



ROMAN NAGÓRSKI<sup>1)</sup>  
 KRZYSZTOF BŁAŻEJOWSKI<sup>2)</sup>  
 KATARZYNA MARCZUK<sup>3)</sup>

## COMPARATIVE ANALYSIS OF STRAINS AND DURABILITY OF ASPHALT PAVEMENT OF PERPETUAL AND STANDARD TYPE

### ANALIZA PORÓWNAWCZA ODKSZTAŁCEŃ ORAZ TRWAŁOŚCI NAWIERZCHNI ASFALTOWEJ TYPU „PERPETUAL” I NAWIERZCHNI STANDARDOWEJ

**STRESZCZENIE.** W pracy dokonano analizy kluczowych odkształceń oraz trwałości obliczeniowej według kryteriów spękania zmęczeniowego i deformacji podłoża w układzie warstwowym nawierzchni drogowej skonstruowanej według wariantów: standardowej nawierzchni asfaltowej oraz standardowej nawierzchni z warstwą przeciwmęczeniową (jak w koncepcji nawierzchni *perpetual*). Przyjęto obciążenie ruchome o dwóch prędkościach, tj. 60 km/h i 5 km/h. Porównywano wyniki dla każdego typu nawierzchni przy różnych założeniach materiałowych i konstrukcyjnych: model odniesienia ze wszystkimi warstwami sprężystymi i dwa modele składające się z lepkosprężystych warstw asfaltowych oraz ze sprężystych warstw z kruszywa, ulepszonego podłoża stabilizowanego cementem i podłoża gruntowego. Oprócz wyznaczenia naprężeń, odkształceń i przemieszczeń obliczono, korzystając z wzorów Instytutu Asfaltowego, wymienione na wstępie miary trwałości nawierzchni. W formule na odporność na spękania zmęczeniowe jako moduł sztywności dolnej warstwy asfaltowej podstawiono moduł początkowy Van der Poela oraz moduł dynamiczny obliczony jako niezależny lub zależny od prędkości obciążenia. Dokonano oceny wpływu poszczególnych czynników na trwałość nawierzchni wyrażoną w milionach osi obliczeniowych, wykazując, że model całkowicie sprężystych warstw zawsze obliczoną trwałość. Wykazano także istotny wpływ prędkości pojazdów na odkształcenia oraz na trwałość zmęczeniową.

**SŁOWA KLUCZOWE:** analiza porównawcza odkształceń i trwałości, modele lepkosprężyste i sprężyste, nawierzchnia asfaltowa typu perpetual i standardowa.

**ABSTRACT.** This paper analyses the key strains and fatigue performance of the following types of road pavements using fatigue cracking and subgrade rutting as the evaluation criteria: conventional asphalt pavement and pavement structure with fatigue-resistant layer (as in *perpetual pavement* concept). Calculations were performed for two wheel speeds: 60 km/h and 5 km/h. The study included a comparison of results obtained for pavements differing in terms of material specifications and structure: reference model built of only elastic layers and two models built of viscoelastic asphalt layers and layers of aggregate cement-treated base (CTB) on soil subgrade. The determinations included strains, deformation and displacements (for which VEROAD software program was used) also the above-mentioned failure criteria determined using the Asphalt Institute equations. For predicting the fatigue life of pavement the lower asphalt layer was assumed to have the modulus value equal to the initial modulus calculated with Van der Poel equation and dynamic moduli calculated as sensitive or insensitive to the wheel speed respectively. The effect of the respective factors on the life of pavement in million standard axles (msa) was assessed, demonstrating that the calculations assuming elastic behaviour of all the pavement layers lead to overestimating the pavement life. Finally, it was found that the wheel speed had a significant effect on the strain and on the fatigue life of pavement.

**KEYWORDS:** comparative analysis of strain and life of pavement, perpetual and conventional pavement design, viscoelastic and elastic models.

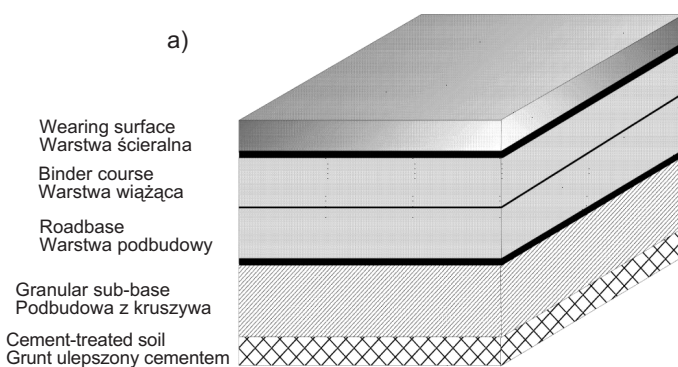
<sup>1)</sup> Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej; R.Nagorski@il.pw.edu.pl (✉)

<sup>2)</sup> Orlen Asfalt Sp. z o.o.; Krzysztof.Blazejowski@orlen.pl

<sup>3)</sup> Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej; K.Marczuk@yahoo.com

## 1. WPROWADZENIE

Nawierzchnia drogowa jest układem warstwowym. Każda warstwa charakteryzowana jest zestawem właściwości mechanicznych (moduł sprężystości lub sztywności, współczynnik Poissona itp.) oraz fizycznych (zawartość objętościowa składników, zawartość wolnych przestrzeni itp.). Klasyczna nawierzchnia podatna (asfaltowa) składa się z 2-3 warstw związanych lepiszczem asfaltowym, znajdujących się w górnej części konstrukcji oraz 2-3 warstw niezwiązanych (z kruszywa), stanowiących podbudowę i podłoże. Standardowo, głównie w celach technologicznych, stosuje się także ulepszenie spoiwem hydraulicznym jednej z warstw podłoża, znajdującej się bezpośrednio pod warstwami konstrukcyjnymi nawierzchni. W dotychczasowej praktyce konstruowania układu warstw nawierzchni (Rys. 1a), w warstwach z mieszanek mineralno-asfaltowych zawierających lepiszcze asfaltowe zawartość wolnych przestrzeni zwiększa się im niżej położona jest warstwa. Związane jest to z obniżaniem objętościowej zawartości lepiszczka w niżej leżących warstwach. W konsekwencji, ostatnia dolna warstwa związana asfaltem (podbudowa asfaltowa), która przenosi największe naprężenia rozciągające, charakteryzuje się najmniejszą wytrzymałością zmęczeniową (najmniej lepiszczka, najwięcej wolnych przestrzeni w warstwie).



## 1. INTRODUCTION

A road pavement is a layered system. Each of the respective layers has distinct properties: mechanical (elasticity modulus or stiffness modulus, Poisson's ratio) and physical (content of components by volume, void content, etc.). A conventional flexible (asphalt) pavement is built of 2-3 asphalt layers in the upper part of construction underlain with 2-3 unbound (aggregate) layers of sub-base and subgrade. Besides, it is a common practice to treat the surface of subgrade underlying the pavement with hydraulic binder, mainly for construction-related reasons. Traditionally the respective asphalt layers were designed with different void contents, increasing towards the bottom of the pavement structure (Fig. 1a). This corresponds to smaller content of the bitumen in the lower layers. As a result, the lowest asphalt layer (asphalt base course) which has to withstand the highest tensile stresses has the lowest fatigue performance of all (resulting from the smallest content of bitumen and the greatest content of voids).

For more than a dozen years the concept of *perpetual pavements* (*long-lasting pavements*) has been gaining popularity throughout the world and during that time it has been developed into a few design variants. The first

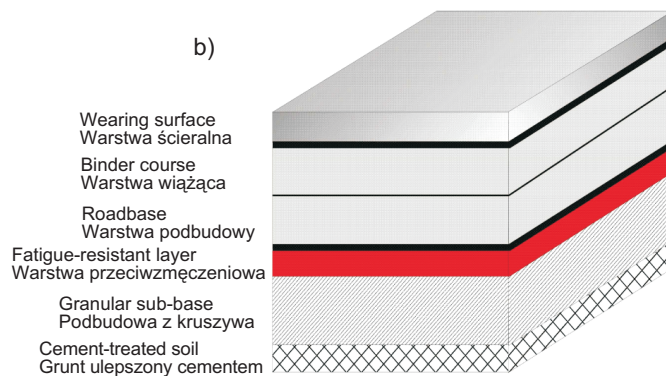


Fig. 1. Scheme of the conventional pavement structure, as currently used in Poland (a) and the perpetual pavement incorporating the fatigue-resistant layer (b)

Rys. 1. Schemat standardowej konstrukcji nawierzchni stosowany obecnie w Polsce (a) oraz nawierzchnia typu perpetual z warstwą przeciwmęczeniową (b)

Od kilkunastu lat propagowana jest na świecie idea asfaltowych nawierzchni *długowiecznych* (ang. *perpetual pavements* lub *long-lasting pavements*), występująca w kilku wariantach. Pierwsze spostrzeżenia pojawiły się w publikacji Nunna z 1998 roku [1 - 2], który zauważył, że

observations concerning *perpetual pavements* were reported in the Nunn's article published in 1998 [1-2] who pointed out that pavements designed with extra strength would not show any structural damage even when subjected to very heavy traffic loading. With over 37 cm total

w nawierzchniach o dużej rezerwie wytrzymałości nie pojawiają się zniszczenia strukturalne, nawet przy bardzo dużym obciążeniu ruchem. Przy grubości warstw asfaltowych ponad 37 cm, odkształcenia są tak niewielkie, że nie ma zagrożenia zniszczeniem zmęczeniowym (w spodzie warstw asfaltowych) oraz deformacją strukturalną (na powierzchni podłoża). Jedyнным obserwowanym typem zniszczenia były spękania góra-dół oraz powstawanie kolein lepkoplastycznych (tzw. funkcjonalnych). Od tego czasu koncepcja ta zdobywa coraz większą popularność.

