

# **Wpływ laboratoryjnych metod zagęszczania na właściwości fizykomechaniczne recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem spienionym**

**Marek Iwański, Anna Chomicz-Kowalska, Piotr Ramiączek,  
Krzysztof Maciejewski, Mateusz M. Iwański**

*Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej, Politechnika Świętokrzyska; e-mail: iwanski@tu.kielce.pl, akowalska@tu.kielce.pl, piotrr@tu.kielce.pl, kmaciejewski@tu.kielce.pl, matiwanski@tu.kielce.pl*

**Streszczenie:** W referacie przedstawiono wyniki badań oceny wpływu laboratoryjnych metod zagęszczania na właściwości recyklowanych mieszanek z asfaltem spienionym (MCAS) oraz z emulsją asfaltową (MCE). Obecne wymagania opracowane i stosowane w naszym kraju przy realizacji zadań drogowych na etapie projektowania składu mieszanek oraz kontroli właściwości wykonywanej warstwy podbudowy w technologii recyklingu na zimno dopuszczają dwie metody formowania prób w warunkach laboratoryjnych: zagęszczanie statyczne prasą hydrauliczną oraz udarowe w ubijaku Marshalla. Na podstawie badań stwierdzono, iż rodzaj metody zagęszczania ma wpływ na cechy fizyczne i mechaniczne recyklowanych mieszanek. Zaobserwowano również, że sposób formowania prób wpływa na strukturę uzyskanego materiału, gdzie znaczny udział ziaren materiału mineralnego uległ rozkruszeniu podczas zagęszczania udarowego. Próbki zagęszczane w sposób statyczny uzyskały lepsze parametry wytrzymałościowe oraz charakteryzowały się wyższą odpornością na działanie wody, co ma związek z niższą zawartością wolnych przestrzeni uzyskiwaną w próbkach zagęszczanych tą metodą.

**Słowa kluczowe:** zagęszczanie udarowe (ubijak Marshalla), zagęszczanie statyczne (prasa hydrauliczna), podbudowa drogowa, recykling na zimno, asfalt spieniony, emulsja asfaltowa, zawartość wolnych przestrzeni, odporność na działanie wody.

## **1. Wprowadzenie**

Wzrastające obciążenie ruchem oraz wzrost wymagań w stosunku do nośności nawierzchni drogowych są głównymi przyczynami wymuszającymi postęp techniczny oraz rozwój technologii budowy i modernizacji sieci drogowej. W ostatnich latach poświęca się wiele uwagi w zakresie rozwoju nowych rozwiązań materiałowych i technologicznych konstrukcji nawierzchni drogowych w aspekcie ochrony środowiska naturalnego oraz zrównoważonego rozwoju. Wymagania te spełnia technologia recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym.

Wzrost zainteresowania technologią recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym wynika z możliwości powtórnego wykorzystania materiałów, zmniejszenia zużycia nowych asfaltów i kruszyw oraz ogra-

niczenia energochłonności robót naprawczych przyczyniając się do obniżenia kosztów utrzymania dróg. Należy dodać, iż obecnie w naszym kraju rozpowszechniona jest technologia recyklingu na zimno konstrukcji nawierzchni z zastosowaniem mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). Jednak wykorzystanie lepiszcza w formie piany asfaltowej pozwala uzyskać większą trwałość konstrukcji nawierzchni drogowej przy oddziaływaniu agresywnego obciążenia ruchem i niekorzystnych warunków klimatycznych [1, 2, 3]. Podczas recyklingu głębokiego konstrukcji nawierzchni drogi, dzięki temu, że asfalt spieniony zawiera niewielką ilość wody (ok. 2-3%), następuje szybkie uzyskanie wymaganych parametrów fizykomechanicznych przez wbudowywany materiał (podbudowę). Wpływa to na skrócenie okresu jego pielęgnacji w porównaniu z technologią, w której stosowana jest emulsja asfaltowa. Zastosowanie technologii recyklingu na zimno z asfaltem spienionym może poprawić trudną sytuację materiałową mineralnych zasobów w wielu regionach Polski, a także przynieść wyraźną poprawę stanu technicznego nawierzchni dróg.

