



ROMAN NAGÓRSKI¹⁾
KRZYSZTOF BŁAŻEJOWSKI²⁾
MAGDALENA NAGÓRSKA³⁾

COMPARATIVE ANALYSIS OF DEFLECTIONS AND STRAINS OF TWO ROAD PAVEMENTS WITH HIGH TRAFFIC LOAD

ANALIZA PORÓWNAWCZA UGIĘĆ I ODKSZTAŁCEŃ DWÓCH NAWIERZCHNI DROGOWYCH O DUŻYM OBCIĄŻENIU RUCHEM

STRESZCZENIE. Praca dotyczy porównania ugięć i kluczowych odkształceń przy wymiarowaniu dwóch wariantów nawierzchni drogowej podatnej obciążonej ruchem ciężkim, różniących się jedynie grubością podbudowy asfaltowej. W artykule pokazano wpływ na wartości porównywanych wielkości ruchu powolnego, obciążenia od hamowania w ruchu powolnym i temperatury sezonowej warstw asfaltowych oraz zastosowanych modeli lepkosprężystych (Bürgersa i Hueta-Sayegha) oraz modelu sprężystego tych warstw. Wykazano, że względna zmiana wartości analizowanych wielkości przy zmianie grubości podbudowy asfaltowej nie zależy lub nieznacznie zależy od wymienionych czynników, mimo że bezwzględne wartości porównywanych wielkości bardzo silnie zależą od prędkości obciążenia i temperatury warstw asfaltowych (i stosunkowo niewiele od zastosowanego modelu obliczeniowego).

SŁOWA KLUCZOWE: konstrukcja nawierzchni, model Bürgersa, model Hooke'a, model Hueta-Sayegha, modelowanie mechaniczne, prędkość obciążenia, temperatura nawierzchni, wpływ hamowania.

ABSTRACT. The paper concerns the comparison of deflections and key strains when dimensioning of two variants of the flexible road pavement loaded with heavy traffic, differing only in the thickness of the asphalt base course. The article shows the impact on values of compared quantities of slow traffic, loading of the braking movement in slow traffic and seasonal temperature of asphalt layers. Moreover, it presents application of viscoelastic models (Bürgers and Huet-Sayegh) and the elastic model of these layers. It has been proven that the relative change of the analysed values in modifying the thickness of the asphalt base course does not depend or does not significantly depend on these factors, although the absolute values of compared quantities strongly depend on the load speed and on the temperature of asphalt layers (and relatively not much on the applied computational model).

KEYWORDS: braking impact, Bürgers model, Hooke's model, Huet-Sayegh model, load speed, mechanistic modelling, pavement structure, pavement temperature.

DOI: 10.7409/rabdlim.015.003

¹⁾ Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej; r.nagorski@il.pw.edu.pl ✉

²⁾ Orlen Asfalt Sp. z o.o.; krzysztof.blazejowski@ornlen.pl

³⁾ Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej; m.nagorska@il.pw.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Tematem pracy jest analiza porównawcza ugięć oraz odkształceń kluczowych przy wymiarowaniu nawierzchni drogowych podatnych na przykładzie dwóch konstrukcji poddanych dużemu obciążeniu ruchem. Do analizy wybrano dwa warianty konstrukcji nawierzchni różniące się jedynie grubością podbudowy asfaltowej, oznaczone symbolicznie KS6 i KN5 (Rys. 1 i 2), by wartości innych parametrów geometryczno-materiałowych warstw nawierzchni nie wpływały na obraz tej analizy.

