



DARIUSZ SYBILSKI¹⁾
WOJCIECH BAŃKOWSKI²⁾

PRACE BADAWCZE LABORATORYJNE I W PEŁNEJ SKALI NAD ZASTOSOWANIEM BETONU ASFALTOWEGO O WYSOKIM MODULE SZTYWNOŚCI W NAWIERZCHNI DROGOWEJ

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono doświadczenia z betonem asfaltowym o wysokim module sztywności AC WMS (dawniej oznaczanym BA WMS). Pierwsze zastosowanie tej technologii miało miejsce w Poznaniu w roku 1997. Prace badawcze obejmowały zaawansowane badania laboratoryjne i analizy obliczeniowe konstrukcji, które wskazały na korzystny wpływ AC WMS na trwałość zmęczeniową nawierzchni. Opracowano typowe konstrukcje o trwałości przewidywanej na 20 i 30 lat. Opracowane zostały wytyczne techniczne dotyczące betonu asfaltowego o wysokim module sztywności. W Pruszkowie pod Warszawą wybudowane zostały odcinki testowe, które poddano badaniom z zastosowaniem symulatora pojazdów ciężkich HVS. Potwierdzone zostały dobre właściwości nawierzchni z AC WMS.

1. WPROWADZENIE

Podstawowym problemem w latach dziewięćdziesiątych XX wieku w Polsce były deformacje trwałe nawierzchni asfaltowych, wybudowanych w ubiegłych latach i nie dostosowanych do zwiększonego obciążenia ruchem drogowym, zwłaszcza przy

¹⁾ prof. dr hab. inż. – Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie oraz Politechnika Lubelska

²⁾ dr inż. – Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie oraz Politechnika Lubelska

jednoczesnym wzroście temperatury w tym okresie. Rok 1994 był szczególnie krytyczny – rekordowo gorące lato i wzrost obciążenia dróg spowodowały powstanie deformacji trwałych na niemal całej sieci dróg krajowych.

W celu przeciwdziałania powstawaniu deformacji nawierzchni asfaltowych opracowano w IBDiM metodę pomiarową i zalecenia doboru materiałów zwiększających odporność betonu asfaltowego na deformacje trwałe. Zalecenia te i metodyka badawcza zostały zaakceptowane przez GDDP i szybko upowszechniły się, stając się standardem w specyfikacjach kontraktowych (publikacja IBDiM zeszyt 48 z serii „I”).

Konieczność zwiększenia odporności na koleinowanie nawierzchni asfaltowych była pierwszym i podstawowym zadaniem. Najczęściej przyjmowano jednak najprostsze i najtańsze, stosowane w świecie rozwiązania:

- zmniejszenie zawartości asfaltu,
- zastosowanie twardszego asfaltu (D50 zamiast D70),
- zwiększenie największego ziarna mieszanki mineralno-asfaltowej.

Zwiększenie odporności na koleinowanie zostało w znacznej mierze uzyskane, lecz niestety objawiły się wady przyjętych rozwiązań materiałowych:

- pogorszenie wodo- i mrozoodporności warstwy ścieralnej z betonu asfaltowego o zwiększonej odporności na deformacje trwałe wg zeszytu 48,
- zmniejszenie trwałości zmęczeniowej betonu asfaltowego w przypadku zbyt małej grubości nawierzchni (co niestety często się spotykało).

Równolegle wdrażano nową technologię mieszanki mastyksowo-grysowej SMA. Koncept tej mieszanki powstał w Niemczech w celu zwiększenia odporności na deformacje nawierzchni asfaltowej i upowszechnił się w świecie jako alternatywa betonu asfaltowego.

Wdrożenie betonu asfaltowego o zwiększonej odporności na koleinowanie opóźniło niestety upowszechnienie stosowania mieszanki SMA. Nowe narzędzie w postaci metody badania pęczania do oceny właściwości mieszanki w wysokiej temperaturze, umożliwiło poprawę odporności na deformacje. Uzyskano to prostymi metodami przy projektowaniu betonu asfaltowego: zmniejszenia zawartości asfaltu i zastosowaniu gruboziarnistych mieszanek. Nie towarzyszyła temu jednak ocena innych ważnych właściwości funkcjonalnych mieszanki: zmęczenia i odporności niskotemperaturowej. Brak było odpowiednich ku temu narzędzi. Efektem było zwiększenie sztywności betonu asfaltowego przy jednoczesnym osłabieniu odporności na pękanie zmęczeniowe i niskotemperaturowe.

W IBDiM podjęto prace nad nowymi rozwiązaniami technologicznymi i nowymi zaleceniami doboru materiałów i projektowania konstrukcji nawierzchni w celu zwiększenia trwałości nawierzchni, uwzględniając odporność na deformacje, zmęczenie, pękanie niskotemperaturowe i wodoodporność. Ważnym składnikiem tych prac była technologia betonu asfaltowego o wysokim module sztywności.

2. MIESZANKI O WYSOKIM MODULE SZTYWNOŚCI WE FRANCJI

Prace nad technologią betonu asfaltowego o wysokim module sztywności podjęto we Francji na początku lat osiemdziesiątych XX wieku. Mieszanki o wysokim module występowały wówczas w dwóch wariantach: do warstwy ścieralnej i wiążącej BBME wg NF P 98-141, do warstwy podbudowy EME wg NF P 98-140. Późniejsza praktyka ograniczyła się do stosowania EME w warstwach wiążących i podbudowy. Warstwę ścieralną wykonuje się jako cienką warstwę o grubości nie większej niż 3,5 cm (stosowane są też warstwy bardzo cienkie o grubości nie większej niż 2,5 cm, a także ultra cienkie o grubości nie większej niż 1,5 cm). Koncept ten jest praktyczną realizacją funkcjonalnego układu warstw nawierzchni: cienka warstwa ścieralna zapewnia odpowiednią charakterystykę powierzchni jezdni, a wiążąca i podbudowa – odporność na koleinowanie i zmęczenie. Cienka warstwa ścieralna wykonywana jest z mieszanki mineralno-asfaltowej o nieciąglym uziarnieniu z lepiszczem polimeroasfaltowym.

Mieszanki EME mają uziarnienie 0/10, 0/14 lub 0/20 mm. Wyróżnia się klasy 1 i 2. Właściwości mechaniczne określają odporność na deformacje, moduł zespolony (w 15°C, 10 Hz) $\geq 14\,000$ MPa i odporność na zmęczenie ϵ_6 (po 10^6 cyklach obciążeń w 10°C, 25 Hz) $\geq 100 \cdot 10^{-6}$ lub $\geq 130 \cdot 10^{-6}$. Zawartość wolnej przestrzeni (po zagęszczeniu w żyratorze) $\leq 10\%$ lub $\leq 6\%$. Mieszanka klasy 1 zawiera około 4,2% m/m, a klasy 2 około 5,6% m/m asfaltu. Mieszanki obu klas są równie odporne na deformacje, ale mieszanki klasy 2 są znacznie bardziej odporne na zmęczenie ze względu na dużą zawartość asfaltu. Obecnie unika się zmniejszania zawartości asfaltu, aby nie pogarszać trwałości zmęczeniowej nawierzchni.

Jako lepiszcze w mieszankach o wysokim module stosowany jest bardzo twardy asfalt o penetracji 10 - 20 \times 0,1 mm, asfalt z dodatkiem asfaltytów lub twardy polimeroasfalt (w ostatnim czasie przechodzi się na polimeroasfalty ze względu na niebezpieczeństwo spękań).

Wykonane we Francji badania porównawcze podbudów z tym samym twardym asfaltem o penetracji 14 \times 0,1 mm w mieszankach o składzie według norm francuskiej i brytyjskiej wykazały, że mieszanki francuskie o większej zawartości asfaltu mają wyraźnie większą odporność zmęczeniową przy porównywalnej sztywności i odporności na deformacje. Sztywność tych mieszanek była natomiast znacznie większa niż klasycznej podbudowy według normy brytyjskiej z asfaltem o penetracji 100 [1].

Najmniejszy moduł sztywności francuskich mieszanek EME w 15°C i 10 Hz, wynosi 14 000 MPa. Praktycznie uzyskuje się wartości około 20 000 MPa, zwłaszcza gdy stosowana jest modyfikacja asfaltem. Pod względem sztywności materiał taki jest porównywalny z podbudową stabilizowaną cementem lub z żuzłą stalowniczego [2]. Moduł sztywności jest około 1,5 - 3 razy większy w porównaniu do modułu klasycznego betonu asfaltowego przeznaczonego do warstwy wiążącej lub podbudowy.

Wysoki moduł sztywności mieszanek EME można uzyskać również z kruszywem gorszej jakości, tj. można kruszywo łamane zastąpić kruszywem naturalnym (we Francji do warstwy ścieralnej wymaga się 100% kruszywa łamanego, a do warstwy podbudowy co najmniej 60%) [3]. Nie pogarsza to wartości konstrukcyjnej, ani odporności na koleinowanie warstwy podbudowy lub wiążącej.

Warstwy podbudowy o wysokim module sztywności mają jeszcze i tę zaletę, że pozwalają na zmniejszenie grubości konstrukcji nawierzchni bez zmniejszania jej trwałości zmęczeniowej. Zwiększenie sztywności podbudowy 5 razy zwiększa trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni (liczbę obciążeń do zniszczenia) od 5 do 10 razy [1].

Ze względu na zastosowanie bardzo twardego asfaltu warstwy z mieszanki EME mogą być podatne na pękanie niskotemperaturowe, które przypisywane jest właściwościom asfaltu [4]. Zabezpieczeniem warstwy z mieszanki EME jest warstwa ścieralna, nawet bardzo cienka, która zmniejsza jej narażenie na bezpośrednie działanie niskiej temperatury.

Doświadczenia francuskie z zainteresowaniem zostały przyjęte w innych krajach. Pierwsze zastosowanie poza Francją miało miejsce w Wielkiej Brytanii. Nie było ono niestety udane, bowiem nie przeprowadzono pełnych badań betonu asfaltowego o wysokim module, a w tym zwłaszcza badań zmęczenia. Nie uwzględniono także potrzeby zmniejszenia zawartości wolnych przestrzeni w mieszance. Beton asfaltowy o wysokim module sztywności jest stosowany także w Czechach, Belgii i innych krajach.

Beton asfaltowy typu AC WMS jest mieszanką o właściwościach specjalnych – charakteryzuje się wysoką sztywnością i dobrą odpornością na koleinowanie oraz jednocześnie wyższą odpornością na zmęczenie w porównaniu z typowym betonem asfaltowym do warstwy wiążącej lub podbudowy. Uzyskanie takich właściwości jest możliwe dzięki odpowiedniej kompozycji uziarnienia i zastosowanym materiałom. W celu uzyskania sztywności i odporności na deformacje trwałe stosuje się asfalty twardsze. Z drugiej strony uziarnienie mieszanki mineralnej dobierane jest podobnie jak dla warstwy ścieralnej, co umożliwi wprowadzenie większej zawartości asfaltu i uzyskanie mniejszej zawartości wolnych przestrzeni. W ten sposób uzyskiwana jest wysoka trwałość zmęczeniowa.

3. PIERWSZE BADANIA I ZASTOSOWANIA W POLSCE

W 1997 r. podjęto prace badawcze nad nowym lepiszczem asfaltowym, dotychczas nie stosowanym w Polsce, asfaltem wielorodzajowym multigrade [5]. Asfalt ten był wówczas pierwszym tego typu, nowym produktem opracowanym przez producenta w ramach programu badawczego skoncentrowanego nad rozwojem nowego lepiszcza uniwersalnego, to znaczy o zmniejszonej wrażliwości termicznej [6 - 9]. Podstawową zaletą asfaltu Multiphalte jest podwyższenie odporności na deformacje trwałe nawierzchni asfaltowych z równoczesnym polepszeniem jej odporności na działanie niskiej temperatury, przy stosunkowo niewielkim wzroście kosztów produkcji mieszanki. Od około 1985 roku wykonano na świecie odcinki próbne nawierzchni z lepiszczem Multiphalte. Nawierzchnie poddane działaniu różnym obciążeniami i warunkom klimatycznym wykazały się dobrą odpornością na koleinowanie oraz trwałością.

Asfalt multigrade jest asfaltem specjalnym, niemodyfikowanymi polimerami. Otrzymywany jest w specjalnym procesie technologicznym z konwencjonalnego surowca – ropy naftowej. Jest produktem pośrednim pod względem jakości i ceny pomiędzy konwencjonalnym asfaltem drogowym a polimeroasfaltem. Nazwa angielska „multigrade” oznacza, że asfalt ma właściwości pokrywające swym zakresem kilka rodzajów normowych asfaltu zwykłego, np. w niższej temperaturze 50-70, a w wyższej temperaturze 35-50. Asfalt wielorodzajowy wykazuje lepsze właściwości niż konwencjonalny asfalt drogowy. Główną zaletą jest zwiększenie odporności na deformacje w wysokiej letniej temperaturze i odporności na pękanie w warunkach zimowych. Indeks penetracji wynosi od 0 do 2, w porównaniu z indeksem od -1 do +1 w przypadku zwykłego asfaltu.

Badaniom w IBDM poddano dwa rodzaje asfaltów wielorodzajowych: Multiphalte 35/50 i Multiphalte 60/80, produkcji Shell, w porównaniu do asfaltu zwykłego D70. Wykonano badania lepszycy i betonu asfaltowego z tymi lepszyczami. Oznaczono właściwości w wysokiej i niskiej temperaturze, powinowactwo z kruszywem, trwałość (odporność na działanie wody, soli, mrozu). Badania wykonano z zastosowaniem dostępnej wówczas metodyki (moduł sztywności w Nottingham Asphalt Tester, odporność na deformacje w koleinomierzu LCPC) [5].

Pierwsze zastosowanie asfaltu wielorodzajowego miało miejsce w roku 1999 w ramach modernizacji rejonu skrzyżowania ulic Obornickiej, Witosa, Lutyckiej i Lechickiej w Poznaniu. Ulica Obornicka stanowi wylot z Poznania w kierunku Piły i Koszalina (DK11, kategoria ruchu KR5). Wybrano odcinek dojazdowy do skrzyżowania, czyli odcinek o bardzo trudnych warunkach obciążenia ruchem, skanalizowany, z ruchem powolnym i stacjonarnym. Nowe warstwy nawierzchni to:

- 3 cm warstwa ścieralna z BBTM 12,8 mm z polimeroasfaltem Olexobit [10],
- 8 cm warstwa wiążąca z AC WMS 16 mm (wówczas określanego jako beton asfaltowy o zwiększonej odporności na koleinowanie i zmęczenie) z asfaltem wielorodzajowym Multiphalte 35/50.