W konsekwencji zmieniono podejście do oczekiwanych właściwości warstw asfaltowych na zgodne ze schematem pracy układu warstwowego, podlegającego przede wszystkim zginaniu. Z jednej strony polega on na zmniejszeniu wartości maksymalnego odkształcenia występującego w spodzie ostatniej (dolnej) warstwy asfaltowej (odkształcenia poziome rozciągające) oraz na powierzchni podłoża (odkształcenie pionowe ściskające), a zarazem na umieszczeniu na spodzie warstw asfaltowych warstwy podatnej, odpornej na spękania zmęczeniowe.

Konstrukcja *perpetual pavement*, w swojej oryginalnej koncepcji składa się z trzech warstw: ścieralnej, pakietu warstw pośrednich (wiążącej i podbudowy asfaltowej) oraz dodatkowej warstwy asfaltowej (warstwy przeciwmęczeniowej). Każda z warstw ma spełniać odpowiednią funkcję. Stosuje się zatem cienkie warstwy ścieralne (warstwa eksploatacyjna o odpowiednim współczynniku tarcia i szczelności), grube warstwy wiążące i podbudowy (o dużej sztywności), które muszą być odporne na deformacje trwałe i implikować możliwie małe odkształcenia poziome, oraz dodatkową warstwę asfaltową - warstwę przeciwmęczeniową o dużej zawartości asfaltu modyfikowanego polimerami i niewielkiej zawartości wolnych przestrzeni (Rys. 1b), o większej odkształcalności i zarazem większej odporności na spękania zmęczeniowe. Tak skonstruowana nowa nawierzchnia charakteryzuje się znacznie większą wytrzymałością zmęczeniową i odpornością na koleinowanie strukturalne. Inny sposób zwiększenia trwałości nawierzchni polega na zastosowaniu standardowego układu warstw asfaltowych nawierzchni, w którym jednakże warstwę wiążącą i podbudowy asfaltowej wykonuje się z mieszanek o wysokim module sztywności AC WMS, ale bez dodatkowej warstwy przeciwmęczeniowej na samym dole warstw asfaltowych. Ten drugi wariant stał się w Polsce bardzo popularny.

Biorąc pod uwagę dwa główne kryteria zniszczenia nawierzchni asfaltowej – spękania zmęczeniowe i głębokość koleiny strukturalnej (deformacja trwała podłoża) – przyjęta

thickness of asphalt courses the strains are so small that there is no risk of fatigue failure (on the bottom surface of the asphalt layers) and structural deformation (on the top of subgrade). The only type of distress were top-down cracks and surface rutting. Since then growing popularity of perpetual pavement concept has been observed.

As a consequence, a different behaviour is expected from the designed asphalt layers, which, operating in a layered system, are exposed primarily to bending forces. The new approach consisted in reducing the maximum strain at the underside of the asphalt layers (horizontal tensile strain) and on the top of subgrade (vertical compressive strain), as well as designing a flexible fatigue-resistant layer on the bottom.

Thus, *perpetual pavement* construction, as originally conceived, consists of the following three layers: wearing surface, intermediate layers (binder course and asphalt base) and additional asphalt layer (fatigue resistant layer). Each of these layers has a different role in the pavement structure. Therefore the pavement is built of thin wearing surface (driving surface with appropriate skid resistance and water tightness), thick binder and base layers (high stiffness modulus) – resistant to structural deformations and limiting, as far as practicable, horizontal strains and additional asphalt fatigue-resistant layer with higher flexibility and improved resistance to fatigue cracking owing to high content of polymer-modified bitumen and small void content (Fig. 1b). The new-built pavement constructed in this way features much improved fatigue performance and resistance to structural rutting. Fatigue performance may also be improved by using high-modulus asphalt mixtures for construction of binder course and base in a conventional pavement design without the fatigue-resistant layer as the lowest asphalt layer. This option has become very popular in Poland.

Based on the two failure criteria applicable to asphalt pavements, namely fatigue cracking and structural rutting (permanent deformation of subgrade) pavements designed as described above should have fatigue life extended up to 40-50 years from the actual 20 years. With a higher construction cost such pavements will be cheaper during the long-life operation, since replacements will be limited to the uppermost wearing surface and thus high cost-effectiveness may well be expected.

nowa koncepcja zakłada, że trwałość obliczeniowa nawierzchni powinna zwiększyć się z obecnych 20 do 40-50 lat. Mimo, że cała konstrukcja nawierzchni jest droższa na etapie budowy, zakłada się, że jej utrzymanie będzie tańsze – w kolejnych latach wymianie będzie podlegała wyłącznie warstwa ścieralna i w konsekwencji oczekuje się wysokiej efektywności ekonomicznej.

## 2. CEL PRACY I PRZYJĘTE ZAŁOŻENIA

Celem pracy jest porównanie profili odkształceń obliczonych oraz przybliżonej trwałości nawierzchni podatnych: standardowej – o typowym układzie warstw i standardowej z dodatkową warstwą przeciwmęczeniową (jak w koncepcji *perpetual*), dla wybranych wartości parametrów materiałowych, grubości warstw i prędkości obciążenia kołem pojazdu.

W wariancie standardowym, porównawczym, konstrukcji nawierzchni (wariant S – Rys. 2) przyjęto:

- układ trzech warstw asfaltowych wykonanych z betonu asfaltowego,
- warstwę podbudowy niezwiązanej (z kruszyw) stabilizowanej mechanicznie,
- warstwę ulepszonego podłoża stabilizowanego cementem znajdującą się bezpośrednio pod podbudową z kruszywa,
- podłoże gruntowe.

Jako nawierzchnię standardową z dodatkową warstwą (jak w koncepcji *perpetual*) przyjęto podobny układ warstw – z dodatkową warstwą asfaltową numer „4” (przeciwmęczeniową – pod podbudową asfaltową), wykonaną z mieszanki SMA (Rys. 2b-c) oraz:

- w wariancie pierwszym – o tej samej łącznej grubości wszystkich warstw asfaltowych co w układzie standardowym (wariant P1 – Rys. 2b),
- w wariancie drugim – o tych samych grubościach warstw standardowych co w układzie standardowym (wariant P2 – Rys. 2c), a więc o zwiększonej łącznej grubości warstw asfaltowych w porównaniu do wariantu standardowego (o grubość warstwy przeciwmęczeniowej).

Na Rys. 2. przyjęto następujące skrótowe oznaczenia warstw:

- MMA – warstwa mineralno-asfaltowa,  
 K – warstwa kruszywa stabilizowanego mechanicznie (podbudowa niezwiązana),

## 2. OBJECTIVE AND ASSUMPTIONS

The objective of this research is to compare the computed strain characteristics and approximate fatigue performance of two pavement structures: conventional pavement designed with typical layout and the second incorporating an additional fatigue-resistant layer (similar to the perpetual pavement concept) for specific material characteristics, thicknesses of pavement layers and wheel speed.

The conventional pavement, used as reference (type S – Fig. 2) is built of:

- a set of three asphalt layers made of asphalt concrete,
- granular sub-base made of compacted unbound aggregate,
- cement-treated subgrade underlying the granular sub-base,
- natural subgrade.

The same structure is valid also for the conventional pavements with additional fatigue-resistant layer made of SMA (Fig. 2b-c) and laid under the asphalt base layer (as in perpetual pavements) of the following two types:

- pavement type P1 – having the same total thickness of asphalt layer as in the conventional design (type P1 – Fig. 2b),
- pavement type P2 – having the same respective layer thicknesses as in the conventional design (type P2 – Fig. 2b), giving the total thickness of asphalt greater than in the conventional design (increased by the thickness of the fatigue-resistant layer).

Key to abbreviations used in Fig. 2:

- MMA – asphalt mixture,  
 K – compacted aggregate (granular sub-base),  
 P – improved (treated) subgrade,  
 G – natural subgrade,  
 $h$  – layer thickness.

For each type of pavement the following material models were used in calculations [3 - 6]:

- RS – reference model built of only elastic layers (Hook's model), insensitive to the wheel speed,
- LS1 – viscoelastic model for the asphalt layers (Bürger's model) and elastic model for the remaining layers (Hook's model) accompanied with low wheel speed (to represent slowly moving trucks),

