

## **Zastosowanie mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze zagęszczania z dodatkiem zeolitów w warunkach rzeczywistych**

**Agnieszka Woszuk<sup>1</sup>, Wojciech Franus<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Katedra Dróg i Mostów, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, e-mail: a.woszuk@pollub.pl*

<sup>2</sup> *Katedra Geotechniki, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, e-mail: w.franus@pollub.pl*

**Streszczenie:** Celem tej pracy jest ocena możliwości obniżenia temperatury zagęszczania mieszanek mineralno-asfaltowych (MMA) przez zastosowanie zeolitów na podstawie badań nawierzchni z odcinka doświadczalnego. W artykule przedstawiono zarówno wyniki badań laboratoryjnych jak i próbek z odcinka doświadczalnego dla AC 16 W 35/50 z dodatkiem zeolitu naturalnego – klinoptilolitu. Ilość dozowanego materiału zeolitowego wynosiła 1% w stosunku do masy mieszanki mineralnej oraz 0,4% – przy dodatkowym nasączeniu klinoptilolitu wodą. Na podstawie badań laboratoryjnych wykazano, iż możliwe jest obniżenie temperatury zagęszczania mieszanek mineralno-asfaltowych na ciepło (WMA) z dodatkiem zeolitu o 30°C z 145°C do 115°C. Podczas wbudowywania mieszanki na odcinku doświadczalnym uzyskano obniżenie temperatury zagęszczania o 20–40°C. Badania MMA z tego odcinka obejmowały: zawartość lepiscza rozpuszczonego, zagęszczenie warstwy, odporność na deformacje trwałe oraz moduł sztywności metodą IT-CY.

**Słowa kluczowe:** zeolit, klinoptilolit, mieszanki mineralno-asfaltowe na ciepło, zagęszczalność.

### **1. Wprowadzenie**

Zeolity są to glinokrzemiany o strukturze szkieletowej w których występują puste przestrzenie w postaci komór i kanałów. Cechą charakterystyczną zeolitów jest zdolność gromadzenia w nich tzw. wody zeolitowej, która może być usunięta przez podgrzewanie, a następnie ponownie pochłonięta lub zastąpiona przez inne substancje. Taka specyficzna budowa wewnętrzna nadaje zeolitom wiele cech fizykochemicznych, które są niezwykle korzystne dla różnego rodzaju zastosowań przemysłowych [1, 2, 3]. Jedną z możliwości praktycznego zastosowania jest dodanie zeolitu do mieszanki mineralno-asfaltowej (MMA) w celu spienienia asfaltu i obniżenia temperatur technologicznych. W momencie dodania zeolitu do mieszanki mineralnej jednocześnie z asfaltem, woda gromadzona w porach molekuł zaczyna się uwalniać. W wyniku parowania wody zeolitowej dochodzi do ekspansji objętościowej spoiwa, efektem czego jest spienienie asfaltu i obniżenie jego lepkości [4, 5]. Dzięki temu zwiększa się urabialność MMA i przyczepność asfaltu do kruszywa w niższych temperaturach. Zjawisko to trwa przez około 2 godzin [6, 7], przez co efekt zwiększonej urabialności trwa zarówno w trakcie produkcji, transportu jak i wbudowywania MMA.

Dodany zeolit w recepcie MMA zastępuje wypełniacz i w badaniach powinien być dokumentowany jako wypełniacz [8, 9 10]. Wyniki badań wskazują jednak, że nie jest

możliwe całkowite zastąpienie wypełniacza wapiennego zeolitem [11]. Produkcja MMA z dodatkiem zeolitu nie różni się od tradycyjnie produkowanych mieszanek. Problematyczne może być jedynie dozowanie zeolitu. Z uwagi na charakter swojego działania ważna jest kolejność dozowania poszczególnych składników mieszanki. Zeolit powinien być dozowany razem z wypełniaczem lub bezpośrednio po nim. Dozowanie automatyczne odbywa się z silosu lub przy użyciu dodatkowo zainstalowanego zasobnika wagowego. W przypadku niedużych ilości MMA możliwe jest ręczne dodawanie zeolitu w workach [12, 9]. Producent (Eurovia) deklaruje, że dodatek Aspha-Min może być stosowany dla wszystkich powszechnie znanych asfaltów i asfaltów modyfikowanych oraz każdego rodzaju kruszywa.