Na podstawie prowadzonych równolegle prac badawczych opracowano wytyczne [11]. Wykorzystano w nich doświadczenia światowe (głównie francuskie), wyniki badań modułu asfaltów oraz modułu i zmęczenia mieszanek mineralno-asfaltowych [12, 13] oraz pierwsze zastosowanie w Polsce konstrukcji nawierzchni z warstwą wiążącą z betonu asfaltowego o wysokim module sztywności i cienką warstwą ścieralną [14]. Uwzględniono zastosowanie asfaltu wielorodzajowego lub elastomeroasfaltu DE30B.

W 2001 r. podjęto pracę badawczą, dotyczącą wdrożenia technologii i weryfikacji zaleceń wykonywania konstrukcji nawierzchni o zwiększonej odporności na koleinowanie i zmęczenie [15]. Przygotowano zastosowanie nowej konstrukcji nawierzchni i technologii mieszanek mineralno-asfaltowych. Nową technologię zastosowano na odcinku DK 10 od km 403+800 do km 404+300 na obu pasach jezdni [16]. Pierwotny projekt naprawy nawierzchni przewidywał sfrezowanie nawierzchni na głębokość 6 cm w celu wyrównania kolein. Na tak przygotowanym podłożu planowano ułożyć warstwę wiążącą o grubości 6 cm z betonu asfaltowego, a warstwę ścieralną grubości 4 cm,

również z betonu asfaltowego, dopiero w następnym sezonie. Przyjęcie takiego rozwiązania zwiększyłoby narażenie nowej warstwy asfaltowej na przedwczesne uszkodzenia od czynników atmosferycznych (struktura częściowo zamknięta – działanie lodu; mała zawartość asfaltu – rozciąganie termiczne) oraz zmęczeniowe (mniejsza grubość konstrukcji – duże ugięcia). Zaproponowano nawierzchnię o zwiększonej odporności na koleinowanie i zmęczenie:

- warstwa ścierna, 2 cm: mieszanka mineralno-asfaltowa o nieciąglym uziarnieniu BBTM z elastomeroasfaltem Elastobit 80 RG (DE80C),
- warstwa wiążąca, 6 cm: beton asfaltowy o wysokim module sztywności AC WMS z elastomeroasfaltem Elastobit 30 RG (DE30B).

Zmniejszono grubość warstw asfaltowych o 2 cm w stosunku do pierwotnego projektu oraz wykonano nawierzchnię trwalszą niż pierwotnie zaprojektowano. Rezultatem pracy badawczej było opracowanie zasad wykonywania nawierzchni asfaltowej o zwiększonej odporności na koleinowanie [17].

Kolejnym zastosowaniem była nawierzchnia drogi DK10, na odcinku Mirosławiec - Nieradz, km od 125+900 do 126+500 (obwodnica Mirosławca). Zaprojektowano mieszanki: AC WMS 16 do warstw wiążącej i podbudowy (asfalt Modbit 30B) i BBTM10 do cienkiej warstwy ścierniczej (asfalt Modbit 80C). Wykorzystano zasady podane w [17].

4. PROPOZYCJA NOWYCH KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI Z AC WMS

4.1. BADANIA LABORATORYJNE

W 2004 podjęto pracę badawczą, której celem było wykonanie szerszych badań laboratoryjnych właściwości betonu asfaltowego o wysokim module wraz z opracowaniem nowych konstrukcji nawierzchni [18]. W badaniach uwzględniono wcześniejsze wyniki badań AC WMS 20 do podbudowy z asfaltami D50 (AC WMS 20 D50), OLEXOBIT 30B (AC WMS 20 OL 30B) i MULTIPHALTE 35/50 (AC WMS 20 MP 35/50) oraz opracowano nowy skład AC WMS do warstw wiążącej lub podbudowy według [17]: AC WMS 12, AC WMS 16 oraz AC WMS 20 na warstwę wiążącą, AC WMS 16 oraz AC WMS 20 na warstwę podbudowy.

Do nowych mieszanek zastosowano asfalty:

- 20/30 produkcji NYNAS (20/30N),
- 35/50 produkcji GRUPA LOTOS SA (35/50 GL),
- Multiphalt 10/20 (MP 10/20),
- OLEXOBIT 30B (OL 30B).

Lepiszczce 20/30N było wcześniej po raz pierwszy zastosowane w Polsce w nawierzchni z AC WMS odcinka testowego wykonanego w ramach współpracy GDDKiA OLD Poznań z francuskim laboratorium badawczym LCPC na drodze DK5. Asfalt 20/30 nie jest stosowany we Francji do betonu asfaltowego o wysokim module. Dr Yves Brosseau z LCPC uznał, że ze względu na warunki klimatyczne

w Polsce nie jest zalecany twardy asfalt 10/20 stosowany we Francji, lecz powinien być zastosowany nieco miększy asfalt 20/30, który nie był wówczas produkowany w polskich rafineriach.

Mieszanki poddano badaniom funkcjonalnym:

- odporności na koleinowanie w dużym aparacie LCPC,
- charakterystyki zmęczeniowej metodą belki 4PB w 10°C, 10 Hz,
- modułu sztywności metodą belki 4PB w 10°C, 10 Hz.

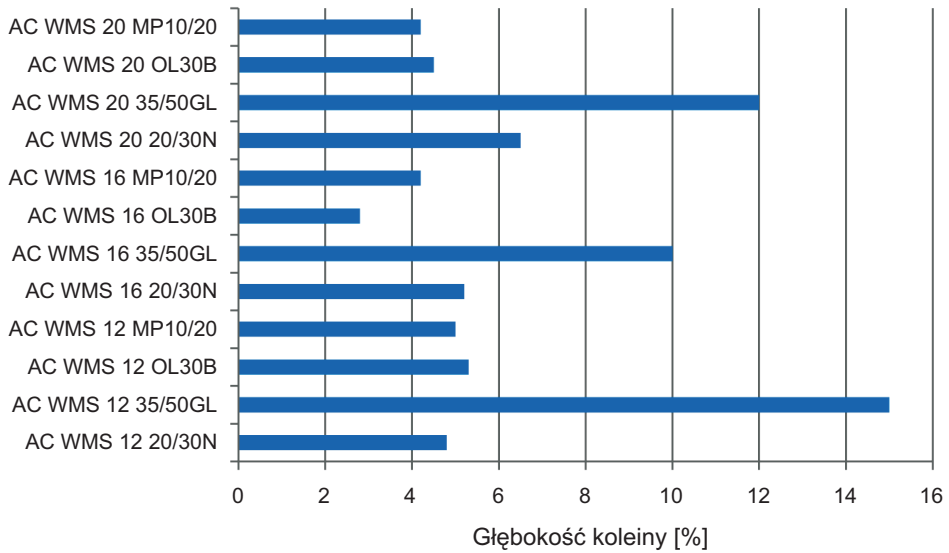
Przyjęto ówczesne wymagania wobec AC WMS na podstawie [17] (tabl. 1 i 2). Wyniki badań przedstawiono na rysunkach 1 - 4.

Tablica 1. Wymagania wobec AC WMS do warstwy wiążącej [17]
Table 1. Requirements for AC WMS for binder course [17]

Właściwość	Metoda badania	Jednostka	Wymagania
Zawartość wolnej przestrzeni w próbkach Marshalla zagęszczanych 75 uderzeniami na stronę	PN-S-96025:2000	% (v/v)	od 3 do 5
Zawartość wolnej przestrzeni w warstwie	PN-S-96025:2000	% (v/v)	≤ 6
Odporność na koleinowanie w 60°C po 30 000 cyklach	duży koleinomierz (LCPC)	%	≤ 5
Moduł sztywności pełzania pod obciążeniem statycznym w 40°C	według Zeszytu 48, seria I, IBDiM	MPa	≥ 20
Moduł sztywności, 10°C, 10 Hz	belka 4-punktowo zginana	MPa	≥ 12 000
Odporność na zmęczenie: odkształcenie ϵ_6 , w 10°C, 10 Hz	belka 4-punktowo zginana	-	≥ 100 · 10 ⁻⁶

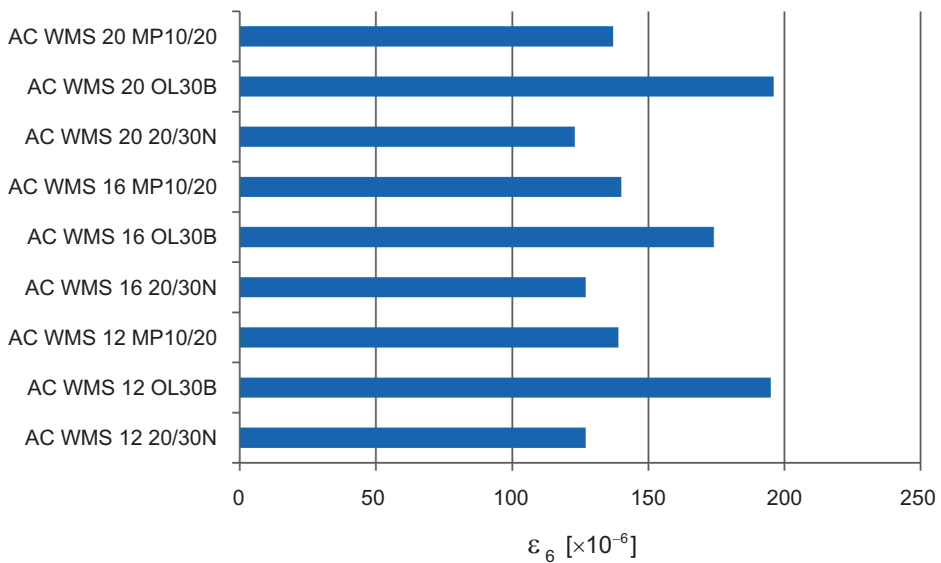
Tablica 2. Wymagania dla AC WMS do warstwy podbudowy [17]
Table 2. Requirements for AC WMS for base course [17]

Właściwość	Metoda badania	Jednostka	Wymagania
Zawartość wolnej przestrzeni w próbkach Marshalla zagęszczanych 75 uderzeniami na stronę	PN-S-96025:2000	% (v/v)	od 3 do 5
Zawartość wolnej przestrzeni w warstwie	PN-S-96025:2000	% (v/v)	≤ 6
Odporność na koleinowanie w 60°C po 30 000 cyklach	duży koleinomierz (LCPC)	%	≤ 8
Moduł sztywności pełzania pod obciążeniem statycznym w 40°C	według Zeszytu 48, seria I, IBDiM	MPa	≥ 22
Moduł sztywności, 10°C, 10 Hz	belka 4-punktowo zginana	MPa	≥ 14 000
Odporność na zmęczenie: odkształcenie ϵ_6 , w 10°C, 10 Hz	belka 4-punktowo zginana	-	≥ 130 · 10 ⁻⁶



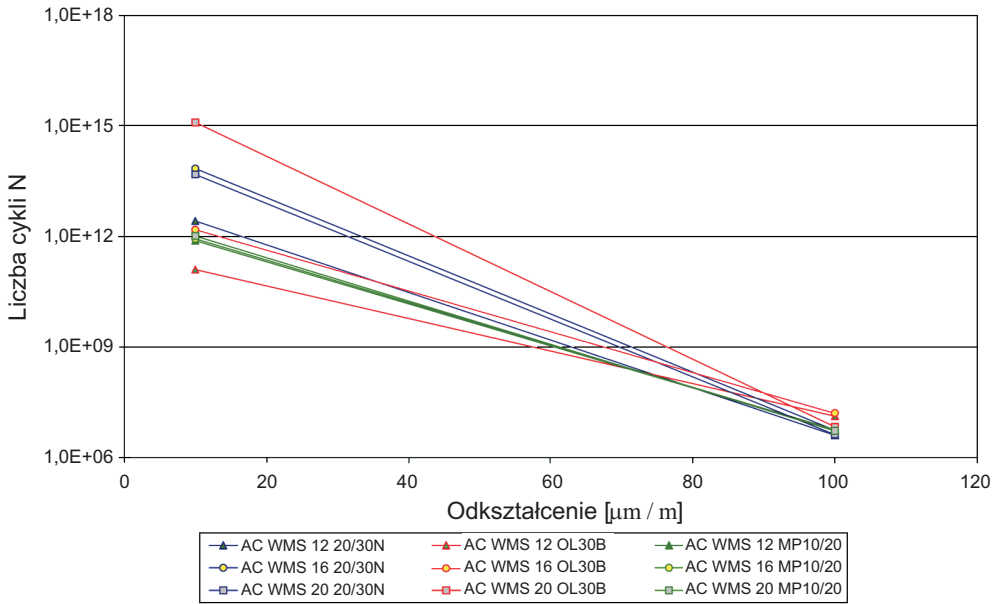
Rys. 1. Wyniki badania koleinowania mieszanek AC WMS [19]

Fig. 1. Wheel tracking test results for AC WMS mixes [19]

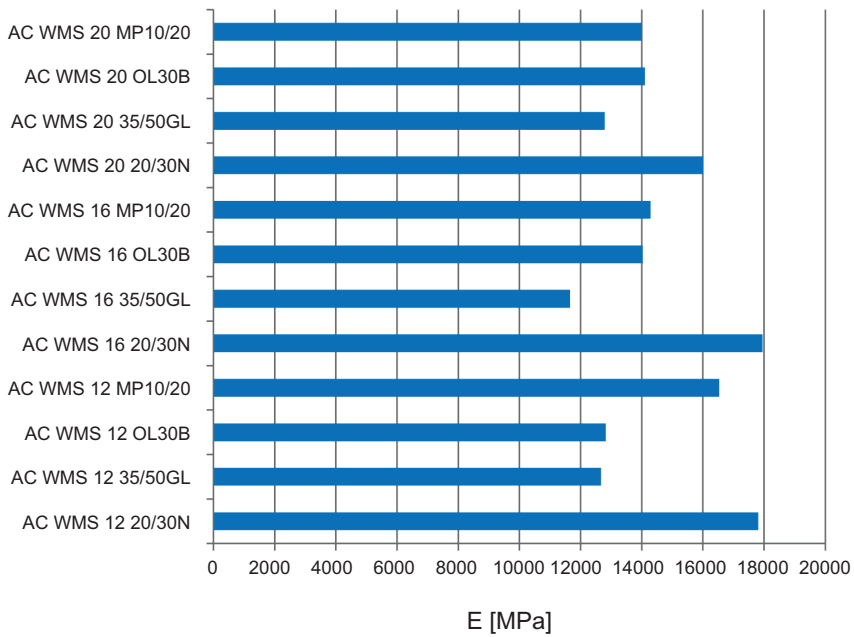


Rys. 2. Trwałość zmęczeniowa mieszanek AC WMS [19]

Fig. 2. Fatigue life of AC WMS mixes [19]



Rys. 3. Charakterystyka zmęczeniowa mieszank AC WMS [19]
 Fig. 3. Fatigue law of AC WMS mixes [19]



Rys. 4. Moduł sztywności mieszank AC WMS [19]
 Fig. 4. Stiffness of AC WMS mixes [19]

Badania wykazały, że mieszanki AC WMS z asfaltem zwykłym 35/50 nie spełniają wymagań. O ile trwałość zmęczeniowa tych mieszanek jest dobra, to niemożliwe okazało się osiągnięcie minimalnej wartości modułu sztywności, a w szczególności mieszanki były nieodporne na koleinowanie. Obserwacje te potwierdziły założenie o nieprzydatności asfaltu tego rodzaju do AC WMS. W dalszych badaniach zrezygnowano ze stosowania asfaltu 35/50.