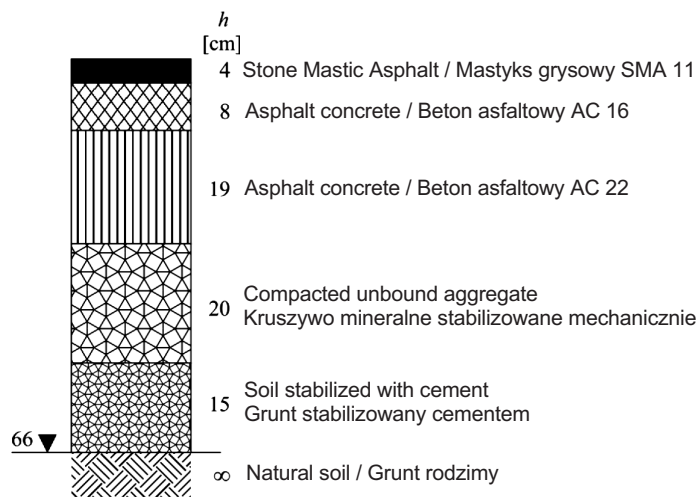


Fig. 1. The pavement structure KS6
Rys. 1. Konstrukcja nawierzchni KS6

Taki układ warstw w nawierzchniach KS6 i KN5 wybrano dlatego, że przedstawiają one konstrukcje zbliżone odpowiednio do typowej konstrukcji dla kategorii ruchu KR6 według Rozporządzenia [1] z 1999 roku i Katalogu TNPP z 1997 [2] (KS6) oraz do typowej konstrukcji dla kategorii ruchu KR5 według Katalogu TNPP z 2013 roku [3] (KN5). Obie konstrukcje mają przenieść ruch drogowy równoważny liczbie przejazdów osi obliczeniowych 100 kN w ciągu 20 lat w przedziale 14 600 000 - 22 000 000, wspólnym dla kategorii KR6 według [1] oraz dla kategorii KR5 według [3].

W analizach nawierzchni tego typu i podobnych, zwłaszcza przy ich wymiarowaniu, stosuje się głównie model mechaniczny w postaci półprzestrzeni warstwowej. Do modelowania materiałów warstw nawierzchni najczęściej przyjmuje się modele sprężyste, aczkolwiek w pracach o charakterze naukowym wykorzystuje się także inne modele, zwłaszcza modele lepkosprężyste [4-14]. W artykule zastosowano zarówno model sprężysty Hooke'a (oznaczony dalej jako H),

1. INTRODUCTION

The subject matter of the work is a comparative analysis of key strains and deflections when dimensioning of flexible road pavements as exemplified by two structures subjected to heavy traffic load. The analysis was based on two variants of the pavement structure differing only in the thickness of the asphalt base course, marked by the symbols KS6 and KN5 (Fig. 1 and 2), so that the values of other geometric and material parameters of the pavement layers do not affect the image of this analysis.

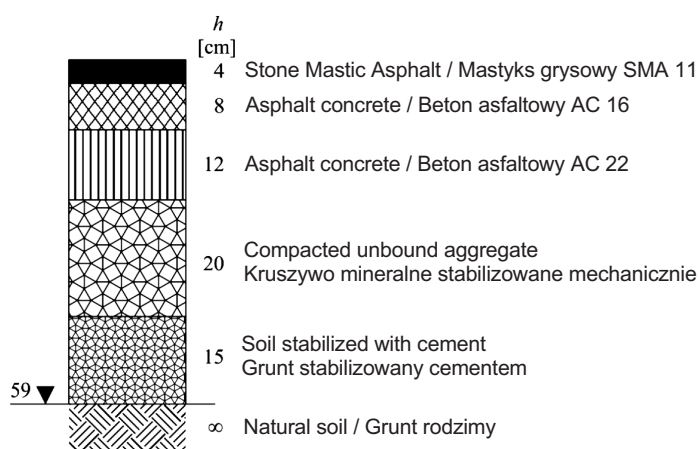


Fig. 2. The pavement structure KN5
Rys. 2. Konstrukcja nawierzchni KN5

This arrangement of layers in the pavements KS6 and KN5 was chosen because they represent similar structures according to the standard structure for KR6 traffic category in accordance with the Regulation [1] of 1999, the TNPP Catalogue of 1997 [2] (KS6) and a typical structure for KR5 traffic category according to the TNPP Catalogue of 2013 [3] (KN5). Both structures are to carry the traffic equivalent to the number of passages of standard axis 100 kN within 20 years in the range of 14 600 000 - 22 000 000, common for KR6 category according to [1] and for KR5 category according to [3].

