

**prof. dr hab. inż. Dariusz Sybilski**  
**dr inż. Wojciech Bańkowski**  
**mgr inż. Robert Mularzuk**  
Instytut Badawczy Dróg i Mostów  
Zakład Technologii Nawierzchni

## **Ocena konstrukcji nawierzchni z BAWMS z zastosowaniem programu komputerowego VEROAD**

### **Evaluation of Pavement Structure with High Modulus Asphalt Concrete with Use of Veroad Software**

#### **STRESZCZENIE**

Celem podjętej pracy jest porównanie dwóch konstrukcji nawierzchni drogowej: typowej zgodnej z Katalogiem Typowych Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych składającej się z konwencjonalnych mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltami drogowymi oraz innowacyjnej o innej grubości warstw asfaltowych z mieszankami typu beton asfaltowy o wysokim module sztywności z polimeroasfaltem. Mieszanki mineralno-asfaltowe zostały poddane badaniom laboratoryjnym w szerokim zakresie, a mianowicie przeprowadzono badania: zespolonego modułu sztywności, zmęczenia, pełzania, koleinowania, bezpośredniego ściskania i rozciągania oraz pełzania pod obciążeniem powtarzalnym z ciśnieniem bocznym. Wyniki badań zostały wykorzystane w obliczeniach z zastosowaniem programu VEROAD, który oparty jest na modelu lepkosprężystym. Przeprowadzono analizę trwałości zmęczeniowej z zastosowaniem różnych kryteriów zmęczeniowych oraz analizę odkształceń trwałych. Wykazano korzyści ze stosowania konstrukcji innowacyjnej z betonem asfaltowym o wysokim module sztywności, w tym możliwość redukcji grubości warstw asfaltowych. Porównano wyniki uzyskane z zastosowaniem modelu Burgersa i Hueta-Sayegha, przeanalizowano wpływ prędkości pojazdu oraz wykazano korzyści z korzystania z programu VEROAD.

#### **SYNOPSIS**

The purpose of work is to compare two flexible asphalt pavement structures: typical in accordance with Polish Catalogue of Typical Flexible and Semi-Rigid Pavements consisted in standard asphalt mixes with conventional binders and innovative of varying layers' thickness with high modulus mixes with polymer modified binders. Asphalt mixtures were subjected to the wide range of laboratory tests: complex modulus test, fatigue test, creep test, rutting test, direct tension-compression test and triaxial creep test. VEROAD software based on viscoelastic models was used for analysis of strains and stresses in the pavements with use of data from laboratory tests. Two basic studies of structures were performed: fatigue life analysis with use of different fatigue criteria and analysis of permanent deformation. The analysis showed advantages of innovative structures and materials, i.e. longer durability and possibility of reduction of pavement thickness. VEROAD software allows for comprehensive and reliable complex assessment of pavement serviceability and for better understanding and prediction of pavement performance.

## 1. Wprowadzenie i cel pracy

Celem pracy jest porównanie dwóch konstrukcji pod ruch ciężki: typowej wg Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych [1] z zastosowaniem typowych mieszanek mineralno-asfaltowych według PN-S-96025:2000 [2] z asfaltami zwykłymi oraz konstrukcji innowacyjnej opartej na nowych w polskich warunkach rozwiązaniach. Zaprojektowane mieszanki poddano szerokim badaniom laboratoryjnym: modułu sztywności, zmęczenia, pełzania, koleinowania, ściskania i rozciągania bezpośredniego oraz pełzania trójosiowego. Uzyskane wyniki badań zostały użyte w obliczeniach z zastosowaniem programu VEROAD, obliczono trwałość zmęczeniową konstrukcji na podstawie laboratoryjnych badań zmęczenia i kryterium zmęczeniowego wg Instytutu Asfaltowego oraz dokonano oceny odporności konstrukcji na deformacje trwałe.

## 2. Materiały

### 2.1. Lepiszcza asfaltowe

Do opracowania recept zastosowano lepiszcza asfaltowe wymienione w tablicy 1.

Tablica 1. Podstawowe właściwości lepiszczy asfaltowych

Lepiszcze	Typ	Pen 25°C 0,1mm	T <sub>PIK</sub> °C	T <sub>Fraass</sub> °C	PI (Pen/T <sub>PIK</sub> )
D50	asfalt zwykły	51	55,0	-17	0,10
DE30B	polimeroasfalt	41	63,5	-15	1,30
DE80C	polimeroasfalt	51	76,0	-17	3,81

### 2.2. Kruszywa mineralne

Do mieszanek mineralno-asfaltowych zastosowano materiały mineralne:

- mączkę wapienną, Kujawy,
- piasek łamany granitowy 0/2 mm, Graniczna,
- grys bazaltowy 2/5 mm; 5/8 mm; 8/11 mm, Wilków,
- grys granitowy 11/16 mm; 16/25 mm, Graniczna.

## 3. Mieszanki mineralno-asfaltowe

Zaprojektowano następujące mieszanki mineralno-asfaltowe:

- BA25 D50 betonu asfaltowego według PN-S-96025:2000 do podbudowy do nawierzchni dróg o kategorii ruchu od KR3 do KR6 z asfaltem D50,
- BA20 D50 betonu asfaltowego według PN-S-96025:2000 do warstwy wiążącej do nawierzchni dróg o kategorii ruchu od KR3 do KR6 z asfaltem D50,
- BA16 D50 betonu asfaltowego według PN-S-96025:2000 do warstwy ścieralnej do nawierzchni dróg o kategorii ruchu od KR3 do KR6 z asfaltem D50,
- BAWMS20 30B betonu asfaltowego o wysokim module sztywności według Zeszytu 63 [1] do warstwy wiążącej i podbudowy z polimeroasfaltem DE30B,
- SMA8 80C mastyksu grysowego SMA według PN-S-96025:2000 do warstwy ścieralnej do nawierzchni dróg o kategorii ruchu od KR3 do KR6 z polimeroasfaltem DE80C.

