



ANNA CHOMICZ-KOWALSKA

Politechnika Świętokrzyska
akowalska@tu.kielce.pl

Zastosowanie technologii recyklingu na zimno z asfaltem spienionym do wykonania podbudów drogowych – Część 2

Wzrost ruchu drogowego, jak również zwiększanie obciążeń działających na nawierzchnię drogową, w konsekwencji prowadzą do pogarszania się jej stanu technicznego. Stwarza to realne zagrożenie dla bezpieczeństwa użytkowników dróg. Poprawa bezpieczeństwa ruchu drogowego, a także minimalizacja oddziaływania inwestycji drogowych na środowisko, stanowią obecnie zasadnicze czynniki brane pod uwagę w procesie projektowania, budowy i utrzymania infrastruktury drogowej. Stosowana od kilkunastu lat w Polsce technologia recyklingu na zimno, umożliwiająca powtórne wykorzystanie materiałów uprzednio zastosowanych do wykonania nawierzchni, w celu uzyskania pełnowartościowej warstwy podbudowy, przyczynia się do ochrony zasobów naturalnych, niosąc za sobą również korzyści finansowe, m.in. poprzez obniżanie kosztów realizacji zadań drogowych.

Technologia recyklingu na zimno z zastosowaniem mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE) od wielu lat znajduje zastosowanie jako efektywny sposób modernizacji istniejących konstrukcji nawierzchni drogowych. Od 2010 r., w szczególności na terenie województwa świętokrzyskiego, stosowana jest odmiana technologii recyklingu na zimno wykorzystująca jako lepiszcze asfalt spieniony (MCAS – mieszanki mineralno-cementowe z użyciem asfaltu spienionego). W technologii tej w ciągu ostatnich 5 lat przebudowano około 40 km dróg, z czego ponad 35 km to odcinki dróg wojewódzkich, obciążone z reguły ruchem KR3-KR4.

Szeroki zakres badań prowadzony w Politechnice Świętokrzyskiej nad zastosowaniem asfaltu spienionego do technologii recyklingu głębokiego na zimno, zrealizowane odcinki dróg, na których wykonane zostały konstrukcje nawierzchni z podbudową z mieszanek MCAS wykazały przydatność oraz efektywność ekologiczną i ekonomiczną tej technologii, a w niektórych aspektach nawet przewagę względem tradycyjnego rozwiązania, tzn. mieszanek MCE. Przy wytwarzaniu mieszanek MCAS istnieje możliwość wykorzystania materiałów mineralnych o niższych parametrach technicznych, w szczególności kruszyw o wysokim zaplewniu, przy jednoczesnym zapewnieniu uzyskania przez nawierzchnię drogową wymaganych parametrów techniczno-eksploatacyjnych. Bardzo istotną zaletą wynikającą z zastosowania tej technologii jest możliwość uzyskania wymaganej nośności przez warstwę podbudowy bezpośrednio po jej wykonaniu, przez co możliwe jest znaczne skrócenie czasu realizacji prac nawierzchniowych, tj. wbudowania kolejnych warstw asfaltowych.

Dotychczas zrealizowane odcinki potwierdziły możliwość zastosowania asfaltu spienionego w polskich warunkach klimatycznych w celu pełnego wykorzystania istniejących nawierzchni, obejmujących warstwy konstrukcyjne, zazwyczaj charakteryzujące się zróżnicowanymi właściwościami pod względem składu, grubości jak również pochodzenia, tj. destruktu asfaltowego, kamiennego i betonowego. W efekcie recyklingu uzyskuje się nośną i trwałą podbudowę, na której może być układany pakiet warstw asfaltowych, zależny od kategorii obciążenia ruchem. Popularyzacja wykorzystania wykorzystywania mieszanek MCAS może wpłynąć na poprawę trudnej sytuacji materiałowej w zakresie kruszyw mineralnych, jaka występuje w wielu regionach naszego kraju. Niższe koszty wykonania mogą ponadto przynieść wyraźną poprawę stanu technicznego nawierzchni dróg [1-3] poprzez zwiększenie zakresów wykonywanych robót opisaną metodą.

Metodyka badań laboratoryjnych i polowych

Baza danych zgromadzona w trakcie realizacji odcinków dróg w regionie świętokrzyskim z podbudową z mieszanki mineralno-cementowej z lepiszczem w postaci asfaltu spienionego umożliwiła przeprowadzenie analiz i ustalenie wpływu składu MCAS na wybrane właściwości wykonanej warstwy konstrukcyjnej.

Na opisanych w pierwszej części artykułu („Drogownictwo” 6/2015 [4]) odcinkach A i B przetworzono materiał istniejących warstw (tj. asfaltowych i kamiennych) z dodatkiem pyłów wapiennych i kruszywa doziarniającego (kruszywo wapienne frakcji 0/4 mm i 0/31,5 mm, odpowiednio na odcinku A i B), natomiast na odcinku C zastosowano jedynie mieszankę nowych kruszyw naturalnych (kruszywo wapienne frakcji 0/2 mm i 0/31,5 mm).

Metodykę badawczą a także kryteria oceny właściwości zaprojektowanych mieszanek MCAS oraz wykonanych warstw podbudowy przyjęto zgodnie z wymaganiami zawartymi w krajowym dokumencie technicznym SST D-04.10.01a [5] opracowanym na podstawie wytycznych technicznych [6, 7, 8, 9, 10] oraz w oparciu o doświadczenia własne.

Prezentację i analizę wyników podzielono na dwa etapy. Pierwszy etap obejmuje analizę wybranych wyników badań uzyskanych na etapie projektowania składu mieszanek MCAS, natomiast drugi etap dotyczy wybranych wyników badań kontrolnych zrealizowanych przy odbiorze robót, tj. w zakresie weryfikacji zgodności uzyskanych parametrów

wbudowanego materiału z założeniami projektowymi, tzn. w odniesieniu do recept laboratoryjnych oraz sprawdzenia nośności i zagęszczenia wykonanej warstwy podbudowy.

