



WOJCIECH BAŃKOWSKI¹⁾
MARCIN GAJEWSKI²⁾

BADANIA PRZYSPIESZONE W SKALI RZECZYWISTEJ INNOWACYJNYCH NAWIERZCHNI DROGOWYCH

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono wyniki przeprowadzonych w Polsce badań w skali rzeczywistej innowacyjnych nawierzchni drogowych. Odcinek testowy podzielono na cztery części o takiej samej grubości warstw, lecz z różnymi mieszankami mineralno-asfaltowymi, m.in. SMA, betonem asfaltowym, betonem asfaltowym o wysokim module sztywności, mieszanką kompozytową i mieszanką antyzmęczeniową. W ten sposób możliwe było porównanie różnych rozwiązań technologicznych. Odcinki zostały poddane przyspieszonym obciążeniom z zastosowaniem symulatora HVS. Uzupełnieniem były badania terenowe i laboratoryjne.

SŁOWA KLUCZOWE: badania przyspieszone nawierzchni, beton asfaltowy, beton asfaltowy o wysokim module sztywności, mieszanka kompozytowa i mieszanka antyzmęczeniowa, projektowanie konstrukcji nawierzchni, projektowanie mieszanek, trwałość zmęczeniowa.

1. WPROWADZENIE

W artykule przedstawiono wyniki badań w skali rzeczywistej odcinków testowych, z których część stanowiły innowacyjne konstrukcje nawierzchni. Należy tu wymienić przede wszystkim zastosowanie warstwy przeciwmęczeniowej, warstwy kompozytowej Strabaphalt i betonu asfaltowego o wysokim module sztywności. Zasadniczym

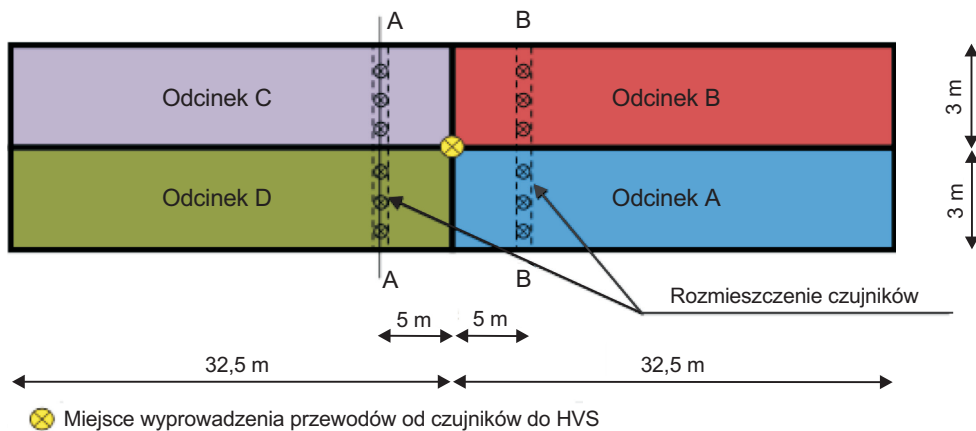
¹⁾ dr inż. – Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie oraz Politechnika Lubelska

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

elementem omawianej pracy badawczej było wykonanie odcinków testowych i podanie ich obciążeniom przy zastosowaniu urządzenia HVS (ang. *Heavy Vehicle Simulator*) [1]. Tego rodzaju badania są dość powszechne w świecie [2]. Znaczenie tego rodzaju badań jest nieocenione, ponieważ pozwalają na przyspieszone sprawdzenie w skali rzeczywistej rozwiązań technologicznych i materiałowych. Do tego rodzaju metod należy zaliczyć badania przyspieszone na torach badawczych [3 - 5] oraz przyspieszone badania nawierzchni przy użyciu specjalnych symulatorów stacjonarnych [6, 7] lub mobilnych [8]. Do tej ostatniej grupy zalicza się urządzenie HVS, które po raz drugi zostało zastosowane w Polsce. Pierwsze miało miejsce w trakcie budowy odcinka Autostrady A-2 w 2003 roku [9]. Przygotowano szeroki program badawczy, który umożliwił kompleksową ocenę zastosowanych rozwiązań oraz porównanie technologii konwencjonalnych i innowacyjnych.

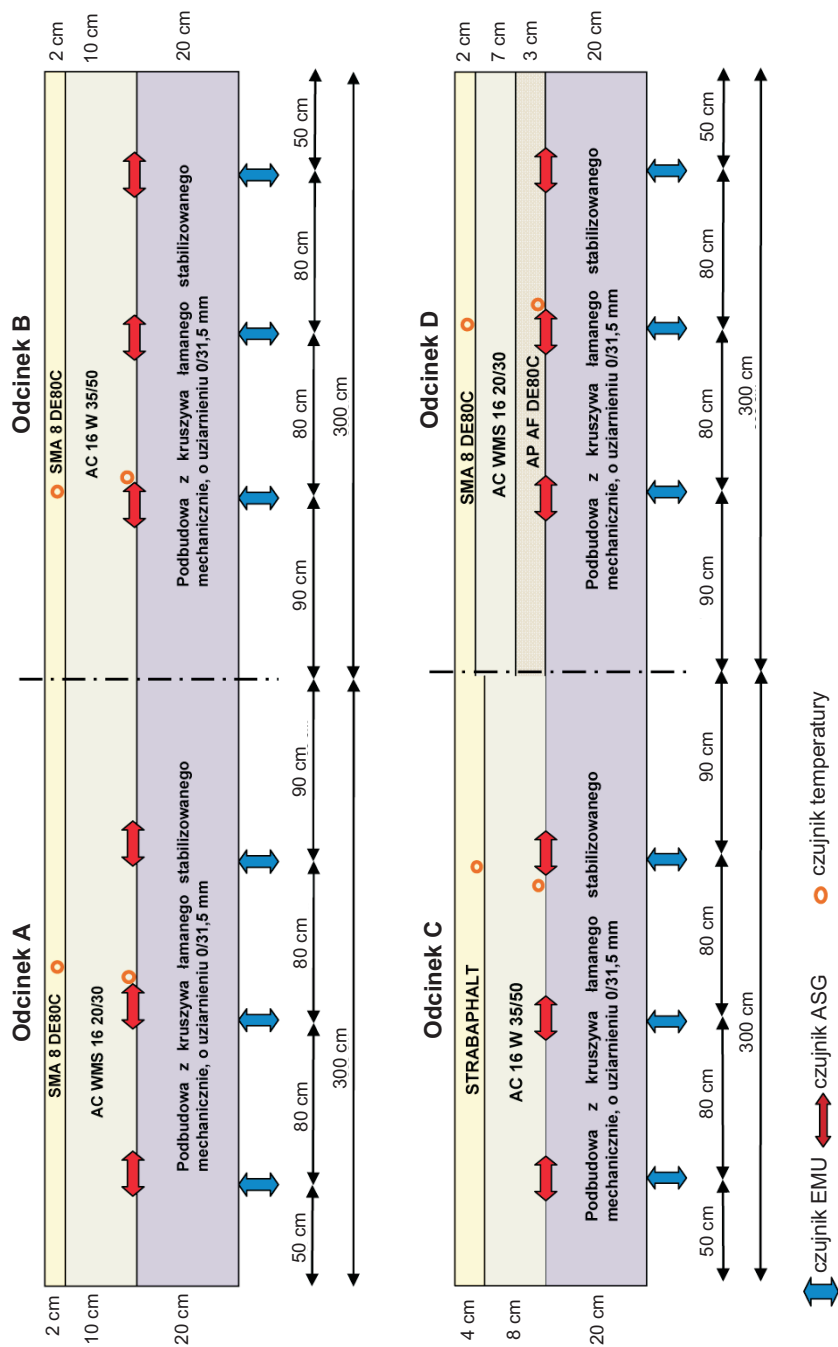
2. OPIS ODCINKÓW TESTOWYCH

W ramach projektu europejskiego SPENS [10, 11] wybudowano cztery odcinki testowe o różnych konstrukcjach warstw asfaltowych. Odcinki zostały zlokalizowane w Pruszkowie. Każdy odcinek miał długość około 30 m i szerokość około 3 m. Schemat rozmieszczenia odcinków badawczych przedstawiono na rysunku 1. Odcinki zostały tak rozmieszczone, aby możliwe było jednoczesne testowanie urządzeniem HVS dwóch konstrukcji (odpowiednio A i B oraz C i D na rysunku 2). Wszystkie konstrukcje z założenia miały charakteryzować się tą samą grubością warstw asfaltowych, co miało umożliwić bezpośrednie porównanie różnych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych.



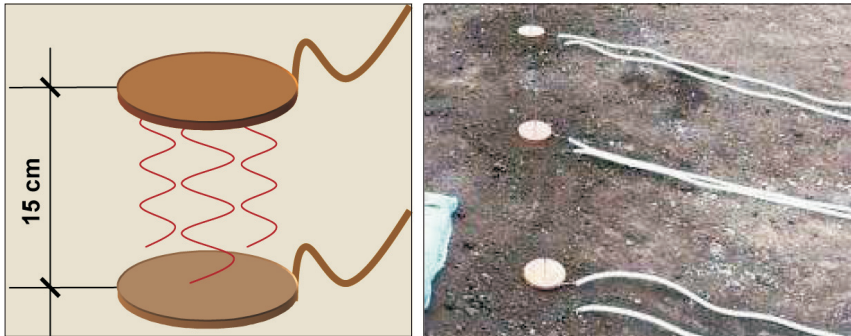
Rys. 1. Schemat odcinków testowych (widok z góry)

Fig. 1. Schematic view of test sections (view from the top)



Rys. 2. Konstrukcja odcinków testowych
 Fig. 2. The structure of test sections

Nawierzchnie odcinków wyposażono w czujniki temperatury odkształceń pionowych w stropie podłoża gruntowego (rys. 3) oraz odkształceń poziomych poprzecznych w spodzie warstw asfaltowych (rys. 4).



Rys. 3. Podłączenie czujników odkształceń pionowych w warstwie podłoża
Fig. 3. Setup of vertical strain measurement system



Rys. 4. Czujniki odkształceń poziomych na warstwie podbudowy z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie
Fig. 4. Horizontal strain sensors at the top of sub-base made of stabilized crushed aggregate

Wybudowano nawierzchnie o następujących konstrukcjach:

- odcinek A
 - warstwa ścierna grubości 2 cm z SMA 8 z asfaltem Orbiton 80C,
 - warstwa wiążąca grubości 10 cm z betonu asfaltowego o wysokim module sztywności AC WMS 16 20/30,
 - podbudowa niezwiązana grubości 20 cm z kruszywa dolomitowego 0/31,5 stabilizowanego mechanicznie,
- odcinek B
 - warstwa ścierna grubości 2 cm z SMA 8 z asfaltem Orbiton 80C,

- warstwa wiążąca grubości 10 cm z betonu asfaltowego AC 16 W 35/50,
 - podbudowa niezwiązana grubości 20 cm z kruszywa dolomitowego 0/31,5 stabilizowanego mechanicznie,
- odcinek C
- warstwa ściernalna grubości 4 cm z mieszanki Strabaphalt,
 - warstwa wiążąca grubości 8 cm z betonu asfaltowego AC 16 W 35/50,
 - podbudowa niezwiązana grubości 20 cm z kruszywa dolomitowego 0/31,5 stabilizowanego mechanicznie,
- odcinek D
- warstwa ściernalna grubości 2 cm z SMA 8 z asfaltem Orbiton 80C,
 - warstwa wiążąca grubości 7 cm z betonu asfaltowego o wysokim module sztywności AC WMS 16 20/30,
 - warstwa antyzmęczeniowa grubości 3 cm z asfaltu piasekowego APAF z zastosowaniem asfaltu Orbiton 80C,
 - odbudowa niezwiązana grubości 20 cm z kruszywa dolomitowego 0/31,5 stabilizowanego mechanicznie.