Tablica 2. Zestawienie mieszanek mineralno-asfaltowych

Oznaczenie	Warstwa	Uziarnienie, mm	Zawartość asfaltu %m/m	Zawartość wolnej przestrzeni %v/v	Stabilność, kN	Odkształcenie, mm
BA16 D50	ścieralna	0/16	4,9	2,9	11,3	2,8
BA20 D50	wiążąca	0/20	4,2	5,6	11,5	2,6
BA25 D50	podbudowa	0/25	4,0	5,9	12,2	3,0
SMA8 80C	ścieralna	0/8	6,4	2,9	8,8	4,0
BAWMS20 30B	wiążąca, podbudowa	0/20	4,2	4,8	12,5	2,6

## 4. Opracowanie konstrukcji nawierzchni typowej i innowacyjnej

Jako wariant konstrukcji typowej przyjęto konstrukcję według Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych, typ A, tablica 10. Do poszczególnych warstw przyjęto typowo stosowane

mieszanki betonu asfaltowego z asfaltem D50. Są to mieszanki gruboziarniste o stosunkowo małej zawartości asfaltu D50.

**Tablica 3. Układ warstw konstrukcji nawierzchni w wariantcie typowym „T”**

Rodzaj warstwy	Grubość warstwy	Mieszanka
✓ warstwa ściernalna	5 cm	BA16 D50
✓ warstwa wiążąca	8 cm	BA20 D50
✓ podbudowa zasadnicza	18 cm	BA25 D50
✓ podbudowa pomocnicza	20 cm	mieszanka kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie

Jako wariant konstrukcji innowacyjnej przyjęto konstrukcję o układzie warstw podanym w tablicy 4. Do poszczególnych warstw przyjęto mieszanki zgodnie z zaleceniami Zeszytu 63 [1]. Warstwa ściernalna zaprojektowana jest jako cienka warstwa wykonana z mieszanki typu SMA 0/8 mm z elastomeroasfaltem DE80C. Do warstwy wiążącej i podbudowy przewidziano mieszanki betonu asfaltowego o wysokim module sztywności z elastomeroasfaltem DE30B. Grubości warstwy podbudowy będą przedmiotem szczegółowej analizy w dalszej części pracy.

**Tablica 4. Układ warstw konstrukcji nawierzchni w wariantcie innowacyjnym „I”**

Rodzaj warstwy	Grubość warstwy	Mieszanka
✓ warstwa ściernalna	2 cm	SMA8 80C
✓ warstwa wiążąca	6 cm	BAWMS20 30B
✓ podbudowa zasadnicza	do 18 cm	BAWMS20 30B
✓ podbudowa pomocnicza	20 cm	mieszanka kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie

## 5. Metody badań

### 5.1. Zmęczenie

Badania zmęczenia mieszanki mineralno-asfaltowej wykonano metodą belki czteropunktowo zginanej według normy ASHTO TP8-94 [3] na stanowisku pomiarowym MTS przeznaczonym do materiałowych badań wytrzymałościowych [4]. Badanie zmęczenia polega na cyklicznym czteropunktowym zginaniu próbki prostopadłościowej, belkowej. Badania przeprowadzono w temperaturze 10 °C, przy częstotliwości 10 Hz, obciążeniu sinusoidalnym, w trybie kontrolowanych odkształceń na mieszankach BA25 D50 oraz BAWMS20 30B przeznaczonych do warstwy podbudowy. Na podstawie wyników badań opracowano charakterystyki zmęczeniowe mieszanek mineralno-asfaltowych, które następnie wykorzystano do obliczania trwałości zmęczeniowej konstrukcji.

### 5.2. Zespolony moduł sztywności

Badanie zespolonego modułu sztywności przeprowadzono metodą belki czteropunktowo zginanej w aparacie do badania zmęczenia. Podczas badania rejestrowana jest siła, ugięcie belki, kąt przesunięcia fazowego, liczba cykli, obliczany jest moduł sztywności zginania oraz naprężenia i odkształcenia. Badania przeprowadzono w temperaturach 0, 10, 20 i 30 °C, częstotliwościach 0,1, 1, 5, 10, 20, 30 Hz w trybie kontrolowanych odkształceń. Amplituda odkształceń wynosiła około 30 μmm/mm, co przy małej liczbie powtórzeń nie powodowało szkód zmęczeniowych. Wynikiem badania jest moduł sztywności i kąt przesunięcia fazowego. Na podstawie uzyskanych wyników badania zespolonego modułu sztywności wyznaczono parametry modeli Burgersa i Huet-Sayegha.

### 5.3. Wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie proste

Badania przeprowadzono według procedury IBDiM na próbkach zagęszczonych w ubijaku Marshalla, o średnicy 101,6 mm i wysokości: 100 mm oraz 63,5 mm. Próbkę niższą zagęszczano 2 x 75 uderzeniami na stronę, a próbkę wyższą: 2 x 120 uderzeniami na stronę. Do badania rozciągania użyto tylko niższych próbek, o wysokości 63,5 mm. Do obu rodzajów badań próbki miały spolerowane podstawy o możliwie najbardziej równoległych płaszczyznach. W badaniu ściskania siłę obciążającą przykładano osiowo bezpośrednio na próbkę. W badaniu rozciągania próbki były przyklejane do metalowych krążków obciążających w szablonie gwarantującym ich równoległość. Otrzymane wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie mieszanek mineralno-asfaltowych przy zerowym ciśnieniu bocznym posłużyły do wykreślenia linii zniszczenia na wykresie Mohra-Coulomba.