## 2. Projekt recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych

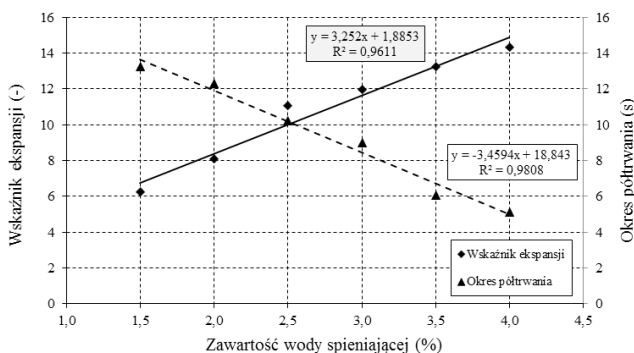
Celem badań było ustalenie wpływu laboratoryjnej metody zagęszczenia recyklowanych mieszanek mineralno-asfaltowych (MMA) na zmiany ich cech fizycznych mechanicznych.

W badaniach zgodnie z zaleceniami [4,5] wykorzystano dwie metody zagęszczania próbek: metodę I - uderową (zagęszczanie ubijakiem Marshalla) oraz metodę II - statyczną (zagęszczanie prasą hydrauliczną). Badania przeprowadzono na recyklowanych mieszankach różniących się rodzajem użytego lepiszcza asfaltowego (MCE, MCAS) przeznaczonych na warstwę podbudowy nawierzchni obciążonej ruchem KR3.

### 2.1. Właściwości materiałów wiążących

Zgodnie z zaleceniami WT-3 z 2009 roku [6] do wytworzenia mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej wykorzystano wolnorozpadową kationową emulsję C60B5 R, spełniającą wymagania normy PN-EN 13808 [7]. Natomiast do mieszanki MCAS zastosowano asfalt spieniony wyprodukowany na bazie lepiszcza 50/70 w urzędzeniu badawczym WLB 10S firmy Wirtgen. Pomiar parametrów piany asfaltowej (WE - wskaźnik ekspansji oraz  $t_{1/2}$  - okres półtrwania piany asfaltowej) przeprowadzono przy temperaturze wyjściowej lepiszcza (przed spienieniem) wynoszącej 170°C.

Do ustalenia optymalnych cech asfaltu spienionego zawartość wody wynosiła od 1.5% do 4.0% zwiększając jej ilość co 0.5% wagowo. Zależność pomiędzy badanymi parametrami (WE,  $t_{1/2}$ ) a zmianą ilości wody dozowanej podczas procesu spieniania asfaltu 50/70 przedstawiono na rysunku 1. Natomiast właściwości badanego lepiszcza oraz powstałej z niego piany asfaltowej zamieszczono w tablicy 1.



Rys. 1. Zależność parametrów asfaltu spienionego od zawartości wody spieniającej.

Tabela 1. Właściwości asfaltu 50/70.

Właściwości	Wynik
<i>Parametry asfaltu przed spienieniem</i>	
Penetracja w temperaturze 25°C, 0,1mm	58,7
Temperatura mięknięcia PiK, °C	51,3
Temperatura łamliwości wg Fraassa, °C	-14,3
<i>Parametry asfaltu spienionego</i>	
Optymalna zawartość wody spieniającej, % (m/m)	2,5
Wskaźnik ekspansji	11,1
Okres półtrwania, s	10,2

W składzie recyklowanych mieszanek zgodnie z zaleceniami [4, 5] jako spoiwo hydrauliczne stosowano cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II klasy 32,5 spełniający wymagania normy PN-EN 197-1 [8], którego obecność reguluje czas rozpadu emulsji asfaltowej [9], poprawia równomierną dyspersję piany asfaltowej oraz wpływa na podwyższenie parametrów wytrzymałościowych recyklowanych materiałów [2, 3].