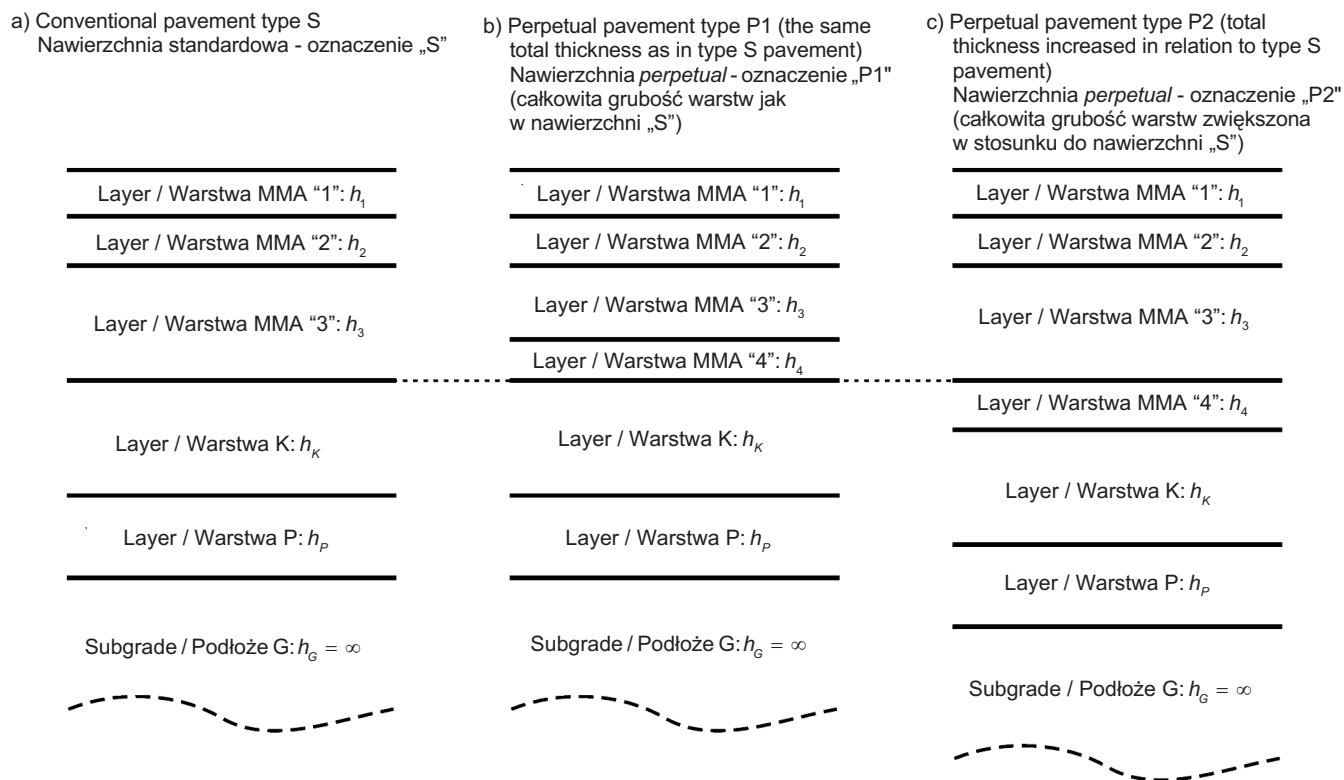


Fig. 2. Cross-sections of the analysed types of pavement: a) conventional, b) conventional with fatigue-resistant asphalt layer “4” included within the same total thickness and c) conventional with fatigue-resistant asphalt layer “4” adding to the total thickness of asphalt layers

Rys. 2. Układ warstw konstrukcji nawierzchni: a) standardowej, b) standardowej z warstwą przeciwmęczeniową MMA “4” bez zmiany całkowitej grubości warstw asfaltowych oraz c) standardowej z warstwą przeciwmęczeniową MMA “4” ze zwiększoną grubością warstw asfaltowych

- P – warstwa ulepszonego podłoża,
- G – podłoże gruntowe,
- $h$  – grubość warstwy.

Dla każdego z wariantów układu konstrukcyjnego nawierzchni do obliczeń przyjęto następujące modele materiałowe [3 - 6]:

- model RS – model odniesienia, w którym wszystkie warstwy są sprężyste (według modelu Hooke’a); model ten jest nieczuły na prędkość obciążenia kołem pojazdu,
- model LS1 – model lepkosprężysty warstw asfaltowych (według modelu Bürgersa) i model sprężysty pozostałych warstw (według modelu Hooke’a) przy małej prędkości obciążenia kołem pojazdu (co odpowiada ruchowi powolnemu pojazdów ciężkich),
- model LS2 – model lepkosprężysty warstw asfaltowych (według modelu Bürgersa) i model sprężysty pozostałych warstw (według modelu Hooke’a) przy umiarkowanej prędkości obciążenia kołem pojazdu (co odpowiada typowemu ruchowi pojazdów ciężkich).

- LS2 – viscoelastic model for the asphalt layers (Bürger’s model) and elastic model for the remaining layers (Hook’s model) accompanied with moderate wheel speed (to represent trucks moving at a normal speed).

The material properties of the viscoelastic asphalt layers were modelled with four-parameter Bürgers’ model (Fig. 3). In Fig. 3  $E_1$ ,  $E_2$  are the values of elasticity modulus and  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  are the values of viscosity coefficient ( $\sigma$  – stress). In the Hooke’s model a single common value of elasticity modulus  $E_1$  is adopted for all the materials. Besides, the materials used for the respective layers have different values of Poisson’s ratio.

Loading of pavement is obtained by application on the uppermost layer of pavement (wearing surface) of a standard vehicle wheel travelling at different constant speeds  $v$ . The application of the wheel on the surface at a given moment (and place) is modelled as a vertical load with  $p$  intensity uniformly distributed within the circle of radius  $a = \sqrt{P / (\pi \cdot p)}$ , where  $P$  is the wheel load and  $2P$  is the maximum allowable vehicle axle load (Fig. 4).

Właściwości materiałowe warstw lepkosprężystych z MMA modelowano czteroparametrowym modelem Bürgersa (Rys. 3). Na Rys. 3  $E_1$  i  $E_2$  oznaczają moduły sprężystości, a  $\eta_1$  i  $\eta_2$  – współczynniki lepkości ( $\sigma$  – naprężenie). Materiał warstw według modelu Hooke’a charakteryzuje tylko jeden moduł  $E_1$ . Dodatkowo wszystkie materiały warstw nawierzchni charakteryzuje współczynnik Poissona.

Obciążenie nawierzchni zostało przyjęte jako oddziaływanie na powierzchnię górną pierwszej warstwy (ścieralnej), wynikające z przejazdu standardowego koła pojazdu umownego w ruchu ustalonym (jednostajnym), z różnymi prędkościami  $v$  tego przejazdu. Oddziaływanie koła pojazdu na nawierzchnię w danej chwili (w danym miejscu) zostało zamodelowane jako pionowe obciążenie rozłożone równomiernie o intensywności  $p$  na powierzchni koła o promieniu  $a = \sqrt{P / (\pi \cdot p)}$ , gdzie  $P$  oznacza nacisk na koło, a  $2P$  oznacza dopuszczalny nacisk na obliczeniową oś pojazdu (Rys. 4).

Przyjęto, że nawierzchnia jest prawidłowo wykonana, gdy zarówno warstwy konstrukcyjne, jak i podłoże można traktować jako jednorodne i izotropowe. Przyjęto również, że warstwy mają w procesie deformacji zapewnioną idealną ciągłość przemieszczeń (szczepność) między nimi i warstwą ulepszonego podłoża a podłożem rodzimym. Założenie idealnej szczepności zakłada stan poprawnego wykonania połączenia międzywarstwowego (zazębienie i sklejenie warstw), co w rzeczywistości występuje nie w każdym przypadku i na pewno nie przez cały okres eksploatacji nawierzchni. Oceniając rezultaty obliczeń prezentowane w dalszej części artykułu należy pamiętać, że otrzymane wyniki są obarczone niedokładnością z tego powodu.

Wpływ temperatury uwzględniono jedynie w obliczeniach zależnych od temperatury wartości parametrów materiałowych. Przyjęto temperaturę  $10^\circ\text{C}$  jako temperaturę średnią pracy nawierzchni w ciągu roku. Innych czynników zewnętrznych w tej analizie nie uwzględniono.

Przy powyższych założeniach analiza porównawcza obu typów nawierzchni z dodatkową warstwą przeciwnieżeniową (typu *perpetual*) może być przede wszystkim skierowana na uchwycenie wpływu przyjętych układów konstrukcyjnych i grubości warstw oraz prędkości obciążenia. Oprócz porównania rozkładów wybranych odkształceń w funkcji położenia obciążenia w stosunku do ustalonego przekroju poprzecznego nawierzchni porównane zostaną także wyniki obliczeń trwałości według empirycznych wzorów amerykańskiego Instytutu Asfaltowego.

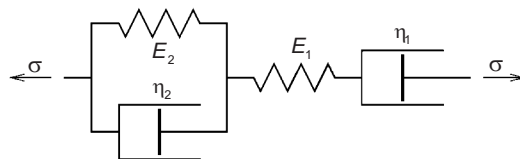


Fig. 3. The scheme of Bürgers' model of material  
Rys. 3. Schemat materiału według modelu Bürgersa

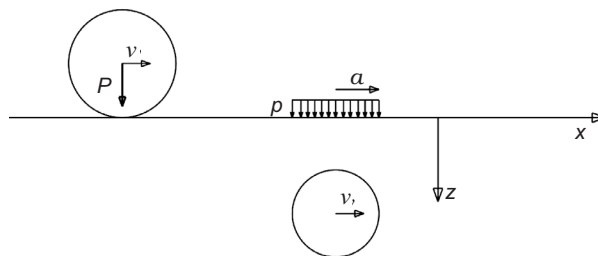


Fig. 4. The model of vehicle wheel impact on pavement (a),  
the surface load uniformly distributed on the circle (b)  
Rys. 4. Model oddziaływania koła pojazdu na nawierzchnię (a),  
obciążenie powierzchniowe równomiernie rozłożone na  
powierzchni kołowej (b)

For the purposes of this research it has been assumed that in a well constructed pavement both the structural layers and subgrade are homogenous and isotropic. Additionally, perfect bond has been assumed between the pavement layers and between the treated and natural subgrade. In real life such perfect bond requires high quality of connection between the pavement layers (mechanical interlocking and bonding), which is not always the case, and even if such quality is obtained the bond will certainly not last throughout the whole service lifetime. For this reason, the results of calculations presented in this report should not be perceived as perfectly accurate.

The effect of temperature is taken into account only for temperature depending on properties of materials. The mean annual temperature of  $10^\circ\text{C}$  has been assumed as the operating temperature of pavement. The effect of any other external factors has been ignored in this analysis.

With these input assumptions the comparative analysis of the two pavements with additional fatigue-resistant layer (designed according to the perpetual pavement concept) is bound to focus on capturing the effect of different structural arrangements, thicknesses of layers and wheel speed. The comparative analysis will cover distribution of selected strains as the function of load application position in relation to the pre-defined pavement cross section and fatigue life calculated with the Asphalt Institute fatigue formulae (empirical).