In the analyses of this pavement type and similar, especially in their dimensioning, a mechanical model in the form of the layer half-space is mainly used. For the modelling of the material of pavement layers, the elastic models are most often used, although in the scientific works, other models are applied, in particular, viscoelastic ones [4-14]. In this work, Hooke's elastic model was used (designated hereinafter as H) as well as (for comparative purposes) two

jak również (w celach porównawczych) dwa modele lepko-sprężyste w odniesieniu do warstw asfaltowych: model Bürgersa (dalej oznaczany jako B) [11, 12] i model Hueta-Sayegha (dalej H-S) [11, 13, 14]. Założony model sprężysty Hooke'a warstw asfaltowych jest w określonym sensie równoważny modelom lepko-sprężystym, zwłaszcza modelowi Hueta-Sayegha. Jako model materiałów warstw nieasfaltowych użyto jedynie modelu Hooke'a. Jako obciążenie nawierzchni przyjęto typowe przy wymiarowaniu układu warstw nawierzchni działanie ruchomego koła osi standardowej pojazdu w postaci nacisku rozłożonego równomiernie na powierzchni kołowej.

Celem artykułu jest:

- po pierwsze, przedstawienie (przykładowe) wpływu ruchu powolnego pojazdów ciężkich w porównaniu z ruchem o prędkości typowej na kluczowe przy wymiarowaniu nawierzchni wielkości mechaniczne, dla trzech temperatur sezonowych (zimy, wiosny/jesieni i lata), również z uwzględnieniem sił hamowania w ruchu powolnym, z wykorzystaniem trzech założonych modeli warstw asfaltowych obu wariantów konstrukcji nawierzchni,
- po drugie, wykazanie, że mimo znaczącego zróżnicowania wartości wyznaczonych wielkości mechanicznych dla ruchu powolnego i z typową prędkością oraz dla trzech przyjętych wartości temperatury warstw asfaltowych, stosunek (iloraz) tych wielkości przy zmianie grubości podbudowy asfaltowej (konstrukcji KS6 w stosunku do konstrukcji KN5) nie zależy lub zależy mało znacząco od wymienionych czynników, jak również nie zależy od zastosowanego modelu obliczeniowego H, B i H-S.

Przedstawione w pracy wyniki są częścią szerokiej analizy konstrukcji KS6 i KN5 wykonanej w ramach pracy badawczej zatytułowanej „Badania mieszanek mineralno-asfaltowych i analiza konstrukcji nawierzchni podatnych z uwzględnieniem trwałości nawierzchni”, wykonanej przez zespół autorów niniejszej publikacji w roku 2013 na zlecenie Zarządu Dróg Wojewódzkich w Katowicach i przedsiębiorstwa Śląskie Kruszywa Naturalne Sp. z o.o.

2. ZAŁOŻENIA I DANE

Obciążenie nawierzchni przyjęto (zgodnie z Katalogami TNPP [3] i PRNPP z 2013 roku [15]) w postaci pionowego nacisku VL koła pojazdu $P = 50$ kN (dla osi o nacisku 100 kN), rozłożonego równomiernie z intensywnością (ciśnieniem) $p = 850$ kPa na powierzchni kołowej o promieniu:

$$a \text{ [m]} = \sqrt{\frac{P \text{ [kN]}}{\pi \cdot p \text{ [kPa]}}} = 0,1368 \text{ [m]}, \quad (1)$$

viscoelastic models, in relation to the asphalt layers: the Bürgers model (hereafter referred to as B) [11, 12] and Huet-Sayegh model (hereafter H-S) [11, 13, 14]. The adopted Hooke's elastic model of asphalt layers is, in a certain sense, equivalent to viscoelastic models, especially to the Huet-Sayegh model. As a model of material of non-asphalt layers only Hooke's model was used. The operation of the moving wheel of a standard vehicle axle in the form of load distributed uniformly over the circular surface was assumed as a pavement load, typical in dimensioning of the pavement layers.