## 2.2. Skład recyklowanych mieszanek

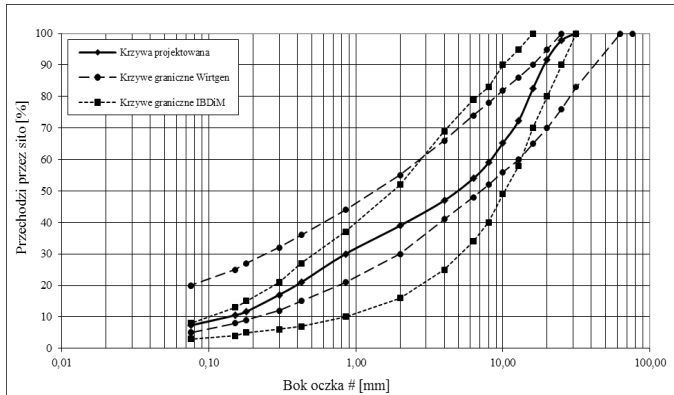
W zaprojektowanej mieszance mineralno-cementowej (MMC) wykorzystano materiał zgodnie z zaleceniami [4, 5] pochodzący z istniejących warstw konstrukcji nawierzchni drogowej: destruk asfaltowy otrzymany w wyniku frezowania istniejących warstw asfaltowych oraz destruk pozyskany z warstwy podbudowy kamiennej. Zawartość asfaltu w destrukcie asfaltowym oznaczona zgodnie z normą PN-EN 12697-1 [10] wyniosła 5,1%. Jako nowy materiał doziarniający stosowano kruszywo wapienne frakcji 0/4 spełniające wymagania normy PN-EN 13242 [11].

W obu mieszankach zawartość nowego lepiszcza wynosiła 2,5%, natomiast spoiwo dozowano w ilości 2,0%. Zawartość materiałów wiążących ustalono na podstawie doświadczeń własnych [2, 3, 12].

Należy zaznaczyć, że zaprojektowana recyklowana mieszanka (rys. 2, tablica 2) o uziarnieniu 0/31,5 mm spełniała kryteria uziarnienia zarówno dla mieszanek

w technologii recyklingu na zimno z asfaltem spienionym jak i dla mieszanek MCE (rys. 2) zgodnie z wymaganiami [4, 5].

W celu uzyskania wymaganej wilgotności zapewniającej prawidłowe warunki zagęszczania recyklowanych mieszanek stosowano wodę zarobową spełniającą wymagania PN-EN 1008 [13], której optymalną zawartość ustaloną w badaniu metodą Proctora wg PN-EN 13286-2 [14] określono na poziomie 6,9%.



Rys. 2. Uziarnienie recyklowanej mieszanki mineralno-cementowej do warstwy podbudowy w technologii recyklingu głębokiego na zimno.

Tabela 2. Skład ramowy recyklowanych mieszanek podbudowy.

Składniki	MMC [%]	MCAS/MCE [%]
Destrukt asfaltowy	50	48,75
Destrukt kamienny	30	29,25
0/4 mm	18	17,55
CEM II	2,0	1,95
Lepiszczce asfaltowe*	-	2,5
Suma	100	100

\* asfalt spieniony / asfalt z emulsji asfaltowej

Na podstawie analizy wymagań dotyczących uziarnienia (rys. 2) można stwierdzić, że mieszanka mineralna recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym powinna zawierać w swoim składzie zgodnie z wymaganiami [15] od 5% do 20% frakcji <0,063 mm. Natomiast mieszanka mineralno-cementowo-emulsyjna [5] od 3% do 8%. Dzięki temu stosowanie asfaltu spienionego pozwala wykorzystywać bardziej zapyłone materiały poddane recyklingowi w stosunku do mieszanki MCE.

### 2.3. Formowanie i pielęgnacja prób

Wydane w 1999 r. i obecnie stosowane na etapie projektowania składu mieszanki MCE oraz kontroli jakości wykonywanej warstwy podbudowy „Warunki techniczne wykonywania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej” autorstwa J. Zawadzkiego, J. Matras, T. Mechowskiego, D. Sybilskiego wydane przez IBDiM [5] dopuszczają dwie metody formowania prób w warunkach laboratoryjnych: zagęszczanie udarowe w ubijaku Marshalla (metoda I) oraz

zagęszczanie statyczne prasą hydrauliczną (metoda II). Metoda pierwsza wymaga 28 dniowego okresu pielęgnacji próbek, natomiast metoda druga jedynie 7 dni, co ze względów praktycznych korzystne jest dla Wykonawcy.