Podczas produkcji i wbudowywania MMA istotnym problemem są powstające gazy i opary. Badania wykazują, że emisje gazów i oparów asfaltu praktycznie nie istnieją przy temperaturze 80°C. Niewielkie ich stężenie występuje w temperaturze 150°C, a w 180°C stężenia osiągają już bardzo duże wartości [13]. Redukcja temperatury o 10°C zmniejsza o połowę emisji oparów i aerozoli [8]. Badania WMA z zeolitem przeprowadzone w Niemczech wykazały zmniejszenie emisji oparów o 75% przy spadku temperatury produkcji o 26°C. Podczas wbudowywania mieszanki odnotowano redukcję tych związków o 90% [12]. Wraz ze zmniejszeniem temperatury produkcji MMA następuje także redukcja emitowanego przez wytwórnię ditlenku węgla o ok. 40%, a innych związków niebezpiecznych – nawet o 70% [6, 14, 15, 16]. Zmniejszenie emisji wycieków i aerozoli poprawia komfort pracy osób zatrudnionych przy produkcji i wbudowywaniu MMA, co przekłada się na wyższą wydajność i jakość wykonywanych prac. Lepsza urabialność mieszanki oraz niższa temperatura wbudowywania i zagęszczania WMA umożliwia wydłużenie drogi i czasu transportu gotowej mieszanki. Niższa temperatura wbudowywania pozwala także na wydłużenie sezonu robót drogowych oraz szybsze oddanie nawierzchni do ruchu [17, 18]. Intensywne badania WMA prowadzone są od ponad 20 lat. W tym okresie powstało wiele odcinków doświadczalnych [6, 19, 20]. Natomiast badania WMA z dodatkiem zeolitu naturalnego są w fazie badań laboratoryjnych. Dotychczas nie powstały odcinki doświadczalne w tej technologii.

Głównym celem pracy jest ocena możliwości zastosowania zeolitu naturalnego (klinoptilolitu) i jego odmiany modyfikowanej poprzez nasączenie wodą do produkcji MMA o obniżonej temperaturze zagęszczania w warunkach rzeczywistych na podstawie wykonanego odcinka doświadczalnego.

## 2. Materiały

W badaniach zastosowano, zeolit naturalny klinoptylolit pochodzący ze złoża Sokyrnytysa – Obwód Zakarpacki (Ukraina). Zeolit do MMA był dozowany w stanie powietrzno-suchym oraz po dodatkowym nasączeniu wodą. Nasycenie klinoptilolitu wodą wynosiło 25% wody wagowo w stosunku do masy suchego zeolitu.

Stosowane lepiszcze to: asfalt 35/50 dostarczony przez LOTOS Asfalt Sp. z o.o. Zastosowane kruszywa to: wypełniacz wapienny, kruszywo wapienne o ciągłym uziarnieniu, grysy granodiorytowe oraz dolomitowe. Tego typu materiały kamienne powszechnie stosowane są w budowie nawierzchni drogowych na terenie Polski Wschodniej. Mimo, że granodioryty są skałą kwaśną w prowadzonych badaniach zrezygnowano z dodatków adhezyjnych poprawiających przyczepność kruszyw do asfaltu. Ich zastosowanie mogłoby mieć wpływ na wyniki końcowe badań.

Materiałem referencyjnym była mieszanka mineralno-asfaltowa przeznaczona na warstwę wiążącą drogi obciążonej ruchem o kategorii KR 3–4 (AC 16 W 35/50), zaprojektowana zgodnie z polskimi standardami technicznymi WT 2 2010 [21].

### 3. Recepta mieszanki mineralno-asfaltowej

Uziarnienie kruszyw zbadano metodą przesiewu na sucho (PN-EN 933-1) [22], uziarnienie mączki wapiennej określono metodą przesiewu w strumieniu powietrza (PN-EN 933-10) [23]. Optymalna ilość dozowanego materiału zeolitowego określona w badaniu zagęszczalności wynosi 1,0% oraz 0,4% przy dodatkowym nasączeniu wodą [24]. Skład mieszanki mineralnej zaprojektowano metodą krzywych granicznych i przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Skład granulometryczny mieszanki mineralnej

Wymiar sita [mm]	Odsiew %	Skrócony odsiew [%]	dozowanie frakcji [%]	Przesiew [%]	Rzędne krzywych granicznych	
31,5	0,0	69,4	20,0	100,0	0	0
22,4	0,0			100,0	100	100
16	2,4			97,6	90	100
11,2	17,6			80,0	70	90
8	19,6		32,5	60,4	55	85
5,6	12,9			47,5	0	0
4	7,9		16,8	39,6	0	0
2	9,0			30,6	25	50
1	10,6	24,4	30,6	20,0	0	0
0,5	5,7			14,3	0	0
0,25	3,5			10,7	0	0
0,125	2,5			8,3	4	12
0,063	2,0			6,2	4	10
0	6,2	6,2				
razem	100,0	100,0	100,0			

Skład mieszanki mineralnej oraz mieszanki mineralno-asfaltowej, przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Projektowany skład mieszanki mineralnej i mieszanki mineralno-asfaltowej 0/16 warstwy wiążącej z betonu asfaltowego AC 16 W, dla kategorii ruchu KR 3-4 wg WT 2 2010.