#### 5.4. Pełzanie pod obciążeniem powtarzalnym z ciśnieniem bocznym

Badanie przeprowadzono w aparacie MTS według procedury IBDiM opartej na badaniu według projektu normy prEN 12697-25 [5] oraz badaniach opisanych w pracy [6]. Badanie przeprowadzono na próbkach jak opisano w punkcie 5.3. Temperatura badania wynosiła 40 °C. Stałe ciśnienie boczne działające na próbkę, o wartości 0,050 MPa, było wywierane przez membranę neoprenową zmodyfikowanego aparatu Hveema. Ciśnienie pionowe minimalne i boczne wynosiło 0,05 MPa, a maksymalne 0,5 MPa. Czas działania ciśnienia pionowego minimalnego wynosił 0,8 s, a ciśnienia pionowego maksymalnego 0,2 s. W trakcie badania rejestrowano odkształcenie przed każdym przyłożeniem ciśnienia pionowego maksymalnego. Logarytm wartości odkształcenia w funkcji logarytmu liczby cykli tworzy krzywą pełzania, która w pewnym zakresie cykli obciążania jest zbliżona do prostej tworzącej z osią cykli (czasu) kąt  $\alpha$ . Przy założeniach przyjętych w badaniu lepkość  $\eta$  mieszanki mineralno-asfaltowej wyznacza się z równania:

$$\eta = \frac{0,09}{\alpha} \text{ [MPa} \cdot \text{s]} \quad (1)$$

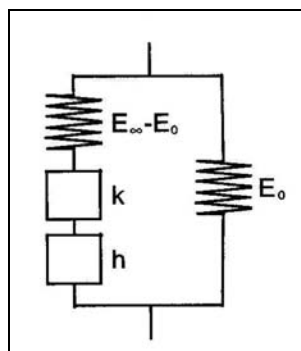
### 6. Modele lepkosprężyste

#### 6.1. Wprowadzenie

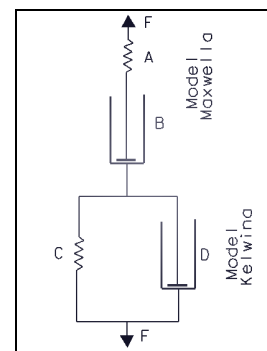
Obliczenia stanu naprężeń i odkształceń w konstrukcji nawierzchni drogowej pod obciążeniem od kół przejeżdżających pojazdów wymaga przyjęcia modelu opisującego zachowanie się, reakcję materiału na te obciążenia. W modelach tradycyjnych przyjmuje się, że obciążenie od koła jest statyczne (koło jest nieruchome), a materiał zachowuje się liniowo-sprężysto. Bardziej zaawansowane modele symulują lepkosprężyste zachowanie się warstw asfaltowych, poprzez zastosowanie różnych kombinacji sprężyn i elementów tłumiących. Umożliwiają prowadzenie obliczeń stanu naprężeń i odkształceń w konstrukcji poddanej cyklicznemu obciążeniu od kół pojazdów. Do tych modeli należą m.in. model Burgersa oraz model Hueta-Sayegha, które są wykorzystywane w programie komputerowym VEROAD.

#### 6.2. Model Burgersa

Model Burgersa powstał przez połączenie modelu Maxwella z modelem Kelvina (rysunek 1). Model Maxwella składa się z szeregowo połączonych elementów Hooke'a (sprężyna) i Newtona (tłumik), natomiast model Kelvina składa się z takich samych elementów, ale połączonych równolegle. Pod wpływem przyłożenia stałego naprężenia stycznego następuje najpierw natychmiastowe odkształcenie sprężyste będące rezultatem reakcji elementu sprężystego A. Dalsze odkształcenie jest sumą odkształcenia elementu lepkiego B oraz elementu sprężystego C, hamowanego przez element lepki D. Tak przyjęty model stosowany jest do obliczeń stanu naprężeń i odkształceń pod obciążeniem powtarzalnym i wykorzystywany do obliczania trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni. W przypadku obliczania odkształceń trwałych w konstrukcji nawierzchni (koleiny) model redukuje się to jednego elementu tłumiącego  $\eta_0$ .



Rysunek 1 Model Burgersa



Rysunek 2 Model Hueta-Sayegha

Model Burgersa opisany jest przez cztery parametry  $E$ ,  $E_1$ ,  $\eta$ ,  $\eta_1$ , które obliczane są na podstawie wyników badań laboratoryjnych zespolonego modułu sztywności  $E^*$  w szerokim zakresie temperatury i częstotliwości. Zespolony moduł sztywności związany z modelem Burgersa opisany jest równaniem:

$$E^*(i\omega) = \frac{E}{1 + (i\omega \frac{\eta}{E})^{-1}} + \frac{E_1}{1 + (i\omega \frac{\eta_1}{E_1})^{-1}} \quad (2)$$

### 6.3. Model Hueta-Sayegha

Model Hueta-Sayegha składa się z dwóch równoległych gałęzi, z których jedna zawiera dwa biparaboliczne tłumiki  $k$  i  $h$  oraz sprężynę  $E_\infty - E_0$  ustawione szeregowo, a druga zawierająca pojedynczą sprężynę  $E_0$  (rysunek 2). Symbol  $E_\infty$  oznacza moduł idealnie sprężysty, a  $E_0$  moduł pod długotrwałym stałym obciążeniem. Zespolony moduł sztywności w oparciu o model Hueta-Sayegha opisują następujące równania:

$$E^*(i\omega) = E_0 + \frac{E_{\infty-0}}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad \ln(\tau) = a + bT + cT^2 \quad (3) \text{ i } (4)$$

Model Hueta-Sayegha opisany jest przez pięć parametrów  $E_\infty$ ,  $E_0$ ,  $k$ ,  $h$ ,  $\delta$ , które obliczane są na podstawie wyników badań laboratoryjnych zespolonego modułu sztywności  $E^*$  w szerokim zakresie temperatury i częstotliwości za pomocą regresji liniowej oraz wartości  $\tau$  będącej funkcją temperatury.

## 7. Obliczenia trwałości konstrukcji

### 7.1. Trwałość zmęczenia

Trwałość zmęczeniową konstrukcji typowej „T” i innowacyjnej „I” obliczono następującymi metodami:

- na podstawie charakterystyk zmęczeniowych mieszanek mineralno-asfaltowych uzyskanych w badaniach laboratoryjnych,
- Instytutu Asfaltowego (IA), w której trwałość zmęczeniowa opisywana jest równaniem:

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

w którym:

- $E$  – moduł sztywności, MPa,
- $V_b$  – zawartość objętościowa lepiszcza w mma, %,
- $V_v$  – zawartość objętościowa wolnej przestrzeni w mma, %,
- $\varepsilon$  - odkształcenie rozciągające w spodzie warstw asfaltowych.