W dalszych badaniach odcinków ocenie poddawane były szczególnie mieszanki AC 16 W 35/50 i AC WMS 16 20/30. Natomiast w przypadku konstrukcji D przedmiotem analizy była efektywność zastosowania warstwy antyzmęczeniowej AP AF. Zgodnie z założeniami taka warstwa powinna zwiększyć trwałość zmęczeniową konstrukcji. Jest to uzyskiwane przez odpowiednie umiejscowienie tej warstwy tj. w spodzie warstw asfaltowych czyli w miejscu, gdzie powstają największe odkształcenia rozciągające i gdzie najczęściej inicjowane jest zmęczenie konstrukcji oraz przez podwyższoną odporność zmęczeniową mieszanki do tej warstwy. Dobre właściwości zmęczeniowe mieszanki AP AF uzyskano poprzez drobnoziarniste uziarnienie mieszanki mineralno-asfaltowej (asfalt piaskowy) umożliwiające wprowadzenie większej ilości lepiszcza, zastosowanie asfaltu modyfikowanego Orbiton 80C oraz poprzez dodanie włókna polimerowego Tofic [12].

3. OPRACOWANIE RECEPT MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH

3.1. MIESZANKA SMA 8 DE80C

Mieszanka SMA 8 z asfaltem DE80C została zaprojektowana według wymagań zawartych w projekcie WT-2 [13] oraz Instrukcji [14] do warstwy ściernalnej kategorii ruchu KR3-KR6. Do produkcji mieszanki SMA 8 DE80C zastosowano następujące materiały składowe:

- asfalt modyfikowany DE 80C (OrlenAsfalt),
- mączka wapienna (Mowap),

- mieszanka drobna granulowana 0/4 mm (Sulików),
- bazalt 2/5 mm, 5/8 mm (Sulików),
- dodatki stabilizujące: Viatop Premium (Rettenmeier Polska),
- środki adhezyjne: Wetfix BE (Akzo Nobel),
- Sasobit (Schuman Sasol).

Tablica 1. Właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej SMA 8 DE80C
Table 1. Properties of mineral-asphalt mix SMA 8 DE80C

Właściwości	Wyniki	Wymagania według [13]
Gęstość objętościowa mieszanki-mineralnej [g/cm ³]	2,997	–
Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej [g/cm ³]	2,632	–
Gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej [g/cm ³]	2,545	–
Wolna przestrzeń w mieszance mineralno-asfaltowej [% v/v]	3,3	od 2 do 4
Wypełnienie asfaltem wolnej przestrzeni [% v/v]	84,7	–
Odporność na deformacje trwałe (metoda B w powietrzu, 60°C, 10000 cykli)	0,04 5,6	<i>WTS</i> _{AIR0,70} <i>PRD</i> _{AIR7,0}
Średnia głębokość koleiny w temperaturze 60°C, grubość próbki 50 mm, po 10 000 cykli obciążenia [% (mm/mm)]	9,2	–
Odporność na działanie wody, wskaźnik wytrzymałości na rozciąganie pośrednie ITSR [%]	92,6	ITSR ₉₀
Zawartość asfaltu [% m/m]	7,1	B _{min5,8}

3.2. MIESZANKA STRABAPHALT (PA 11 50/70)

Asfalt porowaty PA 11 z asfaltem 50/70 został zaprojektowany według wymagań PN-EN13108-7 [15] do warstwy ścieralnej kategorii ruchu KR1-KR6. Po wykonaniu asfaltu porowatego PA 11 przewidziano wypełnienie wolnych przestrzeni wodnym zaczynem cementowym, pokrycie środkiem do pielęgnacji betonu i uszorstnienie powierzchni suchym piaskiem kwarcowym. Do produkcji mieszanki PA 11 zastosowano następujące materiały składowe:

- asfalt drogowy 50/70 (LOTOS Asfalt),
- mączka wapienna (Mowap),
- grys melafirowy 8/11 mm (Czarny Bór),
- dodatki stabilizujące: Viatop Premium (Rettenmaier Polska),
- środki adhezyjne: Wetfix BE (Akzo Nobel),
- zaczyn cementowy, środek do pielęgnacji betonu, piasek kwarcowy.

Tablica 2. Właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej PA 11 50/70
Table 2. Properties of mineral-asphalt mix PA 11 50/70

Właściwości	Wyniki	Wymagania według [15]
Gęstość objętościowa mieszanki-mineralnej g/cm^3	2,719	–
Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej $[\text{g/cm}^3]$	2,527	–
Gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej $[\text{g/cm}^3]$	1,782	–
Wolna przestrzeń w mieszance mineralno-asfaltowej [% v/v]	29,5	$V_{\min 24,0}$ $V_{\max 32,0}$
Wypełnienie asfaltem wolnej przestrzeni [% v/v]	17,8	–

3.3. MIESZANKA AC 16 W 35/50

Mieszanka AC 16 W z asfaltem 35/50 – beton asfaltowy przeznaczony do warstwy wiążącej kategorii ruchu KR3-KR6 według wymagań WT-2 [13]. Do produkcji mieszanki AC 16 W 35/50 zastosowano następujące materiały składowe:

- asfalt drogowy 35/50 (LOTOS Asfalt),
- mączka wapienna (Mowap),
- piasek łamany dolomitowy 0/2 mm (Radkowice),
- dolomit 2/8 mm, 8/12 mm, 12/25 mm (Radkowice).

Tablica 3. Właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej AC 16 W 35/50
Table 3. Properties of mineral-asphalt mix AC 16 W 35/50

Właściwości	Wyniki	Wymagania według [13]
Gęstość objętościowa mieszanki-mineralnej $[\text{g/cm}^3]$	2,821	–
Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej $[\text{g/cm}^3]$	2,619	–
Gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej $[\text{g/cm}^3]$	2,506	–
Wolna przestrzeń w mieszance mineralno-asfaltowej [% v/v]	3,8	$V_{\min 4,0}$ $V_{\max 7,0}$
Wypełnienie asfaltem wolnej przestrzeni [% v/v]	70,5	od 74 do 90
Stabilność według Marshalla w 60°C [kN]	17,4	–
Odształcenie według Marshalla [mm]	2,9	–
Sztywność w temperaturze 10°C i przy częstotliwości 10 Hz [MPa]	19435	$S_{\min 9000}$
Odporność na zmęczenie ϵ_6 w temperaturze 10°C i przy częstotliwości 10 Hz, odształcenie $[\mu\text{mm/mm}]$	116	ϵ_{6-115}
Odporność na deformacje trwałe (metoda B w powietrzu, 60°C, 10000 cykli)	0,03 1,02	$WTS_{\text{AIR}0,10}$ $PRD_{\text{AIR}3,0}$
Odporność na działanie wody, wskaźnik wytrzymałości na rozciąganie pośrednie ITSR [%]	90,2	$ITSR_{80}$
Zawartość asfaltu [% m/m]	4,3	$B_{\min 4,1}$

3.4. MIESZANKA AC WMS 16 20/30

Mieszanka AC WMS 16 z asfaltem 20/30 jest to beton asfaltowy o wysokim module sztywności przeznaczony do warstwy podbudowy i wiążącej zaprojektowany dla kategorii ruchu KR3-KR6 według [16] oraz WT-2 [13]. Do produkcji mieszanki AC WMS 16 20/30 zastosowano następujące materiały składowe:

- asfalt 20/30 (ORLEN Asfalt),
- mączka wapienna (Mowap),
- wapień 0/5,6 mm; 4/8 mm; 8/16 mm (Kujawy).

Tablica 4. Właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej AC WMS 16 20/30 o składzie optymalnym dla zawartości asfaltu $A_m=5,5$ [% m/m]

Table 4. Properties of mineral-asphalt mix AC WMS 16 20/30 optimally designed for asphalt content $A_m=5,5$ [% m/m]

Właściwości	Wyniki	Wymagania według [12] i [15]
Gęstość objętościowa mieszanki-mineralnej [g/cm ³]	2,698	–
Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej [g/cm ³]	2,471	–
Gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej [g/cm ³]	2,377	–
Wolna przestrzeń w mieszance mineralno-asfaltowej [% v/v]	3,8	$V_{\min 1,0}$ $V_{\max 4,0}$
Wypełnienie asfaltem wolnej przestrzeni [% v/v]	77,4	od 74 do 90
Stabilność według Marshalla w 60°C [kN]	19,5	–
Średnia głębokość koleiny w temperaturze 60°C, grubość próbki 50 mm, po 30 000 cykli obciążenia [% (mm/mm)]	3,6	≤ 5,0
Sztywność w temperaturze 10°C i przy częstotliwości 10 Hz [MPa]	16312	$S_{\min 14000}$
Odporność na zmęczenie ϵ_6 w temperaturze 10°C i przy częstotliwości 10 Hz, odkształcenie [µmm/mm]	180	ϵ_{6-130}
Odporność na deformacje trwałe (metoda B w powietrzu, 60°C, 10000 cykli)	0,08 2,7	$WTS_{AIR0,10}$ $PRD_{AIR3,0}$
Odporność na działanie wody, wskaźnik wytrzymałości na rozciąganie pośrednie ITSR [%]	91,8	$ITSR_{80}$
Zawartość asfaltu [% m/m]	5,5	$B_{\min 4,7}$

3.5. MIESZANKA AP AF

Mieszanka AP AF jest mieszanką typu asfalt piaskowy z asfaltem modyfikowanym Orbiton 80C przeznaczona do warstwy antyzmęczeniowej. Mieszanka została zaprojektowana jak dla kategorii ruchu od KR1 do KR2 według PN-S-96025:2000 [17], jednak jej zastosowanie jako warstwy antyzmęczeniowej z założenia będzie obejmowało

wszystkie kategorie ruchu. Przyjęcie wymagań według normy miało charakter jedynie pomocniczy w projektowaniu składu. W celu uzyskania wysokiej odporności na zmęczenie zastosowano asfalt modyfikowany DE80C oraz włókno Tofic, które spełnia zadanie stabilizatora i mikrobrojenia mieszanki mineralno-asfaltowej. Do produkcji mieszanki AP AF zastosowano następujące materiały składowe:

- asfalt modyfikowany Orbiton 80C (ORLEN Asfalt),
- mączka wapienna (Mowap),
- piasek naturalny 0/2 mm (Marianka),
- piasek łamany 0/2 mm (Radkowice),
- dodatki stabilizujące: Tofic (ABC Recykling),
- środki adhezyjne: Wetfix BE (Akzo Nobel),
- Sasobit (Schuman Sasol).