Zagęszczanie i kondycjonowanie próbek laboratoryjnych odbywało się zgodnie z procedurą opisaną w krajowym dokumencie technicznym [5], który dopuszcza formowanie prób metodą I – udarową (zagęszczanie ubijakiem Marshalla) lub metodą II – statyczną (zagęszczanie prasą hydrauliczną). Rozważania związane ze stosowaniem równocześnie obu metod w procesie formowania prób z recyklowanych mieszanek podbudowy wraz ze wskazaniem na uzyskiwane różnice w parametrach fizyczno-mechanicznych zostały opisane szczegółowo w publikacjach [11, 12]. Na kolejnych wybranych realizacjach w województwie świętokrzyskim, tzn. odcinkach wykonywanych od 2013 r., stosowano metodę statyczną z użyciem prasy hydraulicznej równoległe z metodą udarową ubijakiem Marshalla, w celu poszukiwania związków pomiędzy metodą zagęszczania a właściwościami uzyskanej warstwy podbudowy. Chodziło o dostosowanie obecnej procedury zagęszczania metodą II (zmiana czasu, sposobu przykładania oraz wielkości nacisku) do rzeczywistych warunków zagęszczania na budowie, tj. gęstości objętościowej i zawartości wolnych przestrzeni, uzyskiwanej w zagęszczonej warstwie podbudowy.

Mieszanki MCAS wbudowywane na przedmiotowych odcinkach dróg zagęszczano ubijakiem Marshalla stosując 75 uderzeń na każdą stronę próbki. Kondycjonowanie próbek odbywało się w następujących warunkach: w okresie pierwszej doby próbki pozostawiano w formach, w których prowadzono zagęszczanie w temperaturze pokojowej wynoszącej +25°C (±2°C), a następnie przez okres 72 h próbki przechowywano w suszarce laboratoryjnej z wymuszonym obiegiem powietrza w temperaturze +40°C (± 2°C).

Podstawę do dokonania oceny zaprojektowanych mieszanek mineralno-cementowych z asfaltem spienionym stanowiły badania laboratoryjne przeprowadzane po kondycjo-

waniu próbek, które obejmowały oznaczenie następujących cech fizycznych i mechanicznych:

- zawartość wolnych przestrzeni (V_m) wg PN-EN 12697-8,
- wytrzymałość na pośrednie rozciąganie wg PN-EN 12697-23 i SST D-04.10.01a [5]: ITS_{dry} (w stanie powietrzno-suchym) oraz ITS_{wet} (po nasączeniu wodą przez 24h) – badania w temperaturze +25°C,
- wskaźnik odporności na oddziaływanie wody TSR , wyrażony jako pozostała wytrzymałość na pośrednie rozciąganie po przechowywaniu próbek w wodzie obliczony wg SST D-04.10.01a [5],
- moduł sztywności S_m oznaczony metodą IT-CY wg PN-EN 12697-26 (Załącznik C) w następujących warunkach: temperatura badania +25°C, czas przyrostu siły 124 ± 4 ms, docelowy poziom deformacji $5 \mu m$, czas pomiędzy cyklami obciążenia 3 s, współczynnik Poissona 0,30.

Podane parametry określano również na materiale pobranym na budowie bezpośrednio z za recyklera w trakcie wykonywania warstwy podbudowy (tj. po wymieszaniu z lepiszczem, lecz przed zagęszczeniem), a następnie zagęszczonym w laboratorium.

W ramach badań kontrolnych wykonanej warstwy z mieszanki MCAS dokonano pomiaru cech geometrycznych oraz oznaczenia parametrów fizyczno-mechanicznych (m.in. zawartości wolnych przestrzeni w warstwie oraz nośności i zagęszczenia warstwy).

W tabeli 1 zestawiono zalecane właściwości dla mieszanek MCAS oraz w odniesieniu do wykonanej warstwy podbudowy. Wymagania odnoszą się do właściwości mieszanek mineralno-cementowych z asfaltem spienionym stosowanych przy przebudowie istniejących nawierzchni oraz przy budowie nowych konstrukcji w ramach przebudów i remontów. Z uwagi na naturalną niejednorodność materiału z recyklingu, na drogach obciążonych ruchem ciężkim KR5-KR7 należy stosować indywidualne projektowanie z zastosowaniem metod mechanistyczno-empirycznych. W tym przypadku

Tabela 1. Wymagania względem uformowanych próbek z mieszanki MCAS oraz w odniesieniu do wykonanej warstwy podbudowy

Parametr	Zalecane wymagania w zależności od kategorii ruchu (KR)	
	KR1 ÷ KR2	KR3 ÷ KR4 (KR5 ÷ KR7 ¹⁾)
Wymagania dla próbek uformowanych z mieszanki MCAS		
Zawartość wolnych przestrzeni, V_m [% (v/v)]	od 8 do 16	od 8 do 15
Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie (w stanie powietrzno-suchym), ITS_{dry} [kPa]	≥ 225	≥ 225
Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie (po nasączeniu wodą), ITS_{wet} [kPa]	≥ 100	≥ 100
Wskaźnik odporności na działanie wody, TSR [%]	≥ 70	≥ 70 (≥ 80)
Moduł sztywności w schemacie IT-CY, S_m ²⁾ [MPa] – Destrukt asfaltowy/kruszywo łamane (mieszanka 50/50) – Kruszywo łamane o ciągłym uziarnieniu	od 2500 do 4000 od 2000 do 3000	od 2500 do 4000 od 2000 do 3000
Wymagania względem warstwy podbudowy z mieszanki MCAS		
Wskaźnik zagęszczenia, w_z [%]	≥ 98%	≥ 98%
Zawartość wolnych przestrzeni w warstwie, V_{mw} [% (v/v)]	≤ 16	≤ 16
Nośność warstwy podbudowy – wtórny moduł odkształcenia E_2 [MN/m ²] – dynamiczny moduł odkształcenia E_{VD} ²⁾ [MN/m ²]	$E_2 \geq 140$ $E_{VD} \geq 70$	$E_2 \geq 180$ $E_{VD} \geq 90$

¹⁾ Wymaga indywidualnego projektowania konstrukcji nawierzchni

²⁾ Parametry te należy traktować jako wymagania pomocnicze

a)



b)



Fot. 1. Pomiar nośności i zagęszczenia podbudowy a) płytą statyczną (VSS) b) płytą dynamiczną (DW nr 752, odcinek Św. Katarzyna - Podgórze, 2015 r.)

zaleca się zachować szczególną ostrożność podczas identyfikacji układu i rodzaju istniejących warstw nawierzchni, a następnie przy opracowywaniu składu mieszanki MCAS. W celu zapewnienia wysokiej jednorodności zalecane jest wbudowywanie mieszanki wytworzonej w wytwórni stacjonarnej.