The purpose of this article is:

- first, to describe (as an example) the impact of the slow traffic of heavy vehicles as compared to the traffic with typical speed to mechanical quantities that are essential in pavement dimensioning, for three seasonal temperatures (winter, spring/autumn and summer), also taking into account the braking forces in slow traffic, using three adopted models of asphalt layers of two variants of pavement structure,
- secondly, to demonstrate that despite the considerable diversity of values of the mechanical quantities designated for slow traffic and traffic with typical speed, as well as for three adopted temperature values of asphalt layers, the ratio (quotient) of these quantities when changing the thickness of the asphalt base course (KS6 structure in relation to the KN5 structure) does not depend or depends to a minor degree on these factors, and does not depend on the applied H, B or H-S computational models.

The results presented in this work are part of a broad analysis of the KS6 and KN5 structures performed within the framework of the research entitled „Badania mieszanek mineralno-asfaltowych i analiza konstrukcji nawierzchni podatnych z uwzględnieniem trwałości nawierzchni” [“Testing asphalt mixes and the analysis of structure of flexible pavements, taking into account the durability of the pavement”], carried out by the authors of this publication in 2013 at the request of the Board of Regional Roads in Katowice and the company Śląskie Kruszywa Naturalne Ltd.

2. ASSUMPTIONS AND DATA

The pavement load was assumed (according to the TNPP [3] and PRNPP Catalogues of 2013 [15]) in the form of a vertical load VL of the vehicle wheel $P = 50$ kN (for an axle with the load of 100 kN), uniformly distributed with the intensity (pressure) $p = 850$ kPa at the circular surface with the radius:

przy dwu prędkościach obciążenia: $v = 60$ km/h (założonej jako typowa dla niezakłóconego ruchu pojazdów ciężkich - oznaczenie HS) i $v = 5$ km/h (założonej dla ruchu powolnego, np. na dojeździe do skrzyżowania – oznaczenie LS). Dla ruchu powolnego analizowano także przypadek obciążenia pionowego VL łącznie z obciążeniem poziomym (HL – np. pochodzącym od hamowania, tj. tarcia poślizgowego przy zablokowanych kołach pojazdu na dojeździe do skrzyżowania), rozłożonym równomiernie z intensywnością równą $p' = 0,7p = 595$ kPa na tej samej powierzchni kołowej co obciążenie pionowe (Rys. 3).

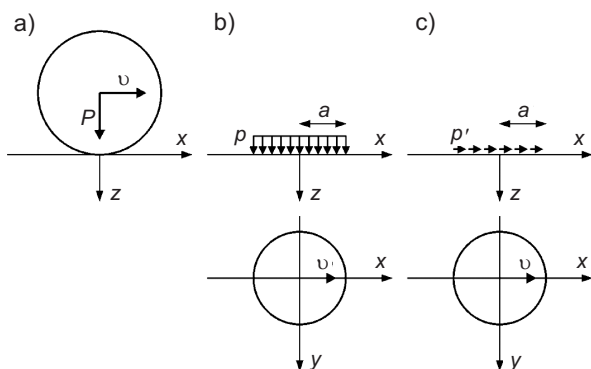


Fig. 3. The scheme of pavement load
Rys. 3. Schemat obciążenia nawierzchni

W obliczeniach przyjęto następujące wartości temperatury warstw asfaltowych odpowiednio dla pory zimowej, wiosenno-jesiennej i letniej: $T = -2^{\circ}\text{C}$, 10°C , 23°C . Parametry materiałowe mieszanek mineralno-asfaltowych użytych w warstwach asfaltowych nawierzchni KS6 i KN5: SMA 11 S PMB 45/80-55, AC 16 W MG 35/50, AC 22 P MG 35/50 (MG – asfalt wielorodzajowy, PMB – asfalt modyfikowany polimerami), ze zbioru Wytycznych Technicznych (WT) ZDW w Katowicach [16], zostały określone na podstawie badań próbek w KOAC-NPC (Holandia). Próbkę wykonano na podstawie badań typu i z materiałów SKN Sp. z o.o. Badania przeprowadzono metodą czteropunktowego zginania próbek w kształcie belek prostokątnych (4PB-PR) wykonanych z wymienionych mieszanek. W laboratorium KOAC-NPC dokonano pomiarów modułu zespolonego sztywności $E^*(\omega) = S(\omega)\exp[i\varphi(\omega)]$ ($S = |E^*|$ – moduł dynamiczny sztywności, φ – kąt przesunięcia fazowego, $\omega = 2\pi f$ – częstość kołowa cyklu obciążenia w [rad/s], f – częstotliwość cyklu w [Hz], i – jednostka urojona), zgodnie z normą [17]. W kolejnym kroku, po wykorzystaniu algorytmów numerycznych minimalizacji średniokwadratowej, wyznaczono niezbędne parametry materiałowe (podane dalej).