Lp.	Materiał	Skład [%]		
		MM	MMA	MMA
1.	Kruszywo grube 11/16 granodioryt kop. Vyrivsyj Karjer	20	19,1	19,1
2.	Kruszywo grube 8/11 dolomit kop. Piskrzyń	18	17,2	17,2
3.	Kruszywo grube 4/8 granodioryt kop. Vyrivsyj Karjer	24	22,9	22,9
4.	Kruszywo o c.u. 0/4 wapień kop. Trzuskawica	34	32,5	32,5
5.	Wypełniacz dodany (mączka wapienna) Bukowa	4	2,8 *	3,4 *
6.	Asfalt drogowy 35/50		4,6	4,6
7.	Zeolit naturalny klinoptilolit		1	0,4**

\* ilość wypełniacza dodanego została pomniejszona o ilość dozowanego tufu zeolitowego

\*\* dodatek zeolitu nasączonego wodą

#### 4. Właściwości fizykomechaniczne WMA z zeolitem

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych, za optymalną temperaturę zagęszczania próbek WMA z dodatkiem klinoptilolitu przyjęto 115°C. Dla zaprojektowanej mieszanki AC 16 W z dodatkiem zeolitów wykonywano badania podstawowych właściwości fizykomechanicznych. Wyniki badań laboratoryjnych przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Właściwości fizykomechaniczne WMA AC 16 W z dodatkiem zeolitu naturalnego klinoptilolitu

Właściwości	Wyniki badań mieszanki AC 16 W z dodatkiem zeolitu		Wymagania wg WT-2 2010
	1% CLIN	0,4% CLIN- nas.	
Gęstość MMA wg PN-EN 12697-5 [25] [kg/m <sup>3</sup> ]	2507	2517	
Gęstość objętościowa MMA wg PN-EN 12697-6 [26] [kg/m <sup>3</sup> ]	2357	2364	
Zawartość wolnych przestrzeni wg PN-EN 12697-8 [27] [%]	6,0	6,1	V <sub>min</sub> 4,0 V <sub>max</sub> 7,0
Odporność na deformacje trwałe wg PN-EN 12697-22 [28], metoda B w powietrzu, +60°C, 10 000 cykli	WTS	0,15	WTS <sub>AIR0,30</sub>
	PRD	7,1	PRD <sub>AIR</sub> Deklarowane
Odporność na działanie wody i mrozu wg PN-EN 12697-12 [29], przechowywanie w 40°C z jednym cyklem zamrażania, badanie w temp. +25°C	85	82	ITSR 80
Moduł sztywności [MPa] metodą IT-CY wg PN-EN 12697-26 [30] w temperaturze badania:	23°C	4954	4423
	10°C	11675	9984
	-2°C	17892	17133

#### 5. Wytwarzanie i wbudowywanie mieszanki mineralno-asfaltowej z zeolitem

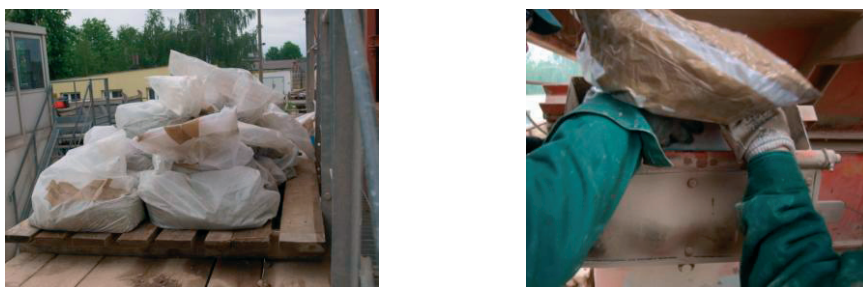
Odcinek doświadczalny wykonano w m. Zamość, województwo lubelskie, na drodze gminnej Nr 110538 L, nr ewidencyjny działki 258/2, stanowiącej łącznik między ulicą Hrubieszowską, a Ciepłownią w Zamościu. Długość odcinka wynosiła 100 mb, szerokość – 5,5 m. Grubość warstwy po zagęszczeniu, zgodnie z projektem wynosiła 40 mm. Aby możliwe było pobranie próbek do badania odporności na deformacje trwałe, podczas wbudowywania mieszanki miejscowo zwiększono grubość wbudowywanej warstwy do 65 mm. Wykonawcą prac było Przedsiębiorstwo Robót Drogowych Spółka z o.o. w Zamościu. Wytypowany odcinek drogi podzielono na dwie części: prawą i lewą i oznaczono odpowiednio literami L i P. Prawa strona odcinka doświadczalnego została wykonana z mieszanki AC 16 W 35/50 z 1% dodatkiem klinoptilolitu w stosunku do masy MMA. Lewa część odcinka doświadczalnego została wykonana z mieszanki AC 16 W 35/50 z 0,4% dodatkiem klinoptilolitu nasączonego wodą.