Tablica 5. Właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej AP AF
Table 5. Properties of mineral-asphalt mix AP AF

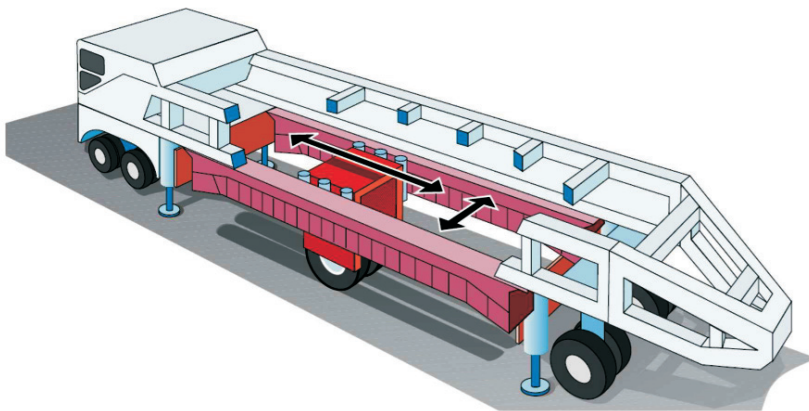
Właściwości	Wyniki	Wymagania według [17]
Gęstość objętościowa mieszanki-mineralnej [g/cm ³]	2,706	–
Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej [g/cm ³]	2,409	–
Gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej [g/cm ³]	2,351	–
Wolna przestrzeń w mieszance mineralno-asfaltowej [% v/v]	2,4	od 2 do 4
Wypełnienie asfaltem wolnej przestrzeni [% v/v]	88,6	–
Stabilność według Marshalla w 60°C [kN]	11,6	> 5,5
Odkształcenie według Marshalla w 60°C [mm]	3,6	od 2 do 4
Odporność na deformacje trwałe (metoda B w powietrzu, 60°C, 10000 cykli, WTS_{air} [mm/mm/1000 cykli]	0,003	–
Odporność na deformacje trwałe (metoda B w powietrzu, 60°C, 10000 cykli, PRD_{air} [%]	10,3	–
Średnia głębokość koleiny w temperaturze 60°C, grubość próbki 50 mm, po 10 000 cykli obciążenia [% (mm/mm)]	10,3	–
Zespolony moduł sztywności E , 10°C, 10Hz, [MPa]	10052	–
Odporność na zmęczenie ϵ_6 w temperaturze 10°C i częstotliwości 10 Hz, odkształcenie [μ mm/mm]	279	–
Zawartość asfaltu [% m/m]	7,1	6,5

4. BADANIA HVS

4.1. OPIS URZĄDZENIA

HVS jest urządzeniem mobilnym, stosowanym do przyspieszonej symulacji obciążeń na konstrukcji nawierzchni drogowej w skali rzeczywistej [3]. Stosując to urządzenie można symulować obciążenia pochodzące od pojazdów ciężkich oraz analizować zachowanie różnych konstrukcji nawierzchni i materiałów. Urządzenie HVS umożliwia zadanie ponad tysiąca obciążeń na godzinę, jest automatycznie sterowane i może pracować nawet przez całą dobę. Obciążenie przekazywane jest przez typowe koło samochodu ciężarowego (pojedyncze lub podwójne), które porusza się ze stałą prędkością na odcinku długości 6 metrów. Możliwa jest symulacja zmienności położenia koła w przekroju poprzecznym (ang. *lateral wander*). Dodatkowo montowana obudowa izolacyjna oraz układ termostatu umożliwia zachowanie stałej, ustalonej temperatury w czasie badania. Schemat przedstawiono na rysunku 5. Podstawowe parametry techniczne urządzenia:

- koło obciążające: pojedyncze lub podwójne,
- zakres obciążenia: 30 - 110 kN,
- wydajność: 150 obciążeń/tydzień,
- prędkość maksymalna: 12 km/h,
- temperatura nawierzchni: 0 - 30°C,
- zasilanie: elektryczne lub silnik diesla,
- długość odcinka: 8 m (6 m ze stałą prędkością),
- wymiary urządzenia: 23,0 × 3,8 × 4,0 m,
- masa własna: 47 000 kg.



Rys. 5. Schemat urządzenia HVS

Fig. 5. Schematic view of HVS

5.2. PROGRAM I METODYKA BADANIA

Badania HVS były prowadzone przez Szwedzki Instytut Badawczy Dróg i Transportu VTI. Ustalono następujące parametry techniczne badań:

- koło pojedyncze,
- obciążenie koła: 60 kN (80 kN),
- ciśnienie w oponie: 800 kPa,
- prędkość: 10 - 12 km/h,
- zmienne położenie koła w przekroju poprzecznym według rozkładu normalnego,
- temperatura nawierzchni: +10°C.

Założono, że całkowita liczba obciążeń na badanych odcinkach wyniesie około 300 tys. przejść w trakcie 2 tygodni, co w przeliczeniu miało odpowiadać trwałości zmęczeniowej konstrukcji pod ruch KR2 w okresie dwudziestu lat. Nacisk koła został zwiększony z 60 do 80 kN po 197 tys. obciążeń, ponieważ nawierzchnia nie wykazywała widocznych uszkodzeń. Można szacować, że jedno przejście koła o obciążeniu 60 kN odpowiada około 2,1 przejściom osi 100 kN. W przypadku obciążenia 80 kN przelicznik ten wynosi około 6,6.

Codziennie przeprowadzano pomiary profilu poprzecznego, odkształcenia pionowego w podłożu, odkształcenia trwałego pionowego podłoża oraz poziomego odkształcenia w spodzie warstw asfaltowych. Drugiego i ostatniego dnia pracy urządzenia HVS przeprowadzono pomiary poziomych poprzecznych odkształceń w spodzie warstw asfaltowych oraz odkształceń pionowych podłoża przy różnym obciążeniu koła (30, 40, 50 i 60 kN).

Odształcenia mierzone w trakcie badania oznaczono następująco:

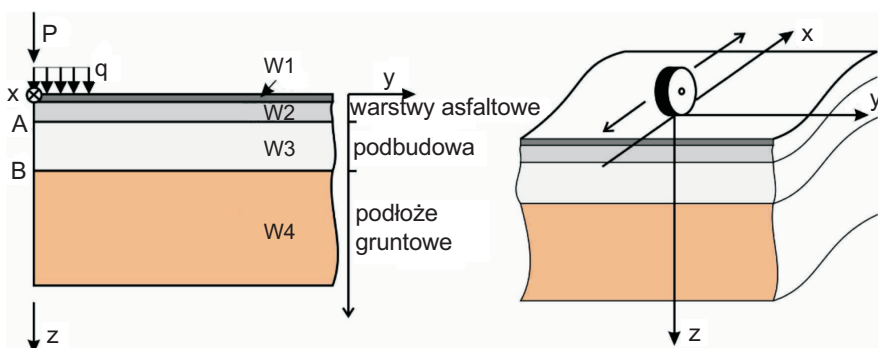
$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p, \quad (1)$$

gdzie:

- ε – odkształcenie całkowite,
- ε^e – odkształcenie sprężyste (odwracalne),
- ε^p – odkształcenie trwałe (nieodwracalne).

Na rysunku 6 indeksy x , y , z wskazują kierunek w układzie współrzędnych. Odkształcenia poziome w spodzie warstw asfaltowych mierzono w kierunku y , a odkształcenia pionowe w podłożu w kierunku z :

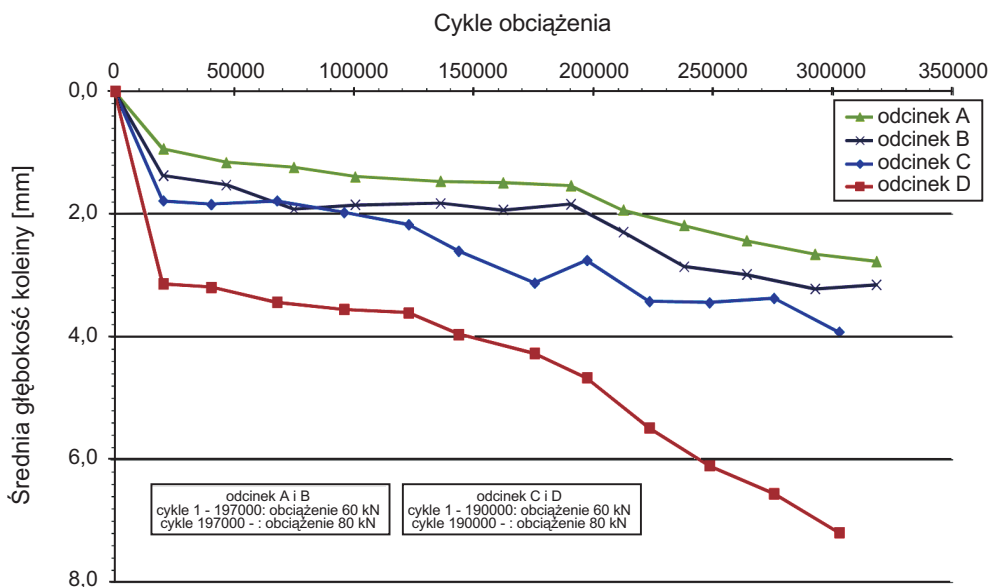
- ε_y^e – odkształcenia sprężyste w kierunku y w spodzie warstw asfaltowych (pomiar czujnikami ASG),
- ε_z^e – odkształcenia sprężyste w kierunku z w stropie podłoża gruntowego (pomiar czujnikami EMU),
- ε_z^p – odkształcenia trwałe w kierunku z w stropie podłoża gruntowego (pomiar czujnikami EMU).



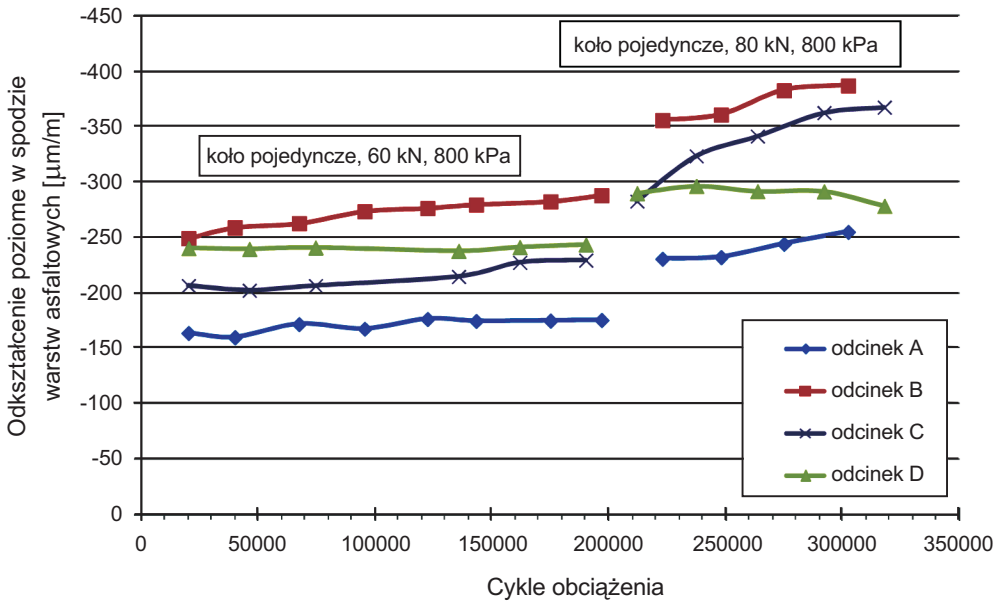
Rys. 6. Schemat obliczeniowy konstrukcji nawierzchni
 Fig. 6. Structure of the pavement assumed for evaluation

4.3. WYNIKI POMIARÓW BADAŃ HVS

Na rysunkach od 7 do 10 przedstawiono wyniki pomiarów przeprowadzonych na poszczególnych odcinkach w trakcie badania HVS w zakresie średniej głębokości koleiny, odkształceń poziomych sprężystych w spodzie warstw asfaltowych, odkształceń pionowych sprężystych i trwałych w stropie podłoża gruntowego. Przedstawione wykresy pozwalają prześledzić zmiany zachodzące w pracy konstrukcji w trakcie badania HVS. Analiza wyników została przedstawiona w dalszej części artykułu.