Nośność warstwy podbudowy sprawdzano na podstawie oceny wtórnego modułu odkształcenia E_2 zgodnie z procedurą opisaną w PN-S-02205:1998 (załącznik B) z wykorzystaniem płyty statycznej (fot. 1a), stosując warunki badania jak w przypadku podbudowy z kruszyw łamanych stabilizowanych mechanicznie. Wbudowywanie kolejnej warstwy konstrukcji nawierzchni następowało po osiągnięciu przez warstwę MCAS wymaganej nośności, którą praktycznie uzyskiwano już w dniu wykonania. W przypadku konieczności dopuszczenia ruchu kołowego względnie zabezpieczenia warstwy od oddziaływania czynników atmosferycznych, na nośnej podbudowie zaleca się ułożyć warstwę asfaltową o grubości minimum 3 cm (dla KR3-KR4). W odniesieniu do prezentowanych odcinków dróg, takie rozwiązanie konstrukcyjne miało miejsce na DW 753 oraz na drodze powiatowej nr 0325T.

Mając na uwadze, że podbudowa wykonana w technologii recyklingu na zimo z asfaltem spienionym szybko uzyskuje zdolność do przenoszenia obciążeń, a jej stosowanie ma mieć korzystny wpływ na przyspieszenie tempa robót, należy oczekiwać, iż wymagana nośność (wyrażoną wtórnym modułem odkształcenia E_2 i/lub modułem dynamicznego odkształcenia E_{vd}) osiągnięta zostanie w pierwszej dobie po wykonaniu podbudowy. Niespełnienie tego warunku oznaczać może, iż podłoże pod warstwą z mieszanki MCAS charakteryzuje się niedostateczną nośnością, względnie właściwości materiału podbudowy są nieodpowiednie, a wpływ na to może mieć m.in. zły skład i jakość przetwarzanych materiałów czy też źle dobrana ilość materiałów wiążących. W takim przypadku wbudowaną warstwę należy ponownie przetworzyć, aby spełnić ten warunek. W przeciwnym razie nie uzyska się wystarczającej trwałości konstrukcji, co w konsekwencji może doprowadzić do powstania przedwczesnych uszkodzeń w nawierzchni.

Osiągnięcie wymaganej nośności przez warstwę MCAS należy uznać za podstawowy parametr wstępnie potwierdzający poprawność jej wykonania, ponieważ określenie pozostałych właściwości (podanych w tabeli 1) możliwe jest dopiero po upływie okresu dojrzewania próbek w warunkach laboratoryjnych.

Na odcinkach dróg z podbudową MCAS, zrealizowanych w województwie świętokrzyskim po 2011 r., nośność zagęszczonej warstwy podbudowy kontrolowano dodatkowo z większą częstotliwością za pomocą aparatu do wyznaczenia modułu dynamicznego odkształcenia (E_{vd}) (fot. 1b) zgodnie z ASTM E2835-11 [13] i oceniano wg [14]. Zagadnienie to będzie przedmiotem kolejnych publikacji. Rozszerzenie standardowej metody płyty statycznej (VSS) o badanie płytą dynamiczną na potrzeby szybkiej oceny stanu nośności i zagęszczenia wbudowanego materiału pozwoli na znaczne skrócenie czasu realizacji zadań drogowych.

Wyniki badań i analiza właściwości mieszanki MCAS i wykonanej warstwy podbudowy

✓ Etap I – właściwości zaprojektowanych mieszanki MCAS

Etap opracowywania recept laboratoryjnych wiązał się z koniecznością przeprowadzenia badań wstępnych obejmujących dużą liczbę mieszanki MCAS z różną kombinacją środków wiążących (asfaltu spienionego i cementu portlandzkiego). Wynikało to z odmiennych składów ramowych, m.in. z obecności destruktu asfaltowego i kamiennego, względnie pyłów wapiennych, a także jakości przetwarzanych istniejących względnie nowych materiałów mineralnych. Na tej podstawie możliwe było skomponowanie optymalnych składów mieszanki mineralno-cementowych z asfaltem spienionym (podanych w pierwszej części artykułu [4]), spełniających założone wymagania z uwzględnieniem warunku ekonomicznego, tj. przy minimalnej zawartości materiałów wiążących. W przypadku wbudowanych mieszanki

Tabela 2. Właściwości fizyczne i mechaniczne zaprojektowanych mieszanek MCAS

Zmienna	Nazwa mieszanki	Tabela przekrojów statystyk opisowych			
		N ważnych	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności [%]
V_m [%]	Mieszanka A	6	10,2	1,037	10,20
	Mieszanka B	6	10,1	0,880	8,76
	Mieszanka C	6	10,7	1,159	10,80
ITS_{dry} [kPa]	Mieszanka A	6	597,8	40,307	6,74
	Mieszanka B	6	649,5	56,371	8,68
	Mieszanka C	6	798,2	64,687	8,10
ITS_{wet} [kPa]	Mieszanka A	6	518,1	35,851	6,92
	Mieszanka B	6	591,1	49,604	8,39
	Mieszanka C	6	602,1	49,748	8,26
TSR [%]	Mieszanka A	–	86,7	–	–
	Mieszanka B	–	91,0	–	–
	Mieszanka C	–	75,4	–	–
S_m [MPa]	Mieszanka A	6	3111,0	228,407	7,34
	Mieszanka B	6	3623,8	248,655	6,86
	Mieszanka C	6	3967,0	327,481	8,26

asfalt spieniony dozowano w ilości 2,5%, 3,0% i 4,0% odpowiednio w mieszance A (na odcinku A), B (na odcinku B) i C (na odcinku C). Natomiast cement stosowany był w jednakowej ilości (2,0%) na wszystkich rozpatrywanych odcinkach dróg. Zalecane jest, aby dodatek cementu był jak najmniejszy, w celu uzyskania w dalszym ciągu podatnej podbudowy, minimalizując w ten sposób ryzyko powstania spękań skurczowych w podbudowie, które w trakcie eksploatacji nawierzchni mogą przyczynić się do powstawania spękań odbitych w ułożonych warstwach asfaltowych.

Wyniki badań uzyskane na etapie opracowywania recept laboratoryjnych na mieszanki MCAS o optymalnych składach ramowych, przeznaczone do wykonania warstwy podbudowy zestawiono w tabeli 2.

Oceniając uzyskane w ramach pierwszego etapu wyniki badań laboratoryjnych stwierdzić można, że na wszystkich trzech odcinkach dróg zaprojektowane optymalne składki mieszanek MCAS spełniły założenia względem cech fizycznych i mechanicznych podanych w tabeli 1.