Z uwagi na to, iż obecnie w Polsce brak jest wytycznych dla recyklowanych mieszanek z asfaltem spienionym do warstw podbudowy, skorzystano z doświadczeń i procedur [15, 16] w zakresie pielęgnacji próbek opracowanych dla tej technologii w innych krajach oraz powstałej na tej podstawie Ogólnej Specyfikacji Technicznej [4]. Próbkę z mieszanki MCAS w odniesieniu do wymienionych dokumentów technicznych niezależnie od metody ich zagęszczania należy przechowywać w formach przez okres 24 godzin w temperaturze +20°C. Następnie po wyjęciu z form należy je pielęgnować w temperaturze +40°C przez okres 72 godzin w komorze termicznej z wymuszonym termoo obiegiem powietrza.

W badaniach laboratoryjnych próbki z mieszanki MCE i MCAS zagęszczano w celach porównawczych metodą I i II. Okres pielęgnacji dostosowany był do rodzaju lepiszcza użytego w składzie recyklowanych mieszanek. Należy dodać, iż zaletą stosowania lepiszcza w formie piany asfaltowej podczas recyklingu konstrukcji nawierzchni metodą na zimno umożliwia skrócenie okresu pielęgnacji warstwy podbudowy.

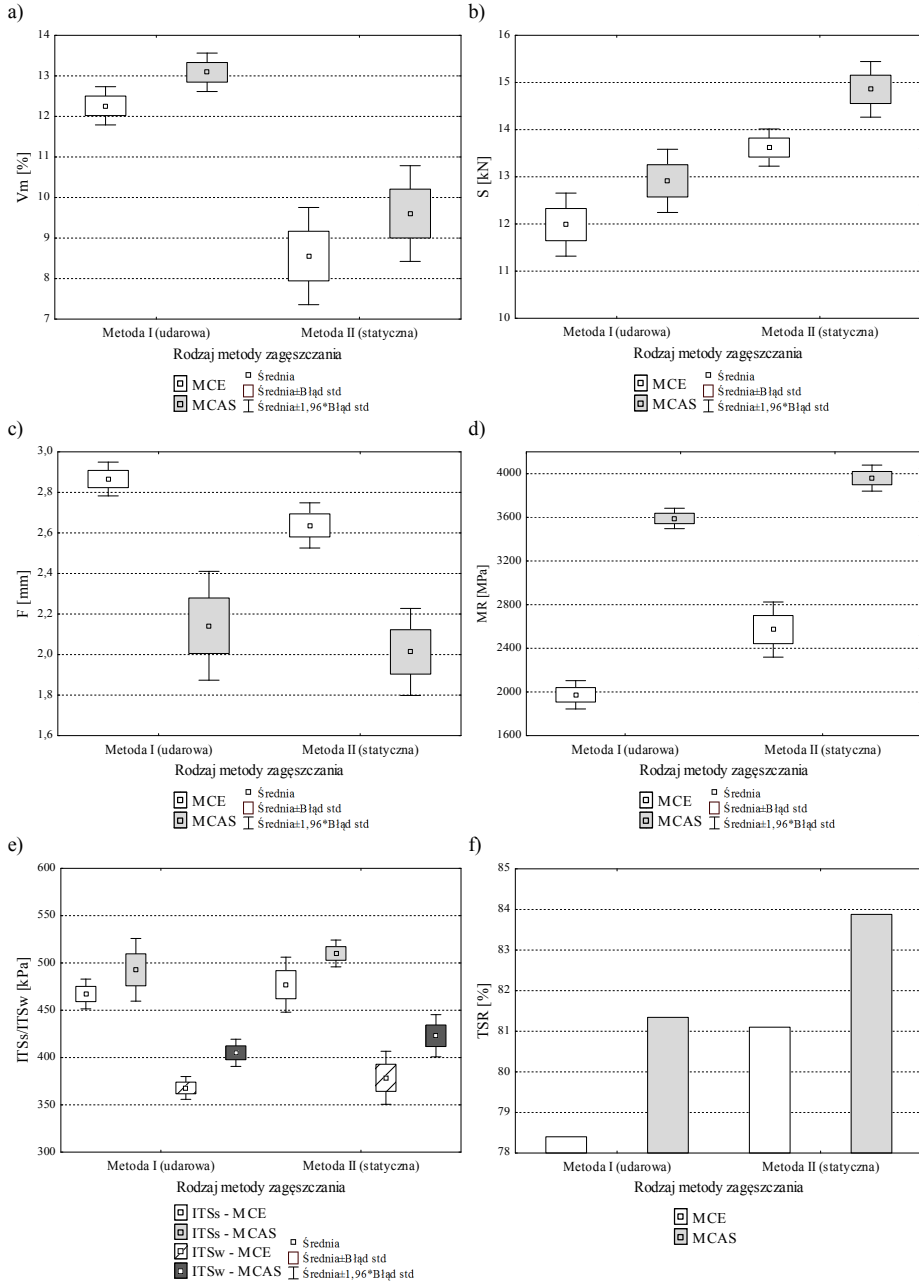
### 3. Wyniki badań i ich analiza

Ocenę wpływu laboratoryjnej metody zagęszczania na zmiany właściwości recyklowanych mieszanek do warstwy podbudowy nawierzchni obciążonej ruchem KR 3 zgodnie z przyjętymi dokumentami technicznymi dokonano na podstawie oznaczenia następujących parametrów:

