)

**Próbka MC-17 (MCAS-M DK50)****kruszywo**

składnikami ziarn kruszywa „grubego” są fragmenty skał wapiennych i znacznie rzadziej bazaltów (Mcas17\_2\_1n, Mcas17\_2\_xn), a drobne składniki reprezentowane są przez ziarna kwarcu (Mcas17\_4\_1n, Mcas17\_4\_xn).

**cement**

minerale cementowe tworzą w mieszance tej wyraźnie widoczne obwódki wokół kruszywa (*szczególnie często wokół firm kruszywa drobnego*) Mcas17\_1n. Igiełkowe kryształki etryngitu widoczne są praktycznie na wszystkich zdjęciach SEM MC-17\_003, MC-17\_004, MC-17\_001.

**asfalt**

występuje tu jako gładkie, bezpostaciowe polewy MC-17\_001, MC-17\_002.

**13 Analiza badań porównanie wyników mieszank MCAS i MCE****Rozciąganie pośrednie i stabilność**

Najniższą stabilność (3,2 kN) i sztywność wg Marshalla po 28 dniach wykazały próbki z mieszanki MCAS-M (DK50). Natomiast najwyższe wartości stabilności (10,7kN) uzyskały próbki z MCE-M. Mieszanka MCAS-S (DK3) wykazywała zbliżone (nieco niższe) wartości do parametrów MCE-M (np. stabilność 8,9kN) .

Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie próbek pielęgnowanych w każdym przypadku była niższa od próbek suchych (bez pielęgnacji). Najwyższe wartości wytrzymałości na rozciąganie wykazywała mieszanka MCAS-S (940kPa), najniższe wartości i duże różnice między wynikami suchych i pielęgnowanych próbek uzyskała mieszanka MCAS-M (512 kPa). Mieszanki MCAS-M i MCE-M charakteryzowały się spadkiem poziomu wytrzymałości na rozciąganie po 28 dniach, natomiast w mieszance MCAS-S zaobserwowano wyraźny wzrost wartości ITSN i ITSS po 28 dniach.

Zaobserwowano, że przy zastosowaniu twardszego asfaltu 50/70 uzyskuje się ogólnie wyższe wartości ITSN i ITSS lecz równocześnie występuje niższa wartość TSR, czyli większe różnice między wytrzymałością próbek suchych i pielęgnowanych. Przy zastosowaniu asfaltu 70/100 (załącznik 2, odcinek 2a, 2b) w takich samych mieszankach uzyskano zdecydowanie niższe wartości ITS, ale występuje zdecydowanie wyższa wartość wskaźnika odporności na działanie wody TSR, ponieważ w tym wypadku wartości ITS ulegają mniejszym zmianą.

Wartość wskaźnika TSR według różnych źródeł waha się w granicach od 60% do 80%. Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki i minimalne kryteria kontroli jakości przy wykonaniu odcinka DK50, gdzie specjaliści z Afryki Południowej przyjęli wskaźnik wynoszący 60%, można więc ten bezpieczny do uzyskania poziom wstępnie przyjąć w zaleceniach.

**Tablica 30.** Kryteria kontroli jakości

Minimalne kryteria kontroli jakości przy odbiorze		
Parametr		Wartość
Wytrzymałość	Pomiary wykonane na brykietach wykonanych w laboratorium z wykorzystaniem próbek pobranych z maszyny do recyklingu.	
	ITS <sub>DRY</sub> (dla brykietów 10cm) (kPa)	300
	ITS <sub>EQU</sub> (dla brykietów 15 cm) (kPa)	170
	UCS <sub>EQU</sub> (dla brykietów 15 cm) (MPa)	1.0
	TSR (%wielu ITS utrzymanego po namoczeniu)	60
Gęstość	Wartość procentowa gęstości wg próby Proctora	
	Zmierzona w całej grubości warstwy (%)	98
	Pomiar w warstwie górnej 10 cm (%)	100
Grubość warstwy	Minimalna partia 20 próbek	
	Grubość średnia dla wszystkich pomiarów (m)	24
	Minimum dopuszczalne dla poszczególnych pomiarów (cm)	23

### **Zespolony moduł sztywności**

Należy zważyć, że wyniki badań mieszanek MCE-M i MCAS-M wskazują na bardzo niskie wartości modułu sztywności i różnią się znacznie od pozostałych trzech mieszanek. Przyczyną tego może być zastosowanie w mieszance MCAS-M mniejszej ilości cementu oraz doziarnienie bardzo drobnym kruszywem 0/2 mm. W przypadku tych materiałów, mieszanka MCAS charakteryzuje się większym modułem sztywności i większym kątem przesunięcia fazowego.