Mieszankę mineralno-asfaltową wytworzono w otaczarce stacjonarnej. Temperatury wytwarzania mieszanki mineralno-bitumicznej wynosiły odpowiednio:

- temperatura asfaltu – 150 °C; ±3
- temperatura kruszywa – 180 °C; ±5
- temperatura mieszanki – 160 °C; ±5

Zdonie z WT 2 2010 temperatura produkcji MMA z asfaltem 35/50 powinna wynosić 155-195°C. Maksymalna temperatura MMA po wytworzeniu na wytwórni wynosi 195°C, natomiast 155°C to minimalna temperatura mieszanki wyładowanej do rozścielacza. Maksymalna temperatura asfaltu 35/50 w zbiorniku może wynosić 190°C. Biorąc pod uwagę powyższe temperatura WMA z zeolitem po wytworzeniu była niższa o 35°C od dopuszczalnej temperatury maksymalnej.

Dozowanie zeolitu odbywało się ręcznie, po wcześniejszym przygotowaniu worków z zeolitem (fot.1).

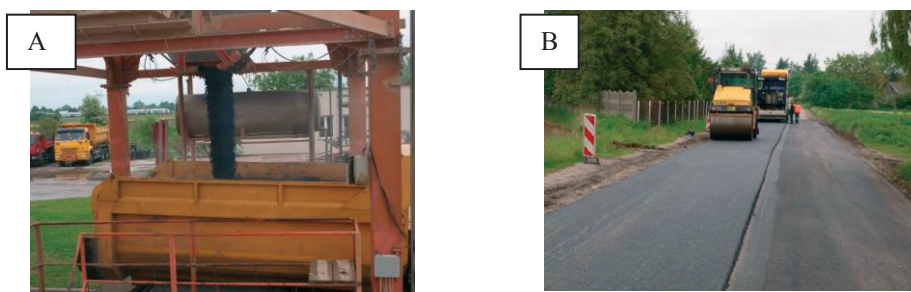


Fot. 1. Ręczne dozowanie zeolitu do Nasączanie zeolitu naturalnego klinoptilolitu wodą.

W czasie wbudowywania WMA z dodatkiem zeolitów panowały następujące, warunki atmosferyczne: temperatura otoczenia + 16 °C, pochmurno z przejaśnieniami, bez opadów atmosferycznych. Podłoże pod warstwę wiążącą zostało wyrównane mieszanką mineralno-asfaltową, czyste, bez pozostałości luźnego kruszywa, wyprofilowane, równe i bez kolein.

Transport mieszanki z wytwórni na miejsce wbudowania odbywał się za pomocą ciągnika siodłowego z naczepą samowyładowczą. Do rozkładania mieszanki użyto rozkładarki gąsienicowej. Zagęszczanie odbywało się przy użyciu walca stalowego gładkiego, bez wibracji o masie 11,6 t. (fot. 2).

Podczas zagęszczania HMA z dodatkiem asfaltu 35/50 początkowa temperatura zagęszczania może być równa temperaturze produkcji MMA wynoszącej ok. 160°C. Natomiast, zaleca końcowa temperatura zagęszczania powinna być wyższa od 115°C. Zagęszczanie rozłożonej warstwy rozpoczęto przy 120°C, zakończono w 95–100°C. Uzyskano obniżenie temperatury zagęszczania o 40°C w początkowej fazie. W końcowej fazie efektywnego zagęszczania temperatura rozkładanej warstwy była o ok. 20°C niższa od temperatury minimalnej zalecanej dla MMA na gorąco.