Średnia zawartość wolnych przestrzeni w analizowanych mieszankach była na porównywalnym poziomie. Najwyższe średnie wartości wytrzymałości na rozciąganie pośrednie przed i po kondycjonowaniu próbek w wodzie stwierdzono w przypadku mieszanki C, natomiast najniższe – w przypadku mieszanki A. We wszystkich trzech porównywanych grupach parametry: ITS_{dry} i ITS_{wet} były wyraźnie wyższe, tj. odpowiednio 2,5 i 3-krotnie od minimalnych wymagań ($ITS_{dry} \geq 225$ kPa i $ITS_{wet} \geq 100$ kPa). Uzyskane wartości wskaźników TSR (> 70%) wskazują, iż w mieszankach do podbudowy zapewniona jest ich szczelność i odporność na oddziaływanie wody. W przypadku mieszanki C, pomimo uzyskania przez

tę mieszankę najwyższych średnich wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, cechowała się ona najniższym wskaźnikiem TSR wynoszącym 75%, na co wpływ mogła mieć najmniejsza (4,0%) średnia sumaryczna ilość lepiszcza (starego i nowego), stanowiącego w tym przypadku jedynie asfalt dodany (spieniony), podczas gdy w mieszance A i B średnia sumaryczna ilość lepiszcza wynosiła znacznie więcej, odpowiednio 5,1% i 4,8%. Wyższą odporność na działanie wody mieszanek A i B w porównaniu do mieszanki C (zawierającej jedynie kruszywa naturalne) można powiązać także z faktem, że w ich skład wchodził destruktu asfaltowy oraz pyły wapienne pozyskane z procesu odpylania kruszywa na wytwórni mieszanek mineralno-asfaltowych. Składniki te przyczyniły się istotnie do zmniejszenia zawartości wolnych przestrzeni i uszczelnienia mieszanki.

Przy ocenie średnich wartości modułów sztywności w pośrednim rozciąganiu w temperaturze badania +25°C najwyższe wartości w zakresie tego parametru zanotowano w przypadku mieszanki z najmniejszą sumaryczną zawartością lepiszcza asfaltowego, wytworzonej na bazie nowych kruszyw (mieszanka C). Mieszanka A z największą sumaryczną ilością lepiszczy uzyskała natomiast najniższą średnią wartość cechy S_m . Odnosząc się do wymagań stawianych mieszankom MCAS wyprodukowanym z destruktu asfaltowego i kruszywa łamanego (w proporcji ok. 50 : 50) wartość parametru S_m powinna wynosić od 2500 MPa do 4000 MPa, natomiast w przypadku mieszanek MCAS wytworzonych z kruszyw łamanych o ciągłym uziarnieniu moduł sztywności powinien zawierać się w przedziale 2000 MPa – 3000 MPa. Z doświadczeń własnych uzyskanych przy opracowywaniu składów mieszanek mineralno-cementowych z asfaltem spienionym na bazie nowych kruszyw wynika, iż uzyskiwane wartości modułów sztywności znacząco przekraczają wymaganą dla tego typu materiału górną wartość graniczną (3000 MPa), dlatego do oceny tego parametru na rozpatrywanych odcinkach dróg przyjęto kryterium pierwsze, tj. $2500 \text{ MPa} \leq S_m \leq 4000 \text{ MPa}$.

Kolejnym elementem analizy było wnioskowanie o istotności różnic między średnimi wartościami rozpatrywanych zmiennych niezależnych (V_m , ITS_{dry} , ITS_{wet} , S_m) w trzech niepowiązanych grupach, tj. mieszanka A, B i C. Z uwagi na

Tabela 3. Wyniki jednoczynnikowej analizy wariancji (one-way ANOVA)

Zmienna	Analiza wariancji (one-way ANOVA) Zaznaczone efekty są istotne z $p < 0,05$							
	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p-value
V_m	2	2	1	16	15	1,06	0,75337	0,48778
ITS_{dry}	129812	2	64906	44934	15	2995,58	21,66729	0,00004
ITS_{wet}	25018	2	12509	31103	15	2073,56	6,03256	0,01196
S_m	2226995	2	1113497	1106213	15	73747,52	15,09878	0,00026

Tabela 4. Wyniki testów porównań wielokrotnych

Nazwa mieszanki	Tukey HSD test Zaznaczone efekty są istotne z $p < 0,05$								
	Zmienna								
	ITS_{dry}			ITS_{wet}			S_m		
	(1) M=597,8	(2) M=649,5	(3) M=798,2	(1) M=518,1	(2) M=591,1	(3) M=602,1	(1) M=3111,0	(2) M=3623,8	(3) M=3967,0
Mieszanka A (1)		0,26179	0,00020		0,03572	0,01570		0,01357	0,00033
Mieszanka B (2)	0,26179		0,00091	0,03572		0,90744	0,01357		0,10580
Mieszanka C (3)	0,00020	0,00091		0,01570	0,90744		0,00033	0,10580	

M – średnia

zgodność rozkładu zmiennych z rozkładem normalnym oraz spełnienie założenia jednorodności wariancji możliwe było użycie testu parametrycznego F (Fishera-Snedecora) (tabela 3). Wyniki testu F pozwalają na przeprowadzenie jednoczesnego porównania kilku średnich, nie wskazując jednak, które średnie grupowe różnią się od innych średnich grupowych. W przypadku, gdy różnice między średnimi okazują się istotne, to z zastosowanego testu wynika jedynie, że przynajmniej jedna średnia różni się od pozostałych. Z tego powodu do oszacowania szczegółowej istotności różnic badanych grup użyto porównania typu *post-hoc*, aby ustalić, które konkretnie średnie różnią się pomiędzy sobą. Użycie ich możliwe jest po uprzednim otrzymaniu istotnego wyniku w ogólnym teście F .

Przedstawione wyniki (tabela 3) sugerują, że rodzaj mieszanki (A, B, C) miał istotny wpływ na cechy ITS_{dry} , ITS_{wet} oraz S_m . W tym przypadku należy odrzucić hipotezę zakładającą równość średnich, gdyż poziom założonego prawdopodobieństwa testowego p -value wyniósł $< 0,05$. Analiza wariancji wykazała, że istnieją co najmniej dwie grupy o istotnym zróżnicowaniu. Jednocześnie wyniki otrzymane w przypadku wspomnianych parametrów uprawniają do przeprowadzenia testów wielokrotnych porównań typu *post-hoc* (tabela 4). Natomiast w przypadku cechy V_m analiza statystyczna potwierdziła brak występowania istotnych różnic w porównywanych grupach badawczych ($p = 0,48778$). Porównywalny poziom wolnych przestrzeni w zaprojektowanych mieszankach umożliwia prawidłowe porównywanie ich cech mechanicznych, a także wyciąganie prawidłowych wniosków dotyczących analizowanego obszaru, tzn. wpływu składu mieszanek MCAS na badane właściwości.