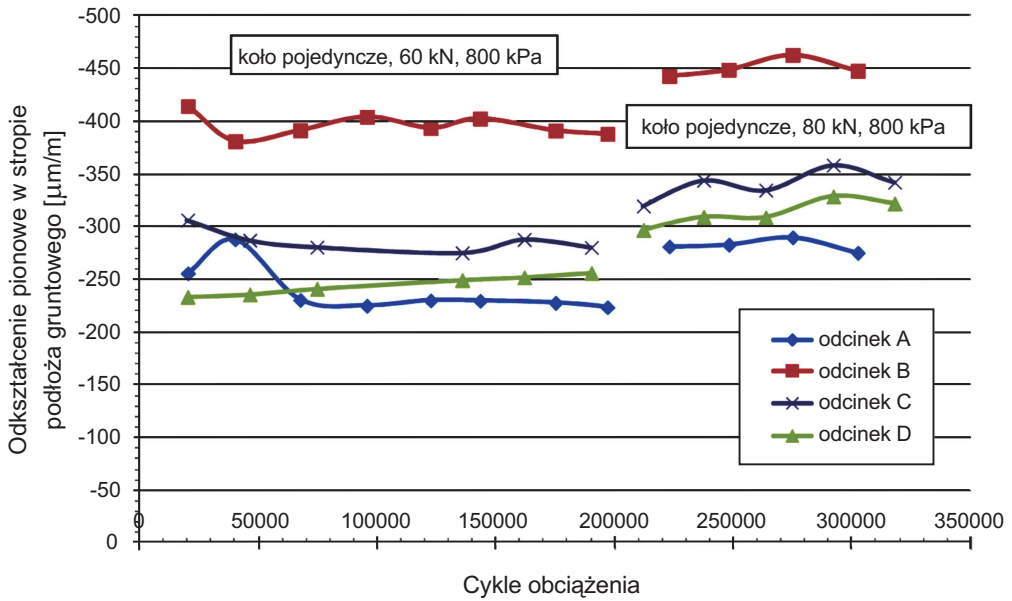


Rys. 7. Wyniki pomiarów średniej głębokości koleiny
 Fig. 7. Results of measurements of average rut depth



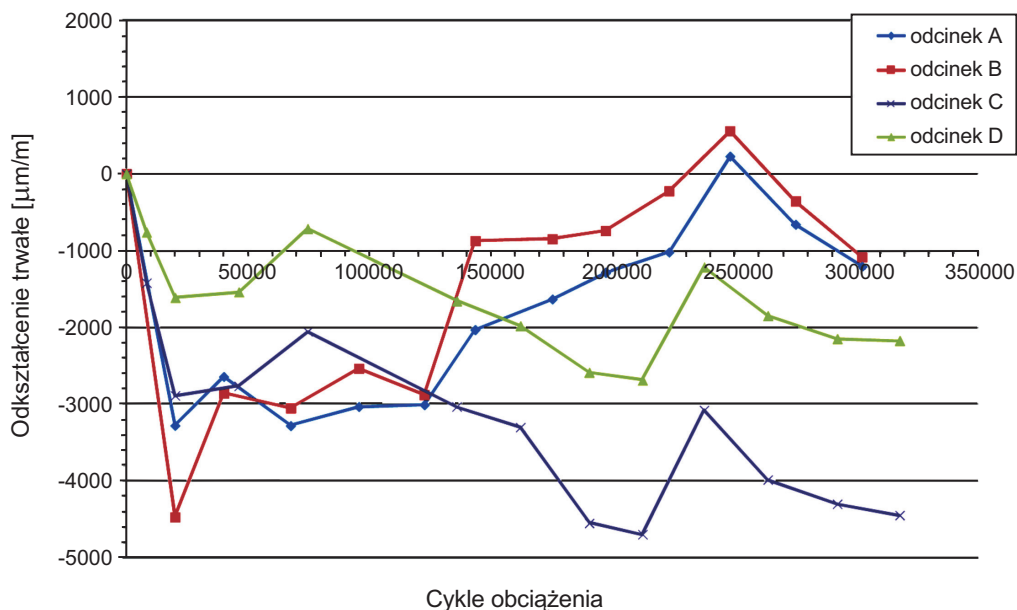
Rys. 8. Wyniki pomiarów odkształceń poziomych sprężystych ϵ_y^e w spodzie warstw asfaltowych

Fig. 8. Results of measurements of horizontal elastic strains ϵ_y^e at the bottom of asphalt layers



Rys. 9. Wyniki pomiarów odkształceń pionowych sprężystych ϵ_z^e w stropie podłoża gruntowego

Fig. 9. Results of measurements of vertical elastic strain ϵ_z^e at the ceiling of the subsoil



Rys. 10. Wyniki pomiarów trwałych odkształceń pionowych ε_z^p w stopie podłoża gruntowego
 Fig. 10. Results of measurements of vertical permanent strain ε_z^p at the ceiling of the subsoil

5. BADANIA UZUPEŁNIAJĄCE

5.1. PROGRAM BADAŃ

Badania i czynności uzupełniające obejmowały:

- sprawdzenie składu mieszanek mineralno-asfaltowych,
- ocenę wizualną odcinków testowych,
- badania FWD i wyznaczenie modułów,
- pobranie próbek do badań laboratoryjnych,
- wyznaczenie zawartości wolnych przestrzeni, zagęszczenia i grubości warstw asfaltowych,
- badania zmęczenia mieszanki AC WMS 16 20/30 i AC 16 W 35/50,
- badania sztywności mieszanki AC WMS 16 20/30 i AC 16 W 35/50.

Badania FWD oraz pobieranie próbek było przeprowadzane ze śladu koła HVS oraz obok śladu do badań laboratoryjnych sztywności i zmęczenia. Celem tych badań było porównanie sztywności oraz charakterystyk zmęczeniowych nawierzchni obciążonej w celu oszacowania szkody zmęczeniowej powstałej w trakcie badania HVS.

5.2. WYNIKI BADAŃ

5.2.1. Badania mieszanek mineralno-asfaltowych

Badania składu mieszanek mineralno-asfaltowych obejmowały sprawdzenie uziarnienia i zawartości asfaltu. Przeprowadzono je na próbkach pobranych z produkcji. Skład ziarnowy wbudowanych mieszanek mineralno-asfaltowych był zgodny z receptą w zakresie dopuszczalnych odchyłek. Wyjątek stanowiły dwie odchyłki w uziarnieniu mieszanki SMA i AP AF. Zawartość asfaltu w mieszance SMA 8 i PA 11 była dokładnie zgodna z receptą. W przypadku pozostałych mma stwierdzono następujące odchyłki zawartości asfaltu:

- ACWMS 16: +0,4 % m/m,
- AC 16 P: -0,3% m/m,
- AP AF: +0,2 % m/m.

5.2.2. Ocena wizualna

Przeprowadzona ocena wizualna nie wykazała żadnych widocznych uszkodzeń nawierzchni. Jedynym wyraźnie widocznym efektem badań był czarny ślad pozostawiony przez oponę urządzenia HVS. Deformacja trwała nawierzchni była niewielka, widoczna po przyłożeniu łaty o dużej szerokości. Widok nawierzchni odcinka po badaniu przedstawiono na rysunku 11. Wyniki pomiarów deformacji zostały przedstawione w rozdziale 3.



Rys. 11. Widok nawierzchni po badaniu HVS
Fig. 11. The view of the pavement after HVS test

5.2.3. Moduły FWD

W tabelicy 6 przedstawiono wyniki obliczeń średnich modułów sprężystości warstw w temperaturze 19,8°C (odcinki C i D) oraz 23,2°C (odcinki A i B) na podstawie badań FWD. Wartości E1, E2 i E3 reprezentują kolejno warstwy asfaltowe, podbudowę niezwiązaną i podłoże gruntowe. Na rysunku 12 przedstawiono graficznie wykresy czasy ugięć (średnie). Odległości podane na wykresach wynikają z rozstawu geofonów.

Tablica 6. Wyniki obliczeń modułów sztywności warstw [MPa]

Table 6. Results of the evaluation of stiffness moduli for the following layers [MPa]

Odcinek	Nawierzchnia nieobciążana			Nawierzchnia po badaniu HVS		
	E1	E2	E3	E1	E2	E3
A	6521	387	172	5624	347	83
B	4625	387	185	5498	332	109
C	6211	473	207	7270	407	159
D	5254	374	177	5348	357	119

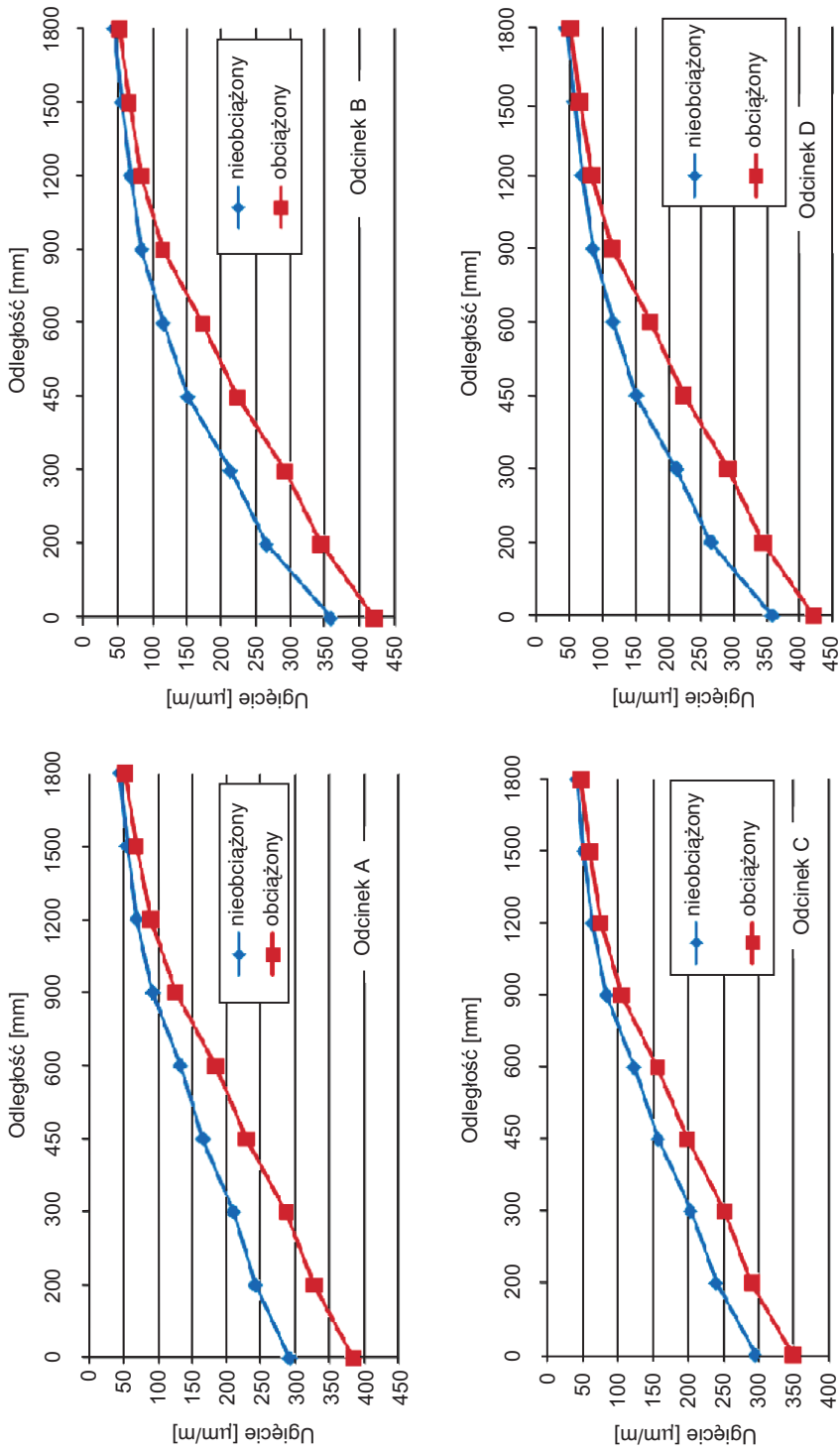
5.2.4. Właściwości warstw asfaltowych

Średnie grubości, zawartość wolnych przestrzeni oraz wskaźnik zagęszczenia warstw asfaltowych przedstawiono w tabelicy 7.