Fot. 2. a) Załadunek WMA z dodatkiem klinoptilolitu, przeznaczonej do wykonania odcinka doświadczalnego warstwy wiążącej z betonu asfaltowego AC 16 W. b) Zagęszczanie WMA z dodatkiem klinoptilolitu w czasie wykonywania nawierzchni warstwy wiążącej z betonu asfaltowego AC 16 W na odcinku doświadczalnym.

Otrzymana mieszanka AC 16 W z dodatkiem zeolitu wizualnie nie różniła od tradycyjnych mieszanek na gorąco. Wszystkie ziarna kruszywa zostały całkowicie otoczone asfaltem. Mieszanka jest czarna i lekko połyskująca, nie wykazuje cech rozsegregowania.

Produkcja, wbudowywanie i zagęszczanie przebiegało bez utrudnień. Przy niewielkiej ilości produkowanej masy sprawdziło się ręczne dozowanie zeolitu, ale przy produkcji na dużą skalę należałoby ten proces zautomatyzować. Niedogodnością było jedynie nasączenie zeolitu wodą i rozważanie odpowiednich porcji do worków. Z uwagi na szybki spadek temperatury rozłożonej mieszanki lepsze byłoby jednoczesne użycie przynajmniej dwóch walców, co przyspieszy proces zagęszczania.

## 6. Badania właściwości fizykochemicznych WMA z zeolitem na próbkach pobranych z nawierzchni odcinka doświadczalnego

### 6.1. Zawartość lepiszcza rozpuszczonego

Podczas załadunku gotowej masy na samochód pobrano próbki luźnej WMA w celu wykonania ekstrakcję według PN-EN 12697-1[31] i oznaczenie zawartości asfaltu nierozpuszczonego.

Teoretyczną zawartość asfaltu rozpuszczonego określono na podstawie wzoru:

$$B_n = 0,14 \times F + 0,1 \quad [\%] \quad (1)$$

gdzie: F – zawartość ziaren mniejszych od 0,063 mm w zaprojektowanej mieszance mineralnej, [%] (m/m).

W tabeli 4 przedstawiono zawartość lepiszcza rozpuszczonego określonego w ekstrakcji WMA.

Tabela 4. Zawartość lepiszcza rozpuszczonego i nierozpuszczonego w mieszance mineralno-asfaltowej AC 16 W 35/50 z dodatkiem materiałów zeolitywych

Zawartość lepiszcza rozpuszczalnego w mieszance gruboziarnistej	Wg recepty	Wynik badania	Odchyłka od recepty	Dopuszczalna odchyłka pojedynczego wyniku badania wg WT-2 2010
MMA +1% CLN	4,6%	4,5%	-0,1%	± 0,6%
MMA +0,4% CLN nas		4,4%	-0,2%	

Badania potwierdziły zgodność składu ilościowego materiałów w wykonanej na wytwórni mieszanki z zaprojektowaną receptą. Ilość rozpuszczonego lepiszcza jest mniejsza jedynie o 0,1–0,2% w stosunku do wartości zaprojektowanej i dodanej. Odchyłka ta jest zgodna z teoretyczną ilością lepiszcza nierozpuszczonego, która wynosi 0,2%. Uzyskane wyniki wskazują, że duża porowatości i chłonność zeolitów, w przypadku ich niewielkiego dodatku (w ilości 0,4–1,0% w stosunku do masy MMA) nie powoduje konieczności zwiększenia ilości dozowanego lepiszcza.

### 6.2. Wskaźnik zagęszczenia warstwy nawierzchni WMA na odcinku doświadczalnym

Wyniki badań zagęszczalności warstwy nawierzchni WMA w dwóch przekrojach odcinka doświadczalnego zestawiono w tabeli 5.



Tabela 5. Zagęszczalność warstwy nawierzchni WMA na odcinku doświadczalnym

Właściwości	Wynik badania km		Wynik badania km		Wymagania
	P	L	P	L	
Gęstość objętościowa MMA [kg/m <sup>3</sup> ]	2300	2338	2301	2315	
Zawartość wolnych przestrzeni [%]	8,2	7,1	8,2	8,0	V <sub>min</sub> 4, V <sub>max</sub> 7
Wskaźnik zagęszczenia warstwy [%]	98	99	98	98	98

P – strona prawa odcinka doświadczalnego wykonanego z WMA z dodatkiem 1% klinoptilolitu

L – strona lewa odcinka doświadczalnego wykonanego z WMA z dodatkiem 0,4% klinoptilolitu nasączonego wodą