Pozostałe mieszanki spełniły wymagania funkcjonalne. Wszystkie mieszanki spełniły wymagania odporności na koleinowanie podbudowy oraz były zbliżone do wymagania wobec warstwy wiążącej. Uzyskano również dobrą trwałość zmęczeniową. Moduł sztywności niektórych mieszanek był bliski dolnej granicy wymagania wobec podbudowy.

4.2. ANALIZA TYPOWYCH KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI Z AC WMS

Wykorzystując wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzono analizę wpływu zastosowania AC WMS w typowych konstrukcjach. Przyjęto typowe konstrukcje nawierzchni wg katalogu [20] typu A, C, E, F pod ruch kategorii KR3 - KR6. Warstwa ścieralna została jednolicie przyjęta z SMA o grubości 2,5 cm zgodnie z [17]. Grubość warstw asfaltowych nośnych (wiąząca i podbudowa) z AC WMS była przedmiotem analizy mechanistycznej. W tablicach 3 - 6 przedstawiono analizowane konstrukcje nawierzchni.

Tablica 3. Konstrukcje nawierzchni podatnej na podbudowie z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie (typ A)

Table 3. Flexible pavement structures on a crushed aggregate subbase (type A)

Rodzaj warstwy	Kategoria ruchu			
	KR3	KR4	KR5	KR6
Warstwa ścieralna	SMA 2,5 cm	SMA 2,5 cm	SMA 2,5 cm	SMA 2,5 cm
Warstwa wiążąca	AC WMS 6 cm	AC WMS 8 cm	AC WMS 8 cm	AC WMS 8 cm
Podbudowa asfaltowa	AC WMS 7 cm	AC WMS 10 cm	AC WMS 14 cm	AC WMS 18 cm
Podbudowa niezwiązana	kruszywo łamane 20 cm	kruszywo łamane 20 cm	kruszywo łamane 20 cm	kruszywo łamane 20 cm

Tablica 4. Konstrukcje nawierzchni podatnej na podbudowie z betonu asfaltowego (typ C)

Table 4. Flexible pavement structures on a asphalt concrete base course (type C)

Rodzaj warstwy	Kategoria ruchu			
	KR3	KR4	KR5	KR6
Warstwa ścieralna	SMA 2,5 cm	SMA 2,5 cm	SMA 2,5 cm	SMA 2,5 cm
Warstwa wiążąca	AC WMS 8 cm	AC WMS 8 cm	AC WMS 8 cm	AC WMS 8 cm
Podbudowa asfaltowa	AC WMS 10 cm	AC WMS 16 cm	AC WMS 20 cm	AC WMS 23 cm

Tablica 5. Konstrukcje nawierzchni półsztywnej na podbudowie stabilizowanej spoiwem hydraulicznym (typ E)
 Table 5. Semi-rigid pavement structures on a base course treated with hydraulic binder (type E)

Rodzaj warstwy	Kategoria ruchu			
	KR3	KR4	KR5	KR6
Warstwa ścieralna	SMA 2,5 cm	SMA 2,5 cm	SMA 2,5 cm	SMA 2,5 cm
Warstwa wiążąca	–	AC WMS 8 cm	AC WMS 8 cm	AC WMS 8 cm
Podbudowa asfaltowa	AC WMS 14 cm	AC WMS 11 cm	AC WMS 15 cm	AC WMS 16 cm
Podbudowa stabilizowana	20 cm	20 cm	20 cm	22 cm

Tablica 6. Konstrukcje nawierzchni półsztywnej na podbudowie z chudego betonu (typ F)
 Table 6. Semi-rigid pavement structures on a lean concrete base course (type F)

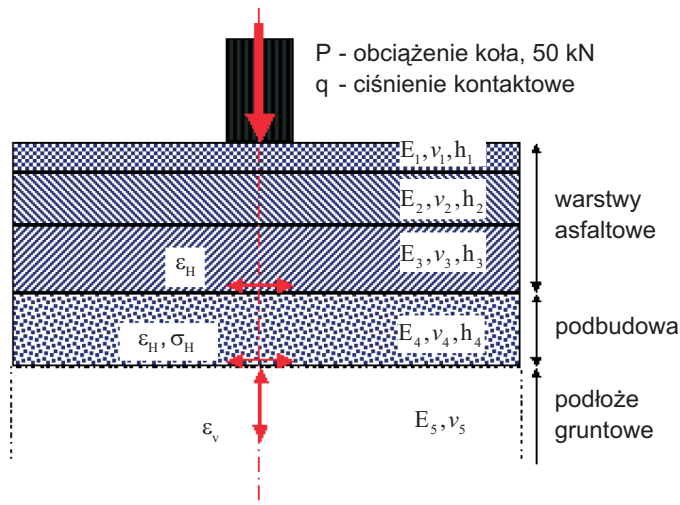
Rodzaj warstwy	Kategoria ruchu			
	KR3	KR4	KR5	KR6
Warstwa ścieralna	SMA 2,5 cm	SMA 2,5 cm	SMA 2,5 cm	SMA 2,5 cm
Warstwa wiążąca	–	–	AC WMS 8 cm	AC WMS 8 cm
Podbudowa asfaltowa	AC WMS 11 cm	AC WMS 15 cm	AC WMS 11 cm	AC WMS 12 cm
Podbudowa betonowa	chudy beton 20 cm	chudy beton 20 cm	chudy beton 20 cm	chudy beton 20 cm

4.3. ZAŁOŻENIA DO ANALIZA MECHANISTYCZNEJ

Metoda mechanistyczna projektowania konstrukcji nawierzchni polega na określeniu trwałości zmęczeniowej konstrukcji na podstawie analizy stanu naprężeń i odkształceń. W tym celu nawierzchnię traktuje się jako układ warstw o określonych grubościach na podłożu gruntowym o nieskończonej grubości. Najczęściej przyjmuje się model warstw sprężystych położonych na półprzestrzeni sprężystej. Poszczególne warstwy charakteryzowane są grubością h_i , modułem sprężystości (sztywności) E_i i współczynnikiem Poissona ν_i . Schemat obliczeniowy przedstawiono na rys. 5.

Kryteriami oceny trwałości konstrukcji nawierzchni asfaltowej podatnej są:

- odkształcenie pionowe strukturalne podłoża gruntowego,
- zmęczenie warstw asfaltowych,
- zmęczenie warstw związanych spoiwem hydraulicznym.



Rys. 5. Schemat obliczeniowy
Fig. 5. Calculation scheme

W analizie nawierzchni asfaltowej półsztywnej zakłada się, że podbudowa sztywna pracuje w dwóch etapach, w których charakteryzuje się innym modułem sprężystości E oraz współczynnikiem Poissona:

- etap I: warstwa związana, przed spękanem zmęczeniowym, konstrukcja półsztywna,
- etap II: warstwa spękana, konstrukcja podatna.

W obliczeniach przyjęto następujące założenia według [20]:

- moduły sztywności warstw asfaltowych wg wyników badań,
- moduły sztywności warstw stabilizowanych 4 500 MPa przed spękanem (300 MPa po spękanu),
- moduły sztywności warstw chudego betonu 12 900 MPa przed spękanem (400 MPa po spękanu),
- moduły sztywności podbudowy stabilizowanej mechanicznie 400 MPa,
- moduły sztywności podłoża gruntowego 100 MPa,
- współczynnik Poissona warstw asfaltowych 0,3,
- współczynnik Poissona warstw stabilizowanych 0,25 przed spękanem (0,3 po spękanu),
- współczynnik Poissona warstw chudego betonu 0,2 przed spękanem (0,3 po spękanu),
- współczynnik Poissona podbudowy stabilizowanej mechanicznie 0,3,
- współczynnik Poissona podłoża gruntowego 0,3,
- wytrzymałość na rozciąganie warstw stabilizowanych spoiwem hydraulicznym 0,5 MPa,

- wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu warstw chudego betonu 0,9 MPa,
- nacisk osi 100 kN,
- ciśnienie kontaktowe $q = 660$ kPa,
- temperatura równoważna 10°C [21],
- pełne połączenie między warstwami.

Trwałość zmęczeniowa warstw asfaltowych została obliczona z zastosowaniem charakterystyk zmęczeniowych uzyskanych w badaniach laboratoryjnych oraz według kryterium Instytutu Asfaltowego [22]:

$$N_f = 18,4 \cdot 10^{4,84(V_b/(V_v+V_b))-0,69} \cdot (6,167 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon^{-3,291} \cdot E^{-0,854}) , \quad (1)$$

w którym:

- E – moduł sztywności [MPa],
- V_b – zawartość objętościowa lepiszcza w mieszance mineralno-asfaltowej [%],
- V_v – zawartość objętościowa wolnej przestrzeni w mieszance mineralno-asfaltowej [%].

Trwałość zmęczeniowa warstw stabilizowanych została obliczona z zastosowaniem metody Dempsey [23]:

$$\log N_f = 11,784 - 12,121 \cdot (\sigma / R_{zgin}) , \quad (2)$$

w którym:

- N_f – liczba obciążeń do wystąpienia spękań zmęczeniowych podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym,
- σ – naprężenie, jakie występuje w warstwie podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym pod obciążeniem osią obliczeniową,
- R_{zgin} – wytrzymałość materiału podbudowy na rozciąganie przy zginaniu.

Kryterium deformacji podłoża gruntowego jest zależnością pomiędzy dopuszczalną liczbą powtarzalnych obciążeń N do powstania krytycznej deformacji strukturalnej równej 12,5 mm, a odkształceniem pionowym na powierzchni podłoża gruntowego ε_p :

$$\varepsilon_p = k(1 / N)^m , \quad (3)$$

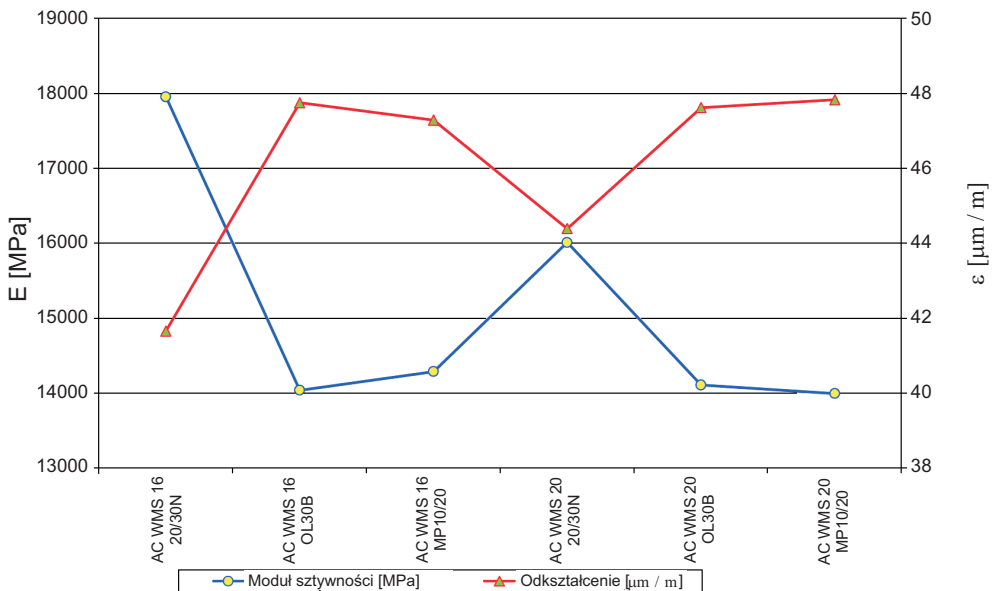
w którym:

- N – liczba dopuszczalnych obciążeń do wystąpienia krytycznej deformacji strukturalnej w konstrukcji nawierzchni,
- k, m – współczynniki doświadczalne, równe odpowiednio: $k = 1,05 \cdot 10^{-2}$; $m = 0,223$.

Obliczenia wyjściowe przeprowadzono na przyjętych wariantach konstrukcji. Do warstwy wiążącej przyjęto wszystkie mieszanki, natomiast do warstwy podbudowy przyjęto mieszanki AC WMS 16 i AC WMS 20. Łącznie obliczeniom poddano 714 różnych kombinacji mieszanek do warstw asfaltowych różnych typów konstrukcji pod ruch KR3 - KR6.