Tablica 7. Zestawienie grubości i zagęszczenia warstw asfaltowych

Table 7. Thickness and compaction ratio of asphalt layers

	Odcinek A	Odcinek B	Odcinek C	Odcinek D
	Grubości warstw asfaltowych [cm]			
Rdzenie	15,0	11,8	13,4	14,3
Warstwa ściernalna	2,4	1,8	4,8	2,2
Warstwa wiążąca	12,6	10,0	8,6	7,5
Warstwa AP AF	–	–	–	4,6
	Zagęszczenie warstw asfaltowych [%]			
Warstwa ściernalna	98,7	97,8	–	97,7
Warstwa wiążąca	98,7	99,5	98,9	98,3
Warstwa AP AF	–	–	–	98,4
	Zawartość wolnych przestrzeni [%]			
Warstwa ściernalna	5,0	6,0	–	6,0
Warstwa wiążąca	4,9	5,0	5,9	4,8
Warstwa AP AF	–	–	–	5,1



Rys. 12. Wykresy czaszy ugięć
Fig. 12. The deformation bowl for FWD

Uzyskane wyniki zawartości wolnych przestrzeni i wskaźnika zagęszczenia świadczą o prawidłowym zagęszczeniu warstw asfaltowych. Przeprowadzone pomiary grubości warstw asfaltowych wskazały, za wyjątkiem odcinka B, na istotne różnice w grubościach warstw asfaltowych w stosunku do zaprojektowanych konstrukcji.

Na odcinku A stwierdzono, że grubość warstw asfaltowych wynosi 15 cm, czyli 3 cm więcej niż założono w projekcie konstrukcji. Zwiększeniu uległa grubość warstwy wiążącej (średnio o 2,6 cm). Odcinek B został wybudowany zgodnie z założeniami. Średnia grubość warstwy wiążącej AC 16 W 35/50 wyniosła 10 cm, natomiast warstwy ścieralnej 1,8 cm (-0,2 cm w stosunku do projektu konstrukcji). Na odcinku C stwierdzono zwiększenie grubości warstw asfaltowych o 1,4 cm w porównaniu do projektu konstrukcji. Średnia grubość warstwy ścieralnej Strabaphalt była większa o 0,8 cm, natomiast warstwa wiążąca o 0,6 cm. Średnia grubość warstw asfaltowych na odcinku D wyniosła 14,3 cm. Średnie grubości wszystkich warstw są większe w stosunku do założonego projektu: warstwa ścieralna +0,2 cm, warstwa wiążąca +0,5 cm, warstwa przeciwnieżeniowa AP AF +1,6 cm.

Przeprowadzona analiza pozwala stwierdzić, że grubości warstw asfaltowych były zróżnicowane. Nie uzyskano zamierzonego celu, którym było wybudowanie odcinków o jednakowej grubości pakietu warstw asfaltowych. Takie założenie miało umożliwić bezpośrednią analizę porównawczą czterech odcinków testowych poddanych obciążeniom HVS. Najbardziej zbliżone do siebie grubości pakietu warstw asfaltowych mają odcinki A i D (różnica 0,7 cm). W tym przypadku bezpośrednia analiza porównawcza jest możliwa. Nieco większa różnica występuje w grubościach warstw asfaltowych konstrukcji C i D (+0,9 cm na odcinku D). W pozostałych przypadkach różnice są większe i zmieniają się od 1,6 do 3,2 cm. Możliwości bezpośredniego porównywania konstrukcji przy takich różnicach grubości warstw asfaltowych są więc ograniczone.

5.2.5. Moduł sztywności

W tablicach 8 i 9 przedstawiono wyniki modułu sztywności metodą 4PB według PN-EN 12697-26 mieszanek AC WMS 16 20/30 i AC 16 W 35/50 z próbek pobranych z nawierzchni na odcinkach testowych (miejsca obciążone A, B, C, D i nieobciążone A', B', C', D') oraz próbek przygotowanych w laboratorium (lab.).

Tablica 8. Zestawienie wyników badania sztywności mieszanki AC 16 przygotowanej w laboratorium oraz pobranej z odcinka B i C
Table 8. Results of stiffness testing of AC 16 mixture prepared in the laboratory and taken from section B and C

	Moduł sztywności [MPa]					Kąt przesunięcia fazowego [°]				
	lab.	B	B'	C	C'	lab.	B	B'	C	C'
Wartość średnia	19435	13274	13837	12795	12636	8,4	14,0	13,4	13,8	14,0
Odchylenie standardowe	1044	708	549	666	716	0,5	0,6	0,4	0,4	0,7

Tablica 9. Zestawienie wyników badania sztywności mieszanki AC WMS 16 przygotowanej w laboratorium oraz pobranej z odcinka A i D
 Table 9. Results of stiffness testing of AC WMS 16 mix prepared in the laboratory and taken from section A and D

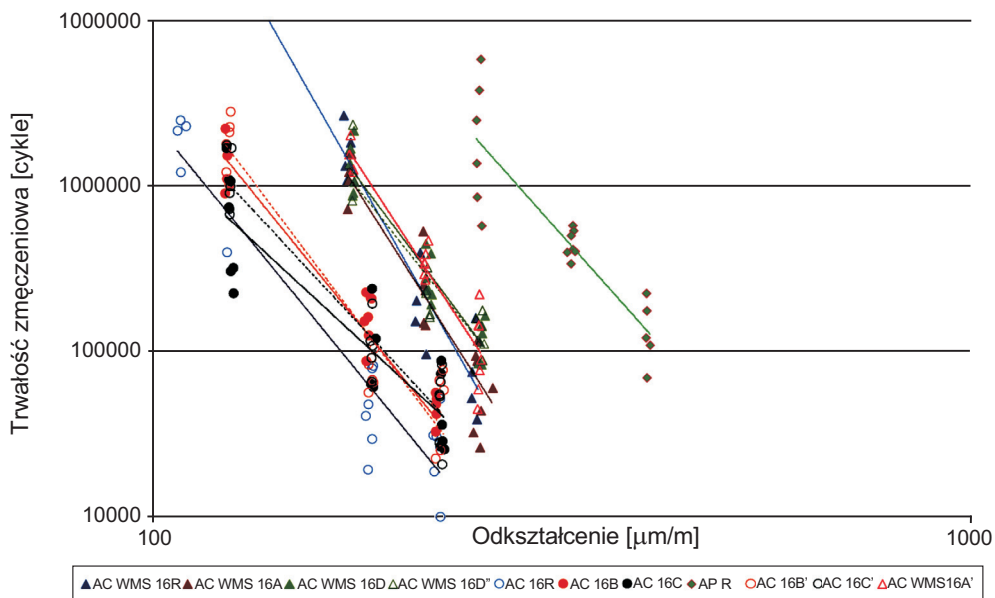
	Moduł sztywności [MPa]					Kąt przesunięcia fazowego [°]				
	lab.	A	A'	D	D'	lab.	A	A'	D	D'
Wartość średnia	16312	11902	12008	12301	11880	7,1	10,7	10,6	10,1	10,8
Odchylenie standardowe	531	670	494	521	770	0,3	0,5	0,4	0,7	0,5

5.2.6. Trwałość zmęczeniowa

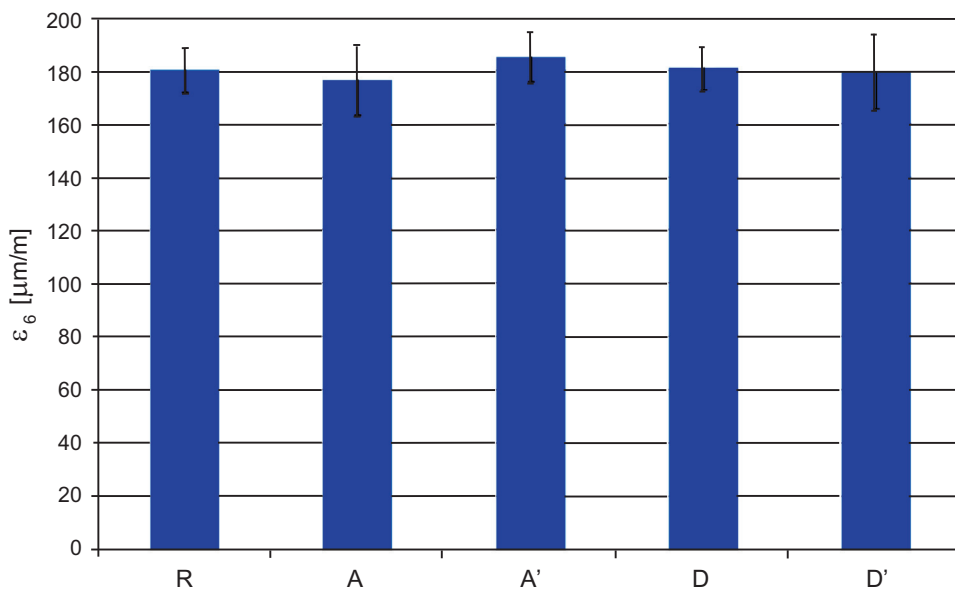
W tablicy 10 oraz na rysunkach od 13 do 15 przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych metodą belki czteropunktowo-zginanej według PN-EN 12697-24 mieszanek AC WMS 16 20/30 i AC 16 W 35/50 z próbek pobranych z nawierzchni na odcinkach testowych (miejsca obciążone A, B, C, D i nieobciążone A', B', C', D') oraz próbek przygotowanych w laboratorium według recepty (R).

Tablica 10. Wyniki badań zmęczenia mieszanek zastosowanych do warstwy wiążącej
 Table 10. Results of fatigue tests of mixtures used in the bonding layer

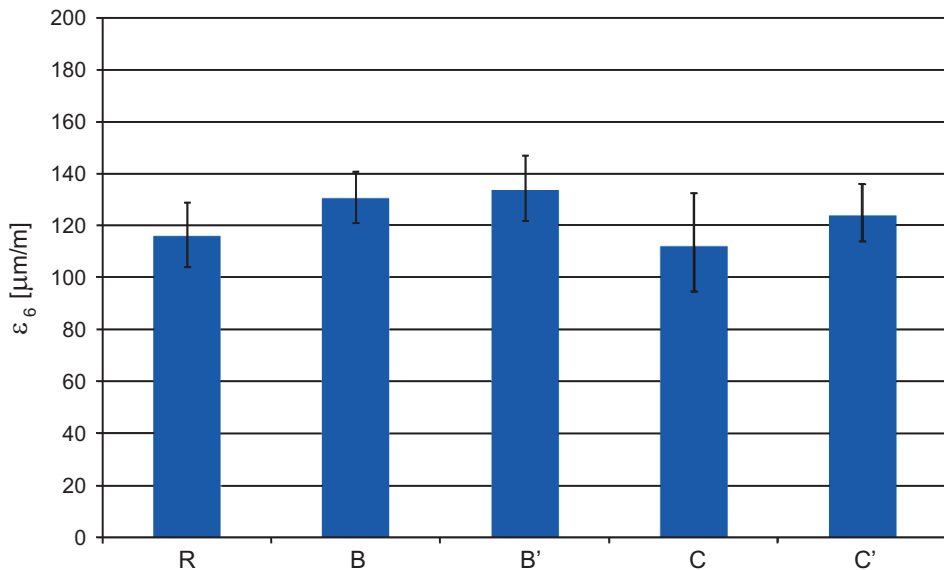
Mieszanka AC WMS 16 20/30					
Parametr	Recepta (R)	Odcinek A	Odcinek A'	Odcinek D	Odcinek D'
A	4,44E+25	3,10E+23	1,59E+23	7,89E+20	9,69E+19
b	-8,71	-7,79	-7,59	-6,60	-6,22
R ²	0,92	0,85	0,89	0,91	0,84
ϵ_6 [$\mu\text{m/m}$]	180	176	185	181	179
$\epsilon_{6 \text{ max}}$ [$\mu\text{m/m}$]	189	190	195	190	194
$\epsilon_{6 \text{ min}}$ [$\mu\text{m/m}$]	172	163	176	173	166
Mieszanka AC 16 W 35/50					
Parametr	Recepta (R)	Odcinek B	Odcinek B'	Odcinek C	Odcinek C'
A	3,14E+18	3,80E+19	9,06E+19	2,22E+15 (3,76E+17) ^{*)}	1,40E+17
b	-6,05	-5,55	-6,56	-4,56 (-5,52)	-5,32
R ²	0,91	0,91	0,89	0,79 (0,88)	0,91
ϵ_6 [$\mu\text{m/m}$]	116	131	134	112 (126)	124
$\epsilon_{6 \text{ max}}$ [$\mu\text{m/m}$]	129	141	147	133 (141)	136
$\epsilon_{6 \text{ min}}$ [$\mu\text{m/m}$]	104	121	122	95 (111)	114
*) W przypadku odcinka C w nawiasach podano wyniki obliczeń po korekcie, polegającej na usunięciu wyników odbiegających uzyskanych przy najmniejszym odkształceniu.					