### 3. DANE DO OBLICZEŃ

Dane materiałowe i grubości warstw trzech rozważanych konstrukcji nawierzchni zestawiono w Tablicach 1 - 3 (dane materiałowe przyjęto z pracy [7]). Dla podanych trzech wariantów konstrukcyjnych nawierzchni przyjęto te same parametry obciążenia  $P = 50$  kN,  $p = 700$  kPa i w konsekwencji  $a = 15,08$  cm, zaś prędkości obciążenia równe:

- dla modelu RS:  $v$  nieokreślona (model niezależny od prędkości obciążenia),
- dla modelu LS:  $v = 1,4$  m/s ( $\sim 5$  km/h) – odpowiadająca bardzo powolnemu ruchowi pojazdu na dojeździe do skrzyżowania,
- dla modelu LS2:  $v = 16,7$  m/s ( $\sim 60$  km/h) – odpowiadająca typowej prędkości przejazdu pojazdu ciężkiego na trasie poza miastem.

Dodatkowo, w szczególności do obliczenia trwałości zmęczenia nawierzchni przyjęto wartości parametrów składu mieszanek warstw asfaltowych zestawione w Tablicy 3.

### 3. CALCULATION INPUT DATA

The material properties and layer thicknesses of three considered pavement structures are presented in Tables 1 - 3 (the material properties have been taken from [7]). The loading parameters of  $P = 50$  kN,  $p = 700$  kPa, and the resulting value of  $a = 15.08$  cm were the same for the three analysed types of pavement, accompanied with different wheel speed values:

- RS:  $v$  uncontrolled (model insensitive to the wheel speed),
- LS:  $v = 1.4$  m/s (ca. 5 km/h) – representing a vehicle approaching a junction at a very low speed,
- LS2:  $v = 16.7$  m/s (ca. 60 km/h) – representing a typical speed of a truck travelling on a non-urban road.

The parameters of asphalt mixtures, as presented in Table 3, were also considered, particularly in fatigue life calculations.

Table 1. Geometry and materials of conventional pavement (type S)

Tablica 1. Dane geometryczno - materiałowe wariantu standardowego konstrukcji nawierzchni (wariant S)

Designation / Number of layer Oznaczenie / Numer warstwy	Layer material Materiał warstwy $T=10^{\circ}\text{C}$	Thickness Grubość $h$ [cm]	Poisson's ratio Współczynnik Poissona $\mu$ [-]	Elasticity modulus Moduł sprężystości $E_1, E_2$ [MPa]	Viscosity modulus Moduł lepkości $\eta_1, \eta_2$ [MPa · s]
MMA 1	Asphalt concrete for wearing course Ref. AC 16 Beton asfaltowy do warstwy ścieralnej AC 16	4	0.3	12 337 13 956	8 633 735
MMA 2	Asphalt concrete for binder course Ref. AC 20 Beton asfaltowy do warstwy wiążącej AC 20	6	0.3	14 000 14 582	9 847 637
MMA 3	Asphalt concrete for roadbase Ref. AC 25 Beton asfaltowy do warstwy podbudowy AC 25	12	0.3	14 853 29 806	2 547 705
K	Granular sub-base (compacted aggregate) Podbudowa z kruszywa (stabilizowana mechanicznie)	20	0.3	400	–
P	Cement-treated subgrade, $R_m = 2.5$ MPa Podłoże stabilizowane cementem $R_m = 2,5$ MPa	15	0.3	300	–
G	Natural subgrade Ref. G1 Podłoże gruntowe G1	$\infty$	0.35	100	–

Table 2. Geometry and materials of pavements incorporating additional fatigue-resistant layer (perpetual pavement system – types P1 and P2)

Tablica 2. Dane geometryczno - materiałowe wariantów konstrukcji nawierzchni z dodatkową warstwą przeciwmęczeniową (typu *perpetual* – wariant P1 i P2)

Designation Number of layer Oznaczenie Numer warstwy	Layer material Materiał warstwy $T=10^{\circ}\text{C}$	Thickness - type P1 Grubość - wariant P1 $h$ [cm]	Thickness - type P2 Grubość - wariant P2 $h$ [cm]	Poisson's ratio Współczynnik Poissona $\mu$ [-]	Elasticity modulus Moduł sprężystości $E_1, E_2$ [MPa]	Viscosity modulus Moduł lepkości $\eta_1, \eta_2$ [MPa · s]
MMA 1	Asphalt concrete for wearing course Ref. AC 16 Beton asfaltowy do warstwy ścieralnej AC 16	4	4	0.3	12 337 13 956	8 633 735
MMA 2	Asphalt concrete for binder course Ref. AC 20 Beton asfaltowy do warstwy wiążącej AC 20	5	6	0.3	14 000 14 582	9 847 637
MMA 3	Asphalt concrete for roadbase Ref. AC 25 Beton asfaltowy do warstwy podbudowy AC 25	9	12	0.3	14 853 29 806	2 547 705
MMA 4	Fatigue-resistant layer - SMA 8 Warstwa przeciwmęczeniowa SMA 8	4	4	0.3	11 295 8 659	5 271 458
K	Granular sub-base (compacted aggregate) Podbudowa z kruszywa (stabilizowana mechanicznie)	20	20	0.3	400	–
P	Cement-treated subgrade, $R_m=2.5$ MPa Podłoże stabilizowane cementem $R_m=2,5$ MPa	15	15	0.3	300	–
G	Natural subgrade Ref. G1 Podłoże gruntowe G1	$\infty$	$\infty$	0.35	100	–

Table 3. Parameters of bituminous mixtures used for construction of asphalt layers

Tablica 3. Wartości parametrów składu mieszanek w warstwach asfaltowych

Symbol Symbol	Layer Warstwa	Grading of aggregate Uziarnienie $D$ [mm]	Bitumen content Zawartość lepiszcza [% v/v]	Void content Wolne przestrzenie [% v/v]
AC 16	Wearing surface Warstwa ścieralna	16	13.0	2.9
AC 20	Binder course Warstwa wiążąca	20	11.0	5.6
AC 25	Asphalt base Podbudowa asfaltowa	25	9.5	5.9
SMA 8	Fatigue-resistant layer Warstwa przeciwmęczeniowa	8	15.0	2.9



## 4. WYNIKI OBLICZEŃ – ODKSZTAŁCENIA I TRWAŁOŚĆ NAWIERZCHNI

W obszarze analizowanej nawierzchni wprowadzono współrzędne kartezjańskie  $x$ ,  $y$  i  $z$  jak na Rys. 5. Oś  $x$  określa linię przejazdu koła obciążającego nawierzchnię (po której przemieszcza się środek koła obciążenia, Rys. 3), o zwrocie w kierunku jazdy, oś  $y$  wyznacza kierunek prostopadły do osi  $x$  na powierzchni jezdni, natomiast oś  $z$  skierowana jest w głąb nawierzchni.

Fig. 5. System of co-ordinates and location of test wheel assumed in the analysis

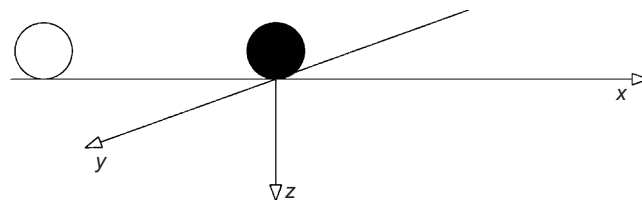
Rys. 5. Układ współrzędnych i położenie koła pojazdu przyjęte w analizie

Wykorzystując program VEROAD [8] obliczono wartości składowych przemieszczeń, odkształceń i naprężeń w przekroju  $yz$  nawierzchni w funkcji zmiennych  $y$  i  $z$  (dla wybranych wartości tych zmiennych), w zależności od położenia o współrzędnej  $x$  środka koła obciążenia, dla rozważanych wariantów konstrukcji nawierzchni i ich modeli.

Na Rys. 6 - 7 przedstawiono wykresy wybranych, najistotniejszych wielkości w przekroju poprzecznym nawierzchni przy  $x = 0$  i  $y = 0$  w funkcji położenia środka koła obciążenia wzdłuż osi  $x$ : na Rys. 6 odkształcenia  $\varepsilon_{xx}$  na powierzchni dolnej warstw asfaltowych (odkształcenia  $\varepsilon_{yy}$  mają jakościowo bardzo podobny przebieg zmienności), na Rys. 7 odkształcenia  $\varepsilon_{zz}$  na górnej powierzchni podłoża gruntowego. Znacznie obszerniejszy obraz zmienności obliczonych wielkości zamieszczono w raporcie [9]. W ramach analizy rozpatrywanych wariantów konstrukcji nawierzchni i ich modeli obliczono także trwałość zmęczeniową warstw asfaltowych  $N_z$  oraz odporność na deformacje trwałe  $N_d$ , korzystając ze wzorów empirycznych Instytutu Asfaltowego [10]. Należy zaznaczyć, że te wzory zostały zaproponowane i skalibrowane przy określonych założeniach dotyczących konstrukcji nawierzchni i ich modeli. Wykorzystano je do analizy porównawczej wpływu różnych koncepcji, czynników i parametrów na trwałość obliczeniową analizowanych nawierzchni – w odniesieniu do konstrukcji standardowej i modelu sprężystego (użyto tego samego narzędzia w analizie porównawczej miar trwałości). Wzory IA zastosowano również w celu porównania uzyskanych wyników z rezultatami w pracy [7], w której analizowano wpływ wykorzystania mieszank WMS na trwałość nawierzchni (między innymi dlatego dane materiałowe dotyczące mieszank asfaltowych zaczerpnięto z pracy [7]).

## 4. CALCULATED STRAINS AND FATIGUE PERFORMANCE DURABILITY

Cartesian co-ordinate system  $x$ ,  $y$ ,  $z$  has been set up in the analysed area of pavement, as shown in Fig. 5. The  $x$  axis represents the track of the test wheel (on which the load centre moves – see Fig. 3) oriented in the direction of travel,  $y$  axis is oriented perpendicular to  $x$  axis in the plane of road surface and  $z$  axis is oriented inwards the pavement structure.