Parametry  $E$ ,  $V_b$  i  $V_v$  zostały przyjęte na podstawie badań laboratoryjnych mieszanek mineralno-asfaltowych. Odkształcenie  $\varepsilon$  zostało wyznaczone na podstawie modelu sprężystego lub modeli lepkosprężystych (Burgersa i Hueta-Sayegha) dla analizowanych wariantów konstrukcji. Obliczenia trwałości konstrukcji wg modelu sprężystego przeprowadzono z zastosowaniem programu BISAR 3.0 przy następujących założeniach:

- współczynnik Poissona 0,3 dla wszystkich warstw,
- nacisk osi 100 kN,
- ciśnienie kontaktowe  $q = 700$  kPa,
- temperatura równoważna  $10$  °C [7],
- pełne połączenie między warstwami.

Do obliczenia maksymalnych odkształceń rozciągających w spodzie warstw asfaltowych dla modeli lepkosprężystych posłużono się programem VEROAD. Obliczenia przeprowadzono oddzielnie dla modelu Burgersa i Hueta-Sayegha. Parametry modeli zostały przyjęte na podstawie badań laboratoryjnych i obliczeń. Obliczenia trwałości konstrukcji przeprowadzono z zastosowaniem programu VEROAD przyjmując założenia jak w przypadku BISARA oraz prędkość pojazdu od 30 do 80 km/h.

W tabelicy 5 przedstawiono wyniki obliczeń naprężeń rozciągających oraz trwałości zmęczeniowych dla konstrukcji „T” i „I” w zależności od modelu i metody wyznaczania trwałości zmęczeniowej.

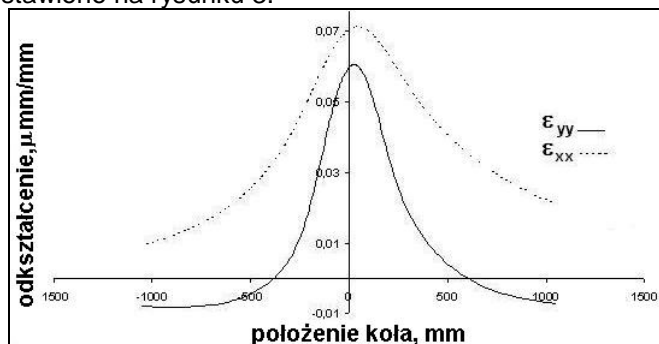
**Tabela 5. Wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej konstrukcji**

wariant	Model sprężysty			Model Burgersa			Model Hueta-Sayegha		
	$\varepsilon$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$N_{IA}$ (mln)	$N_{IBDM}$ (mln)	$\varepsilon$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$N_{IA}$ (mln)	$N_{IBDM}$ (mln)	$\varepsilon$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$N_{IA}$ (mln)	$N_{IBDM}$ (mln)
„T”	36,7	63,5	161	45,8	30,6	51,6	40,8	44,8	93,4
„I” (12)*	68,5	15,6	10396	74,2	12,0	4759	71,1	13,8	7220
„I” (13)*	64,0	19,5	20181	70,0	14,6	8408	66,9	16,9	13089
„I” (14)*	60,0	24,2	37914	66,1	17,6	14722	63,0	20,6	23538
„I” (15)*	56,2	30,0	71848	62,4	21,2	25845	59,4	25,0	41825
„I” (18)*	46,8	54,8	429572	53,1	36,1	125073	50,5	42,6	204258

\* W nawiasach podano grubość warstwy podbudowy asfaltowej w cm.

W odróżnieniu od modelu sprężystego asfaltowe warstwy nawierzchni pracują lepkosprężystość tzn. odkształcenie następuje z pewnym opóźnieniem w stosunku do naprężenia. Kolejną różnicą jest uwzględnienie prędkości pojazdu wpływającej na czas obciążenia, który jest istotny dla zachowania materiałów lepkosprężystych. Obliczenia mogą być prowadzone przy różnym położeniu koła w stosunku do punktu, w którym obliczane są odkształcenia tzn. kiedy koło zbliża się i mija przekrój obliczeniowy.

W konwencjonalnej analizie opartej na modelu sprężystym odkształcenia rozciągające w spodzie warstw asfaltowych liczone są w przekroju pod środkiem śladu koła, a ich wartości są niezależne od kierunku (wzdłuż czy w poprzek jezdni). Analiza za pomocą programu VEROAD wykazała, że największe odkształcenia rozciągające występują, gdy koło minie przekrój obliczeniowy, a odkształcenia zgodne z kierunkiem ruchu koła ( $E_{xx}$ ) są mniejsze niż odkształcenia w kierunku poprzecznym ( $E_{yy}$ ). Przykładowy wykres odkształceń przedstawiono na rysunku 3.

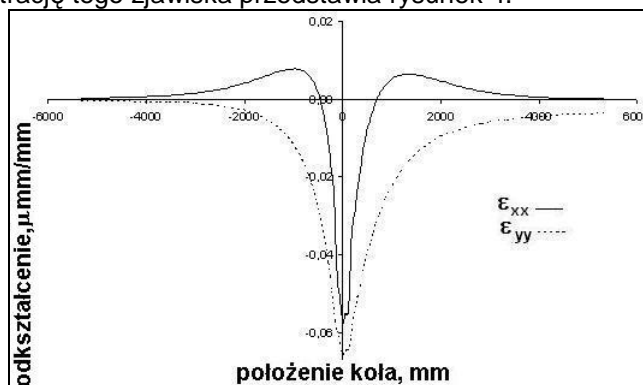


**Rysunek 3 Wykres odkształceń rozciągających w spodzie warstw asfaltowych (konstrukcja „I” 12 cm model Hueta-Sayegha)**

W przypadku każdego z analizowanych wariantów konstrukcji najmniejsze odkształcenia rozciągające w spodzie warstw asfaltowych uzyskiwano korzystając z modelu sprężystego, a największe na podstawie modelu lepkosprężystego Burgersa. W zależności od modelu i konstrukcji różnice te sięgają od 5 do 15 %. Konsekwencją tego są duże różnice w trwałości zmęczeniowej.