W teście *post-hoc* Tukeya HSD (tabela 4) nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic cechy ITS_{dry} przy porównaniu mieszanki A z B, natomiast w przypadku cechy ITS_{wet} i S_m brak istotnych różnic zanotowano pomiędzy mieszanką B i C. Mieszankę A i B łączy rodzaj użytych materiałów (obecność destruktu asfaltowego i pyłów wapiennych) oraz porównywalna średnia sumaryczna ilość lepiszcza, natomiast dla mieszanki B i C charakterystyczną wspólną cechą jest uziarnienie mieszanki mineralnej, tzn. zbliżona zawartość frakcji piaskowej i wypełniaczowej wynosząca łącznie ok. 30%, podczas gdy w mieszance A jest jej o 10% mniej. Pozostałe porównania były istotne na poziomie przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$.

✓ Etap II – kontrola właściwości wbudowanych mieszanek MCAS oraz wykonanej warstwy podbudowy

Kontrolę właściwości mieszanek MCAS oraz warstwy podbudowy na opisywanych odcinkach dróg przeprowadzono na podstawie badań laboratoryjnych i polowych.

W trakcie wykonywania warstwy podbudowy, tzn. po wymieszaniu wszystkich składników, lecz przed zagęszczeniem, z każdej z wyodrębnionych (o powierzchni < 3000 m²) dziennych działek roboczych pobrano materiał z kilku losowo wybranych miejsc, a następnie na próbkach uformowanych w warunkach laboratoryjnych oznaczono cechy fizyczne i mechaniczne, które zestawiono w tabeli 5. Graficzną interpretację wybranych parametrów (ITS_{dry} , ITS_{wet} , S_m) dla wszystkich danych zebranych ze wszystkich działek roboczych w obrębie danego odcinka drogi przedstawiono na rysunku 1 i 2. Do oceny wyników wykorzystano średnie wartości badanych cech z całego odcinka drogi.

Uzyskane wyniki badań na wszystkich rozpatrywanych odcinkach dróg, zarówno na etapie kontroli właściwości materiału pobranego z budowy jak również wbudowanej warstwy podbudowy z mieszanki MCAS, spełniły założone wymagania podane w tabeli 1.

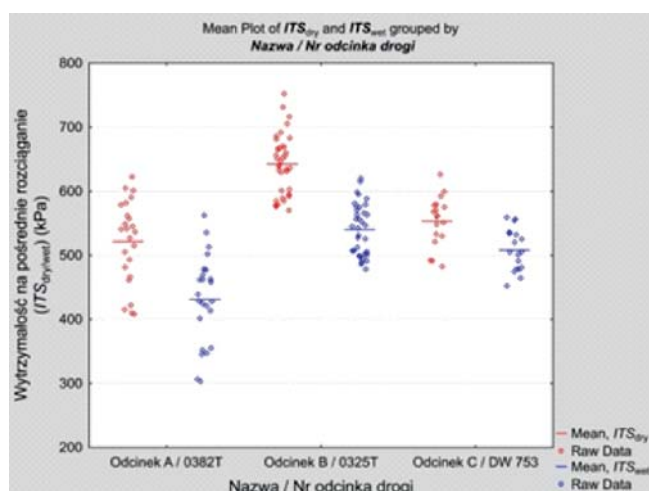
Przetwarzając istniejące, zużyte warstwy nawierzchni, co miało miejsce na odcinku A i B uzyskano podbudowę o zbliżonych parametrach do warstwy, którą wykonano z kruszyw naturalnych (odcinek C).

Zgodnie z wymaganiami [6] [7] [8] [9] opracowanymi dla omawianej technologii, zawartość cementu nie powinna przekraczać 2% (m/m). Dotychczasowe doświadczenia laboratoryjne i praktyka wykonawcza wskazują na konieczność stosowania w polskich warunkach klimatycznych wyższych dodatków cementu w celu zapewnienia odporności podbudowy na działanie wody i mrozu. Stosowanie dodatku 2% cementu pozwoliło uzyskać wymaganą odporność podbudowy na podane czynniki klimatyczne, jak również utrzymać wartości modułów sztywności mieszanek na pożądanym poziomie, zapobiegając w ten sposób ich przesztywnieniu i zmniejszając prawdopodobieństwo powstania w przyszłości spękań odbitych. W zakresie ilości lepiszcza asfaltowego, wbudowane mieszanki na odcinkach A i B zawierały ogółem po ok. 5% asfaltu, natomiast do mieszanki C bez destruktu asfaltowego dozowano 4% nowego lepiszcza. Warunek dotyczący sumarycznej ilości lepiszcza (starego i nowego) nie przekraczają-

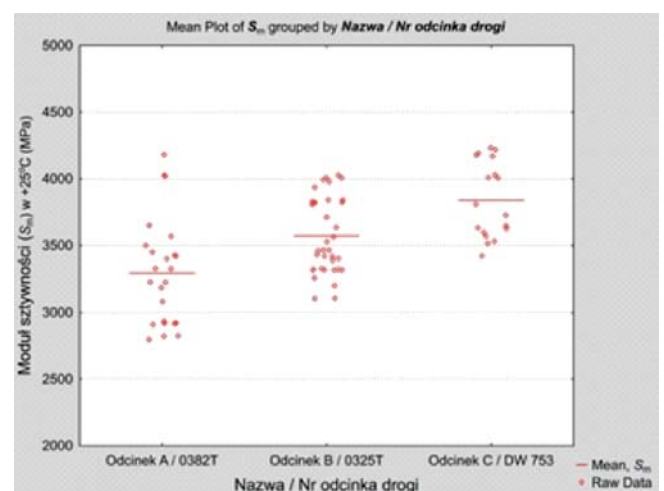
Tabela 5. Wyniki badań parametrów fizyczno-mechanicznych mieszanek MCAS