Software program VEROAD [8] was used to calculate the component displacements, strains and stresses in the  $yz$  pavement section as a function of  $y$  and  $z$  (for selected values of these variables), depending on the position of the load centre on  $x$  axis for all the considered pavement structures and their models.

As an illustration the values of the following key parameters in the pavement cross-section with  $x = 0$  and  $y = 0$  as a function of the load centre position along the  $x$  axis are presented: strain  $\varepsilon_{xx}$  on the bottom surface of the lowest asphalt layer (the variation pattern of strain  $\varepsilon_{yy}$  is very similar) in Fig. 6 and strain  $\varepsilon_{zz}$  on the top of the subgrade in Fig. 7. For a more comprehensive image of their variation pattern see report [9]. As part of the analysis of the pavements and their models the Asphalt Institute empirical equations [10] were used to calculate the fatigue life of asphalt pavement  $N_z$  and resistance to structural rutting  $N_d$ . It is important to note that these equations have been selected and calibrated for specific assumptions concerning the pavement structures and their models. They were used in comparative analysis of the effect of various concepts, factors and parameters on the fatigue performance of the analysed pavements – in relation to the conventional structure and elastic model (the same tool was used in comparative analysis of durability determinations). Moreover, the Asphalt Institute equations were used to compare the current results and the results presented in report [7] from the research analysing the effect of high-modulus mixtures (this is one of the reasons why the material parameters from the report [7] have been used in this research).

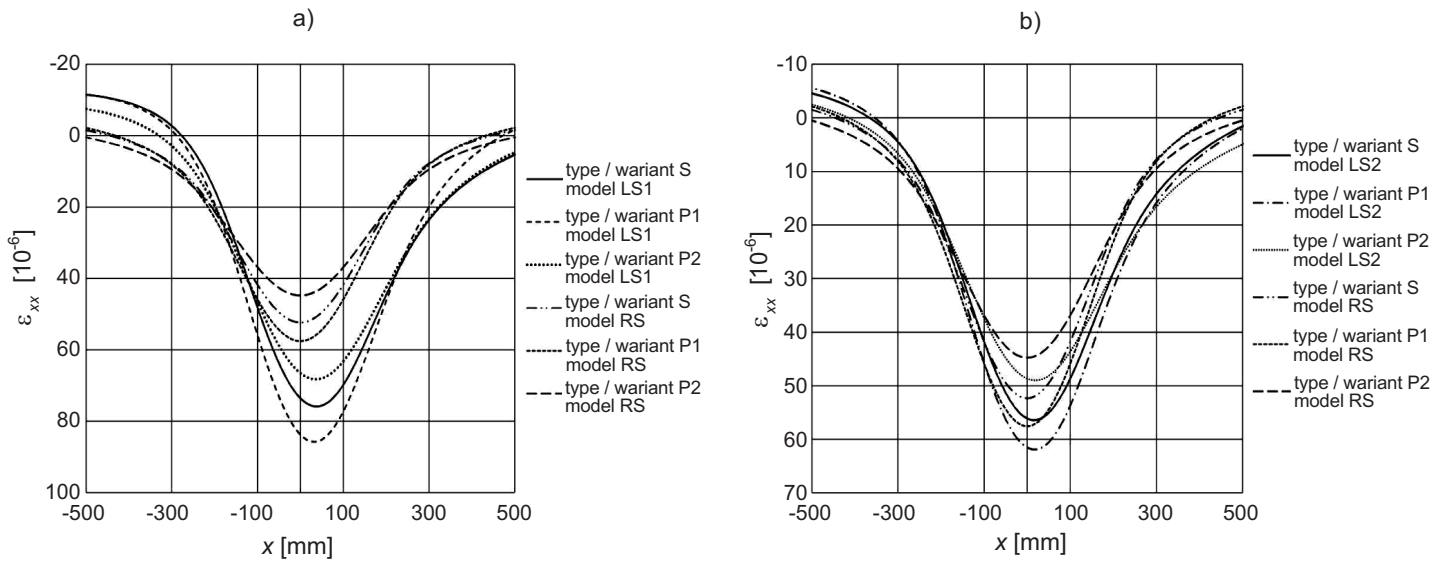


Fig. 6. Strain  $\varepsilon_{xx}$  on the bottom surface of the lowest asphalt layer with  $x = 0$ ,  $y = 0$  as a function of the load centre position on  $x$  axis

Rys. 6. Odształcenia  $\varepsilon_{xx}$  na spodzie warstw asfaltowych przy  $x = 0$ ,  $y = 0$  w funkcji położenia środka obciążenia wzdłuż osi  $x$

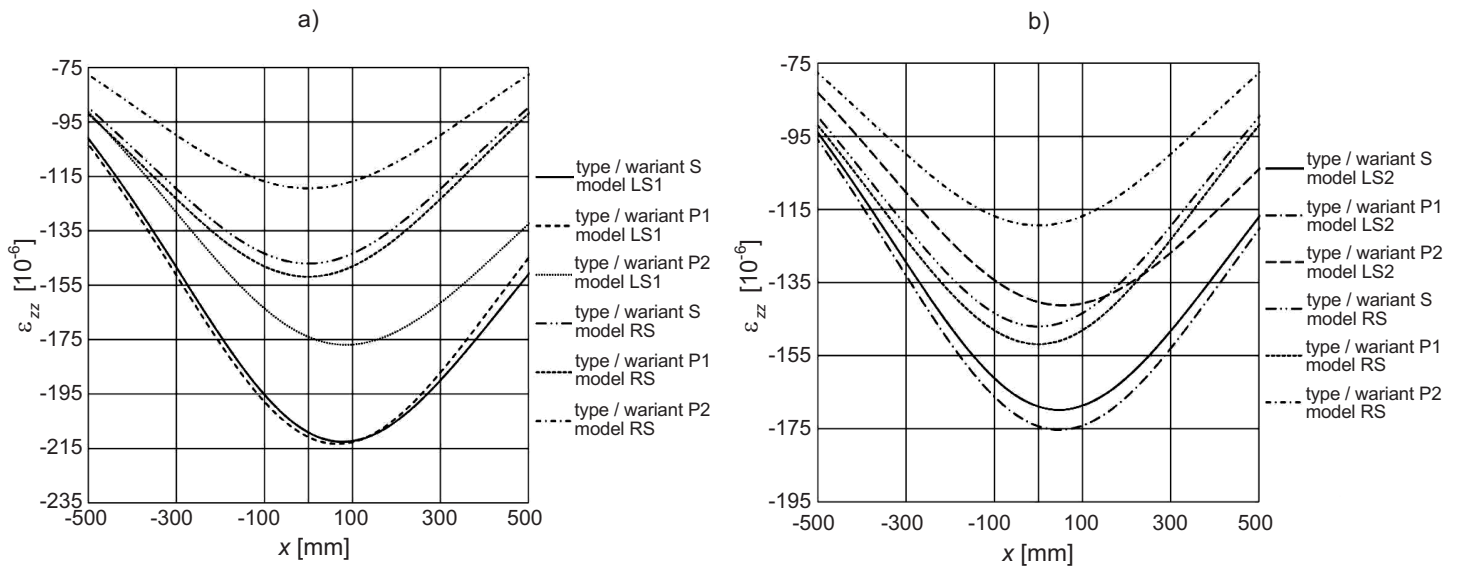


Fig. 7. Strain  $\varepsilon_{zz}$  on the top of subgrade with  $x = 0$ ,  $y = 0$  as a function of the load centre position on  $x$  axis

Rys. 7. Odształcenia  $\varepsilon_{zz}$  na powierzchni górnej podłoża gruntowego przy  $x = 0$ ,  $y = 0$  w funkcji położenia środka obciążenia wzdłuż osi  $x$

O trwałości zmęczeniowej decydują maksymalne odkształcenia rozciągające na spodzie najniższej położonej warstwy asfaltowej oraz jej sztywność, zgodnie ze wzorami:

$$N_z = 18,4 \cdot 10^M \cdot (6,167 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon_a^{-3,291} \cdot E^{-0,854}),$$

$$M = 4,84 \left( \frac{V_a}{V_a + V_v} - 0,69 \right), \quad (1)$$

The fatigue life is determined by the maximum tensile strains on the bottom surface of the lowest asphalt layer and its stiffness according to the following equations:

$$N_z = 18,4 \cdot 10^M \cdot (6,167 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon_a^{-3,291} \cdot E^{-0,854}),$$

$$M = 4,84 \left( \frac{V_a}{V_a + V_v} - 0,69 \right), \quad (1)$$

przy czym:

$E$  – moduł sztywności/sprężystości najniższej położonej warstwy asfaltowej [MPa],

$\varepsilon_a$  – maksymalne odkształcenie rozciągające (w kierunku poziomym  $\varepsilon_a = \varepsilon_{xx}$  lub  $\varepsilon_a = \varepsilon_{yy}$ ) w spodzie warstw asfaltowych [ $10^{-6}$ ],

$V_a$  – zawartość objętościowa asfaltu w mieszance [% v/v],

$V_v$  – zawartość objętościowa wolnych przestrzeni w mieszance [% v/v].

Trwałość zmęczeniową nawierzchni obliczano w dwójaki sposób, przyjmując jako moduł  $E$ :

1) moduł początkowy Van der Poela:

$$E = E_p = E_1(N_z = N_{z1}),$$

2) moduł dynamiczny (moduł zastępczy  $E_z$  – wartość modułu zespolonego  $E_c$ ) obliczany ze wzorów (2) na dwa sposoby:

a) niezależnie od prędkości obciążenia przy przyjęciu częstości  $\omega = 62,8$  rad/s, jak w badaniu dynamicznym próbki z mieszanki mineralno-asfaltowej z częstotliwością  $f = 10$  Hz:  $E = E_{za}(N_z = N_{z2a})$ ,

b) adekwatnie do prędkości obciążenia, po przyjęciu  $\omega$  zgodnie ze wzorami (3), tzn. odpowiednio do czasu oddziaływania obciążenia na dany przekrój nawierzchni przeniesiony odpowiednio na spód warstw asfaltowych  $E = E_{zb}(N_z = N_{z2b})$ .