Konstrukcja typowa charakteryzuje się dobrą trwałością zmęczeniową, spełniając z zapasem wymagania dla ruchu kategorii KR6. Konstrukcja innowacyjna w porównaniu z konstrukcją typową ma co najmniej 5 cm mniejszą grubość warstw asfaltowych i charakteryzuje się zbliżoną trwałością zmęczeniową niezależnie od przyjętego modelu. Przy grubości 18 cm warstwy podbudowy asfaltowej uzyskano trwałość zmęczeniową zbliżoną do trwałości konstrukcji typowej (wg IA). Obliczenia wykazały, że zmniejszenie grubości konstrukcji innowacyjnej o kolejne 6 cm (podbudowa asfaltowa o grubości 12 cm) pozwala na uzyskanie trwałości zmęczeniowej spełniającej wymagania dla ruchu KR6. Obliczenia z zastosowaniem charakterystyk zmęczeniowych uzyskanych w badaniach IBDiM wykazały bardzo dużą trwałość zmęczeniową, kilkadziesiąt razy większą niż liczona wg IA. Kryterium IA opracowywane było na podstawie badań mieszanek mineralno-asfaltowych ze zwykłymi asfaltami i nie uwzględnia korzyści stosowania polimeroasfaltów. Konieczne jest więc opracowanie współczynników przeniesienia wyników badań laboratoryjnych do rzeczywistych, szczególnie dla mieszanek mineralno-asfaltowych z polimeroasfaltami.

Analiza z zastosowaniem programu VEROAD i modeli lepkosprężystych dowiodła, że w warstwie ścieralnej powstają naprężenia rozciągające, czego nie pokazuje analiza klasyczna. Potwierdza to obserwacje, że spękania zmęczeniowe mogą powstawać w górnej części konstrukcji, szczególnie w przypadkach braku lub osłabienia połączeń międzywarstwowych oraz dużych obciążeń (ponadnormatywne pojazdy, zwiększone ciśnienie kontaktowe). Ilustrację tego zjawiska przedstawia rysunek 4.



**Rysunek 4 Wykres odkształceń rozciągających na górnej powierzchni warstwy ścieralnej (konstrukcja „I” 12 cm model Hueta-Sayegha)**

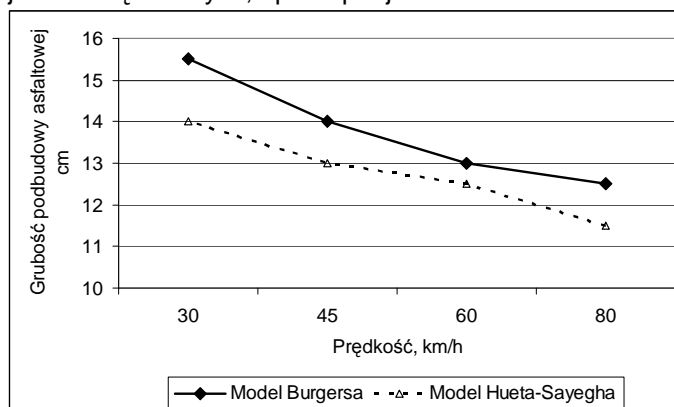
W przykładzie przedstawionym na rysunku 4 odkształcenia rozciągające w warstwie ścieralnej wyniosły około 10 % odkształceń w spodzie warstwy podbudowy. Pomimo, iż wartość ta jest niewielka, to w przypadku cienkiej warstwy może być znacząca i m.in. dlatego stosowanie w warstwie ścieralnej mieszanek mineralno-asfaltowych z polimeroasfaltami jest uzasadnione.

Przeprowadzono obliczenia wpływu prędkości pojazdu na odkształcenie w spodzie warstw asfaltowych i trwałość zmęczeniową konstrukcji na przykładzie konstrukcji innowacyjnej o grubości warstw asfaltowych 20 cm (tablica 6).

**Tablica 6. Wpływ prędkości na odkształcenia i trwałość konstrukcji (według IA)**

Prędkość, km/h	Odkształcenie, $\mu\text{m}/\text{m}$		Trwałość zmęczeniowa, mln osi	
	Model Burgersa	Model Hueta-Sayegha	Model Burgersa	Model Hueta-Sayegha
30	84,8	79,2	7,7	9,7
45	78,0	74,2	10,2	12,0
60	74,2	71,1	12,0	13,8
80	71,4	68,3	13,6	15,8

Przeprowadzono również analizę wpływu prędkości na potrzebną grubość konstrukcji. Założono, że konstrukcja innowacyjna ma przenieść ruch o wielkości około 14,6 mln osi. W zależności od prędkości i modelu obliczeniowego dobierano grubość warstwy podbudowy asfaltowej. Wyniki obliczeń przedstawione na rysunku 5 wskazują na istotny wpływ prędkości na trwałość zmęczeniową i grubość konstrukcji. Różnice w trwałości zmęczeniowej pomiędzy obliczeniami dla prędkości 30 i 80 km/h mogą być nawet prawie dwukrotne. W przeliczeniu na potrzebną grubość konstrukcji różnice mogą sięgać nawet do 3 cm. Uwzględnianie tego zagadnienia może okazać się szczególnie istotne w analizie konstrukcji na odcinkach o spowolnionym ruchu pojazdów ciężarowych, np. na podjazdach na wzniesienia.