Wskaźnik zagęszczenia warstwy wskazuje na bardzo dobrą zagęszczalność WMA z dodatkiem zeolitów. W stosunku do badań laboratoryjnych zwiększyła się zawartość wolnych przestrzeni o 1–2%. Wartości uzyskane z próbek wyciętych z nawierzchni przekraczają maksymalną dopuszczalną granicę. Na tak dużą zawartość wolnych przestrzeni wpływ miała głównie temperatura zagęszczania. Pierwotnie zakładano zagęszczanie w temperaturze 120–100°C. Jednak rozpoczęcie zagęszczania w tak niskiej temperaturze powodowało bardzo szybki spadek temperatury mieszanki podczas wykonywania odcinka doświadczalnego i rzeczywista temperatura zagęszczania, miejscowo, mogła spaść nawet poniżej 90°C. Mimo krótkiego odcinka (100 mb) w celu uniknięcia spadku temperatury zagęszczania mieszanki uzasadnione byłoby użycie dwóch walców.

### 6.3. Odporność na deformacje trwałe warstwy nawierzchni WMA na odcinku doświadczalnym

Wyniki badań odporności na deformacje trwałe dla próbek wyciętych z nawierzchni odcinka doświadczalnego zestawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Odporność na deformacje trwałe dla próbek wyciętych z warstwy nawierzchni WMA na odcinku doświadczalnym

Wyszczególnienie	Wynik badania	
	PRD <sub>AIR</sub>	WTS <sub>AIR</sub>
Wymagania według WT 2 2010	PRD <sub>AIR</sub> Deklarowane	WTS <sub>AIR</sub> 0,30
Wymagania według WT 2 2014	PRD <sub>AIR</sub> 7,0	WTS <sub>AIR</sub> 0,15
AC 16 W+ 1% CLIN	4,4	0,09
AC 16 W+0,4% CLIN <sub>nas</sub>	5,1	0,1

Na podstawie otrzymanych wartości PRD<sub>AIR</sub> i WTS<sub>AIR</sub> należy stwierdzić, że nawierzchnia wykonana z AC 16W w technologii WMA z dodatkiem zeolitu naturalnego klinoptilolitu jest odporna na deformacje trwałe i spełniają wymagania zarówno według WT2 2010 jak i według WT2 20214. Zarówno przyrost głębokości koleiny (WTS<sub>AIR</sub>) jak i proporcjonalna głębokość koleiny (PRD<sub>AIR</sub>) w próbkach wyciętych z nawierzchni są niższe niż w próbkach referencyjnych i w próbkach z dodatkiem klinoptilolitu wykonanych w laboratorium. Przy zastosowaniu 1% klinoptilolitu nastąpił spadek PRD<sub>AIR</sub> o 38% a WTS<sub>AIR</sub> o 40% w stosunku do wyników badań na płytach wykonanych w zagęszczarce płytowej. Przy dodatku 0,4% klinoptilolitu nasączonego wodą PRD<sub>AIR</sub> zmniejszyła się o 25% a WTS<sub>AIR</sub> o 7%.

#### 6.4. Moduł sztywności określony metodą rozciągania pośredniego na próbce cylindrycznej (IT-CY) warstwy nawierzchni WMA na odcinku doświadczalnym

Wyniki badań modułu sztywności określonego w aparacie NAT metodą IT-CY dla próbek wyciętych z nawierzchni odcinka doświadczalnego zestawiono w tabeli 7.

Tabela 7. Modułu sztywności określony metodą IT-CY dla próbek wyciętych z warstwy nawierzchni WMA na odcinku doświadczalnym

Wyszczególnienie	Moduł sztywności [MPa] w temperaturze badania:		
	23°C	10°C	-2°C
AC 16 W+ 1% CLIN	4327	9408	16206
AC 16 W+0,4% CLINnas	3598	8504	13801

Moduły sztywności próbek wyciętych z nawierzchni z dodatkiem 1% klinoptilolitu osiągają wartość porównywalną do wyników badań próbek referencyjnych wykonanych w laboratorium i są niższe o 10-20% od modułów sztywności uzyskanych na próbkach wykonanych w ubijaki Marshalla z takim samym dodatkiem, zależnie od temperatury badania. W przypadku zastosowania zeolitu nasączonego wodą spadek modułu sztywności wynosi od 15 do 20%. Wpływ na spadek modułu sztywności ma większa zawartość wolnych przestrzeni niż w próbkach wykonanych w laboratorium. Zarówno w badaniach laboratoryjnych jak i na próbkach wyciętych z nawierzchni moduły sztywności dla WMA z 0,4% dodatkiem klinoptilolitu nasączonego są niższe od wartości uzyskiwanych dla WMA z 1% klinoptilolitu.