Analizując wyniki mieszanek MCAS-K, MCAS-S i MCE-K można stwierdzić, że niezależnie od częstotliwości i temperatury badania mieszanka MCE charakteryzuje się wyższym modułem sztywności niż mieszanka MCAS, przy zbliżonych wynikach kąta przesunięcia fazowego. Różnica w wartości modułu sztywności zmniejsza się nieznacznie ze wzrostem temperaturą i maleje wraz z obniżeniem częstotliwości. Mieszanki MCAS-K i MCAS-S charakteryzują się bardzo zbliżonymi wartościami modułu sztywności. Wyniki badań kąta przesunięcia fazowego niższych temperaturach mieszanki MCAS i MCE są porównywalne, jednak wraz ze wzrostem w mieszankach MCAS zwiększa się bardziej udział fazy lepkiej (wzrasta kąt przesunięcia fazowego). Porównując mieszanki MCAS-S i MCAS-K można zauważyć, że pierwsza z nich wykazała mniejszy wzrost fazy lepkiej co może korzystnie wpływać na jej odporność na deformacje trwałe. Różnice są również widoczne na wykresach Blacka i Cole-Cole, które wskazują, że mieszanka MCAS-K ma bardziej lepkie właściwości niż mieszanka MCAS-S, co z kolei może wpływać korzystnie na odporność na pękanie.

### **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 oraz zbyt małymi wymiarami próbek w stosunku do uziarnienia mieszanek.

Uzyskane wyniki pozwalają jednak stwierdzić, że mieszanka MCAS charakteryzowała się dużo większą trwałością zmęczeniową niż mieszanka MCE. Trwałość mieszanki

MCE-K wynosiła maksymalnie około 32 tys. cykli, natomiast próbki z mieszanki MCE-M, ulegały zniszczeniu zaraz po rozpoczęciu badania (wyników nie załączono).

Bardzo nietypowy przebieg mają wykresy badań zmęczeniowych mieszanki MCAS-M. Obniżenie wartości modułu jest powolne, stopniowane z widocznymi fazami wzrostu. Zjawisko to jest trudne do wytłumaczenia. Bardzo niskie wartości modułu mogą świadczyć o tym, że próbka uległa zniszczeniu podczas wycinania lub badań wstępnych. Przy założonej amplitudzie odkształceń, występują bardzo małe naprężenia w próbce, które nie powodują szybkiego procesu zmęczenia.

Mieszanki MCAS-S i MCAS-K uzyskały podobne wyniki trwałości zmęczeniowej (średnio około 100 – 150 tys. cykli), co jest wynikiem porównywalnym do uzyskiwanych przez mieszanki typu BA 0/25 z asfaltem zwykłym ( $A_m=3,5\%$ ) do warstwy podbudowy.

#### 14 Zakończenie

Praca miała na celu sprawdzenie laboratoryjne i w odcinkach testowych metody recyklingu nawierzchni na zimno z zastosowaniem asfaltu spienionego. W pracy wykonano porównanie właściwości nawierzchni według metody recyklingu na zimno z użyciem emulsji asfaltowej MCE i asfaltu spienionego MCAS. Ostatecznie wykonano dwa odcinki doświadczalne, które pozwoliły porównać:

- zastosowaniem różnych technologii wytwarzania mieszanki MCAS,
- dwie znacznie różniące się składem mineralnym mieszanki MCAS, zarówno pod względem uziarnienia jak i zawartości cementu,
- właściwości dwóch alternatywnych mieszanek, z zastosowaniem asfaltu spienionego i cementu MCAS do właściwości mieszanki cementowo-emulsyjnej MCE.

Ponieważ z przyczyn niezależnych od IBDiM do wykonania odcinków doświadczalnych przewidzianych w 2005 r., doszło dopiero w drugiej połowie 2006 r., obserwacja i ocena wykonanych odcinków nie była możliwa.

Wobec zaistniałej sytuacji program badań z części drugiej sprawozdania TN-236 został powtórzony w 2006 r. (dla dwóch odcinków doświadczalnych), a wyniki z 2005 r. były traktowane jako porównawcze.

W rezultacie tej pracy przewidziano opracowanie zaleceń stosowania alternatywnej technologii recyklingu na zimno z zastosowaniem asfaltu spienionego (załącznik 7) oraz opracowanie typowych konstrukcji nawierzchni z podbudową MCAS (załącznik 6).

Jednak z uwagi na zbyt krótki okres eksploatacji wykonanych odcinków, brak obserwacji zalecenia należy traktować jako projekt, który po obserwacji odcinków (np. po okresie zimowym) może ulec dalszej weryfikacji.



### **Bibliografia**

- 1 PN-EN 12697-12:2004 (U) Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco. Część 12: Określanie wrażliwości próbek asfaltowych na wodę – metoda zmodyfikowana.
- 2 AASHTO TP8-94 :” Standard test method for determining the fatigue life of compacted hot mix asphalt (HMA) subjected to repeated flexural bending”
- 3 PN-EN 12697-26 (U):2005, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness
- 4 PN-EN 12697-24:2005 (U), Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue
- 5 D. Sybilski, W. Bańkowski: „Wyznaczanie temperatury równoważnej ze względu na zmęczenie”, Drogownictwo 6/2004
- 6 Jaskuła P., Juducki J.: „Wpływ starzenia i oddziaływania wody i mrozu na zmianę właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych”, XLVIII Konferencja naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB - Krynica 2002
- 7 EN 13108-1 – projekt, Bituminous mixtures – Material specifications