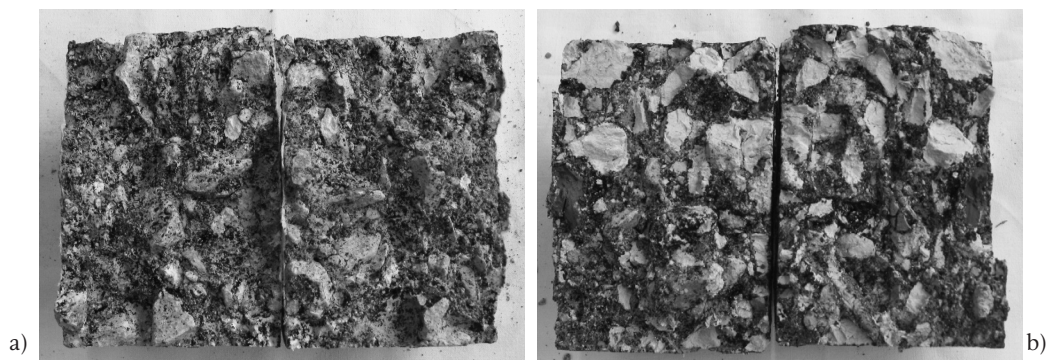
- zawartość wolnych przestrzeni ( $V_m$ ) wg [4, 5],
- stabilność (S) i deformacja (F) wg Marshalla zgodnie z normą PN-EN 12697-30 [17] wytrzymałość na pośrednie rozciąganie przed i po nasączeniu wodą (ITSs, ITSsw) wg [10],
- odporność na działanie wody na podstawie wskaźnika TSR [10].
- moduł sztywności (MR) w schemacie pośredniego rozciągania (IT-CY) w temperaturze 25°C zgodnie z normą PN-EN 12397-26 (załącznik C) [18].

Zależności pomiędzy badanymi parametrami a zastosowaną metodą podczas procesu zagęszczania prób z recyklowanych mieszanek mineralo-cementowo-emulsyjnych oraz mineralno-cementowych z asfaltem spienionym przedstawiono na rysunku 3.

Podczas badań ocenie poddano również powstałą strukturę (fot.1) zagęszczonego materiału, która jest wysoce skomplikowana z uwagi na dużą ilość stref kontaktowych występujących w recyklowanych mieszankach. Należy zaznaczyć, iż analiza makrotekstury odnosi się jedynie do oceny formy geometrycznej elementów składowych i ich wzajemnych relacji.



Rys. 3. Wpływ metody zagęszczenia recyklowanych mieszanek podbudowy na zmiany a) zawartości wolnych przestrzeni ( $V_m$ ) b) stabilności ( $S$ ) wg Marshalla c) odształcenia ( $F$ ) wg Marshalla d) moduł sztywności w pośrednim rozciąganiu ( $MR$ ), e) wytrzymałości na pośrednie rozciąganie przed i po nasączeniu wodą ( $ITSS/ITSw$ ) f) wskaźnik odporności na oddziaływanie wody ( $TSR$ ).