Nazwa odcinka, Nr drogi	Nr dziennej działki roboczej	Kilometraż; strona	Zmienna												
			V_m [%]			ITS_{dry} [kPa]			ITS_{wet} [kPa]			TSR [%]	S_m [MPa]		
			M	SD	V	M	SD	V	M	SD	V	-	M	SD	V
Odcinek A 0382T	I	od km 1+450 do km 0+780; str. L	8,2	0,360	4,44	430,4	26,178	6,08	334,9	23,506	7,02	77,8	3823,8	285,408	7,46
	II	od km 0+780 do km 0+000; str. L	9,4	0,589	6,30	566,4	37,453	6,61	448,7	27,032	6,03	79,2	3051,6	273,445	8,96
	III	od km 0+000 do km 0+800; str. P	9,5	0,532	5,58	530,5	34,501	6,50	435,6	26,449	6,07	82,1	3124,6	227,462	7,28
	IV	od km 0+800 do km 1+450; str. P	9,8	0,535	5,48	558,7	43,194	7,73	505,6	40,754	8,06	90,5	3178,4	236,342	7,44
	Dla całego odcinka A		9,2	0,808	8,79	521,5	64,730	12,41	431,2	68,824	15,96	82,7	3294,6	396,062	12,02
Odcinek B 0325T	I	od km 0+180 do km 0+900; str. P	9,6	0,592	6,15	638,4	41,739	6,54	529,6	38,881	7,34	83,0	3645,3	275,594	7,56
	II	od km 0+900 do km 1+700; str. P	10,6	0,519	4,89	660,7	44,767	6,78	552,5	40,052	7,25	83,6	3647,1	357,472	9,80
	III	od km 1+700 do km 2+449,4; str. P	10,7	0,550	5,13	640,6	49,184	7,68	538,4	34,496	6,41	84,0	3597,6	282,638	7,86
	IV	od km 0+180 do km 0+900; str. L	9,8	0,543	5,57	610,7	32,695	5,35	519,6	33,457	6,44	85,1	3467,8	338,122	9,75
	V	od km 0+900 do km 1+700; str. L	10,2	0,513	5,04	680,3	45,275	6,65	571,6	47,631	8,33	84,0	3578,3	268,423	7,50
	VI	od km 1+700 do km 2+449,4; str. L	10,3	0,703	6,85	624,9	46,898	7,50	529,1	37,630	7,11	84,7	3487,1	236,893	6,79
	Dla całego odcinka B		10,2	0,672	6,59	642,6	46,611	7,25	540,1	40,121	7,43	84,0	3570,5	283,303	7,93
Odcinek C DW 753	I	od km 13+796,16 do km 14+460; str. P	10,4	0,423	4,08	535,6	43,349	8,09	494,9	32,300	6,53	92,4	3828,6	280,676	7,33
	II	od km 13+796,16 do km 14+460; str. L	10,1	0,506	5,01	573,5	32,632	5,69	526,2	34,444	6,55	91,8	3791,8	327,390	8,63
	III	od km 14+460 do km 14+847,75; str. L, P	10,4	0,608	5,84	550,9	37,224	6,76	503,8	29,529	5,86	91,5	3897,2	289,268	7,42
	Dla całego odcinka C		10,3	0,507	4,92	553,3	39,105	7,07	508,3	33,111	6,51	91,9	3839,2	285,172	7,43

M – średnia, SD – odchylenie standardowe, V – współczynnik zmienności



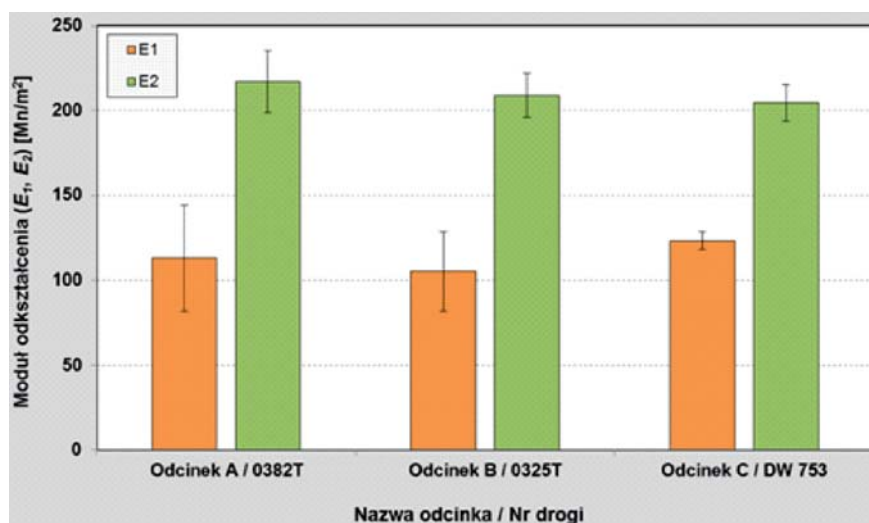
Rys. 1. Wyniki badań wytrzymałości na pośrednie rozciąganie mieszanek MCAS



Rys. 2. Wyniki badań modułów sztywności mieszanek MCAS

Tabela 6. Wyniki z pomiaru nośności i zagęszczenia podbudowy z mieszanki MCAS na analizowanych odcinkach dróg

Zmienna		Nazwa odcinka	Średnia	Minimum	Maksimum	Odc. std.	Wsp. zmienności [%]
Moduł odkształcenia	E_1 [MN/m ²]	Odcinek A	113,1	96,1	146,8	20,477	18,11
		Odcinek B	105,1	82,1	125,0	13,434	12,78
		Odcinek C	123,1	107,5	132,3	11,812	9,60
	E_2 [MN/m ²]	Odcinek A	216,8	183,6	267,1	34,621	15,97
		Odcinek B	209,0	167,3	250,0	24,367	11,66
		Odcinek C	204,5	198,4	211,7	5,698	2,79
Wskaźnik odkształcenia I_o [-]		Odcinek A	1,9	1,8	2,02	0,088	4,58
		Odcinek B	2,0	1,8	2,7	0,134	6,72
		Odcinek C	1,7	1,5	1,9	0,138	8,25



Rys. 3. Wyniki modułów odkształcenia pierwotnego (E_1) i wtórnego (E_2) podbudowy MCAS (słupki błędów określają odchylenia standardowe)

cej 6% (m/m) został spełniony w przypadku wszystkich trzech mieszank. Najbardziej korzystne parametry mieszanki C, tzn. z najmniejszą ilością lepszca asfaltowego można wytłumaczyć bardzo dobrą dyspersją piany asfaltowej w mieszance mineralnej nie zawierającej materiałów z recyklingu, a co za tym idzie większą jednorodnością tej mieszanki.