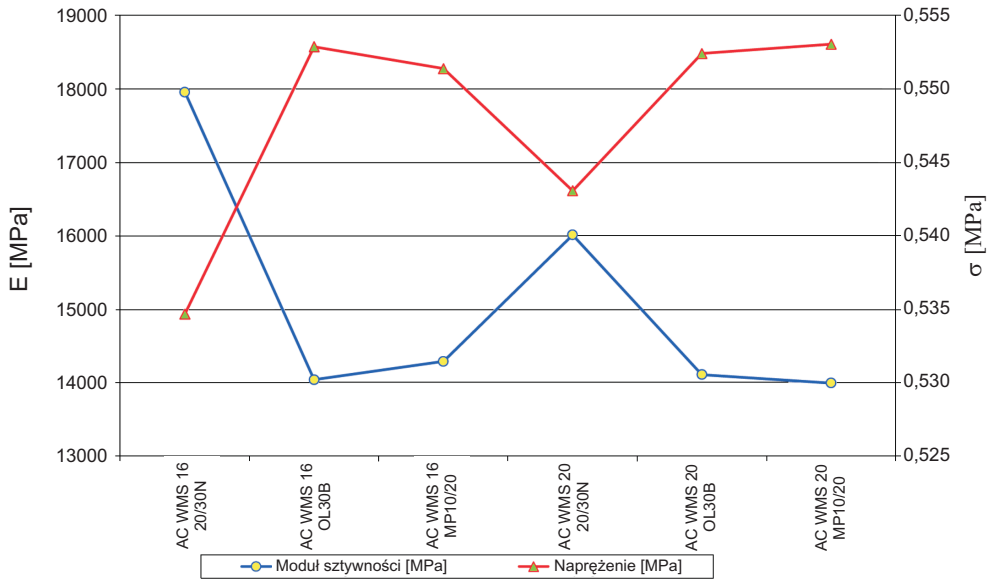
4.4. ANALIZA PROGNOZOWANEJ TRWAŁOŚCI NAWIERZCHNI

Analizując wartości odkształceń przy rozciąganiu w spodzie warstw asfaltowych można zauważyć, że różnice w ramach jednego typu konstrukcji są bardzo niewielkie. Przyczyną tych różnic są różne wartości modułu sztywności warstw zgodnie z przyjętymi wariantami: im sztywniejsze warstwy, tym mniejsze odkształcenia (rys. 6). Podobne wnioski można przypisać odnośnie naprężeń w konstrukcjach półsztywnych, większy moduł warstw asfaltowych skutkuje mniejszymi naprężeniami w podbudowie stabilizowanej spoiwem hydraulicznym lub wykonanej z chudego betonu (rys. 7).



Rys. 6. Przykład wpływu modułu sztywności warstw asfaltowych na odkształcenie rozciągające w ich spodzie (konstrukcja typu A, ruch KR5)

Fig. 6. Example of an influence of high stiffness modulus of bituminous layers on tensile strain at the bottom of them (structure type A, traffic category KR5)



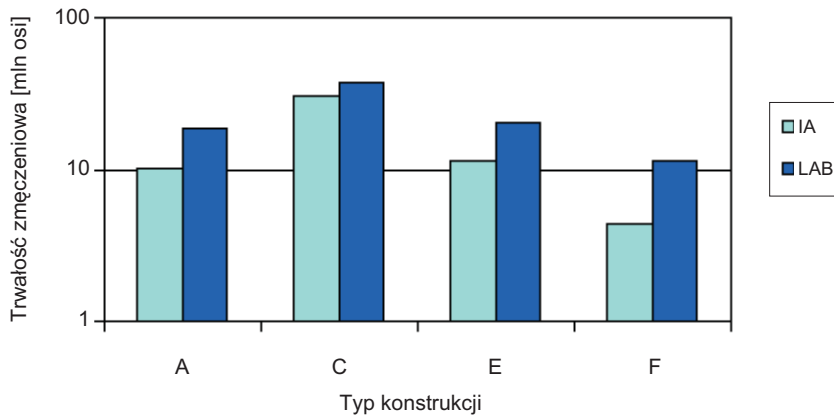
Rys. 7. Przykład wpływu modułu sztywności warstw asfaltowych na naprężenia w podbudowie z chudego betonu (konstrukcja typu F, ruch KR3)

Fig. 7. Example of an influence of high stiffness modulus of bituminous layers stress at the bottom of lean concrete base course (structure type F, traffic category KR3)

Zwiększenie grubości warstw, związane z podwyższeniem kategorii ruchu, powoduje zmniejszenie odkształceń rozciągających na spodzie warstw asfaltowych i naprężeń w podbudowach związanych spoiwem hydraulicznym. Porównując konstrukcje podatne typu A i C, można zauważyć, że w konstrukcji A występują większe odkształcenia warstw asfaltowych niż w konstrukcji typu C. Natomiast w analizowanych konstrukcjach półsztywnych w fazie 1 większe odkształcenia rozciągające na spodzie warstw asfaltowych występują w konstrukcji typu E, podczas gdy większe naprężenia w podbudowie związanej spoiwem hydraulicznym pojawiają się w konstrukcji typu F. W fazie 2 czyli po spękaniu sztywnej podbudowy większe odkształcenia warstw asfaltowych występują w konstrukcji typu F.

Ogólnie można stwierdzić, że niezależnie od typu konstrukcji, kryterium zmęczeniowego i kombinacji mieszanek spełnione zostały wymagania dotyczące wymaganej liczby osi obliczeniowych danej kategorii ruchu. Najlepszą trwałość zmęczeniową niezależnie od kategorii ruchu i kryterium zmęczeniowego uzyskała konstrukcja podatna typu A, a stosunkowo najsłabszą konstrukcja typu F, przy czym wymagania trwałości są spełnione nawet w tej konstrukcji ze stosunkowo dużym zapasem bezpieczeństwa. W przypadku kategorii ruchu KR6 trwałość zmęczeniowa jest co najmniej 6 - 10 razy większa od minimum 14 600 000 osi obliczeniowych tej kategorii ruchu, a w przypadku najmocniejszych konstrukcji jest nawet kilkaset razy większa.

Obliczenia z zastosowaniem kryterium zmęczeniowego według badań laboratoryjnych prowadzą do innych wyników trwałości zmęczeniowej niż według metody Instytutu Asfaltowego (IA), co było już zauważone we wcześniejszych pracach [24] i świadczy o konieczności weryfikacji wyników pomiarami w wielkiej skali [25]. Różnice pomiędzy wynikami zależą od rodzaju asfaltu zastosowanego w mieszance oraz wielkości odkształceń rozciągających związanych z grubością warstw konstrukcji nawierzchni. Przykład omówionych zależności zilustrowano na rys. 8.



Rys. 8. Wpływ typu konstrukcji oraz kryterium zmęczeniowego na trwałość zmęczeniową na przykładzie konstrukcji z mieszanką AC WMS 20 MP10/20

Fig. 8. Influence of pavement structure type and fatigue criterion on fatigue life on the basis structure with AC WMS 20 MP10/20

Przeprowadzone obliczenia potwierdzają dobre właściwości zaprojektowanych mieszanek mineralno-asfaltowych AC WMS oraz wskazują na możliwości zmniejszenia grubości warstw konstrukcji typowych.

Uzyskane wyniki trwałości konstrukcji ze względu na dopuszczalne odkształcenie podłoża gruntowego potwierdzają odpowiednią trwałość poszczególnych konstrukcji w zakresach odpowiednich kategorii ruchu. W większości analizowanych konstrukcji o trwałości konstrukcji decyduje kryterium odkształcenia podłoża. Jedynie w przypadku konstrukcji podatnych pod ruch KR5 i KR6, i konstrukcji półsztywnej typu E pod ruch KR4 - KR6 przy zastosowaniu metody IA, trwałość zmęczeniowa warstw asfaltowych była mniejsza od trwałości ze względu na odkształcenie podłoża. Powyższe obserwacje potwierdzają bardzo istotny wpływ jakości podłoża gruntowego na trwałość konstrukcji, co może być szczególnie istotne w konstrukcjach innowacyjnych o zmniejszonej grubości.

4.5. OPRACOWANIE TYPOWYCH KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI

4.5.1. Rodzaje konstrukcji, założenia i wyniki obliczeń

Opracowano następujące konstrukcje nawierzchni z mieszkankami AC WMS dla kategorii ruchu KR3 - KR6:

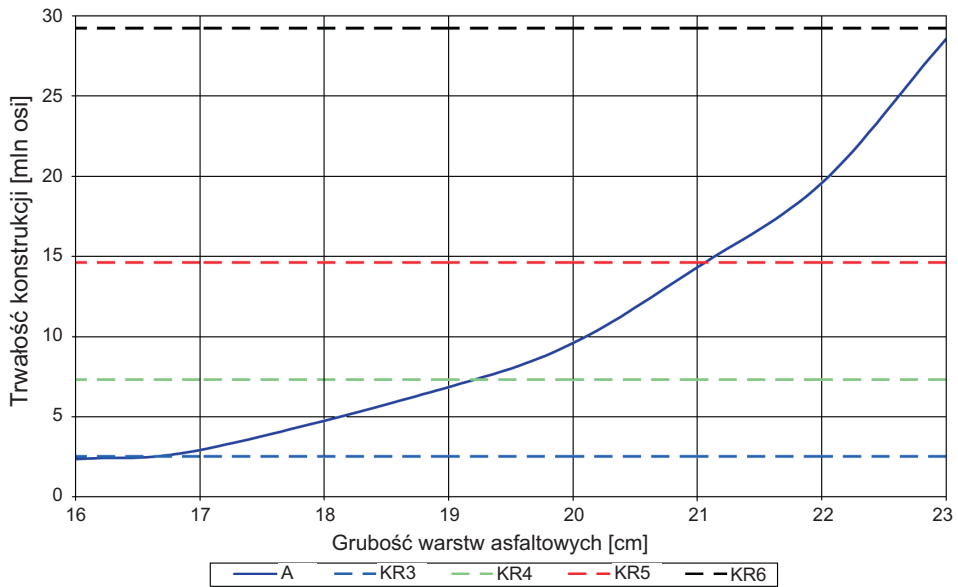
- konstrukcja podatna typ A,
- konstrukcja podatna typ C,
- konstrukcja półsztywna typ E,
- konstrukcja półsztywna typ F.

Opracowane konstrukcje stanowiły uzupełnienie do konstrukcji podanych w [20].

Obliczenia przeprowadzono metodą mechanistyczną, której założenia podano wcześniej. Przyjęto dodatkowe zmiany i założenia:

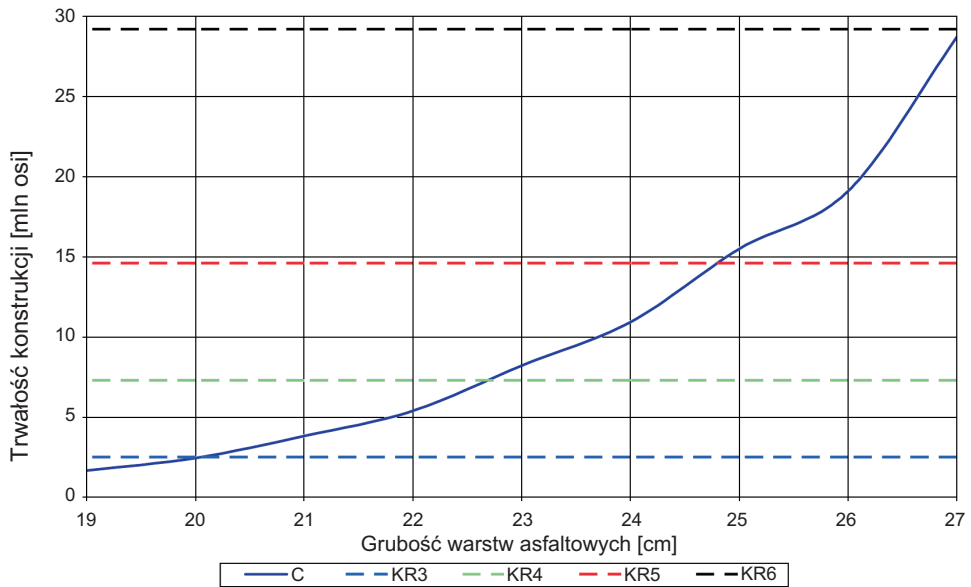
- prawdopodobieństwo sukcesu 95% – uwzględniono dopuszczalną zmienność grubości warstw asfaltowych oraz zmienność modułu sztywności warstw asfaltowych na podstawie doświadczeń laboratoryjnych,
- moduł sztywności mieszanek AC WMS przyjęto równy 14 000 MPa jako wartość minimalną,
- wzorem metody francuskiej w obliczeniach nie uwzględniono grubości warstwy ścieralnej,
- kryterium zmęczeniowe wg IA przy następujących założeniach:
 - zawartość wolnych przestrzeni 4% v/v,
 - zawartość asfaltu 5% m/m,
 - moduł sztywności 14000 MPa,
- grubość warstw asfaltowych (podbudowy i wiążącej) jest przedmiotem obliczeń,
- założono, że dla poszczególnych kategorii ruchu, konstrukcja powinna przenieść liczbę osi obliczeniowych równą górnej granicy przedziału według [20] oprócz KR6, dla której przyjęto liczbę osi równą dwukrotności dolnej granicy:
 - w przypadku KR3 – 2,5 mln,
 - w przypadku KR4 – 7,3 mln,
 - w przypadku KR5 – 14,6 mln,
 - w przypadku KR6 – 29,2 mln.

Wyniki obliczeń trwałości konstrukcji typu A, C, E i F w zależności od łącznej grubości warstwy wiążącej i podbudowy asfaltowej przedstawiono na rys. 9 - 12. Liniami przerywanymi naniesiono graniczne wartości liczby osi obliczeniowych poszczególnych kategorii ruchu.