Fot. 1. Przełom próbki sporządzonej z mieszanki MCAS zagęszczanej ubijakiem Marshalla (b) oraz prasą hydrauliczną (a) [fot. A. Chomicz-Kowalska]

Na podstawie analizy uzyskanych rezultatów badań można stwierdzić, że na zmiany wybranych cech fizycznych i mechanicznych recyklowanych mieszanek podbudowy (MCE, MCAS) istotny wpływ ma rodzaj metody użytej w procesie ich zagęszczania.

Przy ocenie zmian zawartości wolnych przestrzeni (rys. 3a) zauważyć można, iż badane obie mieszanki uzyskały wymaganą wartość tego parametru, która zgodnie z wymaganiami [4, 5] wynosić powinna od 9% do 16% dla mieszanek zagęszczanych ubijakiem Marshalla i od 5% do 12% zagęszczanych prasą hydrauliczną. W badaniach zaobserwowano następującą zależność, próbki zagęszczane statycznie charakteryzują się niższą zawartością wolnych przestrzeni niż w przypadku stosowania metody udarowej. Ponadto w mieszankach MCAS niezależnie od metody ich zagęszczania zarejestrowano nieznacznie (o ok. 1%) wyższe wartości parametru  $V_m$ , które w konsekwencji nie powinny negatywnie wpływać na odporność materiału na oddziaływanie wody.

Analizując wyniki badań Marshalla (rys. 3b, rys. 3c) należy stwierdzić, iż niezależnie od rodzaju użytego lepiszcza asfaltowego (emulsji asfaltowej, asfaltu spienionego) próbki zagęszczone metodą II (statyczną) uzyskały wyższe wartości stabilności przy mniejszym odkształceniu w stosunku do mieszanek zagęszczanych udarowo. Zaobserwowano również, że mieszanki mineralno-cementowe z asfaltem spienionym charakteryzują się niższą wartością stabilności wg Marshalla, przez co wykazują wyższą odporność na powstawanie deformacji trwałych (kolein). Potwierdza to zależność zaobserwowana również przy ocenie odkształcenia wg Marshalla, gdzie próbki sporządzone z mieszanki MCAS uzyskały wartość tego parametru na niższym poziomie. Odnosząc się do wymagań [4, 5] obie mieszanki charakteryzują się wymaganymi wartościami analizowanych parametrów, które dla kategorii obciążenia ruchem KR3 powinny zawierać się w przedziale dla  $S=8,0-20,0\text{kN}$  i dla  $F=1,0-3,5\text{mm}$ .

Oceniając wytrzymałość na pośrednie rozciąganie należy stwierdzić, iż metoda zagęszczenia ma wpływ na zmiany analizowanych parametrów. Mieszanka mineralno-cementowa z asfaltem spienionym uzyskała wyższe wartości parametru  $ITS_s$  i  $ITS_w$  w przypadku stosowania metody statycznej podczas jej zagęszczania w porównaniu do mieszanki MCE. Należy dodać, iż wszystkie mieszanki otrzymały wyższe wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie od minimalnej wymaganej

wynoszącej  $ITS_s \geq 225$  kPa i  $ITS_w \geq 100$  kPa zgodnie z przyjętym kryterium [15, 16]. Ustalona na podstawie stosunku  $IST_w/ITS_s$  wartość wskaźnika TSR umożliwiającą ocenę mieszanek podbudowy w aspekcie ich odporności na oddziaływanie wody wskazuje, iż zastosowanie w składzie recyklowanych mieszanek podbudowy asfaltu spienionego zapewnia jej odporność na oddziaływanie wody na wyższym poziomie niż stosowanie emulsji asfaltowej. W odniesieniu do wymagań [4], gdzie wartość wskaźnika TSR powinna wynosić co najmniej 80%, mieszanka MCE zagęszczana udarowo nie spełniła tego kryterium ( $TSR=78,4\%$ ). Na tej podstawie można wnioskować, iż podbudowa z użyciem asfaltu spienionego wykazuje większą odporność na oddziaływanie wody w porównaniu do podbudowy zawierającej emulsję asfaltową.