W Tabelicy 4 zestawiono wartości poszczególnych modułów sztywności  $E$ .

Table 4. Dynamic stiffness modulus calculated for the different types and models of pavement

Tablica 4. Wartości dynamicznego modułu sztywności dla różnych wariantów i modeli konstrukcji nawierzchni

Type of pavement Wariant konstrukcyjny	Mechanistic model Model mechaniczny	Initial modulus according to Van der Poel Moduł początkowy Van der Poela $E = E_1$ [MPa]	Dynamic modulus for $\omega = 62.8$ [rad/s] Moduł dynamiczny przy $\omega = 62,8$ [rad/s] $E = E_{za}$ [MPa]	Angular frequency adequate to the wheel speed Częstość adekwatna do prędkości obciążenia $\omega$ [rad/s]	Dynamic modulus Moduł dynamiczny $E = E_{zb}$ [MPa]
Conventional type S Wariant standardowy S	LS1	14 853	12 378	11.98	9 362
	LS2	14 853	12 378	142.87	14 079
	RS	14 853	–	–	–
Perpetual pavement type P1 Wariant <i>perpetual</i> P1	LS1	11 295	9 601	11.44	5 381
	LS2	11 295	9 601	136.52	10 834
	RS	11 295	–	–	–
Perpetual pavement type P2 Wariant <i>perpetual</i> P2	LS1	11 295	9 601	10.28	5 267
	LS2	11 295	9 601	122.61	10 733
	RS	11 295	–	–	–

where:

$E$  – stiffness/elasticity modulus of the lowest asphalt layer [MPa],

$\varepsilon_a$  – maximum tensile strain (in horizontal plane  $\varepsilon_a = \varepsilon_{xx}$  or  $\varepsilon_a = \varepsilon_{yy}$ ) on the bottom surface of the asphalt layers [ $10^{-6}$ ],

$V_a$  – bitumen content [% v/v],

$V_v$  – void content [% v/v].

The fatigue life of pavement was calculated in two ways by using in place of  $E$ :

1) the initial modulus calculated with Van der Poel equation:  $E = E_p = E_1(N_z = N_{z1})$ ,

2) dynamic modulus (equivalent modulus  $E_z$  – value of the complex modulus  $E_c$ ) calculated with equations (2) in two ways:

a) ignoring the wheel speed and taking the angular frequency of  $\omega = 62.8$  rad/s, as in dynamic testing of asphalt sample with load application frequency of  $f = 10$  Hz:  $E = E_{za}(N_z = N_{z2a})$ ,

b) depending on the wheel speed, with the value of  $\omega$  calculated with formulas (3), i.e. depending on the time of load application on a given pavement cross-section, adequately converted to the underside of the asphalt layers  $E = E_{zb}(N_z = N_{z2b})$ .

The values of stiffness modulus  $E$  are compiled in Table 4.

Moduł dynamiczny  $E_z$  dla materiału według modelu Bürgersa obliczamy ze wzorów (2) [11]:

$$E_z = |E_c| = \omega \left[ \frac{(d\omega)^2 + c^2}{(b\omega^2 - 1)^2 + (a\omega)^2} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

$$a = \frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_1}{E_2} + \frac{\eta_2}{E_2}, \quad b = \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2}, \quad c = \eta_1, \quad d = \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1}.$$

Natomiast częstość kołową adekwatną do prędkości koła pojazdu obliczamy odpowiednio ze wzorów (3) [12]:

$$\omega = 2\pi \frac{v}{L}, \quad L = 2(a + z_e), \quad z_e = \sum_i h_i \sqrt[3]{\frac{E_{ai}}{E_{an}}}, \quad (3)$$

gdzie:

- $a$  – promień koła obciążenia,
- $z_e$  – głębokość zastępcza oddziaływania obciążenia na dolną warstwę asfaltową,
- $i$  – numer warstwy asfaltowej ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),
- $h_i$  – grubość warstwy asfaltowej,
- $E_{ai}$  – moduł  $E_1$   $i$ -tej warstwy asfaltowej (według modelu Burgersa).

Trwałość ze względu na kryterium odporności na deformację trwałą podłoża obliczano według następującego wzoru:

$$N_d = \left( \frac{k}{\varepsilon_p} \right)^{1/m}, \quad (4)$$

w którym:

$$k = 1,05 \cdot 10^{-2}, \quad m = 0,223 \quad \text{oraz}$$

$\varepsilon_p = \varepsilon_{z1}$  – maksymalne odkształcenie ściskające (w kierunku pionowym)  $\varepsilon_{zz}$  na powierzchni górnej podłoża gruntowego (przy  $N_d = N_{d1}$ ),

$\varepsilon_p = \varepsilon_{z2}$  – maksymalne odkształcenie ściskające (w kierunku pionowym)  $\varepsilon_{zz}$  na powierzchni górnej podłoża ulepszanego (przy  $N_d = N_{d2}$ ).

W Tabelicy 5 zamieszczono główne wyniki obliczeń, tj. obliczoną trwałość według kryteriów spękania zmęczeniowego i deformacji podłoża gruntowego dla rozpatrywanych wariantów konstrukcji nawierzchni i ich modeli, łącznie z wartościami odkształceń, które w tych kryteriach są wykorzystane.

The following equations (2) are used to calculate the value of dynamic modulus  $E_z$  according to the Bürger's model [11]:

$$E_z = |E_c| = \omega \left[ \frac{(d\omega)^2 + c^2}{(b\omega^2 - 1)^2 + (a\omega)^2} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

$$a = \frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_1}{E_2} + \frac{\eta_2}{E_2}, \quad b = \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2}, \quad c = \eta_1, \quad d = \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1}.$$

The angular frequency corresponding to the wheel speed is calculated with the following equation (3) [12]:

$$\omega = 2\pi \frac{v}{L}, \quad L = 2(a + z_e), \quad z_e = \sum_i h_i \sqrt[3]{\frac{E_{ai}}{E_{an}}}, \quad (3)$$

where:

- $a$  – radius of the load area,
- $z_e$  – equivalent depth for the load application on the lowest asphalt layer,
- $i$  – number of asphalt layer ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),
- $h_i$  – thickness of asphalt layer,
- $E_{ai}$  –  $E_1$  modulus of  $i$ -th asphalt layer (according to the Bürger's model).

Fatigue durability in terms of resistance to structural rutting of subgrade was calculated as follows:

$$N_d = \left( \frac{k}{\varepsilon_p} \right)^{1/m}, \quad (4)$$

where:

$$k = 1,05 \cdot 10^{-2}, \quad m = 0,223 \quad \text{and}$$

$\varepsilon_p = \varepsilon_{z1}$  – maximum compressive strain (in vertical direction)  $\varepsilon_{zz}$  on the top of natural subgrade (for  $N_d = N_{d1}$ ),

$\varepsilon_p = \varepsilon_{z2}$  – maximum compressive strain (in vertical direction)  $\varepsilon_{zz}$  on the surface of treated subgrade layer (for  $N_d = N_{d2}$ ).

The main results of calculations are presented in Table 5, namely values of fatigue life with fatigue cracking and subgrade rutting as the failure criteria for the analysed pavement structures and their models, including strain values used in these criteria.

Table 5. Values of main strains and fatigue performance parameters (fatigue life and resistance to structural rutting) for the different types of pavement and their mechanistic models

Tablica 5. Wartości kluczowych odkształceń i trwałości obliczeniowych (trwałości zmęczeniowej i odporności na trwałe deformacje) dla różnych wariantów konstrukcji nawierzchni i ich modeli mechanistycznych

Pavement type Wariant konstrukcyjny	Mechanistic model Model mechaniczny	$\epsilon_x$ [10 <sup>-6</sup> ]	$\epsilon_y$ [10 <sup>-6</sup> ]	$N_{z1}$ [msa] [mln osi obliczeniowych.]	$N_{z2a}$ [msa] [mln osi obliczeniowych.]	$N_{z2b}$ [msa] [mln osi obliczeniowych.]	$\epsilon_{z1}$ [10 <sup>-6</sup> ]	$N_{d1}$ [msa] [mln osi obliczeniowych.]	$\epsilon_{z2}$ [10 <sup>-6</sup> ]	$N_{d2}$ [msa] [mln osi obliczeniowych.]
Type S Wariant S	LS1	73.6	95.1	4.98	7.38	5.82	-209.1	39.41	-139.9	235.93
	LS2	56.0	63.1	13.21	13.82	15.43	-168.9	107.75	-108.8	775.77
	RS	52.2	52.2	16.90	–	–	-147.0	205.52	-94.1	1525.80
Type P1 Wariant P1	LS1	83.6	99.6	49.59	93.41	56.97	-210.8	38.76	-142.3	223.09
	LS2	61.5	70.4	144.39	149.62	165.88	-174.3	93.48	-113.2	654.09
	RS	57.4	57.4	183.42	–	–	-151.9	177.71	-98.0	1271.06
Type P2 Wariant P2	LS1	66.5	81.4	104.77	201.00	120.37	-174.0	89.75	-114.7	575.04
	LS2	48.6	56.1	311.51	325.36	357.87	-140.3	245.97	-89.2	1873.78
	RS	44.7	44.7	419.33	–	–	-119.4	523.56	-75.5	4082.74

#### Remarks / Uwagi

$\epsilon_x$  – maximum strain  $\epsilon_{xx}$  on the bottom surface of the lowest asphalt layer / maksymalne odkształcenie  $\epsilon_{xx}$  na spodzie warstw asfaltowych,