## 7. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz badań próbek wyciętych z odcinka doświadczalnego można stwierdzić, że dodatek zeolitu naturalnego klinoptilolitu pozwala obniżyć temperaturę zagęszczania WMA o ok. 25–30°C. Przy zastosowaniu optymalnej ilości dozowanego materiału zeolitowego zaprojektowana WMA spełnia wymagania dla MMA na gorąco według polskich Wymagań Technicznych. Wyniki badań próbek wyciętych z odcinka doświadczalnego są zbliżone z wynikami badań laboratoryjnych.

Proces produkcyjny WMA z zeolitem przebiegał prawidłowo i co istotne w istniejącej wytwórni mas bitumicznych bez żadnych modyfikacji. Dozowanie zeolitu odbywało się ręcznie przy zastosowaniu wcześniej odważonych i zapakowanych w foliowe worki porcji materiału zeolitowego. Jednak z uwagi na czasochłonność prac przygotowawczych oraz konieczność angażowania do dozowania zeolitu dwóch osób, przy masowej produkcji bardziej efektywne byłoby zautomatyzowanie tego procesu.

Wytworzona mieszanka nie różniła się wizualnie od MMA na gorąco. Mimo dużej ilości kruszyw kwaśnych (granodiorytów) oraz braku środka adhezyjnego wszystkie kruszywa zostały całkowicie otoczone asfaltem. Rozkładanie i zagęszczanie przebiegało prawidłowo. Ponieważ początkowa temperatura zagęszczania jest dość niska – 120°C, spadek temperatury rozłożonej mieszanki jest szybszy niż w mieszankach tradycyjnych. Aby zapobiec nadmiernemu ochłodzeniu mieszanki należy użyć większej liczby walców zagęszczających.

Badania zawartości lepiszcza rozpuszczonego wskazują, że mimo dużej porowatości zeolitu, mała ilość dozowanego dodatku nie powoduje konieczności zwiększania ilości



asfaltu w MMA. Niższa temperatura zagęszczania nie miała negatywnego wpływu na odporność na deformację trwałą.

Realna możliwość obniżenia temperatury zagęszczania pozwala na wydłużenie drogi transportu MMA, wydłużenie sezonu robót budowlanych, możliwość rozkładania mieszanek przy niższej temperaturze powietrza i podłoża, przy zachowaniu wymagań jakościowych jak dla mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco.

Niższa temperatura zagęszczania to efektywne zmniejszenie emisji gazów, oparów i aerozoli oraz poprawa bezpieczeństwa oraz komfortu osób pracujących przy budowie dróg.

*Badania były finansowane z funduszy statutowych: S-50/II/B/2014*

## Literatura

- 1 Franus W. *Characterization of X-type zeolite prepared from coal fly ash*. Polish Journal of Environmental Studies 21/2 (2012) 337-343.
- 2 Wdowin M., Franus W., R. Panek. *Preliminary results of usage possibilities of carbonate and zeolitic sorbents in CO<sub>2</sub> capture*. Fresenius Environmental Bulletin 21/12 (2012) 3726–3734.
- 3 Chałupnik S., Franus W., Wysocka M., Gzyl G. *Application of zeolites for radium removal from mine water*. Environmental Science and Pollution Research 20 (2013) 7900–7906.
- 4 Sengoz B., Ali Topal A., Gorkem C. *Evaluation of natural zeolite as warm mix asphalt additive and its comparison with other warm mix additive*. Construction and Building Materials 43 (2013) 242–252.
- 5 Wozzuk A., Franus W. *Wpływ dodatku zeolitu NaP1 i klinoptilolitu na lepkość asfaltu*. Logistyka 4 (2015) 6819-6827.
- 6 D'Angelo J., Corrigan M., Harman T., Jones W., Newcomb D., Prowell B. i inni *Warm-Mix Asphalt: European Practice*. Report No. FHWA-PL-08-007, 2008
- 7 Vaiana R, Luele T, Gallelli V. *Warm mix asphalt with synthetic zeolite: a laboratory study on mixes workability*. International Journal of Pavement Research & Technology,6(5) (2013) 562–569.
- 8 Deutscher Asphaltverband e.V. *Mieszanki mineralno asfaltowe o obniżonej temperaturze. Porady z praktyki do praktyki* (2009).
- 9 Materiały informacyjne firmy Aspha-min, dostępne na stronie <http://www.aspha-min.com/98.html>
- 10 Wozzuk A. *Projektowanie mieszanki mineralno-asfaltowej na ciepło z dodatkiem zeolitu*. Budownictwo i Architektura 12(4) (2013) 41–49.
- 11 Wozzuk A., Bandura L., Panek R. *Application of zeolites as fillers in mix asphalt*. Budownictwo i Architektura; 14(1) (2015) 127–134.
- 12 Barthel W., Marchand J., Von Devivere M. *Warm Mix Asphalt by Adding a Synthetic Zeolite*. Proceedings of the Third Euraspalt and Eurobitume Conference, Book 1, Foundation Euraspalt, Breukelen, The Netherlands (2004) 1241-1249.
- 13 Rubio MC., Martínez G., Baena L., Moreno F. *Warm mix asphalt: an overview*. Journal of Cleaner Production 24 (2012) 76–84.
- 14 Vaitkus A., Cygas A., Laurinavicius A., Perveneckas Z. *Analysis and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania*. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 4(2) (2009) 80–86.
- 15 Bueche N. *Warm Asphalt Bituminous Mixtures with Regards to Energy, Emissions and Performance*. Young Researchers Seminar (YRS) LAVOC-CONF- 2010-002Torino, Italy (2009)
- 16 Larsen O.R. *Warm Asphalt Mix with Foam e WAM Foam*. IRF Partie B:Thèmes Techniques, S.00469. Kolo Veidekke, Norway (2001).
- 17 Zaumanis M. *Warm mix asphalt Investigation*. PhD Thesis, Riga Technical University, Kgs. Lyngby, Denmark (2010).
- 18 Button J.W., Estakhri C., Wismatt A. *A Synthesis of Warm-Mix Asphalt*. Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System (2007).