Wartości parametrów materiałowych E_1, E_2, η_1, η_2 modelu lepkosprężystego Bürgersa (schemat modelu fizycznego na Rys. 4) i współczynników Poissona ν warstw asfaltowych

$$a \text{ [m]} = \sqrt{\frac{P \text{ [kN]}}{\pi \cdot p \text{ [kPa]}}} = 0.1368 \text{ [m]}, \quad (1)$$

at two load speeds: $v = 60$ km/h (assumed as typical for the undisturbed traffic of heavy vehicles – marking HS) and $v = 5$ km/h (assumed for slow traffic, e.g. at the place of getting to a crossroad – marking LS). In the case of slow traffic, the incidence of a vertical load VL was analysed together with a horizontal load (HL – e.g. resulting from braking, i.e. sliding friction when the wheels of the vehicle are blocked while getting to the crossroad), uniformly distributed with an intensity equal to $p' = 0.7p = 595$ kPa on the same circular surface as the vertical load (Fig. 3).

The following temperature values for asphalt layers were adopted in the calculations, for the winter, spring and autumn, and summer season respectively: $T = -2^{\circ}\text{C}$, 10°C , 23°C . The material parameters of asphalt mixes used in asphalt pavement layers KS6 and KN5: SMA 11 S PMB 45/80-55, AC 16 W MG 35/50, AC 22 P MG 35/50 (MG – multigrade bitumen, PMB – polymer modified bitumen), from Technical Guidelines (WT) of ZDW in Katowice [16], were identified on the basis of sample testing in a KOAC-NPC (Netherlands). The samples were made on the basis of Type Testing (recipes) and of raw materials from SKN Ltd. The tests were performed using four point bending test of the cuboid shape beams (4PB-PR) made of the above mentioned mixes. In the KOAC-NPC laboratory, the measurements of the stiffness modulus $E^*(\omega) = S(\omega)\exp[i\varphi(\omega)]$ were performed, ($S = |E^*|$ – modulus of dynamic stiffness, φ – the phase angle, $\omega = 2\pi f$ – radial frequency of the load cycle in [rad/s], f – frequency of the cycle in [Hz], i – the imaginary unit), according to the standard [17]. In the next step, after using the numerical algorithms of mean square minimization, the necessary substance parameters were determined (as listed further on).

The values of the material parameters E_1, E_2, η_1, η_2 of the Bürgers viscoelastic model (scheme of a physical model in Fig. 4) and the Poisson's ratios ν of asphalt layers of pavements KS6 and KN5 were presented in Table 1. The symbols of asphalt mixtures indicated in Table 1 (also referred to in Tables 2 and 3) comprise the type of mixture, granulation and the type of binder, therefore, they are abbreviated symbols in relation to the requirements of PN-EN 13108-1,2.

nawierzchni KS6 i KN5 zestawiono w Tabl. 1. Podane w tej tablicy (a także dalej w Tabl. 2 i 3) symbole mieszanek mineralno-asfaltowych zawierają rodzaj mieszanki, uziarnienie oraz typ lepiszcza i są symbolami skróconymi w stosunku do wymagań według PN-EN 13108-1,2.