$\epsilon_y$  – maximum strain  $\epsilon_{yy}$  on the bottom surface of the lowest asphalt layer / maksymalne odkształcenie  $\epsilon_{yy}$  na spodzie warstw asfaltowych,

$\epsilon_{z1}$  – maximum strain  $\epsilon_{zz}$  on the top of natural subgrade / maksymalne odkształcenie  $\epsilon_{zz}$  na górze podłoża gruntowego,

$\epsilon_{z2}$  – maximum strain  $\epsilon_{zz}$  on the top of improved subgrade / maksymalne odkształcenie  $\epsilon_{zz}$  na górze podłoża ulepszanego,

$N_{z1}$  – fatigue life calculated according to the fatigue criterion (in msa) based on initial modulus according to Van der Poel / trwałość według kryterium zmęczeniowego w [mln osi obliczeniowych] z uwzględnieniem modułu początkowego Van der Poela,

$N_{z2a}$  – fatigue life calculated according to the fatigue criterion (in msa) for horizontal strains on the bottom surface of the lowest asphalt layer based on the dynamic modulus with the angular frequency corresponding to 10 Hz frequency as used in dynamic testing of asphalt mixtures / trwałość według kryterium zmęczeniowego w [mln osi obliczeniowych] dla odkształceń poziomych w spodzie ostatniej, dolnej warstwy asfaltowej, z uwzględnieniem modułu dynamicznego z częstotliwością kołową jak w badaniu dynamicznym próbki mma z częstotliwością 10 Hz,

$N_{z2b}$  – fatigue life calculated according to the fatigue criterion (in msa) for horizontal strains on the bottom surface of the lowest asphalt layer based on the dynamic modulus with the angular frequency adequate to the test speed and depth of horizontal strain location / trwałość według kryterium zmęczeniowego w [mln osi obliczeniowych] dla odkształceń poziomych w spodzie ostatniej, dolnej warstwy asfaltowej, z uwzględnieniem modułu dynamicznego z częstotliwością kołową adekwatną do prędkości obciążenia i głębokości położenia odkształcenia poziomego,

$N_{d1}$  – fatigue life calculated according to the subgrade rutting criterion (in msa) taking into account the maximum vertical strains on the top of natural subgrade / trwałość według kryterium odporności na deformację trwałą podłoża (w [mln osi obliczeniowych]) przy uwzględnieniu maksymalnych odkształceń pionowych na górnej powierzchni podłoża gruntowego,

$N_{d2}$  – fatigue life calculated according to the subgrade rutting criterion (in msa) taking into account the maximum vertical strains on the top of improved subgrade / trwałość według kryterium deformacji podłoża w [mln osi obliczeniowych] przy uwzględnieniu maksymalnych odkształceń pionowych na górnej powierzchni podłoża ulepszanego.

## 5. ANALIZA WYNIKÓW

Na podstawie przeprowadzonej analizy sformułowano następujące spostrzeżenia:

- 1) W porównaniu z modelem sprężystym warstw asfaltowych (przy przyjęciu jako modułu sztywności  $E$  modułu początkowego Van der Poela), modele lepkosprężyste implikują zmniejszenie trwałości nawierzchni obliczonej według kryteriów spekania zmęczeniowego

## 5. ANALYSIS OF RESULTS

On the basis of the above-described analysis it may be concluded that:

- 1) In comparison with the flexible model of the asphalt layers (using in place of  $E$  the initial modulus calculated with Van der Poel equation) the visco-elastic models imply reduction of fatigue durability calculated with fatigue cracking and subgrade rutting as failure

i deformacji podłoża. W zależności od wariantu obliczeniowego redukcja trwałości wynosi od około 30% trwałości zmęczeniowej przy prędkości 60 km/h do nawet pięciokrotnego zmniejszenia trwałości w zakresie deformacji podłoża przy prędkości 5 km/h.

- 2) Uwzględnienie w modelach obliczeniowych wpływu prędkości pojazdu prowadzi do znaczących różnic w wynikach trwałości zmęczeniowej konstrukcji dla różnych prędkości. Zachodzi zależność: im większa prędkość pojazdu, tym większa trwałość, co można uznać za zrozumiałe.
- 3) Zastosowanie konstrukcji z warstwą przeciwmęczeniową jest korzystne przy każdym modelu mechanicznym przyjętym w obliczeniach.
- 4) Między wariantami P1 i P2 występują różnice na korzyść wariantu P2, którego trwałość obliczona według obu kryteriów jest znacząco większa niż wariantu P1. Wynika to nie tylko z zastosowania warstwy przeciwmęczeniowej, ale także z prostego pogrubienia konstrukcji P2 w stosunku do przyjętej w P1. Niemniej jednak już prosta zamiana właściwości dolnej strefy warstw asfaltowych z klasycznej podbudowy asfaltowej na warstwę bogatą w asfalt (SMA) przyczynia się do bardzo znaczącego wzrostu trwałości nawierzchni (minimum dziesięciokrotnego).
- 5) Wykazane różnice trwałości między wariantami S i P2 wynikają z zastosowania dodatkowej warstwy przeciwmęczeniowej o grubości 4 cm oraz korzystniejszych właściwości tej warstwy. W tym sensie pogrubienie warstw asfaltowych o 4 cm w dolnej strefie rozciągania jest bardzo korzystne dla trwałości nawierzchni.
- 6) Stosunek trwałości zmęczeniowej dla modeli LS2/LS1 (wpływ prędkości) jest zróżnicowany:
  - a) w przypadku obliczeń trwałości zmęczeniowej z uwzględnieniem modułu początkowego Van der Poela oraz z uwzględnieniem modułu dynamicznego z częstością kołową adekwatną do prędkości obciążenia, stosunek trwałości LS2/LS1 jest taki sam (dla wariantu S=2,65; dla P1=2,91; dla P2=2,97),
  - b) w przypadku obliczeń trwałości zmęczeniowej z uwzględnieniem modułu dynamicznego z częstością kołową jak w badaniu dynamicznym próbki MMA (10 Hz), stosunek trwałości LS2/LS1 jest znacząco mniejszy niż dla dwóch pozostałych (dla wariantu S=1,87; dla P1=1,6; dla P2=1,62).

Zastosowanie w obliczeniach trwałości zmęczeniowej z uwzględnieniem modułu początkowego Van der Poela

criteria. Depending on the calculation variant, the decrease of fatigue life ranges from about 30% at 60 km/h wheel speed up to fivefold decrease at 5 km/h due to subgrade rutting.

- 2) Vehicle speed, when considered in the calculation models, has a major influence on fatigue life calculations. Fatigue life increases with the increase of vehicle speed, which seems quite logical.
  - 3) Fatigue-resistant layer has a positive effect with all the analysed mechanistic models.
  - 4) P2 prevails over P1 structure in terms of fatigue life, which is significantly longer in the former case for both failure criteria. It is also a straightforward consequence of a greater thickness of P2 pavement structure compared to P1. Nevertheless, a considerable increase of fatigue life (at least tenfold) is obtained just by changing the properties of the lower asphalt layer, namely use of SMA which is a bitumen-rich material, instead of the conventional roadbase asphalt.
  - 5) The calculated difference of fatigue life between S and P2 is attributable to the use of additional 4 cm fatigue-resistant layer and its better properties. From this point of view, increasing the thickness of asphalt layers by 4 cm in the bottom zone of tensile stresses has a very positive effect on the fatigue resistance of pavement.
  - 6) A more complex situation in terms of fatigue life ratios was found when comparing models LS2 and LS1 (the effect of speed) and thus the LS2/LS1 ratio was:
    - a) at the same level when calculated with the application Van der Poel modulus and dynamic modulus with angular frequency adequate to the test speed (for S=2.65, for P1=2.91, for P2=2.97),
    - b) considerably lower than in the other two cases (for S=1.87, for P1=1.6, for P2=1.62) when calculated with dynamic modulus with angular frequency used in dynamic testing of asphalt mixtures (10 Hz).
- The calculations of fatigue life based on initial Van der Poel modulus and on dynamic modulus with the angular frequency adequate to the load speed showed the substantial effect and higher values of fatigue life were obtained for dynamic modulus with angular frequency adequate to the load speed.
- 7) The fatigue durability calculation formula based on the subgrade rutting criterion refers to the top surface of the natural subgrade. The values given in the last column of Table 5 calculated for the top surface of improved