Najniższe wartości współczynników zmienności uzyskała mieszanka C, która cechowała się największą jednorodnością wynikającą z właściwości użytych materiałów, natomiast największą zmiennością wyników charakteryzowała się mieszanka A z dużą ilością materiałów z recyklingu (85%). Oczywiście jest, iż ze względu na przetwarzanie istniejących nawierzchni metodą mieszania na miejscu, to z uwagi na zmienne właściwości i grubości zalegających warstw konstrukcyjnych uzyskiwany jest większy rozrzut wyników, co miało miejsce na odcinku A i B (rys. 1 i 2), odnosząc to do przypadku stosowania materiału z dowozu, jak na odcinku C. Z tego powodu niezwykle ważne jest poprawne rozpoznanie układu istniejących warstw nawierzchni na etapie opracowywania składu mieszank, w celu uzyskania jednorodnej warstwy podbudowy. Zanotowane porównywalne wartości współczynników zmienności badanych parametrów w eta-

pie I wynoszące poniżej 11% oraz w etapie II sięgające maksymalnie 16% świadczą o niewielkiej wrażliwości zmienności materiału wejściowego na właściwości produktu końcowego (tzn. wykonanej podbudowy).

Uzyskane pozytywne parametry decydujące o jakości i trwałości wykonanej podbudowy, jak również całej konstrukcji nawierzchni drogowej stanowią podstawę do stwierdzenia, iż technologia ta poprzez ograniczenie zużycia nieodnawialnych surowców naturalnych i zastąpienie ich w jak największym stopniu materiałami z recyklingu wpisuje się w politykę zrównoważonego rozwoju. Za jej stosowaniem przemawiają również względy ekonomiczne, związane z obniżeniem kosztów budowy i utrzymania sieci dróg w naszym kraju.

Jak to zostało podane, na zagęszczonej warstwie podbudowy określono również m.in. zawartość wolnych przestrzeni w warstwie, nośność i zagęszczenie. Wybrane wyniki uzyskane z pomiarów polowych podano w tabeli 6 oraz zilustrowano na rysunku 3. Do oceny wyników wykorzystano średnie wartości badanych cech z całego odcinka drogi. Na fotografiach nr od 2 do 6 przedstawiono wybrane etapy budowy, poczynając od procesu rozpoznania właściwości warstw istniejącej konstrukcji drogowej, przez pomiar cech piany asfaltowej w warunkach *in situ* oraz proces technologiczny wykonywania podbudowy z mieszanki MCAS.

Na podstawie uzyskanych danych stwierdzono prawidłową nośność na wszystkich ocenianych odcinkach dróg. Oznaczone wskaźniki zagęszczenia warstwy oraz za-

wartości wolnych przestrzeni w warstwie spełniły założone wymagania (odpowiednio: $\geq 98\%$ i $\leq 15\%$ (v/v)). Pomimo niejednorodności materiałów mieszanych metodą *in situ*, zmienność wyników z pomiaru nośności i zagęszczenia nie przekroczyła 20%.

Na wszystkich odcinkach dróg nośność warstwy podbudowy zbadana w dniu jej wykonania spełniała założone wymagania, co pozwoliło na układanie kolejnych warstw konstrukcyjnych jeszcze w danym dniu. Uzyskane wartości wtórnego modułu odkształcenia na warstwie podbudowy osiągnęły wartości znacznie powyżej wymaganego kryterium ($E_2 \geq 180$ w przypadku dróg o KR3).

Niezależnie od rodzaju przetwarzanego materiału, wykonane warstwy podbudowy charakteryzowały się zbliżonymi parametrami. Dotychczasowe doświadczenia potwierdziły, że lepszca w postaci asfaltu spienionego może być stosowane nie tylko podczas przetwarzania istniejących, zużytych warstw konstrukcji nawierzchni drogowej w warstwą podbudowy, ale również w uzasadnionych przypadkach stosować można nowe surowce skalne bez dodatku destruktu asfaltowego, który obecnie stanowi cenny materiał stosowany przy produkcji mieszank mineralno-asfaltowych w technologii na gorąco.



Fot. 2. Rozpoznanie układu i rodzaju istniejących warstw konstrukcji nawierzchni i podłoża (DW nr 744, Radom-Wierzbica-Starachowice, 2013 r.)



Fot. 3. Kontrola w warunkach polowych parametrów piany asfaltowej pobranej z dyszy recyklera



Fot. 4. Rozsypywanie środka wiążącego przed przejazdem recyklera (DW nr 753, Huta Nowa-Wólka Milanowska, 2011 r.)



Fot. 5. Zestaw maszyn do recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym (DW nr 753, Huta Nowa-Wólka Milanowska, 2011 r.)

a)



Fot. 6. Mieszanka MCAS po przejściu recyklera a) Wirtgen WR 2000 (droga powiatowa Nr 0382T, Tokarnia, 2010 r.), b) Wirtgen WR 4200 (DW 744, Radom-Wierzbica-Starachowice, 2013 r.)

b)



Podsumowanie

Potrzeby w zakresie remontów i przebudów dróg w naszym kraju są znaczne, a dotyczy to nie tylko dróg krajowych, ale w bardzo dużym zakresie również dróg niższych kategorii, tj. wojewódzkich, powiatowych i gminnych. Popularyzacja i wprowadzenie do wykonawstwa technologii pozwalającej na powtórne wykorzystanie materiałów z istniejących warstw konstrukcji, względnie użycie również innych materiałów odpadających jak np. pyłów mineralnych z odpylania powstających przy produkcji mma, jest tylko kwestią czasu w obliczu zmniejszających się zasobów naturalnych oraz w świetle restrykcyjnych wymogów środowiskowych. Z tego powodu korzystne jest stosowanie technologii recyklingu na zimno z użyciem asfaltu spienionego. Daje to możliwość przetwarzania różnicowanych, niskiej jakości materiałów o zmiennych właściwościach, które w odniesieniu do tradycyjnych technologii są kwalifikowane jako materiał odpadowy, w jednorodną i nośną warstwę pełniącą funkcję podbudowy zasadniczej, pomocniczej względnie wzmocnienia podłoża. Dzięki zastosowaniu recyklingu na zimno ogranicza się zużycie nieodnawialnych zasobów surowców naturalnych poprzez zastąpienie ich w jak największym stopniu (niekiedy nawet w 100%) materiałami odpadowymi. Wpisuje się to w realizację polityki zrównoważonego rozwoju.