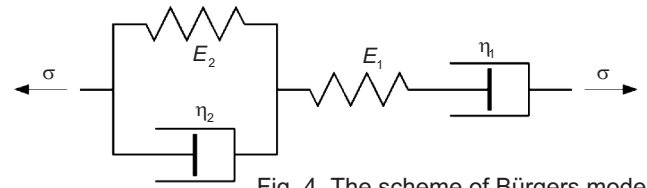


Fig. 4. The scheme of Burgers model
Rys. 4. Schemat materiału Burgersa

Table 1. Mechanical parameters of pavements KS6 and KN5 – Burgers model (B) of asphalt layers for three temperature variants of these layers

Tablica 1. Parametry materiałowe nawierzchni KS6 i KN5 – model Burgersa (B) warstw asfaltowych dla trzech wartości temperatury tych warstw

Layer – Material Warstwa – Materiał	Temperature Temperatura [°C]	Poisson's ratio Współczynnik Poissona ν	Parameters of elasticity Parametry sprężystości E_1, E_2 [MPa]	Parameters of viscosity Parametry lepkości η_1, η_2 [MPa · s]
Wearing course – SMA 11 S PMB Warstwa ścieralna – SMA 11 S PMB	-2	0.25	20482; 34122	32372; 3211
	10	0.30	11679; 7903	4608; 437
	23	0.40	7273; 4200	137; 52
Binder course – AC 16 W MG Warstwa wiążąca – AC 16 W MG	-2	0.25	20900; 56319	68126; 5134
	10	0.30	14503; 24573	30963; 2063
	23	0.40	8575; 8977	10381; 585
Base course – AC 22 P MG Podbudowa – AC 22 P MG	-2	0.25	20511; 49299	59866; 4360
	10	0.30	13904; 20290	23952; 1433
	23	0.40	7644; 7285	7631; 490

Table 2. Mechanical parameters of pavements KS6 and KN5 – Huet-Sayegh model (H-S) of asphalt layers for three temperature variants of these layers

Tablica 2. Parametry materiałowe nawierzchni KS6 i KN5 – model Hueta-Sayegha (H-S) warstw asfaltowych dla trzech wartości temperatury tych warstw

Layer – Material Warstwa – Materiał	Temperature Temperatura [°C]	Poisson's ratio Współczynnik Poissona ν	Parameters Parametry k_a, h_b	Parameters of elasticity Parametry sprężystości E_a, E_p [MPa]	Parameters of viscosity Parametry lepkości η_a, η_b [MPa · s]
Wearing course – SMA 11 S PMB Warstwa ścieralna – SMA 11 S PMB	-2	0.25	0.20; 0.61	38880; 120	30780; 73872
	10	0.30			405; 972
	23	0.40			8; 18
Binder course – AC 16 W MG Warstwa wiążąca – AC 16 W MG	-2	0.25	0.19; 0.50	35890; 110	2622167; 12848620
	10	0.30			56399; 276353
	23	0.40			952; 4666
Base course – AC 22 P MG Podbudowa – AC 22 P MG	-2	0.25	0.21; 0.51	33390; 110	1391250; 6678000
	10	0.30			29216; 140238
	23	0.40			619; 2972

Wartości parametrów materiałowych $E_a, E_p, \eta_a, \eta_b, k_a, h_b$ modelu lepko-sprężystego Hueta-Sayegha (schemat modelu fizycznego na Rys. 5) i współczynników Poissona ν warstw asfaltowych nawierzchni KS6 i KN5 zestawiono w Tabl. 2.

The values of material parameters $E_a, E_p, \eta_a, \eta_b, k_a, h_b$ of the Huet-Sayegh viscoelastic model (scheme of a physical model in Fig. 5) and the Poisson's ratios ν of the asphalt layers of pavements KS6 and KN5 were summarized in Table 2.