**Rysunek 5 Wpływ prędkości na grubość warstwy podbudowy asfaltowej w konstrukcji „I”**

## 7.2. Odporność na deformacje trwałe

Modele Burgersa i Hueta-Sayegha nie uwzględniają odkształceń plastycznych, toteż wszelkie rozważania przy użyciu tych modeli dotyczą faz pracy konstrukcji bez odkształceń plastycznych, związanych ze ścinaniem materiału. W celu zbadania, czy w analizie pracy konstrukcji możemy nie uwzględniać odkształceń plastycznych, stosuje się kryteria przedstawione w pracy [8] na podstawie analizy zależności naprężeń głównych na wykresie Mohra-Coulomba. Jednym z kryterium oceny jest współczynnik  $R$  wg równań:

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{1,f} - \sigma_3} \quad \sigma_{1,f} = \frac{(1 + \sin \varphi) \cdot \sigma_3 + 2 \cdot C \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (6) \text{ i } (7)$$

w których:

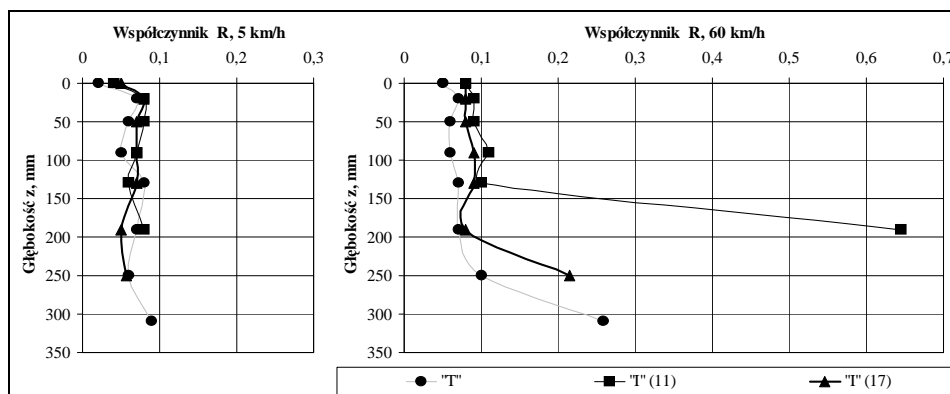
- $\sigma_1$  - naprężenie główne pierwsze występujące w konstrukcji nawierzchni,
- $\sigma_3$  - naprężenie główne trzecie występujące w konstrukcji nawierzchni,
- $\sigma_{1,f}$  - graniczne (niszczące) naprężenie główne pierwsze materiału,
- $C$  - kohezja,
- $\varphi$  - kąt tarcia wewnętrznego.

Współczynnik  $R$  jest to stosunek promienia okręgu wykreślonego dla naprężeń głównych występujących w nawierzchni do promienia okręgu granicznych (niszczących) naprężeń głównych. Przyjmuje się, że jeżeli

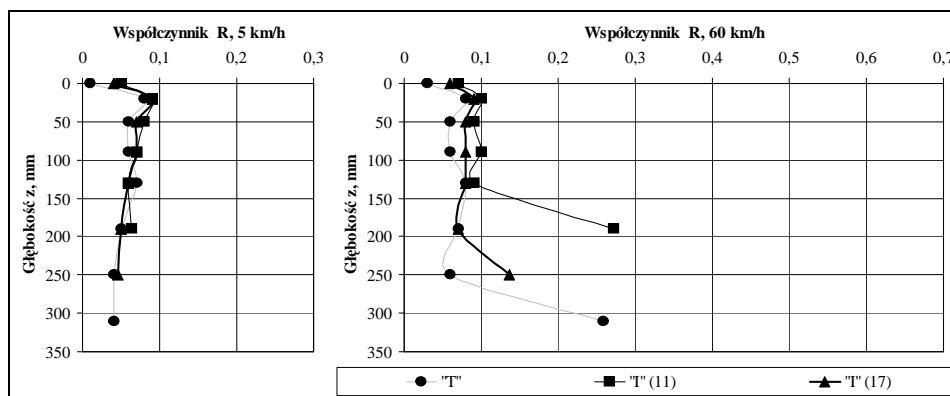
współczynnik R jest mniejszy od 0,6, to materiał jest w stanie stabilnym a prawdopodobieństwo wystąpienia odkształceń plastycznych jest niewielkie.

W analizie granicznych stanów naprężeń najważniejsze są naprężenia maksymalne. Przeprowadzono obliczenia naprężeń i odkształceń typowej konstrukcji nawierzchni w wielu punktach pomiarowych z zastosowaniem modelu Burgersa, przy założeniu temperatury 40 °C i prędkości pojazdu 5 i 60 km/h. Maksymalne odkształcenie i naprężenie powstają pod śladem koła lub w jego okolicy do 300 mm. W takim obszarze przeprowadzono obliczenia naprężeń głównych z zastosowaniem modeli Burgersa i Hueta-Sayegha wraz z porównaniem z wytrzymałością poszczególnych warstw. Obliczenia wykonano przyjmując temperaturę 40 °C, prędkość 5 km/h i 60 km/h, dla dwóch rodzajów konstrukcji: typowej „T” oraz innowacyjnej „I” o dwóch grubościach warstwy podbudowy: 110 mm (11) i 170 mm (17). Maksymalne wartości współczynnika R pokazano na rysunkach 6 i 7. Pod działaniem obciążenia powolnego 5 km/h nie powstają naprężenia główne mogące spowodować deformacje plastyczne, gdyż współczynnik R dla wszystkich analizowanych konstrukcji jest bardzo niski, poniżej 0,1. Wzrost prędkości spowodował zwiększenie wartości R zwłaszcza w dolnej strefie warstw asfaltowych. W obliczeniach wg modelu Burgersa w najcieńszej z konstrukcji: innowacyjnej „I” (11), współczynnik R był większy od 0,6, co może wzbudzać obawę o wystąpienie odkształcenia plastycznego. Te same obliczenia wg modelu Hueta-Sayegha dały jednak niższe wyniki przy podobnym charakterze zmienności po głębokości współczynnika R trzech konstrukcji i nie wskazują na ryzyko wystąpienia odkształceń plastycznych. Wartość współczynnika R z obliczeń obydwoma modelami nie uległa istotnej zmianie w przypadku materiałów typowych, a różniła się znacznie w przypadku materiałów o polepszonych właściwościach. Przyjęcie odpowiedniego modelu do obliczeń wymaga więc dalszych badań sprawdzających, bez których zaleca się stosowanie modelu Burgersa jako bezpieczniejszego dla trwałości konstrukcji.