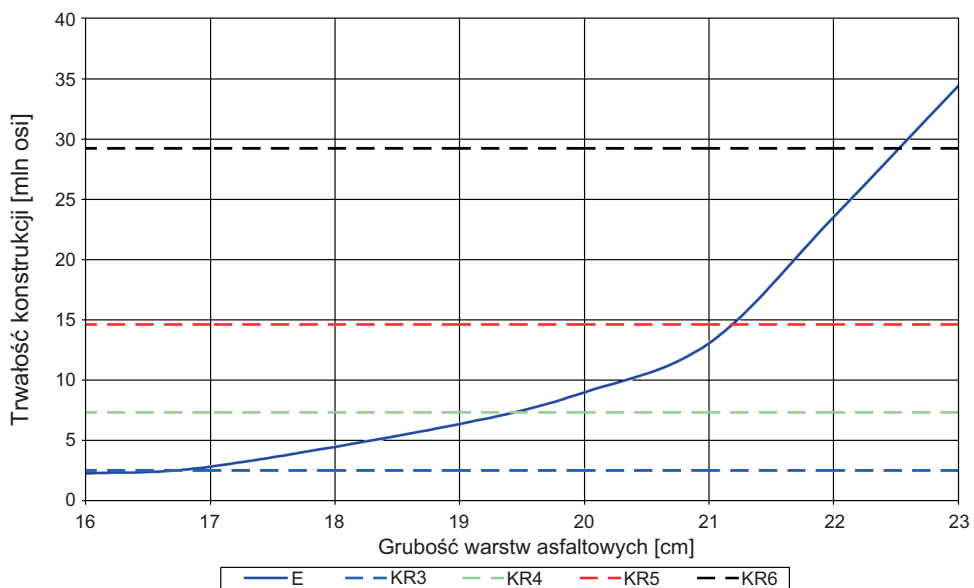
Rys. 9. Trwałość konstrukcji typu A

Fig. 9. Fatigue life of pavement structure type A

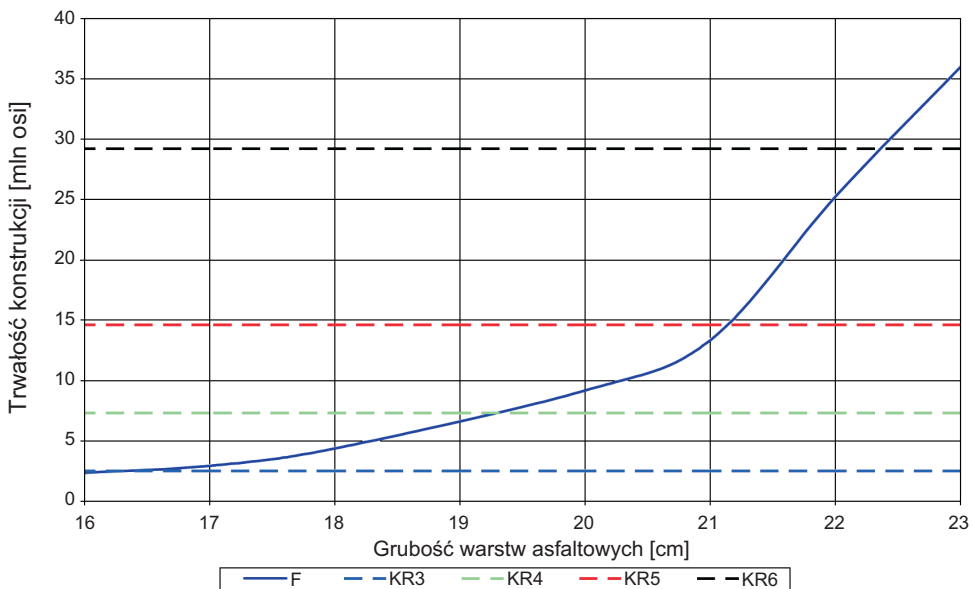


Rys. 10. Trwałość konstrukcji typu C

Fig. 10. Fatigue life of pavement structure type C



Rys. 11. Trwałość konstrukcji typu E
 Fig. 11. Fatigue life of pavement structure type E



Rys. 12. Trwałość konstrukcji typu F
 Fig. 12. Fatigue life of pavement structure type F

4.5.2. Typowe konstrukcje z AC WMS

Na podstawie uzyskanych wyników zaproponowano typowe konstrukcje nawierzchni (tabl. 7 - 10).

Tablica 7. Typowe konstrukcje nawierzchni podatnych. Typ A
Table 7. Typical flexible pavement structures. Type A

Warstwa	Typ mieszanki	Kategoria ruchu		
		KR4	KR5	KR6
		Grubość warstwy [cm]		
Ścieralna	SMA lub BBTM	1,5 - 3,0	1,5 - 3,0	1,5 - 3,0
Wiążąca	AC WMS	8	8	8
Podbudowa zasadnicza	AC WMS	11	13	15
Podbudowa pomocnicza	kruszywo łamane stabilizowane mechanicznie	20	20	20

Tablica 8. Typowe konstrukcje nawierzchni podatnych. Typ C
Table 8. Typical flexible pavement structures. Type C

Warstwa	Typ mieszanki	Kategoria ruchu		
		KR4	KR5	KR6
		Grubość warstwy [cm]		
Ścieralna	SMA lub BBTM	1,5 - 3,0	1,5 - 3,0	1,5 - 3,0
Wiążąca	AC WMS	8	8	8
Podbudowa zasadnicza	AC WMS	15	17	19

Tablica 9. Typowe konstrukcje nawierzchni półsztywnych. Typ E
Table 9. Typical semirigid pavement structures. Type E

Warstwa	Typ mieszanki	Kategoria ruchu		
		KR4	KR5	KR6
		Grubość warstwy [cm]		
Ścieralna	SMA lub BBTM	1,5 - 3,0	1,5 - 3,0	1,5 - 3,0
Wiążąca	AC WMS	8	8	8
Podbudowa zasadnicza	AC WMS	12	14	16
Podbudowa pomocnicza	grunt lub kruszywo stabilizowane spoiwem hydraulicznym	20	20	22

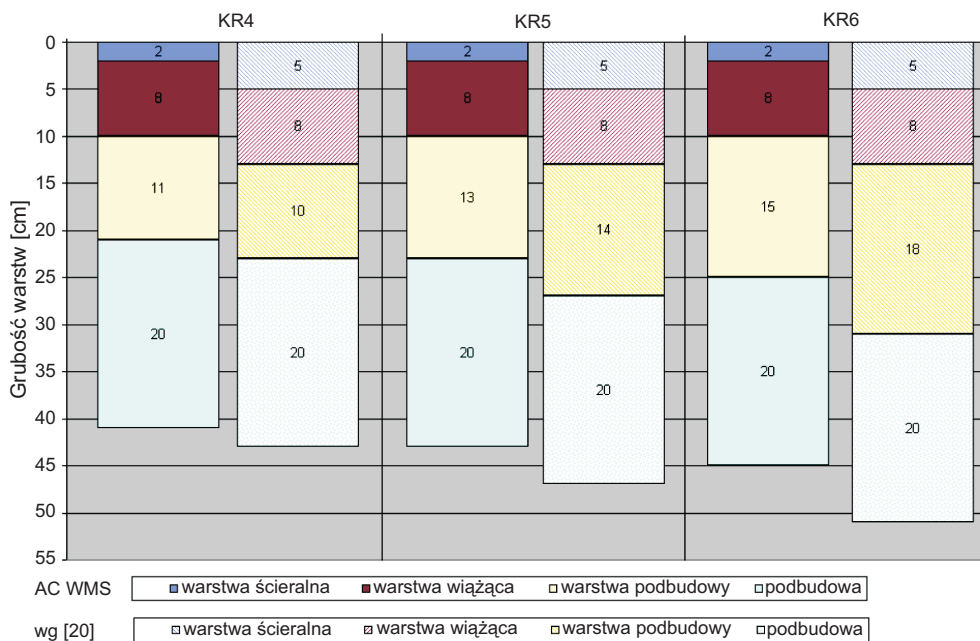
Tablica 10. Typowe konstrukcje nawierzchni półsztywnych. Typ F
Table 10. Typical semirigid pavement structures. Type F

Warstwa	Typ mieszanki	Kategoria ruchu		
		KR4	KR5	KR6
		Grubość warstwy [cm]		
Ścieralna	SMA lub BBTM	1,5 - 3,0	1,5 - 3,0	1,5 - 3,0
Wiążąca	AC WMS	8	8	8
Podbudowa zasadnicza	AC WMS	12	14	16
Podbudowa pomocnicza	chudy beton	20	20	20

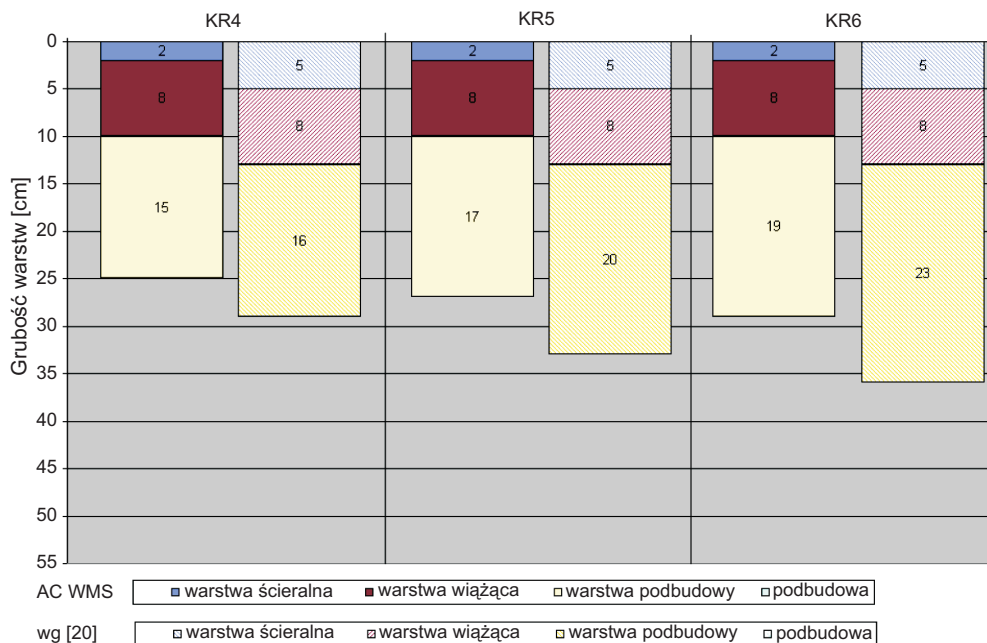
W tablicach nie ujęto kategorii KR3, ponieważ uzyskane grubości warstw są zbliżone do grubości według [20] z mieszankami konwencjonalnymi. Oznacza to, że w pewnych przypadkach można zastosować mieszanki AC WMS dla tej kategorii ruchu, a grubości warstw podbudowy i wiążącej według [20]. Zaproponowane konstrukcje zostały opracowane przy dość bezpiecznych założeniach materiałowych. W przypadku stosowania mieszanek o lepszych właściwościach (wyższy moduł sztywności, lepsza odporność zmęczeniowa) lub w szczególnych przypadkach, konstrukcje należy zaprojektować indywidualnie.

4.5.3. Porównanie z konstrukcjami według [20]

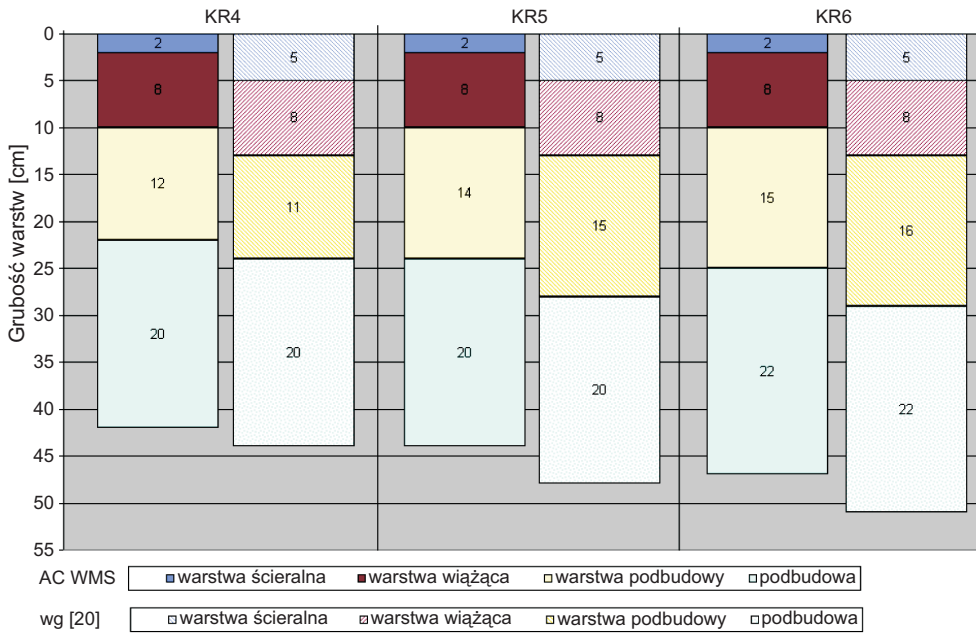
Na rys. 13 - 16 przedstawiono porównanie typowych konstrukcji według [20] z konwencjonalnym betonem asfaltowym i zaprojektowanych konstrukcji z mieszankami AC WMS projektowanymi na 20 lat. Konstrukcje te mają mniejszą grubość pakietu warstw asfaltowych. Różnice są szczególnie widoczne w konstrukcjach podatnych. W konstrukcjach półsztywnych o trwałości w większym stopniu decyduje trwałość zmęczeniowa podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym, stąd nie ma możliwości redukcji grubości warstw asfaltowych. W przypadku konstrukcji podatnych można zaobserwować regułę, że im cięższa kategoria ruchu (grubsza konstrukcja) tym większa oszczędność w grubości warstw asfaltowych. W przypadku niższych kategorii ruchu różnice te zanikają, ponieważ przy cieńszych konstrukcjach o trwałości w większym stopniu decyduje kryterium ze względu na odkształcenie podłoża gruntowego.



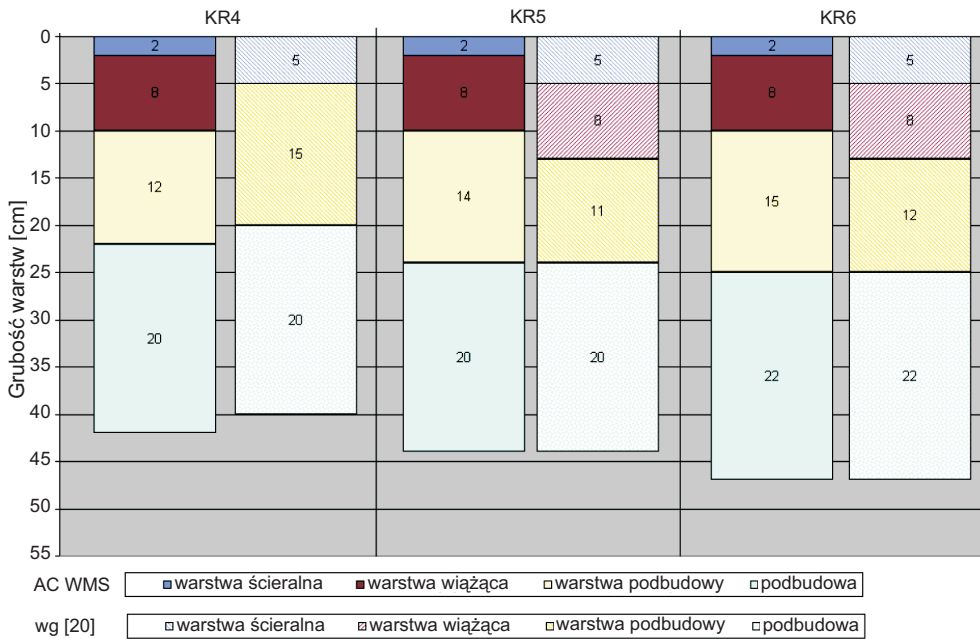
Rys. 13. Porównanie konstrukcji typu A
 Fig. 13. Comparison of pavement structures type A



Rys. 14. Porównanie konstrukcji typu C
 Fig. 14. Comparison of pavement structures type C



Rys. 15. Porównanie konstrukcji typu E
Fig. 15. Comparison of pavement structures type E



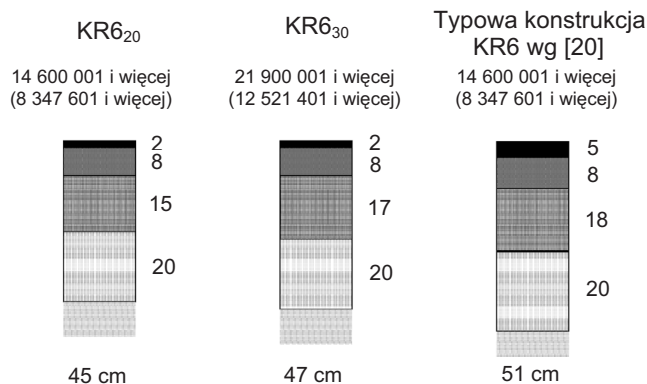
Rys. 16. Porównanie konstrukcji typu F
Fig. 16. Comparison of pavement structures type F

5. WERYFIKACJA ZALECEŃ

Na podstawie przeprowadzonych badań i zebranych doświadczeń praktycznych opracowano nowe zalecenia [26]. Skorygowano i uzupełniono wymagania i zalecenia dla betonów asfaltowych AC WMS. Podano również typowe konstrukcje nawierzchni, stanowiące uzupełnienie katalogu [20]. Uwzględniono nawierzchnie z AC WMS o trwałości projektowej 20 lat, wskazując możliwość zmniejszenia grubości konstrukcji, oraz o trwałości projektowej 30 lat, będącej pierwszym krokiem do nawierzchni długowiecznych. Przykład porównania możliwych oszczędności lub wydłużenia trwałości konstrukcji nawierzchni z AC WMS przedstawia rys. 17, a w tablicach 11 - 14 konstrukcje nawierzchni z AC WMS projektowane na 30 lat.