Rys. 13. Graficzne przedstawienie charakterystyk zmęczeniowych
 Fig. 13. Graphical presentation of fatigue characteristics



Rys. 14. Zestawienie wartości parametru ε_6 dla mieszanek AC WMS 16 20/30 (odcinki A i D) w odniesieniu do wyników według recepty (R)
 Fig. 14. Values of parameter ε_6 for mixtures AC WMS 16 20/30 (sections A and D) with respect to the results according to mix formula (R)



Rys. 15. Zestawienie wartości parametru ϵ_6 dla mieszanek AC 16 W 35/50 (odcinki B i C) w odniesieniu do wyników według recepty (R)

Fig. 15. Values of parameter ϵ_6 for mixtures AC 16 W 35/50 (sections B and C) with respect to the results according to mix formula (R)

6. OBLICZENIA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ KONSTRUKCJI

6.1. ZAŁOŻENIA METODY MECHANISTYCZNEJ

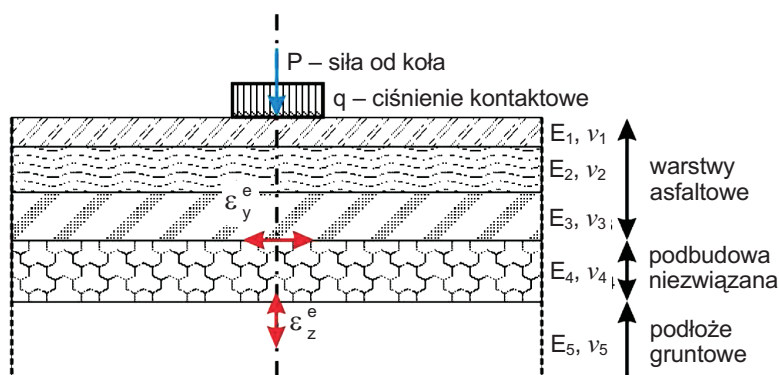
Metoda mechanistyczna projektowania konstrukcji nawierzchni polega na określeniu trwałości zmęczeniowej konstrukcji na podstawie analizy stanu naprężeń i odkształceń. W tym celu nawierzchnię traktuje się jako układ warstw o określonych grubościach na podłożu gruntowym o nieskończonej grubości. Najczęściej 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 . Z punktu widzenia obliczeń trwałości konstrukcji nawierzchni podatnej konieczne jest wyznaczenie odkształceń rozciągających w spodzie warstw asfaltowych i odkształceń ściskających w stropie podłoża gruntowego (rys. 16). Biorąc pod uwagę nowatorski charakter konstrukcji odcinka testowego D wyznaczono również odkształcenia w spodzie warstwy z betonu asfaltowego o wysokim module sztywności.

Obliczenia stanu odkształceń w konstrukcji przeprowadzono stosując program NOAH 2.0. Przyjęto następujące założenia:

- nacisk koła HVS: 60 kN lub 80 kN,
- ciśnienie kontaktowe $q = 800$ kPa,

- temperatura równoważna 10°C [18],
- grubości warstw na podstawie odwiertów,
- pełne połączenie między warstwami asfaltowymi.

Obliczenia trwałości konstrukcji przeprowadzono biorąc pod uwagę kryterium zmęczenia warstw asfaltowych oraz kryterium odkształcenia podłoża gruntowego.



Rys. 16. Ogólny schemat obliczeniowy metody mechanicznej
Fig. 16. A general scheme for calculation using mechanistic method

Obliczenia trwałości zmęczeniowej warstw asfaltowych wykonano metodą Instytutu Asfaltowego IA:

$$N = 18,4 \cdot C \cdot (6,167 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon_t^{-3,291} \cdot |E|^{-0,854}) , \quad (2)$$

$$C = 10^{\frac{4,84 \cdot (V_B - 0,69)}{V_A + V_B}} , \quad (3)$$

gdzie:

N – trwałość zmęczeniowa [liczba osi obliczeniowych],

ε_t – odkształcenie rozciągające [$\mu\text{m}/\text{m}$],

E – zespolony moduł sztywności [MPa],

V_B – zawartość objętościowa asfaltu [% v/v],

V_A – zawartość objętościowa kruszywa [% v/v].

Wartości parametrów V_B i V_A przyjęto zgodnie z wynikami badań kontrolnych. Wartość modułu sztywności warstw asfaltowych odpowiadała wynikom uzyskanym w laboratorium przy częstotliwości 0,3 Hz (częstotliwość badania HVS) lub FWD sprowadzony do temperatury 10°C według wzoru [19]:

$$E = E_T \cdot (0,77 + 0,023 \cdot T) , \quad (4)$$

w którym:

- E – moduł sztywności warstw asfaltowych w temperaturze 10°C,
- E_T – moduł sztywności warstw asfaltowych z badań FWD,
- T – temperatura warstw asfaltowych podczas badania FWD (23,2°C w przypadku odcinków A i B oraz 19,8°C w przypadku odcinków C i D).

Dodatkowo przeprowadzono również obliczenia trwałości zmęczeniowej stosując bezpośrednio charakterystyki zmęczeniowe wyznaczone w badaniach laboratoryjnych. Moduły sprężystości warstwy podbudowy niezwiązanej i podłoża gruntowego przyjęto zgodnie z wynikami badań FWD. Obliczenia trwałości ze względu na odkształcenie podłoża gruntowego przeprowadzono z zastosowaniem równania Instytutu Asfaltowego:

$$\varepsilon_p = 0,0105 \cdot N^{-0,223} , \quad (5)$$

w którym:

- N – trwałość zmęczeniowa [liczba osi obliczeniowych],
- ε_p – odkształcenie podłoża gruntowego [mm].

6.2. WYNIKI OBLICZEŃ

W tablicy 11 przedstawiono trwałość zmęczeniową przy założeniu odkształceń w spodzie warstw asfaltowych według pomiarów podczas badania HVS pod obciążeniem 60 kN, natomiast w tablicy 12 przedstawiono wyniki obliczeń odkształceń oraz trwałości konstrukcji przy założeniu modułów warstw asfaltowych na podstawie badań laboratoryjnych oraz przy założeniu modułu warstw asfaltowych według FWD.

Tablica 11. Wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej dla początkowego odkształcenia w spodzie warstw asfaltowych
Table 11. Results of calculations of fatigue life for the initial deformation at the bottom of asphalt layers

Odcinek	Odształcenie początkowe poziome w spodzie warstw asfaltowych [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Trwałość zmęczeniowa według IA [mln]	Trwałość zmęczeniowa według badań laboratoryjnych [mln]
A	164	2,1	2,5
B	249	0,15	0,02
C	206	0,27	0,07
D	240	1,5	2,3

Tablica 12. Wyniki obliczeń metodą mechaniczną
 Table 12. Results of calculations using the mechanistic method

Odcinek	Obciążenie koła 60 kN		Obciążenie koła 80 kN		Trwałość zmęczenia według IA [mIn]		Trwałość zmęczenia według badań laboratoryjnych [mIn]		Trwałość ze względu na odkształcenie podłoża [mIn]	
	ϵ_{asf} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	ϵ_{grunt} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	ϵ_{asf} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	ϵ_{grunt} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	60 kN	80 kN	60 kN	80 kN	60 kN	80 kN
Metoda I – moduły warstw asfaltowych wyznaczone w laboratorium										
A	170	-570	202	-740	1,9	1,1	1,3	0,4	0,3	0,1
B	205	-736	234	-948	0,3	0,2	5,6	2,7	0,1	0,03
C	175	-550	206	-711	0,5	0,3	0,16	0,06	0,36	0,11
D	86 ^{*)}	-626	99	-809	17,5	11,0	135,0	53,3	0,2	0,06
	213 ^{**)}		250		2,2	1,3	4,5	1,8		
Metoda II – moduły warstw asfaltowych według pomiarów FWD										
A	173	-511	223	-664	1,8	0,8	1,2	0,2	0,5	0,2
B	268	-758	340	-973	0,1	0,06	1,3	0,3	0,09	0,03
C	175	-605	204	-781	0,5	0,3	0,16	0,07	0,24	0,07
D	197	-600	231	-777	2,9	1,7	6,9	2,9	0,24	0,08

^{*)} w spodzie warstwy AC WMS 16 20/30

^{**)} w spodzie warstwy AP AF

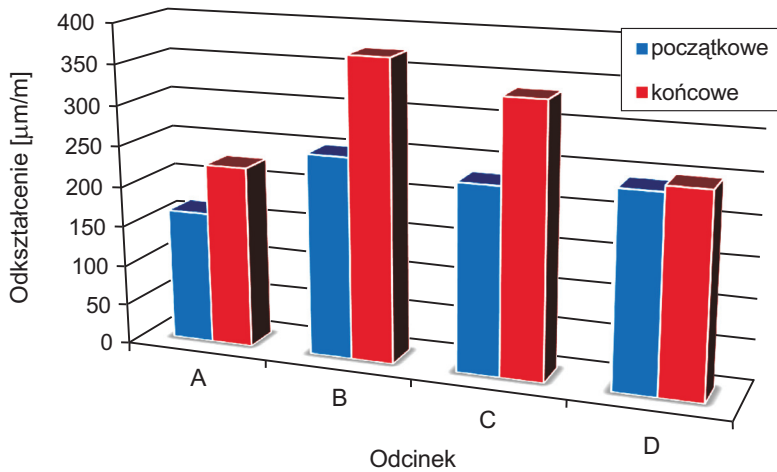
7. ANALIZA WYNIKÓW

7.1. ANALIZA PORÓWNAWCZA ODCINKÓW

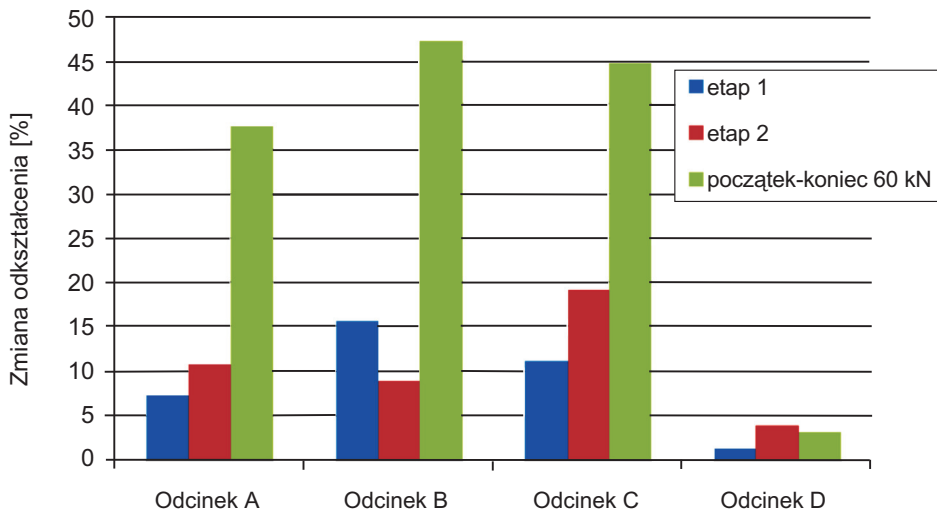
Pomiary głębokości koleiny wskazują na systematyczny przyrost deformacji trwałych na każdym odcinku. Stosunkowo najniższe wyniki uzyskał odcinek B (głębokość koleiny na zakończenie badania 7,2 mm). Pozostałe odcinki charakteryzowały się około dwukrotnie mniejszą głębokością koleiny (kolejno 3,9 mm; 2,77 mm; 3,15 mm).