Niezależnie od prędkości najkorzystniejsze warunki stanu naprężeń występują na powierzchni. Występuje tam najmniejsze ryzyko pojawienia się odkształceń plastycznych. Pod ruchem powolnym najwyższa wartość współczynnika R występuje na głębokości kilku centymetrów. Pod działaniem szybszego ruchu konstrukcja innowacyjna „I” (11) o znacznie mniejszej grubości niż w konstrukcji typowej wykazuje najmniejszą odporność na pojawienie się deformacji plastycznych. Konstrukcja innowacyjna „I” (17) lepiej zachowuje się pod działaniem ruchu szybszego niż konstrukcja typowa. Im grubszy pakiet warstw asfaltowych, tym jest mniejsze ryzyko pojawienia się odkształceń plastycznych.



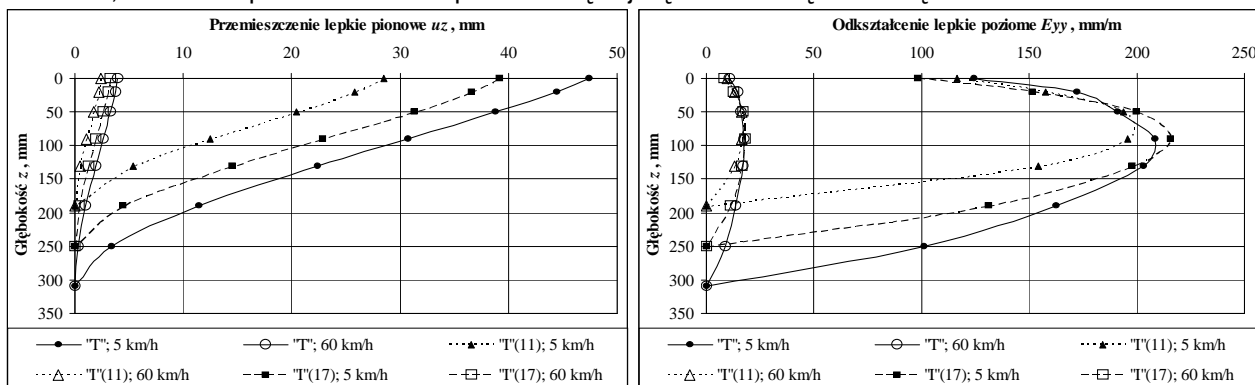
Rysunek 6 Współczynnik R: model Burgersa w 40 °C



Rysunek 7 Współczynnik R: model Hueta-Sayegha w 40 °C

Po wykazaniu braku ryzyka powstania deformacji plastycznych można obliczyć deformacje trwałe lepkie. Należy tu dodatkowo zaznaczyć, że założeniem w takich obliczeniach jest brak zmian właściwości objętościowych warstwy asfaltowej np. na skutek jej dogęszczania. Największe odkształcenia pionowe

i poziome występują w osi śladu koła. Największe przemieszczenia pionowe występują również w środku śladu koła, natomiast przemieszczenia poziome są największe w obrębie krawędzi śladu koła.



**Rysunek 8 Przemieszczenie trwałe lepkie pionowe i poziome na powierzchni konstrukcji**

Na rysunku 8 przedstawiono przemieszczenie pionowe (głębokość koleiny) obliczone na powierzchni trzech porównywanych konstrukcji. Im grubsze warstwy asfaltowe, tym głębokość koleiny jest większa. Interesująca jest analiza odkształcenia poziomego, które zobrazowano na rysunku (6). We wszystkich typach konstrukcji występują podobne odkształcenia. Im prędkość pojazdu jest mniejsza, tym odkształcenia, a więc i przemieszczenia, są większe.

Różnica w grubości warstw asfaltowych w konstrukcjach innowacyjnych spowodowała wystąpienie różnic w wielkości przemieszczeń i odkształceń. W konstrukcji innowacyjnej „I” (11) o grubości mniejszej o ok. 25 % od „I” (17) odkształcenia poziome i przemieszczenia pionowe są mniejsze o ok. 10 % przy prędkości 60 km/h (dla prędkości 5 km/h różnice zacierają się z uwagi na małe wartości). Wynika stąd, że ze względu na deformacje trwałe należy dążyć do stosowania cieńszych konstrukcji asfaltowych.

Na podstawie rysunku 6 można stwierdzić, że największym odkształceniom ulega część konstrukcji na głębokości ok. 50 – 100 mm. W tej strefie w każdej z trzech typów konstrukcji wystąpiły największe odkształcenia poziome, niezależnie od podatności warstw na koleinowanie. W przypadku badanych materiałów świadczy to o małym wpływie zróżnicowania właściwości tych materiałów na lokalizację największych odkształceń. Dodatkowo w strefie występowania największych odkształceń występuje największa energia rozproszona.

Występowanie największych odkształceń poniżej powierzchni jest bardzo cennym spostrzeżeniem, gdyż warstwa ścieralna nie musi być najbardziej odporną na koleinowanie. Można więc stosować do asfaltowej warstwy ścieralnej więcej asfaltu i/lub o większej penetracji w celu poprawienia odporności na niską temperaturę. Spostrzeżenie to jest szczególnie ważne w projektowaniu remontów dróg. Pozostawienie i przykrycie starej warstwy asfaltowej mało odpornej na deformacje, czyli umieszczenie takiego materiału w strefie największych odkształceń, może przyspieszyć koleinowanie.

Znaczne różnice we właściwościach poszczególnych warstw asfaltowych mogą powodować zupełnie inny rozkład naprężeń i odkształceń w konstrukcji, dlatego korzystne jest analizowanie każdej konstrukcji nawierzchni pod kątem zlokalizowania największych naprężeń głównych i odkształceń trwałych.

## 8. Podsumowanie

Projektowanie nawierzchni podatnych jest zadaniem, którego rozwiązanie wymaga przyjęcia różnych uproszczeń. W klasycznej metodzie mechanistycznej praca nawierzchni opisana jest modelem liniowo-sprężystym, który nie uwzględnia ani lepkosprężystego charakteru warstw wykonanych z mieszanek mineralno-asfaltowych ani wpływu poruszającego się koła. Zastosowanie programu VEROAD pozwala uwzględnić te dwa czynniki, co pozwala uzyskać wyniki bardziej zbliżone do rzeczywistości. Poprawność obliczeń programu VEROAD została pozytywnie potwierdzona podczas badań na symulatorze Lintrack [9].