Należy zwrócić uwagę, że przy zachowaniu stałej grubości warstwy wiążącej z AC WMS niewielkie zwiększenie grubości warstwy podbudowy z AC WMS o 1 lub 2 cm zwiększa okres projektowy nawierzchni z 20 na 30 lat. Ilustruje to opłacalność budowy nawierzchni długotrwałych z AC WMS.

Zaprojektowane konstrukcje są bezpieczne, ponieważ uwzględniono minimalne właściwości materiałowe, wymagane od tego typu betonów asfaltowych oraz wprowadzono rachunek probabilistyczny. W przypadku stosowania materiałów o wyraźnie lepszych właściwościach (moduł sztywności, zmęczenie) zaleca się przeprowadzenie indywidualnej analizy mechanicznej celem uzyskania większych korzyści ekonomicznych ze stosowania tych materiałów. Stosowanie mieszanek o polepszonych właściwościach funkcjonalnych zapewni większą trwałość nawierzchni.



Rys. 17. Porównanie konstrukcji nawierzchni asfaltowej z AC WMS projektowanej na 20 lub 30 lat z typową konstrukcją według [20] (dolny próg liczby osi obciążeniowych 100 kN lub 115 kN – w nawiasach)

Fig. 17. Comparison between bituminous pavement structures with AC WMS designed for 20 or 30 years and typical catalogue pavement structures (lower threshold of a number of ESAL 100 kN or 115 kN – in brackets)

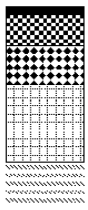
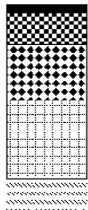
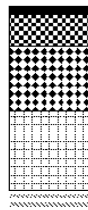
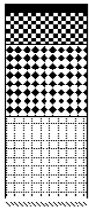
Opracowano także zweryfikowaną wersję wytycznych, dotyczących cienkich warstw ściernych [27], które obok [26] zostały uwzględnione przy opracowywaniu wymagań technicznych WT-2 [28].

Tablica 11. Typowe konstrukcje nawierzchni asfaltowych AC WMS o trwałości 30 lat.

Typ A

Table 11. Typical bituminous AC WMS pavement structures designed for 30 years.

Type A

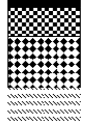
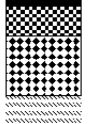
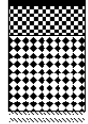
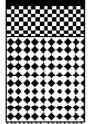
Typ	Kategoria ruchu Liczba osi obciążeniowych 10,0 t/pas/30 lat (11,5 t/pas/30 lat)			
	KR3 ₃₀	KR4 ₃₀	KR5 ₃₀	KR6 ₃₀
	756 001÷3 750 000 (437 401÷2 144 100)	3 750 001÷10 950 000 (2 144 101÷6 260 700)	10 950 001÷21 900 000 (6 260 701÷12 521 400)	21 900 001 i więcej (12 521 401 i więcej)
A	 <p>2 8 10 20</p>	 <p>2 8 13 20</p>	 <p>2 8 15 20</p>	 <p>2 8 17 20</p>

Tablica 12. Typowe konstrukcje nawierzchni asfaltowych AC WMS o trwałości 30 lat.

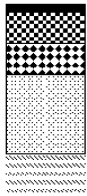
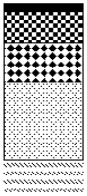
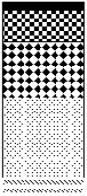
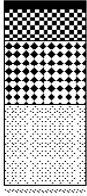
Typ C

Table 12. Typical bituminous AC WMS pavement structures designed for 30 years.

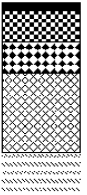
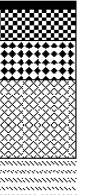
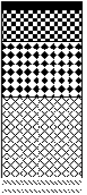
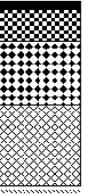
Type C

Typ	Kategoria ruchu Liczba osi obciążeniowych 10,0 t/pas/30 lat (11,5 t/pas/30 lat)			
	KR3 ₃₀	KR4 ₃₀	KR5 ₃₀	KR6 ₃₀
	756 001÷3 750 000 (437 401÷2 144 100)	3 750 001÷10 950 000 (2 144 101÷6 260 700)	10 950 001÷21 900 000 (6 260 701÷12 521 400)	21 900 001 i więcej (12 521 401 i więcej)
C	 <p>2 8 13</p>	 <p>2 8 16</p>	 <p>2 8 19</p>	 <p>2 8 21</p>

Tablica 13. Typowe konstrukcje nawierzchni asfaltowych AC WMS o trwałości 30 lat.
Typ E
Table 13. Typical bituminous AC WMS pavement structures designed for 30 years.
Type E

Typ	Kategoria ruchu Liczba osi obliczeniowych 10,0 t/pas/30 lat (11,5 t/pas/30 lat)			
	KR3 ₃₀	KR4 ₃₀	KR5 ₃₀	KR6 ₃₀
	756 001÷3 750 000 (437 401÷2 144 100)	3 750 001÷10 950 000 (2 144 101÷6 260 700)	10 950 001÷21 900 000 (6 260 701÷12 521 400)	21 900 001 i więcej (12 521 401 i więcej)
E	 2 8 10 20	 2 8 13 20	 2 8 14 22	 2 8 17 22

Tablica 14. Typowe konstrukcje nawierzchni asfaltowych AC WMS o trwałości 30 lat.
Typ F
Table 14. Typical bituminous AC WMS pavement structures designed for 30 years.
Type F

Typ	Kategoria ruchu Liczba osi obliczeniowych 10,0 t/pas/30 lat (11,5 t/pas/30 lat)			
	KR3 ₃₀	KR4 ₃₀	KR5 ₃₀	KR6 ₃₀
	756 001÷3 750 000 (437 401÷2 144 100)	3 750 001÷10 950 000 (2 144 101÷6 260 700)	10 950 001÷21 900 000 (6 260 701÷12 521 400)	21 900 001 i więcej (12 521 401 i więcej)
F	 2 8 10 20	 2 8 13 20	 2 8 14 22	 2 8 16 22

6. AKTUALNE WYMAGANIA WOBEC AC WMS

W tablicy 15 przedstawiono wymagane właściwości AC WMS na podstawie [28]. Jako lepszycze w AC WMS mogą być stosowane: asfalt 20/30 lub polimeroasfalty PMB 10/40-65, PMB 25/55-60, lub inne lepszycza specjalne np. asfalty wielorodzajowe. Mogą być także stosowane dodatki modyfikujące stosowane bezpośrednio w wytwórni mieszanek mineralno-asfaltowych. Wzorem francuskich wymagań wprowadzono dwie klasy 1 i 2 AC WMS różniących się modulem sztywności.

Tablica 15. Wymagane właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej betonu asfaltowego o wysokim module sztywności do warstw podbudowy i wiążącej, KR3+6

Table 15. Requirements for high modulus asphalt concrete mixture for binder and base course, KR3-6

Właściwość	Warunki zagęszczania wg PN-EN 13108-20	Metoda i warunki badania	Wymiar mieszanki	
			AC WMS 16	AC WMS 22
Zawartość wolnych przestrzeni	C.1.3, ubijanie, 2 × 75 uderzeń	PN-EN 12697-8, p. 4	$V_{\min 2,0}$ $V_{\max 4,0}$	$V_{\min 2,0}$ $V_{\max 4,0}$
Odporność na działanie wody	C.1.1, ubijanie 2 × 35 uderzeń	PN-EN 12697-12, przechowywanie w 40°C z jednym cyklem zamrażania**), badanie w 25°C	$ITSR_{80}$	$ITSR_{80}$
Odporność na deformacje trwałe*)	C.1.20, wałowanie, P_{98} - P_{100} , grubość płyty 100 mm	PN-EN 12697-22, metoda B w powietrzu, PN-EN 13108-20, D.1.6, 60°C, 10 000 cykli	$WTS_{AIR0,15}$ $PRD_{AIRDeklarowane}$	$WTS_{AIR0,15}$ $PRD_{AIRDeklarowane}$
Sztywność klasa 1	C.1.20, wałowanie, P_{98} - P_{100}	PN-EN 12697-26, 4PB-PR, temperatura 10°C, częstotliwość 10Hz	$S_{\min 14000}$	$S_{\min 14000}$
Sztywność klasa 2	C.1.20, wałowanie, P_{98} - P_{100}	PN-EN 12697-26, 4PB-PR, temperatura 10°C, częstotliwość 10Hz	$S_{\min 16000}$	$S_{\min 16000}$
Odporność na zmęczenie, kategoria nie niższa niż	C.1.20, wałowanie, P_{98} - P_{100}	PN-EN 12697-24, 4PB-PR, temperatura 10°C, częstotliwość 10Hz	ϵ_{6-130}	ϵ_{6-130}
Objasnienia: *) Grubość płyty AC WMS 16 60 mm, AC WMS 22 60 mm **) Ujednoliconą procedurę badania odporności na działanie wody z jednym cyklem zamrażania podano w załączniku 1				

7. KORZYŚCI ZE STOSOWANIA AC WMS

Wśród korzyści ze stosowania AC WMS należy wymienić:

- zwiększenie odporności nawierzchni na deformacje trwałe bez pogorszenia trwałości zmęczeniowej,
- możliwość zwiększenia trwałości zmęczeniowej nawierzchni przy stosunkowo niewielkim wzroście kosztów budowy, czego efektem jest wydłużenie obliczeniowego okresu eksploatacji nawierzchni,
- możliwość stosowania kruszyw uznawanych za słabsze (wapienie), lokalnych (kruszywa łamane polodowcowe, otoczaki).

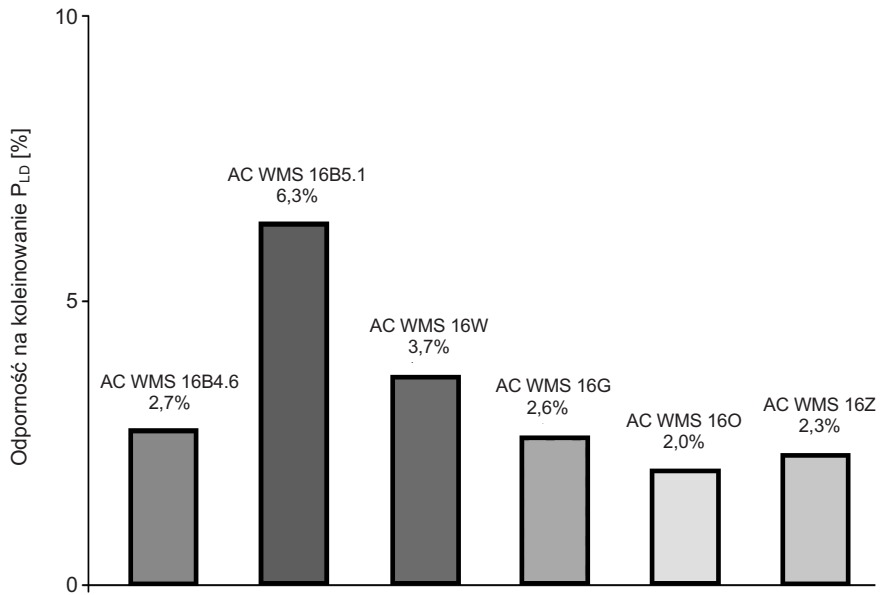
AC WMS wymaga kontroli właściwości mechanicznych, funkcjonalnych: odporności na deformacje trwałe, modułu sztywności i zmęczenia. Dzięki temu zwiększenie odporności na deformacje trwałe nie może spowodować pogorszenia trwałości zmęczeniowej nawierzchni.

Jak wcześniej wykazano, nawet niewielki wzrost grubości warstw z AC WMS znacznie zwiększa trwałość nawierzchni. Pozwala to na znaczne zwiększenie obliczeniowego okresu eksploatacji nawierzchni. W [26] przedstawiono propozycje konstrukcji nawierzchni projektowanych na 20 lub 30 lat. Coraz większym zainteresowaniem w świecie cieszą się nawierzchnie długowieczne o okresie projektowym ponad 40, a nawet ponad 50 lat. Zastosowanie AC WMS jest jednym z warunków spełnienia wymagań takiej nawierzchni [29 - 32].