Podobną zależność zaobserwowano przy ocenie modułów sztywności w pośrednim rozciąganiu, gdzie zanotowano wyższe wartości w próbkach, w których jako lepsze użyto asfaltu spienionego w stosunku do próbek zawierających w swoim składzie emulsję asfaltową, zarówno w I jak i II metodzie ich zagęszczania. Odnosząc się do wymagań [19] stawianych MMA z asfaltem spienionym dla tego typu materiału mineralnego (mieszanka destruktu asfaltowego i kruszywa łamanego: 50/50) wartość MR w temperaturze  $+25^\circ\text{C}$  powinna wynosić w granicach od 2500 MPa do 4000 MPa. Analizując przedstawione wyniki badań (rys. 3f) można zauważyć, że mieszanki przeznaczone na warstwę podbudowy w technologii recyklingu na zimno z asfaltem spienionym zagęszczane statycznie i udarowo spełniają przyjęte kryterium, podczas gdy mieszanka MCE zagęszczana ubijakiem Marshalla uzyskała średnią wartość mniejszą ( $MR=1949$  MPa) od wymaganej.

Analizując powstałą strukturę zagęszczonego materiału (fot.1) zanotowano, iż sposób formowania prób wyraźnie wpływa na ułożenie elementów składowych recyklowanej mieszanki. Zarejestrowano znaczny udział rozkruszonych ziaren materiału mineralnego w przelomie próbki zagęszczanej udarowo, natomiast w przypadku prób formowanych statycznie linia pęknięcia omija ziarna, przez co powierzchnia próbki w miejscu jej rozłupania jest bardziej nieregularna. Dodatkowo zaobserwowano, iż w recyklowanym materiale zagęszczanym udarowo ziarna zmieniają swoje ułożenie na skutek dynamicznej pracy ubijaka Marshalla, natomiast w próbkach zagęszczanych statycznie ziarna nie uległy obrotowi.

#### 4. Wnioski

Na podstawie wykonanych badań laboratoryjnych recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym oraz z emulsją asfaltową w aspekcie laboratoryjnej metody ich zagęszczania sformułowano następujące wnioski:

- na właściwości fizyczne i mechaniczne recyklowanych mieszanek podbudowy wpływ ma rodzaj metody wykorzystywanej w warunkach laboratoryjnych w procesie ich zagęszczania,
- próbki zagęszczane w sposób statyczny uzyskały wyższe parametry wytrzymałościowe ( $S$ ,  $ITS_s$ ,  $ITS_w$ ) w porównaniu do próbek zagęszczanych w ubijaku Marshalla,
- stosowanie asfaltu spienionego w materiale przeznaczonym na warstwę podbudowy w technologii recyklingu na zimno pozwala na zapewnienie jej



- wyższej odporności na deformacje trwałe; dla mieszanki MCAS zanotowano wyższe wartości stabilności oraz mniejsze odkształcenie wg Marshalla,
- obecność asfaltu spienionego w recyklowanych mieszankach wpływa na poprawę odporności na oddziaływanie wody w porównaniu do mieszanek wykonanych z udziałem emulsji asfaltowej, z uwagi na uzyskane wyższe wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie (ITSw) oraz wskaźniki TSR niezależnie od użytej metody ich zagęszczania,
  - stosowanie prasy hydraulicznej (metoda statyczna) do zagęszczania próbek z mieszanki MCE pozwala na zmniejszenie okresu ich pielęgnacji z 28 do 7 dni, natomiast mieszanki MCAS zagęszczane obiema metodami wymagają jedynie 4 dniowego okresu ich pielęgnacji.