Pomiary w spodzie warstw asfaltowych na wszystkich odcinkach w trakcie badania HVS oraz pomiary początkowe i końcowe przy różnych obciążeniach pozwalają stwierdzić, że następował systematyczny wzrost odkształceń w spodzie warstw asfaltowych. W pierwszej części przy obciążeniu 60 kN po około 200 tys. cykli wzrost ten wynosił na odcinkach A, B, C i D odpowiednio około 7,2%, 15,6 %, 11,1% i 1,3%, a w drugiej po 100 tys. cykli przy obciążeniu koła 80 kN odkształcenia te wzrosły kolejno o 10,6%, 8,8%, 19,1% i 3,8%. Porównując wyniki odkształceń pod obciążeniem 60 kN uzyskane na początku i po zakończeniu testu HVS stwierdzono odpowiednio na odcinkach przyrost odkształceń o 37,4 %, 47,0% 44,6% i 3,1%. Przyczyną wzrostu odkształceń mogło być postępujące zmęczenie warstw asfaltowych. Porównanie wartości bezwzględnych odkształceń rozciągających w warstwach asfaltowych pozwala stwierdzić, że największe wartości wystąpiły na odcinku B a najmniejsze na odcinku A. Wyniki z pozostałych dwóch odcinków wskazują na mniejsze odkształcenia konstrukcji C przy obciążeniu 60 kN, po zwiększeniu obciążenia do 80 kN wyniki tego porównania są odwrotne. Można więc założyć, że w pierwszej fazie duże znaczenie miało zastosowanie ścieralnej warstwy kompozytowej o dużej sztywności. Wraz z postępowaniem badania oraz po zwiększeniu obciążenia wpływ tej warstwy jest mniejszy i nawierzchnia pracuje podobnie jak nawierzchnia B z typowymi warstwami asfaltowymi.

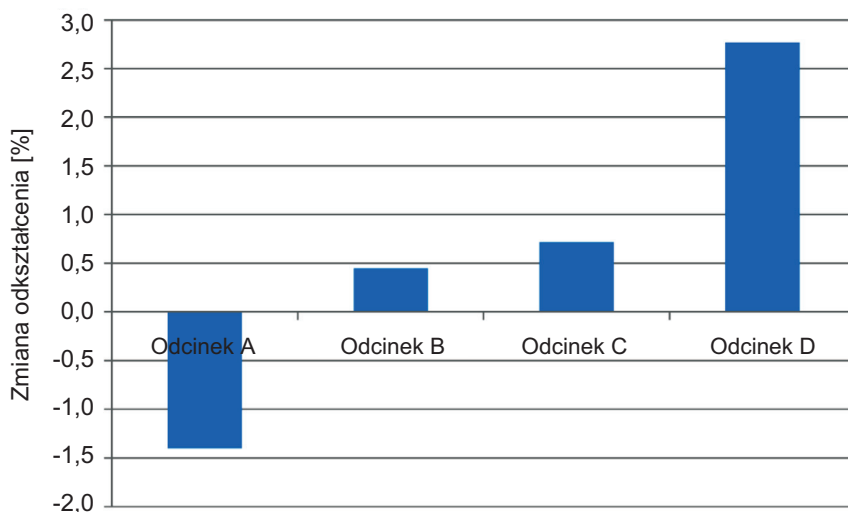
Analiza porównawcza odcinków ze względu na różnice w grubościach warstw jest ograniczona, jednak na podstawie zestawienia wyników pomiarów i ich porównania na rysunkach 17 - 19 można przedstawić pewne obserwacje i wnioski. Na odcinkach B i C zaobserwowano większy przyrost odkształceń w spodzie warstw asfaltowych niż na odcinkach A i D, co świadczy o mniejszej utracie trwałości zmęczeniowej. 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. Należy jednak zauważyć, że jedynie jeden z trzech czujników odkształceń działał prawidłowo i został uwzględniony w analizie. Przyrost odkształceń w spodzie warstw asfaltowych na odcinkach B i C jest zbliżony pomimo prawie 2 cm różnicy w grubościach warstw.



Rys. 17. Porównanie odkształceń ε_y^e w spodzie warstw asfaltowych pod obciążeniem 60 kN uzyskanych na początku oraz na końcu badania HVS
 Fig. 17. Comparison of strains ε_y^e at the bottom of asphalt layers under a load of 60 kN obtained at the beginning and at the end of HVS testing



Rys. 18. Przyrost odkształceń poziomych ε_y^e w spodzie warstw asfaltowych
 Fig. 18. The increase in horizontal strain ε_y^e at the bottom of asphalt layers



Rys. 19. Zmiana odkształcenia pionowego w podłożu gruntowym
Fig. 19. Change of vertical strain in the subsoil layer

Porównanie wyników pomiarów odkształceń podłoża na odcinku A z początku badania i po zakończeniu badania HVS pod obciążeniem koła 60 kN wskazuje na ich zmniejszenie o około 14,0%. Na pozostałych odcinkach B, C i D stwierdzono zwiększenie odkształcenia podłoża o odpowiednio: 4,5%, 7,2% i 27,7%. W trakcie badań HVS wyraźny wzrost odkształceń nastąpił po zwiększeniu obciążenia z 60 do 80 kN.

Na wszystkich odcinkach stwierdzono powstanie odkształceń trwałych w podłożu gruntowym. Na odcinkach C i D w trakcie badania następował sukcesywny wzrost deformacji, natomiast na odcinkach A i B po początkowym wzroście, odkształcenia trwały systematycznie malały. Wyniki w tym zakresie uzyskane na odcinkach A i B są trudne do interpretacji i wyjaśnienia.

7.2. OCENA WYNIKÓW BADANIA SZTYWNOŚCI I ZMĘCZENIA

Badania modułu sztywności i zmęczenia mieszank AC 16 W 35/50 i AC WMS 16 20/30 zostały przeprowadzone na próbkach przygotowanych z mieszanki wyprodukowanej zgodnie z receptą w warunkach laboratoryjnych oraz na próbkach wyciętych z nawierzchni odcinków testowych. Wyniki badań z założenia miały posłużyć ocenie szkody zmęczeniowej powstałej podczas badania HVS w warstwie wiążącej.

Cechą wspólną wszystkich odcinków było spełnienie przez mieszanki z miejsc obciążonych i nieobciążonych przez HVS odpowiednich wymagań w zakresie sztywności i zmęczenia określonych w WT-2 [13] (projektowanie funkcjonalne). Sztywność mieszank pobranych z nawierzchni była zdecydowanie niższa niż sztywność mieszank przygotowanych w laboratorium według recepty. Jako najbardziej prawdopodobną przyczynę tej różnicy należy przyjąć zwiększoną zawartość asfaltu w mieszance wbudowanej na odcinkach A i D. Różnice w sztywności

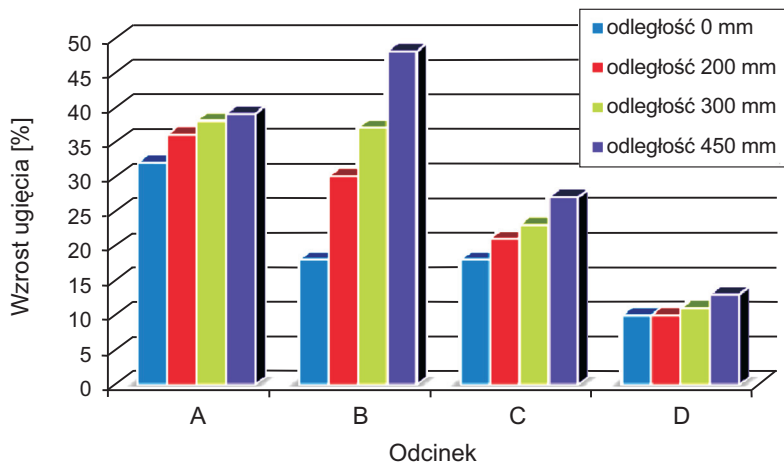
mieszanek pobranych z miejsc obciążonych i nieobciążonych na poszczególnych odcinkach były niewielkie (od około 1% do 4%), co świadczy o bardzo dużej zgodności. Wyniki nie wskazują na powstanie szkody zmęczeniowej.

Wyniki badań zmęczeniowych mieszanki AC WMS 16 20/30 na odcinku D oraz mieszanki AC 16 W 35/50 na odcinkach B i C wykonane na próbkach pobranych z miejsc obciążonych i nieobciążonych są bardzo zbliżone (różnice do około 2%) i również nie świadczą o zmęczeniu tych warstw. Trwałość mieszanki wyrażona przez ε_6 z odcinka obciążonego była około 5% mniejsza niż trwałość mieszanki z odcinka nieobciążonego. Może to wskazywać na powstanie pewnej szkody zmęczeniowej. Różnice w wynikach zmęczeniowych jednak są niewielkie i można je przypisać błędowi pomiaru.

Ogólnie można stwierdzić, że porównanie wyników sztywności i zmęczenia mieszanki z nawierzchni obciążonej i nieobciążonej na badanych odcinkach prowadzi do wniosku, że w nawierzchni nie powstała żadna szkoda zmęczeniowa na skutek badania HVS. Stwierdzenie takie jest jednak w sprzeczności z pomiarami odkształcenia poziomego w spodzie warstw asfaltowych, które wskazują na zwiększenie odkształcenia, a więc na powstanie szkody zmęczeniowej w warstwie wiążącej. Można więc przypuszczać, że po zakończeniu badania HVS, odsłonięciu nawierzchni oraz jej nagraniu (okres letni, silna operacja słoneczna) nastąpił proces samonaprawy (ang. *healing*) czyli zamknięcia mikrospeków w nawierzchni i odzyskania pierwotnych właściwości mechanicznych.

7.3. OCENA WYNIKÓW BADAŃ FWD

Uzyskane wyniki badania FWD wskazują, że na wszystkich odcinkach ugięcia nawierzchni pod płytą FWD w miejscach obciążonych były większe niż w miejscach nieobciążonych. Różnice te wyniosły dla odcinków A, B, C i D odpowiednio: 30%, 18%, 18% i 10% (rys. 20).



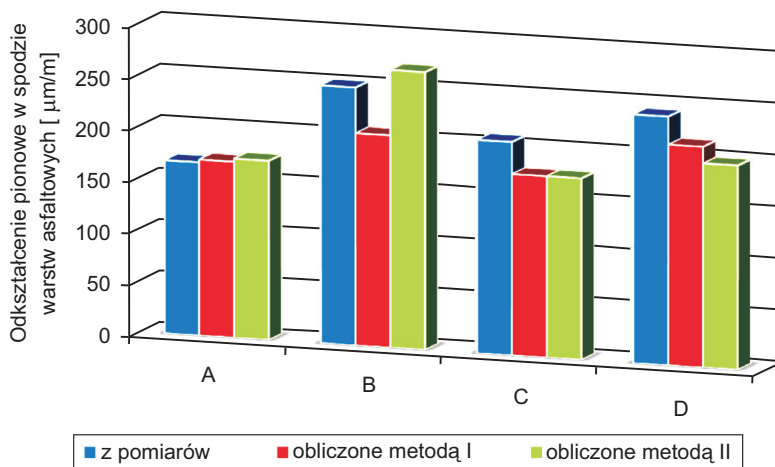
Rys. 20. Różnica ugięcia w badaniu FWD pomiędzy konstrukcją obciążaną i nieobciążaną
Fig. 20. The difference in the FWD deflection results between loaded and not loaded structures

7.4. OCENA TRWAŁOŚCI KONSTRUKCJI

Zaprojektowane i wybudowane odcinki testowe miały grubość warstw asfaltowych odpowiadającą grubości konstrukcji typowej jak dla kategorii ruchu KR2 według katalogu [20], 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, a przez ostatnie 100 tys. kołem o nacisku 80 kN. 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.