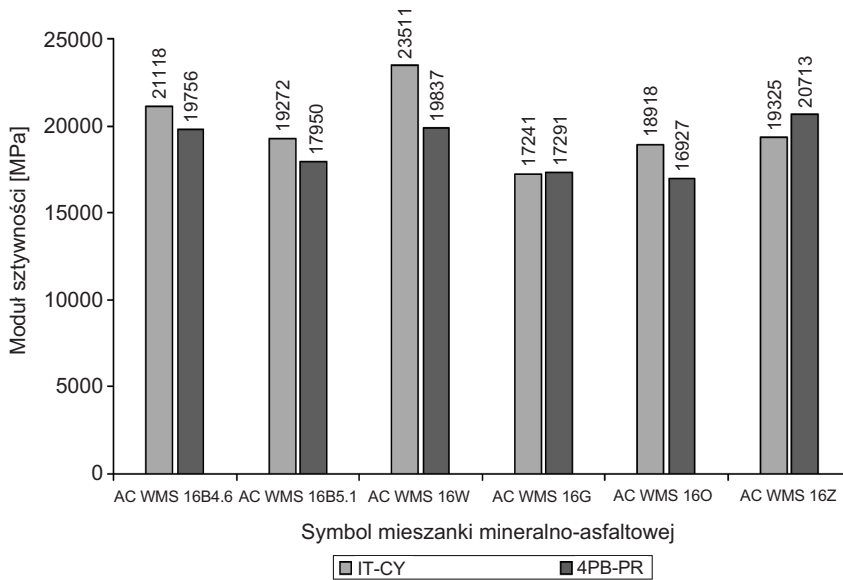
Szczelność i duża zawartość twardego lepiszcza asfaltowego w betonie asfaltowym o wysokim module umożliwiają stosowanie kruszyw o nieco niższych parametrach wytrzymałościowych, np. kruszyw wapiennych lub przekruszonych kruszyw polodowcowych. Badania wykonane w IBDiM [19, 33 - 34] wykazały właściwości mechaniczne AC WMS z takim kruszywami spełniające wymagania. Przykłady ilustrują rys. 18 - 20 (B - bazalt, W - wapień, G - granit, O - kruszywo polodowcowe, Z - żużel stalowniczy).

8. BADANIA W RAMACH PROJEKTU SPENS

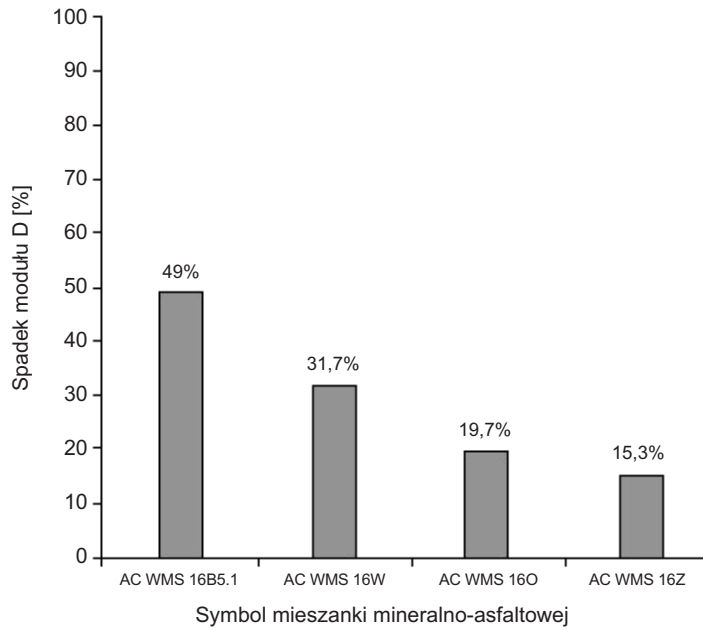
W latach 2006 - 2009 realizowany był projekt SPENS [35] finansowany z funduszy UE. IBDiM był koordynatorem i wykonawcą zadania. Celem było wdrożenie technologii AC WMS w wybranych krajach Europy, tj. Słowenii, Chorwacji, Serbii, Szwecji i Estonii. Pierwszym etapem było opracowanie wstępnych zaleceń do zastosowania w poszczególnych krajach na podstawie polskich zaleceń i doświadczeń, biorąc pod uwagę lokalne warunki klimatyczne, dostępne materiały i metody badań. Kolejnym etapem była budowa przez STRABAG odcinków testowych zlokalizowanych w Pruszkowie. W październiku 2007 r. wykonano cztery odcinki o takiej samej grubości pakietu warstw asfaltowych, ale z różnymi warstwami konstrukcyjnymi. Odcinki testowe zostały poddane obciążeniom przy zastosowaniu urządzenia HVS (ang. *Heavy Vehicle Simulator*) – rys. 21.



Rys. 18. Porównanie odporności na koleinowanie AC WMS z różnymi kruszywami
 Fig. 18. Comparison of rutting resistance of AC WMS with various aggregates



Rys. 19. Porównanie modułu sztywności AC WMS z różnymi kruszywami
 Fig. 19. Comparison of stiffness of AC WMS with various aggregates



Rys. 20. Porównanie trwałości zmęczeniowej (spadku modułu) AC WMS z różnymi kruszywami

Fig. 20. Comparison of fatigue resistance (loss of stiffness) of AC WMS with various aggregates



Rys. 21. Symulator HVS w trakcie badań na odcinkach testowych w Pruszkowie

Fig. 21. HVS Simulator during testing on trial sections in Pruszków

Program badawczy obejmował:

- opracowanie recept mieszanek mineralno-asfaltowych do wbudowania na poszczególnych odcinkach testowych:
 - beton asfaltowy o wysokim module sztywności AC WMS 16 z asfaltem 20/30 do warstwy wiążącej,
 - beton asfaltowy AC 16 z asfaltem 35/50 do warstwy wiążącej,
 - SMA 8 z asfaltem DE80C do warstwy ścieralnej,
 - asfalt piaskowy AP z asfaltem DE80C i włóknami do warstwy przeciwwzmęczenia (AC AF),
 - podbudowa z mieszanki mineralnej,
- badania laboratoryjne mieszanek mineralno-asfaltowych:
 - zawartość wolnych przestrzeni,
 - stabilność i osiadanie wg Marshalla,
 - moduł sztywności pełzania,
 - odporność na działanie wody,
 - moduł sztywności - metoda belki czteropunktowo zginanej,
 - trwałość zmęczeniowa - metoda belki czteropunktowo zginanej,
 - odporność na koleinowanie (duży aparat),
 - odporność na koleinowanie (mały aparat),
- opracowanie i wykonanie konstrukcji nawierzchni odcinków testowych wraz z montażem czujników,
- badania i analizę wyników:
 - poddanie obciążeniom przez urządzenie HVS (ang. *Heavy Vehicle Simulator*) odcinków testowych (zakończenie obciążania przewidziano po osiągnięciu około 280 tys. przejazdów),
 - program badań odcinków testowych:
 - ♦ głębokość koleiny w trakcie obciążania przez HVS,
 - ♦ monitorowanie odkształceń w spodzie warstw asfaltowych i podłożu gruntowym,
 - ♦ zmianę modułów sztywności warstw konstrukcji (badania FWD oraz badania laboratoryjne),
 - ♦ badanie zmęczenia mieszanek mineralno-asfaltowych,
 - ♦ ocenę wizualną,
 - analizę i interpretację uzyskanych wyników pod kątem oceny zastosowanych rozwiązań technologicznych.

Wykonano 4 odcinki testowe o konstrukcjach podanych w tablicy 16.

Tablica 16. Konstrukcja nawierzchni na poszczególnych odcinkach testowych i zastosowane materiały

Table 16. Pavement structures on trial sections and materials used

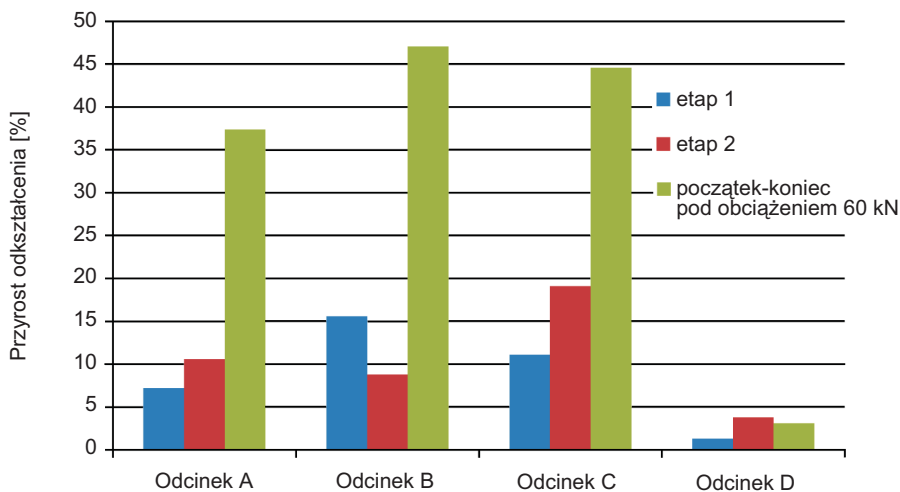
Odcinek	Warstwa	Grubość [cm]	Materiał	Lepiszczce
A	ścieralna	2	SMA 8	DE80C
	wiążąca	10	AC WMS 16	20/30
	podbudowa niezwiązana stabilizowana mechanicznie	20	kruszywo dolomitowe 0/31,5	–
B	ścieralna	2	SMA 8	DE80C
	wiążąca	10	AC 16	35/50
	podbudowa niezwiązana stabilizowana mechanicznie	20	kruszywo dolomitowe 0/31,5	–
C	ścieralna	4	STRABAPHALT	asfalt + zaprawa cementowa
	wiążąca	8	AC 16	35/50
	podbudowa niezwiązana stabilizowana mechanicznie	20	kruszywo dolomitowe 0/31,5	–
D	ścieralna	2	SMA 8	DE80C
	wiążąca	7	AC WMS 16	20/30
	warstwa antyzmęczeniowa	3	AC AF	DE80C
	podbudowa niezwiązana stabilizowana mechanicznie	20	kruszywo dolomitowe 0/31,5	–

Na podstawie wyników badań odcinków pod obciążeniem w warunkach rzeczywistych stwierdzono, że nawierzchnie z AC WMS w stosunku do typowej konstrukcji ze zwykłym betonem asfaltowym wykazały mniejszy przyrost odkształceń pod obciążeniem (rys. 22), co świadczy o wolniejszym postępie zmęczenia nawierzchni. Najmniejszy przyrost szkody zmęczeniowej wykazała nawierzchnia z AC WMS i dodatkową warstwą antyzmęczeniową.

Konstrukcje A i D miały zbliżone grubości warstw asfaltowych. W konstrukcji A występowały około 30 % mniejsze odkształcenia niż w konstrukcji D. Powodem tego jest umiejscowienie podatnej warstwy antyzmęczeniowej w spodzie warstw asfaltowych w konstrukcji D. Zaletą tego rozwiązania jest bardzo mały (około 10 razy mniejszy) przyrost odkształceń w spodzie warstw asfaltowych, mierzony na początku i na końcu testu HVS pod obciążeniem 60 kN. Jeżeli uznać, że przyrost odkształceń w warstwie asfaltowej jest miarą postępowania procesu zmęczenia, to świadczy to tym, że uzyskano zamierzony efekt warstwy przeciwmęczeniowej.

Zaprojektowane i wybudowane odcinki testowe miały grubość warstw asfaltowych odpowiadającą grubości konstrukcji typowej jak dla kategorii ruchu KR2, co odpowiada trwałości w przedziale od 90 tys. do 510 tys. osi 100 kN. Odcinki testowe były

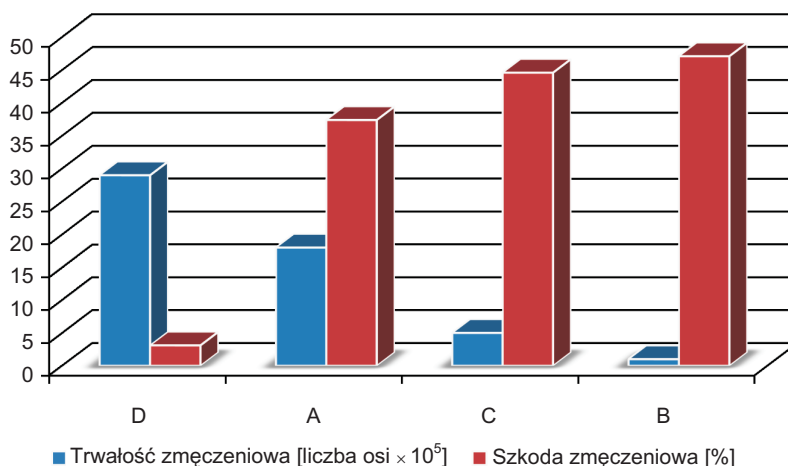
obciążane przez pierwsze 200 tysięcy przejazdów kołem o nacisku 60 kN (etap 1), a przez ostatnie 100 tys. kołem o nacisku 80 kN (etap 2). W przeliczeniu na oś 100 kN (koło 50 kN) konstrukcje podczas całego badania przeniosły obciążenie równoważne co najmniej 700 tys. osi 100 kN. Można więc stwierdzić, że konstrukcja z zapasem spełniła wymagania jak dla kategorii KR2.



Rys. 22. Przyrost odkształceń poziomych poprzecznych w spodzie warstw asfaltowych
Fig. 22. Increase of horizontal transversal strains at the bottom of bituminous layers

Nie stwierdzono uszkodzeń zmęczeniowych i deformacji strukturalnej, która przekraczałaby założone kryteria. Należy tutaj zauważyć, że dla konstrukcji przeznaczonych na niższe kategorie ruchu zazwyczaj decydującym kryterium jest trwałość ze względu na odkształcenia trwałe podłoża gruntowego (deformacja strukturalna konstrukcji). Wyniki obliczeń trwałości ze względu na zmęczenie warstw asfaltowych wskazywały, że konstrukcja nie powinna ulec znaczącym zniszczeniom zmęczeniowym w trakcie badania HVS. Znalazło to potwierdzenie zarówno w wynikach pomiarów HVS, jak i w obliczeniach metodą mechanistyczną. W obydwu przypadkach najlepsze wyniki (największą trwałości obliczeniową i najmniejszą szkodę zmęczeniową) uzyskała nawierzchnia na odcinku D, a najgorsze nawierzchnia na odcinku B (rys. 23) [36].

Na podstawie badań nawierzchni w pełnej skali uzyskano zatem potwierdzenie skuteczności, w porównaniu z tradycyjną nawierzchnią, zwiększenia trwałości zmęczeniowej nawierzchni z AC WMS oraz dodatkowego efektu przy zastosowaniu cienkiej warstwy przeciwmęczeniowej w spodzie nawierzchni asfaltowej.