Przedstawione przykłady pokazują, że odpowiedni dobór środków wiążących w mieszankach MCAS odgrywa kluczowe znaczenie dla uzyskania pożądanego efektów i spełnienia wymagań stawianych przez krajowy dokument techniczny. Istotnym elementem wykonanych prac terenowych było również potwierdzenie możliwości wczesnego obciążania wykonanej podbudowy ruchem technologicznym, bez stwierdzenia negatywnych skutków tego oddziaływania.

Technologia recyklingu na zimno z użyciem jako lepiszcza asfaltu spienionego jest coraz powszechniej stosowana w regionie świętokrzyskim, w szczególności na drogach wojewódzkich. Politechnika Świętokrzyska, we współpracy ze Świętokrzyskim Zarządem Dróg Wojewódzkich w Kielcach, objęła stałym programem monitorowania wszystkie zrealizowane odcinki dróg wojewódzkich z podbudową MCAS. Prowadzone są rozszerzone badania i pomiary mające na celu analizę trwałości konstrukcji nawierzchni dróg z podbudową MCAS. Zbierane dane identyfikujące właściwości podbudowy stanowią będą bazę, która jest rozbudowywana o wyniki z uzupełniających badań, pozwalających na usprawnienie i przyspieszenie tempa realizacji przedsięwzięć drogowych, przy jednoczesnym zapewnieniu wymaganej trwałości konstrukcji nawierzchni. Pomiary nośności ugięciomierzem FWD wykonane w 2015 r. na wszystkich odcinkach dróg (powiatowych i wojewódzkich) potwierdziły odpowiednią nośność konstrukcji nawierzchni z zastosowaną podbudową MCAS.

Autorka serdecznie dziękuje Świętokrzyskiemu Zarządowi Dróg Wojewódzkich w Kielcach oraz Kieleckiemu Przedsiębiorstwu Robót Drogowych (KPRD Sp. z o.o.) za współpracę przy realizacji, zaprezentowanych w artykule, remontów odcinków dróg z podbudową z mieszanki MCAS.

Bibliografia

- [1] Iwański M., Chomicz-Kowalska A.: *Laboratory Study on Mechanical Parameters of Foamed bitumen Mixtures in the Cold Recycling Technology*. 11th International Conference on Modern Building Materials, Structure and Techniques, Volume 57, 433-422, May 16-17, 2013, Vilnius, Lithuania. DOI:10.1016/j.proeng.2013.04.056
- [2] Iwański M., Chomicz-Kowalska A.: *Experimental study of water and frost resistance of foamed bitumen mixes in the cold recycling technology*. Proc. Euroasphalt & Eurobitume Congress, June 13-15, 2012, Istanbul, Turkey.
- [3] Iwański M., Chomicz-Kowalska A.: *Evaluation of the effect of using foamed bitumen and bitumen emulsion in cold recycling technology*. 3rd International Conference on Transportation Infrastructure: Sustainability, Eco-Efficiency, and Conservation in Transportation Infrastructure Asset Management, 69-76, April 22-25, 2014, Pisa, Italy.
- [4] Chomicz-Kowalska A.: *Zastosowanie recyklingu na zimno z asfaltem spienionym w regionie świętokrzyskim – Część 1*. Drogownictwo, 6 (2015), s. 172-176.
- [5] GDDKiA. 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, 2015.
- [6] Wirtgen. *Podręcznik recyklingu na zimno*. Wirtgen GmbH, 2004.
- [7] Wirtgen. *Wirtgen Cold Recycling Technology*. Wirtgen GmbH, 2012.
- [8] Asphalt Academy. *The Design and Use of Foamed Bitumen Treated Materials. Interim Technical Guideline (TG2)*. Asphalt Academy, Pretoria, South Africa, 2002.
- [9] Asphalt Academy. *Technical Guideline TG2: Bitumen Stabilised Materials, A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials*. South Africa, 2009.
- [10] Dołycki B.: *Instrukcja projektowania i wbudowywania mieszank mineralno-cementowo-emulsiyjnych (MCE)*. Wersja z dnia 10.09.2014. Politechnika Gdańska, Katedra Inżynierii Drogowej.
- [11] Iwański M., Chomicz-Kowalska A., Ramiączek P., Maciejewski K., Iwański MM.: *Wpływ laboratoryjnych metod zagęszczania na właściwości fizykomechaniczne recyklowanych mieszank mineralno-asfaltowych z asfaltem spienionym*. Budownictwo i Architektura, Tom: 13, Zeszyt: 1, s. 53-62, 2014.
- [12] Iwański M., Chomicz-Kowalska A.: *Evaluation of the pavement performance*. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences. Vol.63, Issue 1, 97-105, April 2015. DOI: 10.1515/bpasts-2015-0011
- [13] ASTM E2835-11 *Standard Test Method for Measuring Deflections using a Portable Impulse Plate Load Test Device*.
- [14] *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau ZTVE-StB 94*.

Serwis GDDKiA • Aktualności

Podpisano umowę na S17 od węzła Lubelska do Garwolina

Podpisano umowę na realizację trzech kolejnych odcinków drogi S17 pomiędzy Warszawą a Lublinem. Tym samym przypieczętowano rozpoczęcie prac w trybie projektuj i buduj na ponad 37-kilometrowym odcinku od węzła Lubelska pod Warszawą do początku obwodnicy Garwolina. Trwają już prace projektowe na pozostałym, blisko 59-kilometrowym odcinku od końca obwodnicy Garwolina do węzła Kurów Zachód.

Konsorcjum firm Strabag i Strabag Infrastruktura Południe zajmie się realizacją dwóch odcinków: od w. Lubelska do początku obwodnicy Kołbieli (ok. 15,2 km, wartość ok. 370,5 mln zł) oraz obwodnicą Kołbieli (8,7 km, ok. 225,5 mln zł). Kolejny odcinek, od obwodnicy Kołbieli do początku obw. Garwolina (ok. 13 km, blisko 290 mln zł), zaprojektuje i zbuduje firma Budimex.

Zgodnie z umową wykonawcy mają 34 miesiące na oddanie inwestycji do użytkowania (nie wlicza się okresów zimowych od 15 grudnia do 15 marca przypadających na prace w terenie) co oznacza, że kierowcy będą mogli skorzystać z trasy w połowie 2019 roku. Realizacja inwestycji w trybie projektuj i buduj oznacza, iż wykonawca opracuje dokumentację projektową, uzyska decyzję o Zezwoleniu na Realizację Inwestycji Drogowej, a następnie wybuduje trasę. Przed oddaniem do ruchu opracuje dokumentację powykonawczą oraz uzyska decyzję dopuszczenia drogi do użytkowania.

27-01-2016