Nie stwierdzono widocznych 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.

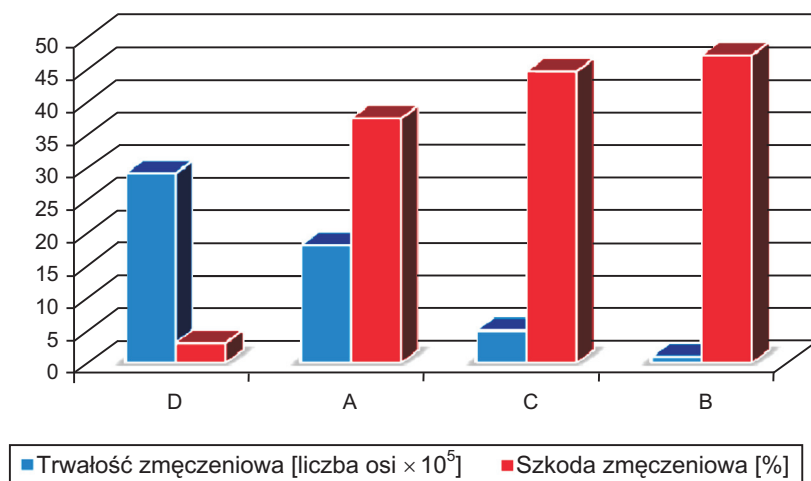
Możliwość powstania szkody zmęczeniowej w warstwach asfaltowych nie została zasadniczo stwierdzona w wynikach badań laboratoryjnych sztywności i zmęczenia. Jak wcześniej wspomniano mogło zaistnieć zjawisko samonaprawy – zamknięcia mikropęknięć pod wpływem wzrostu temperatury i odzyskania pierwotnych właściwości mechanicznych. Odkształcenia pomierzone w spodzie warstw asfaltowych były zbliżone do wartości obliczonych (rys. 21). Świadczy to o dobrej dokładności pomiarów terenowych, badań laboratoryjnych i obliczeń mechanistycznych.



Rys. 21. Porównanie odkształceń w spodzie warstw asfaltowych odczytanych z czujników i obliczonych metodą mechanistyczną

Fig. 21. Comparison of strains at the bottom of asphalt layers read from the sensors and calculated using mechanistic method

Na rysunku 22 przedstawiono obliczenia trwałości zmęczeniowej metodą mechaniczną oraz wyniki obliczeń szkody zmęczeniowej oszacowanej jako wzrost odkształceń w spodzie warstw asfaltowych. Obydwa parametry prowadzą do takiego samego rankingu odcinków pod względem trwałości zmęczeniowej. W obydwu przypadkach najlepsze wyniki (największą trwałość obliczeniową i najmniejszą szkodę zmęczeniową) uzyskała nawierzchnia na odcinku D, a najgorsze – nawierzchnia na odcinku B.



Rys. 22. Porównanie trwałości zmęczeniowej poszczególnych odcinków według IA i szkody zmęczeniowej oszacowanej na podstawie analizy odkształceń pod obciążeniem 60 kN na początku i na zakończenie badania HVS

Fig. 22. Comparison of the fatigue life of the individual sections by IA and fatigue damage estimation based on the analysis of strains under load of 60 kN at the beginning and at the end of HVS testing

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Mieszanki spełniły wszystkie wymagania według przeznaczenia pod ruch ciężki określone w WT-2 [13]. Pomimo problemów wykonawczych (różnice w grubościach konstrukcji, odchyłki w składzie mieszanek mineralno-asfaltowych) wykonane konstrukcje nie uległy zniszczeniu, które mogłyby powstać przy tych grubościach warstw asfaltowych i tak dużym obciążeniu. Wybudowano konstrukcje o grubości charakterystycznej dla typowych konstrukcji pod małe obciążenie ruchem (kategoria KR2). Odcinki testowe poddano 200 tys. obciążeń koła 60kN (maksymalne dopuszczalne obciążenie w Polsce wynosi 115 kN/oś czyli 57,5 kN/koło) oraz 100 tys. obciążeń koła 80 kN. Zadane obciążenie było więc większe niż przyjmowana trwałość konstrukcji pod ruch KR2. Nie stwierdzono spękań zmęczeniowych nawierzchni. Konstrukcja uległa niewielkiej deformacji, której przyczyny należy przede wszystkim szukać w odkształceniu trwałym (lub dogęszczeniu) podłoża. Wyniki badań potwierdziły zalety stosowania mieszanek typu AC WMS. Przeprowadzone badania dowiodły również, że możliwe jest stosowanie kruszyw miejscowych,

lokalnych takich jak wapień, czy dolomit o niższej wytrzymałości niż np. kruszywo bazaltowe. Korzystne wyniki uzyskała konstrukcja z kompozytową warstwą ścieralną Strabaphalt, szczególnie pod względem odporności na koleinowanie.

Najlepsze wyniki pod względem trwałości uzyskała konstrukcja D z warstwą antyzmęczeniową. Warstwa antyzmęczeniowa została zaprojektowana i wykonana z mieszanki typu asfalt piaskowy z asfaltem Orbiton 80C. Mieszanka charakteryzowała się dobrymi właściwościami mechanicznymi wykazanymi w badaniach laboratoryjnych, w szczególności odznaczała się bardzo wysoką trwałością zmęczeniową. Efekt ten został uzyskany poprzez zastosowanie asfaltu wysokomodyfikowanego oraz włókien Tofic, które z założenia mają stanowić „zbrojenie” mieszanki. Dobre właściwości mieszanki do warstwy antyzmęczeniowej stwierdzone w laboratorium znalazły potwierdzenie w badaniach odcinka testowego. Konstrukcja nawierzchni z warstwą antyzmęczeniową jest konstrukcją nowatorską, niestosowaną dotychczas w Polsce, a wyniki przeprowadzonych badań są bardzo obiecujące. Konstrukcja na odcinku A mająca porównywalną grubość do odcinka D (cieńsza o około 0,5 cm) wykazała nieco gorsze wyniki pod względem zaistniałej szkody zmęczeniowej. Wyniki te były lepsze niż na pozostałych odcinkach, jednak różnice w grubościach komplikują bezpośrednie porównanie tych konstrukcji. Podobnie utrudnione jest porównywanie konstrukcji B i C.

Konstrukcje odcinków testowych nie uległy zniszczeniu, co świadczy o ich bardzo dobrych właściwościach mechanicznych, a liczba obciążeń HVS przewidzianych w programie pracy była zbyt mała w stosunku do trwałości zmęczeniowej wykonanych konstrukcji.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Erlingson S., Wiman L.G.*: Accelerated Pavement Testing by HVS – a Transnational Testing Equipment. Proceedings of Transport Research Arena Europe 2008, Ljubljana 21 - 24 April 2008, CD-ROM
- [2] *Bańkowski W.*: Metody badań nawierzchni drogowych w wielkiej skali. Drogownictwo nr 7/2001, 213 - 215
- [3] *Epps J., Seeds S., Alavi S., Monismith C., Ashmore C., Mitchell T.*: WesTrack Full-Scale Test Track: Interim Findings. Proceedings of the 8th International Symposium on Asphalt Pavements, Vol. III, Seattle 10 - 14 August 1997
- [4] *Clyne T.R., Wallgren L., Worel B.J.*: MnROAD Research Projects: Construction Experiences and Preliminary Results. Proceedings of 3rd International Conference on Accelerated Pavement Testing, paper No. 79, Maplewood, Minnesota, 3 June 2008
- [5] *Kowalski K.J.*: Porównanie drogowych torów badawczych do przyspieszonej oceny nawierzchni. Drogi i Mosty nr 2/2007, 17 - 30
- [6] *Mateos A., Ayuso J.P., de la Fuente P.*: Flexible pavements dynamic response under a moving wheel. Proceedings of 3rd International Conference on Accelerated Pavement Testing, Madrid, 1 - 3 October 2008, 31p

- [7] *Molenaar A., Huurman R., Hofman R., Schreyer J., Steinhauer B., van Bochove G.*: Accelerated Testing of Double Layer Porous Asphalt Wearing Courses. Proceedings of 3rd International Conference on Accelerated Pavement Testing, Madrid, 1 - 3 October 2008, 10p
- [8] *Hugo F., de Vos, E., Tayob, H., Kannemeyer, L., Partl, M.N.*: Innovative Applications of the MLS10 for Developing Pavement Design Systems. Proceedings of 3rd International Conference on Accelerated Pavement Testing, Madrid, 1 - 3 October 2008
- [9] *Ruttmar I., Szydło A.*: Wykorzystanie symulatora ciężkich pojazdów do weryfikacji konstrukcji nawierzchni płatnej autostrady A-2. *Drogownictwo* nr 3/2004, 75 - 78
- [10] <http://spens.fehrl.org>
- [11] *Tusar M., Bańkowski W., Kalman B., Wiman L.G.*: Evaluation of materials for road upgrading. Proceedings of Transport Research Arena Europe 2008, Ljubljana 2008, 104 p.
- [12] *Bańkowski W., Sybilski D., Wróbel A.*: Nowe włókno TOFIC do poprawy właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych. *Polskie Drogi* nr 10/2007, 40 - 46
- [13] *Sybilski D.* i in.: Wymagania Techniczne - Nawierzchnie Asfaltowe Drogowe i Lotniskowe. IBDiM, projekt, maj 2008, praca niepublikowana
- [14] *Pałys M., Sybilski D., Zawadzki J.*: Zasady wykonania nawierzchni z mieszanki SMA (ZW-SMA 2001). IBDiM, Seria „I” zeszyt 63, Warszawa 2001
- [15] PN-EN13108-7 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Wymagania – Część 7: Asfalt porowaty
- [16] *Sybilski D., Bańkowski W., Mularzuk R.*: Zasady wykonania nawierzchni asfaltowej o zwiększonej odporności na koleinowanie i zmęczenie (ZW-WMS 2007). Seria „I” zeszyt 70, wydanie III, Warszawa 2007
- [17] PN-S-96025:2000 Drogi samochodowe i lotniskowe – Nawierzchnie asfaltowe – Wymagania
- [18] *Sybilski D., Bańkowski W.*: Wyznaczanie temperatury równoważnej ze względu na zmęczenie. XLVIII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”, Opole-Krynica 15-20 września 2002, Tom 4, 235 - 246
- [19] *Mechowski T., Graczyk M.*: Opracowanie współczynników sezonowości dla nawierzchni dróg w polskich warunkach klimatycznych. Praca badawcza dla GDDKiA, IBDiM, Warszawa 2006, niepublikowana, dostępna na www.gddkia.gov.pl
- [20] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. Praca zbiorowa pod kier. D. Sybilskiego, IBDiM, Warszawa 1997

INFORMACJE DODATKOWE

Prace zostały przeprowadzone przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów oraz Szwedzki Instytut Badawczy Dróg i Transportu – VTI w ramach projektu europejskiego SPENS (ang. *Sustainable Pavements for European New Member States*) przy współudziale firm: STRABAG Sp. z o.o., TPA Instytut Badań Technicznych Sp. z o.o., Lafarge Kru-szywa i Beton Sp. z o.o. oraz ORLEN Asfalt Sp. z o.o.

ACCELERATED LOADING TESTS IN THE FULL SCALE ON INNOVATIVE PAVEMENT STRUCTURES

Abstract

The paper presents results of field tests performed in Poland on innovative pavement structures. The test section was divided into four parts of the same layer thickness, but with different bituminous mixes, i.e. asphalt concrete, high modulus asphalt concrete, composite mixture and anti-fatigue mixture. This allowed direct comparison of different technologies. Tests sections were subjected to accelerated loading test with use of the Heavy Vehicle Simulator (HVS). The HVS tests were accompanied by the field tests and laboratory tests.

Keywords

Accelerated loading tests, antifatigue mixture, asphalt concrete, composite mixture, fatigue life, high modulus asphalt concrete, mix design, pavement design.