## Literatura

- [1] Iwański, M., Chomicz-Kowalska, A. 2011. *Właściwości recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym*. Drogownictwo 9 (2011) 271-277.
- [2] Iwański, M., Chomicz-Kowalska, A. 2012. *Moisture and frost resistance of the recycled base rehabilitated with the foamed bitumen technology*. Archives of Civil Engineering Vol. 58 nr 2 (2012) 185-198.
- [3] Iwański, M.; Chomicz-Kowalska, A. 2013. *Laboratory Study on mechanical Parameters of Foamed Bitumen Mixtures in the Cold Recycling Technology. Proceedings of the 11th International Conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques"*. May 16-17, 2013, Vilnius, Lithuania. Procedia Engineering 57, Elsevier: 433-442.
- [4] OST D-04.10.01a „Szczegółowa specyfikacja techniczna: Podbudowa z mieszanki mineralno-cementowej z asfaltem spienionym (MCAS) wykonana w technologii recyklingu głębokiego na zimno”. Warszawa, GDDKiA, 2013.
- [5] Zawadzki J., Matras J., Mechowski T., Sybilski D. *Warunki techniczne wykonywania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE)*. Zeszyt 61 IBDiM. Warszawa 1999.
- [6] Wymagania Techniczne „Kationowe emulsje asfaltowe na drogach publicznych” WT-3 Emulsje asfaltowe, Warszawa 2009.
- [7] PN-EN 13808 *Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Zasady klasyfikacji kationowych emulsji asfaltowych*.
- [8] PN-EN 197-1 *Cement - Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku*.
- [9] Dołżycki B. *Instrukcja projektowania i wbudowywania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)*. Wersja z dnia 12.12.2013. Gdańsk 2013.
- [10] PN-EN 12697-1 *Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 1: Zawartość lepiszcza rozpuszczalnego*.
- [11] PN-EN 13242 *Kruszywa do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym*.
- [12] Iwański, M.; Chomicz-Kowalska, A. 2012. *Experimental study of water and frost resistance of foamed bitumen mixes in the cold recycling technology*. 5th Euroasphalt & Eurobitume Congress. 13-15 June 2012, Istanbul, 2012.
- [13] PN-EN 1008 *Woda zarobowa do betonu - Specyfikacja pobierania próbek, badanie i ocena przydatności wody zarobowej do betonu, w tym wody odzyskanej z procesów produkcji betonu*.
- [14] PN-EN 13286-2 *Mieszanki niezwiązane i związane hydraulicznie - Część 2: Metody badań laboratoryjnych gęstości na sucho i zawartości wody - Zagęszczanie metodą Proktora*.

- [15] *Wirtgen Cold Recycling Technology* Wirtgen GmbH. Germany 2012.
- [16] Asphalt Academy. 2009. Technical Guideline: *Bitumen Stabilised Materials, A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials*, Technical Guideline 2 (TG2), 2009.
- [17] PN-EN 12697-30 *Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 30: Przygotowanie próbek zageszczonych przez ubijanie*.
- [18] PN-EN 12697-26:2005 *Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 26: Sztynność*.
- [19] *Wirtgen Cold Recycling Manual*. Wirtgen GmbH. Germany, 2004.

## **The influence of laboratory compaction methods on the physical and mechanical properties of foamed bitumen recycled mixes**

**Marek Iwański, Anna Chomicz-Kowalska, Piotr Ramiączek,  
Krzysztof Maciejewski, Mateusz M. Iwański**

*Department of Transportation Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture,  
Kielce University of Technology, e-mail: iwanski@tu.kielce.pl, akowalska@tu.kielce.pl,  
piotrr@tu.kielce.pl, kmaciejewski@tu.kielce.pl, matiawanski@tu.kielce.pl*

**Abstract:** This study attempts to evaluate the influence of two advisable methods for compacting laboratory specimens of road base recycled mixes with foamed bitumen (MCAS) and bitumen emulsion (MCE). The obligatory regulations for this technology permit fabrication of the specimens using either an impact Marshall compactor or a static hydraulic press. The research showed that the compaction method influenced both the physical and mechanical properties of samples regardless of the type of bitumen binder. What is more, the structure of the material changed after the impact compaction process, which manifested in fact that many of the aggregate particles were crushed in its course. Better strength and resistance to moisture damage was observed in samples prepared in the hydraulic press. This was associated with lower void contents obtained in this compaction method.

**Keywords:** Marshall compactor, hydraulic press, road base, cold recycling technology, foamed bitumen, bitumen emulsion, void content, resistance to moisture damage.