- oraz z uwzględnieniem modułu dynamicznego z częstotliwością kołową adekwatną do prędkości obciążenia wykazuje znaczny wpływ prędkości obciążenia, przy czym moduły dynamiczne z częstotliwością kołową adekwatną do prędkości obciążenia generują większe trwałości zmęczeniowe.
- 7) Formuła obliczania trwałości według kryterium odporności na deformacje podłoża odnosi się do górnej powierzchni podłoża gruntowego. Zamieszczenie w ostatniej kolumnie Tablicy 5 wartości obliczonych dla górnej powierzchni podłoża ulepszonych pokazuje jak znaczący wpływ na te wartości miałyby większa sztywność tej warstwy podłoża, traktowanej zazwyczaj jako warstwa technologiczna.
  - 8) W przebiegach zmienności poszczególnych wielkości w przekroju poprzecznym nawierzchni w funkcji położenia środka obciążenia w stosunku do tego przekroju zauważalna jest znana niesymetria tych przebiegów względem rozpatrywanego przekroju, będąca efektem lepkości materiału w warstwach asfaltowych (uwzględniona w modelu Bürgersa). W szczególności maksimum wielu istotnych wielkości (głównie odkształceń) w danym przekroju nawierzchni występuje nie pod środkiem koła obciążenia, ale jest opóźnione (pojawia się po przejechaniu koła przez ten przekrój).
  - 9) Wpływ na wartości i charakter przebiegu poszczególnych wielkości w danym przekroju poprzecznym nawierzchni w funkcji współrzędnej  $x$  położenia środka obciążenia jest dla różnych wariantów konstrukcyjnych nawierzchni i ich modeli mechanicznych zróżnicowany. Na uwagę zasługują między innymi następujące spostrzeżenia:
    - a) największe odkształcenia generuje mała prędkość obciążenia (w modelu LS1), przy czym warianty konstrukcji S i P1 są prawie równoważne w zakresie odkształceń  $\varepsilon_{zz}$ , natomiast odkształcenia  $\varepsilon_{xx}$  i  $\varepsilon_{yy}$  na spodzie dolnej warstwy asfaltowej są większe dla P1 niż S,
    - b) najmniejsze odkształcenia generuje model RS (sprężysty), niezależny od prędkości obciążenia, co oznacza, że stosowanie modelu RS na pewno wygeneruje największą trwałość nawierzchni – w konsekwencji może okazać się, że nawierzchnia jest niedowymiarowana.
  - 10) Różnice między wariantami S i P2, które pokazują efekt dodania warstwy przeciwmęczeniowej, są dla odkształceń  $\varepsilon_{xx}$  na spodzie dolnej warstwy asfaltowej następujące: przy małej prędkości obciążenia (model LS1), układ konstrukcyjny S implikuje  $\varepsilon_{xx} = 75 \mu\text{m/m}$ , a układ konstrukcyjny P2 powoduje  $\varepsilon_{xx} = 68 \mu\text{m/m}$ , subgrade show the benefits of such improvement of subgrade, normally implemented purely for construction-related purposes.
  - 8) The variation pattern of the respective values across the pavement cross-section as the function of load centre position shows the known asymmetry of these patterns in relation to the analysed cross-section, which is attributed to the effect of viscosity in the asphalt layers (which is taken into account in the Bürger's model). In particular, the peaks of various significant parameters (mainly strains) in a given pavement cross-section are delayed in relation to the load centre position (appear after the wheel has passed through the cross-section).
  - 9) The effect of the load centre position in a given cross-section as a function of  $x$  varies between the analysed pavement types and their mechanistic models. The most important observations are detailed below:
    - a) the greatest strains are generated at low test speeds (in model LS1) and types S and P1 are almost equivalent in terms of  $\varepsilon_{zz}$  strain while  $\varepsilon_{xx}$  and  $\varepsilon_{yy}$  strains on the bottom surface of the lowest asphalt layer are greater in pavement type P1 (as compared to pavement type S),
    - b) the lowest strain value was generated in model RS (elastic) which ignores the wheel speed, and as such will yield the greatest fatigue life value, potentially leading to an under-designed pavement.
  - 10) The following values of strain  $\varepsilon_{xx}$  on the bottom surface of the lowest asphalt layer were obtained for the S and P2 pavements (in order to show the effect of additional fatigue-resistant layer): at low test speed (model LS1) the values of  $75 \mu\text{m/m}$  and  $68 \mu\text{m/m}$  were obtained for the S and P2 types respectively and at higher speed (model LS2) the values were  $55 \mu\text{m/m}$  and  $48 \mu\text{m/m}$  (meaning proportional decrease of the strain value in both cases).
  - 11) In the analysis a perfect bond was assumed between the pavement layers which is not always the case in real life situations. Moreover, even if it is attained it will not in any case last throughout the whole service lifetime. For this reason the results of fatigue life calculations have been overestimated and, as such, they should not be used directly in pavement design.

natomiast przy większej prędkości obciążenia (model LS2) konstrukcja S implikuje  $\varepsilon_{xx} = 55 \mu\text{m/m}$ , zaś konstrukcja P2 wyznacza  $\varepsilon_{xx} = 48 \mu\text{m/m}$  (spadek wielkości odkształceń proporcjonalny w obydwu przypadkach).

- 11) W obliczeniach przyjęto założenie idealnej szczepności warstw, co w rzeczywistości nie występuje w każdym przypadku i na pewno nie przez cały okres eksploatacji nawierzchni. W jakimś stopniu więc otrzymane wyniki dotyczące trwałości są przeszacowane z tego powodu i nie powinny być przekładane na rzeczywisty projekt nawierzchni.

## 6. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych analiz sformułowano następujące wnioski:

1. Stosowanie teorii sprężystości, a więc także opartej na tej teorii oprogramowania do obliczeń w odniesieniu do układu warstwowego asfaltowej nawierzchni drogowej prowadzi do niedowymiarowania konstrukcji nawierzchni w strefie powolnego ruchu pojazdów. Może to tłumaczyć obserwowane przedwczesne zniszczenia nawierzchni na dojazdach do skrzyżowań lub na pasach powolnego ruchu.
2. Zastosowanie warstwy przeciwmęczeniowej przyczynia się do zwiększenia trwałości nawierzchni, także w przypadku, gdy część grubości konwencjonalnej podbudowy asfaltowej została zastąpiona warstwą przeciwmęczeniową.
3. W przypadku zastosowania warunków skuteczności układu warstw nawierzchni typu *perpetual*, tzn. osiągnięcia odkształcenia rozciągającego w spodzie ostatniej warstwy asfaltowej mniejszego od  $70 \mu\text{m/m}$  oraz odkształcenia ściskającego na powierzchni podłoża mniejszego od  $200 \mu\text{m/m}$  [13], analiza uzyskanych wyników wskazuje, że warunki te dla przyjętych konstrukcji nawierzchni mogą nie być spełnione. W przypadku zastosowania do obliczeń teorii i oprogramowania uwzględniających lepkosprężysty charakter materiałów asfaltowych i prędkości obciążenia, otrzymujemy większe wartości kluczowych odkształceń, które przekraczają wartości graniczne. Wniosek ten jest niezależny od wyników trwałości według równań Instytutu Asfaltowego, ponieważ dotyczy obliczonych wartości odkształceń, a nie ich dalszego przetwarzania na liczbę osi do umownego zniszczenia nawierzchni (pozostałej trwałości).

## 6. CONCLUSIONS

On the basis of the above-described analyses it can be concluded that:

1. Application of the theory of elasticity and use of computer programs based on this theory for designing multi-layered asphalt pavements leads to under-designing of pavements structures in areas where vehicles move with low speed. This may be the reason of premature failure of pavement on approaches to junctions and on low-speed truck lanes.
2. Introduction of fatigue-resistant layer in the pavement structure has a positive effect on the fatigue life of pavement, even if the remained thickness of conventional asphalt roadbase has been reduced accordingly.
3. Analysis of the results against the *perpetual pavement* performance criteria, i.e. tensile strain on the bottom surface of the lowest asphalt layer below  $70 \mu\text{m/m}$  and compressive strain on the surface of subgrade below  $200 \mu\text{m/m}$  [13] indicates that the assumed pavement structures may fail to meet these criteria. Application of theories and software programs taking into account visco-elastic properties of bituminous materials and the effect of speed yields higher values of the main strains which exceed the limits. This conclusion does not depend on the results calculated with Asphalt Institute durability calculation equations as it considers the calculated strain values and not their subsequent use in the calculation of the number of axle load applications until failure of the pavement (residual fatigue life).

## REFERENCES / BIBLIOGRAFIA

- [1] Nunn M.E.: Design of Long-Life Roads for Heavy Traffic. Australian Asphalt Pavement Association Industry Conference, Surfers Paradise, Australia, 1998, 18
- [2] Nunn M.E., Brown A., Weston D., Nicholls J.C.: Design of Long-Life Roads for Heavy Traffic. TRL Report 250, 1997
- [3] Secor K.E., Monismith C.L.: Visco-Elastic Properties of Asphalt Concrete. Proceedings. Highway Research Board, **41**, 1962, 299 - 320
- [4] Goodrich J.L.: Asphaltic Binder Rheology. Asphalt Concrete Rheology and Asphalt Concrete Mix Properties. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, **60**, 1991, 80 - 120
- [5] Lee H.J., Kim Y.R.: Visco-Elastic Constitutive Model for Asphalt Concrete under Cyclic Loading. Journal of Engineering Mechanics, **124**, 1, 1998, 32 - 40



- [6] *Kim Y.R.*: Modeling of Asphalt Concrete, ASCE Press - McGraw-Hill, New York, 2009
- [7] *Sybilski D., Mularzuk R., Bańkowski W.*: Comparison Between Typical Pavement Structure in Accordance with Polish Design Guide and Innovation Pavement Structure with Use of Veroad Software. II International Congress of Societa Italiana Infrastructre Viarie, Firenze, 2004 [http://sed.siiv.it/documenti/63\\_2848\\_20080819151747.pdf](http://sed.siiv.it/documenti/63_2848_20080819151747.pdf)
- [8] *Hopman P.C.*: The Visco-Elastic Multilayer Program VEROAD. Heron, **41**, 1, 1996, 71 - 91
- [9] *Nagórski R., Błażejowski K., Marczuk K.*: Analiza porównawcza deformacji i naprężeń oraz trwałości zmęczeniowej i odporności na deformacje strukturalne w konstrukcji podatnej nawierzchni asfaltowej typu „perpetual pavement” i nawierzchni standardowej. Instytut Dróg i Mostów, Politechnika Warszawska, praca statutowa (raport), Warszawa, 2012
- [10] *Piłat J., Radziszewski P.*: Nawierzchnie asfaltowe. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2007
- [11] *Nagórski R., Błażejowski K., Wiśniakowski P., Nagórska M.*: Analiza porównawcza właściwości materiałów Burgersa, Bogusławskich i Zenera w świetle testów naprężenia i odkształcenia w odniesieniu do właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych. DROGI I MOSTY, **10**, 1, 2012, 5 - 32
- [12] Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Appendix CC-3: Updated Traffic Frequency Calculation for Asphalt Layer. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Illinois, USA, 2003
- [13] The Asphalt Handbook (MS-4). Asphalt Institute, digital edition, 2007