Rys. 23. Porównanie trwałości zmęczeniowej poszczególnych odcinków wg IA i szkody zmęczeniowej oszacowanej na podstawie analizy odkształceń pod obciążeniem 60 kN na początku i na zakończenie badania HVS

Fig. 23. Comparison of fatigue life on test sections according to IA criterion and fatigue damage calculated on the basis of strain analysis under 60 kN load at the beginning and at the end of HVS testing

9. NAJNOWSZE ZASTOSOWANIA AC WMS W POLSCE

Pierwsze zastosowanie AC WMS w Polsce w dużej skali miało miejsce w 2005 r. na odcinku autostrady A2 Konin-Dębnie. Zastosowano AC WMS z asfaltem 20/30 w podbudowie zasadniczej nawierzchni. W dużej skali AC WMS stosowany jest w „weekendowych remontach” nawierzchni ulic warszawskich [37]. Od 2003 roku wymieniono warstwy asfaltowe nawierzchni blisko 400 km ulic. Przegląd dokonany w 2010 r. wykazał dobry stan 90% nawierzchni. Większe natężenie uszkodzeń stwierdzono w 5% nawierzchni ulic. Najczęściej występującymi uszkodzeniami są spękania poprzeczne i podłużne odbite – odtworzone ze spękanej podbudowy związanej cementem (stabilizacja, chudy beton). Spękania siatkowe, zmęczeniowe pojawiają się w nawierzchniach o zbyt małej grubości warstwy wiążącej.

W kolejnych latach stosowanie AC WMS znacznie się upowszechniło, zwłaszcza na nowobudowanych autostradach i drogach krajowych. W latach 2003 - 2010 wybudowano ponad 30 odcinków nawierzchni dróg krajowych i autostrad, w tym wzmocnienie autostrady A2 (odcinek Konin-Nowy Tomyśl, z wyłączeniem obwodnicy Poznania) oraz na drogach według listy zamieszczonej w tablicy 17.

Tablica 17. Lista zastosowań AC WMS w nawierzchni dróg krajowych i autostrad do 2010 r.
 Table 17. List of application of AC WMS on national roads and highways until 2010

Lp.	Droga	Odcinek	Rok
1	DK62	14+500 - 23+000	2009
2	DK8	717+829 - 723+236	2004/2005
3	DK8	648+117 - 654+548	2008/2009
4	DK94	285+484 - 286+300 i inne odcinki	2008
5	A4	410+983 - 428+103	2007/2008
6	DK4	508+589 - 517+884	2008/2009
7	DK1	skrzyżowanie z DW789	2008
8	DK1	skrzyżowanie z DW791 i 904	2008
9	S1	Hałdunów - Tychy	2008/2009
10	A1	Węzeł Sośnica	2009
11	DK78	Południowa obwodnica Siewierza	2009
12	A1	Bełk - Świerklany	2009
13	A4	Przebudowa węzła „Murckowska”	2008/2009
14	DK2	Sochaczew - granica województwa	2006/2007
15	S8	Konotopa - Trasa AK	2010
16	DK9	154+100 - 158+000	2003
17	DK9	158+000 - 161+600 i inne odcinki (21 km)	2005/2006
18	DK5	obwodnica Poznania, dojazd do A2	2003/2004
19	DK2 (A2)	Komorniki - Krzesiny	2003
20	DK92	Iwno-Starczanowo	2003
21	DK92	Starczanowo-Września	2006
22	196	4+100 - 7+200	2003
23	S-11	Poznań - Kurnik	2006/2009
24	S-11	Obwodnica Ostrowa Wlkp.	2009
25	A2	Konin-Koło-Dębie	2005
26	DK15	Obwodnica Gniezna	2005
27	A2	Komorniki - Nowy Tomyśl	2003
28	DK11	Poznań, Żeromskiego	2009

10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Beton asfaltowy o wysokim module sztywności od wielu lat stosowany skutecznie we Francji został przyjęty do stosowania także w innych krajach: Wielka Brytania, Belgia, Czechy, a także w Polsce. Pierwsze zastosowania w Polsce w pełnej skali na drogach krajowych wykazały zalety tej technologii. Nawierzchnia z warstwami nośnymi (podbudowa i wiążąca) z AC WMS oraz cienka warstwa ścieralna z SMA (lub BBTM) zapewnia odporność na deformacje, trwałość zmęczeniową. Warstwa ścieralna z polimeroasfalem powinna zapewniać odporność na pękanie niskotemperaturowe. Największą skuteczność zapewnia w tym wypadku polimeroasfalt o dużej zawartości polimeru SBS (5% - 6% m/m).

Zwiększona sztywność warstw nośnych nawierzchni zmniejsza odkształcenia w spodzie warstw i obciążenia przekazywanego na podłoże gruntowe. Może to być wykorzystane w dwojaki sposób:

- zmniejszenie grubości nawierzchni i uzyskanie efektu ekonomicznego oszczędności materiałów,
- zwiększenie trwałości zmęczeniowej nawierzchni, czyli wydłużeniu okresu użytkowania nawierzchni, co przynosi korzyści techniczno ekonomiczne w dłuższym okresie, dzięki zwiększeniu okresu międzyremontowego (zmniejszeniu częstotliwości remontów), a tym samym zmniejszeniu uciążliwości dla użytkowników drogi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Nunn M., Smith T.*: Evaluation of enrobé á module élevé (EME: A French high modulus roadbase material). Transport Research Laboratory, Project Report 66, 1994
- [2] *Serfass J.P., Bauduin A., Garnier J.F.*: High modulus asphalt mixes - laboratory evaluation, practical aspects and structural design. 7th International Conference on Asphalt Pavements, ISAP, Nottingham 1992
- [3] *Goacolou H., Dimitri A., Prudhomme F., Geroge L.A.*: Use of Subnormal Local Aggregates in High Modulus Asphalt Mixes. 7th International Conference on Asphalt Pavements, ISAP, Nottingham 1992
- [4] *Vérhée F., Delorme J.L.*: Enrobés classiques et á module élevé. Bilan de comportement des enrobés á module élevé. Bull. de liaison des LCPC, 172, 1991
- [5] *Sybilski D., Mularzuk R.*: Właściwości betonu asfaltowego z asfalem wielorodzajowym (multigrade). V Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, Kielce 11 - 12 maja 1999
- [6] *Koole R.C., Valkering C.P., Lancon D.J.L.*: Development of a multigrade bitumen to alleviate permanent deformation. AAPA Asphalt Conference, Manly 1991, 8p.
- [7] *Maia A.F.*: Multiphalte: A cost effective bitumen to combat rutting. 1st Malaysian Road Conference, Kuala Lumpur 1994, 12p.

- [8] *Valkering C.P., Lancon D.J.L., de Hilster E., Stoker D.A.*: Rutting resistance of asphalt mixes containing non-conventional and polymer-modified binders. Preprint of the Proceedings Association Asphalt Paving Technologist, 1990
- [9] *Robertus C.*: Shell Multigrade bitumen: a binder for high-stability asphalt. Proceedings of Fifth Eurobitume Congress, Stockholm 1993, Vol. 1A, 161 - 165
- [10] *Sybilski D., Styk S.*: Zalecenia wykonywania cienkich warstw ścieralnych „na gorąco” bitumicznych nawierzchni drogowych (ZW-CWG-95). Zasady wykonywania nawierzchni z mieszanki mineralno-bitumicznej o nieciągłym uziarnieniu (ZW-MMB-NU-95). IBDiM, Seria „I” zeszyt 50, Warszawa 1995
- [11] *Sybilski D.* i in.: Opracowanie wytycznych i zaleceń technologicznych wykonania konstrukcji nawierzchni asfaltowej z zastosowaniem cienkiej warstwy ścieralnej i wzmocnionych dolnych warstw. IBDiM, Sprawozdanie TN-199, 2000 (praca niepublikowana)
- [12] *Sybilski D.* i in.: Wyznaczenie charakterystyki zmęczeniowej betonu asfaltowego do podbudowy z uwzględnieniem wpływu składu i właściwości składników. Sprawozdanie TN-194, IBDiM, 2000 (praca niepublikowana)
- [13] *Sybilski D., Bańkowski W.*: Zastosowanie wyników badania zmęczenia mieszanek mineralno-asfaltowych w mechanistycznym projektowaniu konstrukcji nawierzchni. VII Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, Kielce maj 2001
- [14] *Sybilski D., Mularzuk R., Pałys M., Kaczycka J.*: Pierwsze w Polsce zastosowanie asfaltu drogowego wielorodzajowego (multigrade). VI Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, Kielce 9 - 10 maja 2000
- [15] *Sybilski D., Bańkowski W., Mularzuk R., Pałys M.*: Wdrożenie technologii i weryfikacja zaleceń wykonywania konstrukcji nawierzchni o zwiększonej odporności na koleinowanie i zmęczenie. IBDiM, Zakład Technologii Nawierzchni, Sprawozdanie TN-217 na zlecenie GDDKiA, 2001
- [16] *Sybilski D., Bańkowski W., Pałys M., Mularzuk R.*: Wdrożenie w Polsce konstrukcji nawierzchni asfaltowej odpornej na koleinowanie i zmęczenie. VIII Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, Kielce 6 - 7 maja 2002
- [17] *Sybilski D., Pałys M., Mularzuk R., Bańkowski W.*: Zasady wykonywania nawierzchni asfaltowej o zwiększonej odporności na koleinowanie i zmęczenie (ZW-WMS 2002). IBDiM, Seria „I” zeszyt 63, Warszawa
- [18] *Sybilski D., Bańkowski W., Horodecka R., Wróbel A., Mirski K.*: Wpływ zastosowania betonu o wysokim module sztywności na trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni podatnej lub półsztywnej. IBDiM, Zakład Technologii Nawierzchni. Sprawozdanie TN-234 na zlecenie GDDKiA, 2004
- [19] *Sybilski D., Bańkowski W., Maliszewska D., Maliszewski M., Mularzuk R.*: Badania możliwości stosowania kruszyw lokalnych o niższej jakości w betonie asfaltowym o wysokim module sztywności BAWMS. IBDiM, Sprawozdanie TN-237, 2006 (praca niepublikowana)

- [20] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. IBDM, GDDP, Warszawa 1997
- [21] *Sybilski D., Bańkowski W.* i zespół: „Temperatura równoważna nawierzchni asfaltowej ze względu na zmęczenie w polskich warunkach klimatycznych”. Drogownictwo nr 6/2004
- [22] Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych. IBDiM, GDDP, Warszawa, 2001
- [23] *Dempsey B.J.* i in.: Report ESL-TR-83-34. University of Illinois, Urbana, 1984
- [24] *Sybilski D., Bańkowski W.*: „Analiza wymagań trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych”. IBDiM, praca na zlecenie GDDP, Warszawa 2003
- [25] *Sybilski D., Bańkowski W.*: „Prognozowanie trwałości zmęczeniowej nawierzchni asfaltowej z zastosowaniem modelu lepko-sprężysto-plastycznego nawierzchni”. IBDiM, praca na zlecenie GDDP, Warszawa 2003
- [26] *Sybilski D., Bańkowski W., Mularzuk R.*: Zasady wykonywania nawierzchni asfaltowej o zwiększonej odporności na koleinowanie i zmęczenie (ZW-WMS 2006). IBDiM, Seria „I” zeszyt 70, wydanie II uzupełnione, Warszawa 2006
- [27] *Sybilski D., Bańkowski W., Mularzuk R.*: Zalecenia wykonywania cienkich warstw ścieralnych na gorąco (ZW-CWG-2006). IBDiM, Seria „I” zeszyt 70, wydanie II uzupełnione, Warszawa 2006
- [28] *Sybilski D.* i in.: Nawierzchnie asfaltowe na drogach publicznych. IBDiM, WT-2 Nawierzchnie asfaltowe, Wymagania Techniczne rekomendowane przez Ministra Infrastruktury, Warszawa 2008
- [29] *Sybilski D.*: Długowieczne nawierzchnie asfaltowe w świecie i w Polsce. Drogownictwo, 3, 59, 2004, 79 - 86
- [30] *Nunn M.E.*: Long-life flexible roads. Proceedings of the Eighth International Conference on Asphalt Pavements, 1997, 3 - 16
- [31] *Ferne B., Nunn M.*: The European Approach to Long Lasting Asphalt Pavements: A state-of-the-art review by ELLPAG. ISAP International Symposium on Construction and Maintenance of Long Lasting Asphalt Pavements, NCAT, Auburn, Alabama, 2004
- [32] *Dumont A.G., Beuving E., Christory J.P., Jasienski A., Ortiz Garcia J., Piau J.M., Sybilski D.*: Long Life Pavements and success stores. World Road Association (PIARC/AIPCR), Technical Committee C4.3 report, 2007
- [33] *Sybilski D., Bańkowski W., Maliszewska D., Maliszewski M., Mularzuk R.*: Stosowanie kruszyw lokalnych i sztucznych w betonie asfaltowym o wysokim module sztywności. Polskie Drogi nr 9/2007, 60 - 68
- [34] *Sybilski D., Bańkowski W., Maliszewska D., Maliszewski M., Mularzuk R.*: Beton asfaltowy o wysokim module sztywności AC WMS z kruszywami lokalnymi. Drogi i Mosty nr 4/2007, 53 - 85
- [35] www.spens.fehrl.org

- [36] *Bańkowski W., Błażejowski K., Gajewski M., Ruttmar I., Sybilski D.*: Validation of innovative pavement structures on test section with use of accelerated loading test. Konferencja ENVIROAD, Warszawa 2009
- [37] *Sybilski D., Maliszewski M., Maliszewska D.*: Szybka naprawa nawierzchni ulic Warszawy. *Drogownictwo*, 2, **62**, 2007, 39 - 42

LABORATORY RESEARCH AND FULL SCALE TESTING OF HIGH MODULUS ASPHALT CONCRETE IN ROAD PAVEMENT

Abstract

This paper presents the development of high modulus concrete AC WMS in Poland. First implementation of AC WMS was in 1997 in Poznań. In 2002 the first edition of guidelines for high modulus asphalt concrete was published. The second edition of guidelines appeared in 2008 as the result of research project funded by GDDP. The research covered a wide range of laboratory tests with use of performance test method. Mechanical analyzes of pavement structures showed a better performance of variants with high modulus concrete. Typical pavement structures with AC WMS including 20 and 30 years of design life were presented. Current requirements for AC WMS are included in WT-2, which is Polish application document for new European standards. Development of high modulus asphalt concrete was also included in European project "SPENS". For its purpose test sections were built in Pruszków and tested with heavy vehicle simulator (HVS). The results confirmed good performance of pavement with AC WMS. Finally a list of AC WMS applications in Poland is presented and benefits of high modulus concrete are summarized.