- 19 Bernier A., Zofka A., Josen R., Mahoney J. *Warm-mix asphalt pilot project in Connecticut*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2294 (2012) 106–116.
- 20 Kim Y.-R., Zhang J., Ban H., *Moisture damage characterization of warm-mix asphalt mixtures based on laboratory-field evaluation*. Construction and Building Materials 31 (2012) 204–211.
- 21 *Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych, Wymagania techniczne WT2 2010* (2010)
- 22 PN-EN 933–1:2012. *Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 1: Oznaczenie składu ziarnowego – Metoda przesiewania*.
- 23 PN-EN 933–10:2009. *Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 10: Ocena zawartości drobnych cząstek - Uziarnienie wypełniaczy (przesiewanie w strumieniu powietrza)*.
- 24 Wozuk A., Franus W., *Wpływ dodatku zeolitu na obniżenie temperatury produkcji i zagęszczania mieszanek mineralno-asfaltowych*. Barometr regionalny 2(13) (2015) 117 – 118.
- 25 PN-EN 12697–5: 2010 *Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 5: Oznaczenie gęstości*.
- 26 PN-EN 12697–6:2012 *Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 6: Oznaczenie gęstości objętościowej próbek mieszanki mineralno-asfaltowej*.
- 27 PN-EN 12697–8. 2005 *Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 8: Oznaczenie zawartości wolnej przestrzeni*.
- 28 PN-EN 12697–2+A1:2008 . *Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 22: Koleinowanie*.
- 29 PN-EN 12697–12:2008 *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 12: Określanie wrażliwości próbek asfaltowych na wodę*.
- 30 PN-EN 12697–26:2012. *Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 26: Szttywność*.
- 31 PN-EN 12697–1:2012 *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 1: Zawartość lepiszcza rozpuszczalnego*.

## Use of mix asphalts with reduced compaction temperature and addition of zeolites in real conditions

Agnieszka Wozuk<sup>1</sup>, Wojciech Franus<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lublin University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Architecture,  
Department of Roads and Bridges, a.wozuk@pollub.pl

<sup>2</sup> Lublin University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Architecture,  
Department Geotechnical Engineering, w.franus@pollub.pl

**Abstract:** The aim of this study is to evaluate the possibility of decreasing the mix asphalt compaction temperature through zeolites use, based on pavement analysis of the trial section (of road). The article contains results of laboratory tests and analysis of samples from trial section (of road) for AC 16 W 35/50 with addition of a natural zeolite – clinoptilolite. The amount of dosed zeolite material was 1% with regard to the mineral mix mass and 0,4% – with additional clinoptilolite infusion with water. Basing on laboratory tests, it was proved that it is possible to decrease the compaction temperature of warm mix asphalt (WMA) with zeolite addition by 30°C (from 145°C to 115°C). Compaction temperature decrease of 20–40°C was obtained during incorporation of the mix in the trial section (of road). The MMA analysis of this section (of road) included: soluble binder content, compactibility, resistance to permanent deformation and stiffness modulus using a IT-CY method.

**Keywords:** zeolite, clinoptilolite, warm mix asphalt, compactibility.