Analiza wyników obliczeń konstrukcji typowej wg KTKNPIP [1] i innowacyjnej wg założeń Zeszytu 63 [10] prowadzi do następujących wniosków:

- analizowane konstrukcje spełniły wymagania trwałości zmęczeniowej dla ruchu ciężkiego KR6,
- konstrukcje wykazały odporność na deformacje trwałe lepkie i plastyczne, wyjątek stanowiła najcieńsza konstrukcja innowacyjna według obliczeń z zastosowaniem modelu Burgersa,
- konstrukcja innowacyjna przy mniejszej grubości warstw asfaltowych w stosunku do konstrukcji typowej charakteryzuje się zbliżoną trwałością zmęczeniową oraz zbliżoną odpornością na deformacje trwałe lepkie,
- możliwe jest zmniejszenie grubości konstrukcji innowacyjnej w stosunku do konstrukcji typowej o 5 cm,
- o ile wyniki trwałości zmęczeniowej konstrukcji typowej liczonej wg IA i charakterystyk IBDiM są w pewnych zakresach zbliżone, to dla konstrukcji innowacyjnej różnice są bardzo duże, co świadczy

- o dobrej odporności zmęczeniowej takiej konstrukcji i potwierdza tezę, że klasyczne kryteria zmęczeniowe np. IA nie uwzględniają korzyści z zastosowania mieszanek mineralno-asfaltowych specjalnych np. BAWMS z polimeroasfaltami,
- stosowanie modelu lepkosprężystego w odróżnieniu do modelu sprężystego prowadzi do lepszego odwzorowania pracy nawierzchni uwzględniając lepkosprężysty charakter materiałów i efekt poruszającego się koła oraz możliwość obliczania lepkich deformacji trwałych,
  - uzyskane wyniki odkształceń w spodzie warstw asfaltowych dowiodły, że stosowanie modelu lepkosprężystego prowadzi do uzyskania większych wartości, co pozwala na zwiększenie bezpieczeństwa projektowanej konstrukcji,
  - program VEROAD umożliwia znalezienie maksimum odkształcenia i naprężeń głównych w warstwach asfaltowych, które wbrew założeniom modelu sprężystego nie znajduje się pod środkiem koła,
  - stwierdzono istotny wpływ prędkości pojazdów na trwałość zmęczeniową i grubość konstrukcji oraz deformacje trwałe lepkie i plastyczne, co może być wykorzystywane w projektowaniu odcinków, na których ruch jest spowolniony, np. na podjazdach na wzniesienia,
  - wbrew klasycznym założeniom odkształcenia rozciągające pojawiają się również w warstwie ścieralnej, co potwierdza konieczność stosowania polimeroasfaltów zwiększających odporność zmęczeniową, szczególnie do cienkich warstw ścieralnych i pod ruch ciężki,
  - najmniejsze naprężenia główne oraz deformacje lepkie generowane są przy powierzchni warstw asfaltowych, gdzie można zastosować materiały mniej wytrzymałe, lecz odporniejsze na czynniki atmosferyczne (mieszanki mineralno-asfaltowe w cienkiej warstwie z dużą ilością miękkiego asfaltu),
  - największe naprężenia główne występują na spodzie warstw asfaltowych, co jest uzasadnieniem stosowania w tym miejscu bardziej odpornych mieszanek (BAWMS),
  - w konstrukcjach o mniejszej grubości warstw asfaltowych generowane są mniejsze przemieszczenia pionowe (mniejsza głębokość koleiny),
  - największe deformacje lepkie występują na głębokości ok. 50-100 mm, a więc w warstwie wiążącej, która powinna być szczególnie odporna na działanie sił ścinających, może to być szczególnie istotne w remontach nawierzchni – należy usuwać z tej strefy warstwy podatne na koleinowanie,
  - konieczne jest przeprowadzenie badań w wielkiej skali, które pozwolą na weryfikację wielu istotnych problemów związanych z projektowaniem konstrukcji odpornych na zmęczenie i koleinowanie oraz sprawdzenie konstrukcji specjalnych, których stosowanie pozwoli na uzyskanie trwałych nawierzchni przy możliwości istotnego zmniejszenia grubości warstw asfaltowych.

## LITERATURA

---

- 1 Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych, IBDM, GDDP, Warszawa 1997
- 2 PN-S-96025: 2000 - „Drogi samochodowe – Nawierzchnie asfaltowe – Wymagania”;
- 3 Standard test method for determining the fatigue life of compacted hot mix asphalt (HMA) subjected to repeated flexural bending”, AASHTO TP8-94
- 4 Sybilski D., Bańkowski W.: „ Nowe stanowisko badania mieszanek mineralno-asfaltowych w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów” – Drogownictwo 10/1999
- 5 prEN 12697–25 Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 25: Cyclic compression test, part B: Triaxial cyclic compression test
- 6 Molenaar J. M. M., Molenaar A. A. A.: “Susceptibility to permanent strain of asphalt in the dynamic triaxial compression creep test”. 2-th Euroasphalt & Eurobitume Congress Barcelona 2000 – Proc.0095.uk
- 7 Sybilski D., Bańkowski W. i zespół: „Opracowanie procedury wyznaczania temperatury równowaznej nawierzchni ze względu na zmęczenie” (TN-213), IBDiM 2001
- 8 VEROAD: “User manual”, Version 2000 April. Appendix B: “Additional Theory”. NPC bv, Utrecht, Netherlands 2000
- 9 Hopman P., Nilsson R., Pronk A.: „Theory, validation and application of the disco-elastic multilayer program VEROAD”, ICAP, Seattle, USA 1997
- 10 Zasady wykonywania nawierzchni asfaltowej o zwiększonej odporności na koleinowanie i zmęczenie (ZW-WMS 2002) – zeszyt 63, IBDiM 2002.