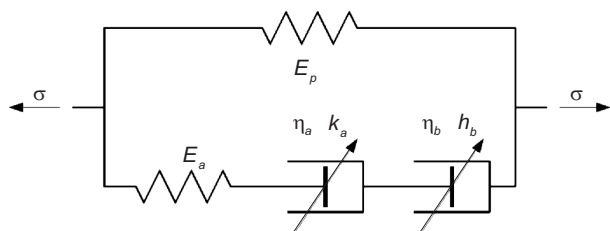


Fig. 5. The scheme of Huet-Sayegh model
Rys. 5. Schemat materiału Hueta-Sayegha

Wartości modułów sprężystości E warstw asfaltowych w modelu Hooke'a (schemat na Rys. 6) przyjęto równo modułom dynamicznym sztywności $S = |E^*|$, wyznaczonym na podstawie pomiarów w wymienionej pracy badawczej, z częstotliwością f cyklu obciążenia założoną odpowiednio do prędkości v obciążenia nawierzchni. Przyjęto mianowicie, że częstotliwość $f = 10$ Hz odpowiada ruchowi pojazdów ciężkich z typową prędkością, a częstotliwość $f = 1$ Hz odpowiada ruchowi z małą prędkością (ruch powolny). W Tabl. 3 zestawiono wartości powyższych modułów sprężystości warstw asfaltowych nawierzchni KS6 i KN5, wraz z przyjętymi modułami referencyjnymi (z Rozporządzenia [1]) oraz wartości współczynników Poissona.



Fig. 6. The scheme of Hooke's model
Rys. 6. Schemat materiału Hooke'a

The values of elastic moduli E of asphalt layers in the Hooke's model (scheme in Fig. 6) were assumed as equal to moduli of dynamic stiffness $S = |E^*|$, designated on the basis of measurements of mentioned research work at a frequency f of the load cycle assumed in relation to the velocity v of the pavement load. It was assumed that the frequency $f = 10$ Hz corresponds to the traffic of heavy vehicles with a typical speed and the frequency $f = 1$ Hz corresponds to the traffic at low speed (slow traffic). Table 3 presents values of the above elastic moduli of pavements KS6 and KN5 asphalt layers, together with the assumed reference moduli (from the Regulation [1]) and the values of Poisson's ratios.

Table 3. Mechanical parameters of asphalt layers of pavements KS6 i KN5 for the model (H) with three variants of elasticity parameters and for three temperature variants of these layers

Tablica 3. Parametry materiałowe warstw asfaltowych nawierzchni KS6 i KN5 dla modelu Hooke'a (H) z wartościami modułów sprężystości w trzech wariantach dla trzech wartości temperatury tych warstw

Layer – Material Warstwa – Materiał	Temperature Temperatura [°C]	Poisson's ratio Współczynnik Poissona ν	Modulus of elasticity Moduł sprężystości $E = S_{ref}$ [MPa]	Modulus of elasticity Moduł sprężystości $E = S_{10Hz}$ [MPa]	Modulus of elasticity Moduł sprężystości $E = S_{1Hz}$ [MPa]
Wearing course – SMA 11 S PMB Warstwa ścieralna – SMA 11 S PMB	-2	0.25	19922	19662	15037
	10	0.30	9544	9837	5467
	23	0.40	3334	2860	1004
Binder course – AC 16 W MG Warstwa wiążąca – AC 16 W MG	-2	0.25	18800	20326	17022
	10	0.30	10100	13818	10596
	23	0.40	3000	7728	5206
Base course – AC 22 P MG Podbudowa – AC 22 P MG	-2	0.25	18100	19821	16308
	10	0.30	9600	12956	9561
	23	0.40	3000	6839	4477

Note / Uwaga

S_{ref} – reference modulus of elasticity - data in Regulation 1999 [1] (data for SMA 11 originate from IBDiM) / moduł sprężystości (sztywności) referencyjny, dane z Rozporządzenia [1] (dla SMA 11 dane z IBDiM)

S_{10Hz} – modulus of dynamic stiffness for $f = 10$ Hz from measurements / moduł sztywności dynamiczny przy $f = 10$ Hz według pomiarów

S_{1Hz} – modulus of dynamic stiffness for $f = 1$ Hz from measurements / moduł sztywności dynamiczny przy $f = 1$ Hz według pomiarów

Przyjęcie takich wartości częstotliwości jako odpowiedników założonych wartości prędkości obciążenia, a więc wartości modułów sprężystości warstw asfaltowych dla obu prędkości obciążenia zapewnia, jak wykazano w artykule

The adoption of such frequency values as equivalents of the assumed load speed values, i.e. elastic moduli values of asphalt layers for both load speeds ensures, as shown in the article [18], good compatibility of maximum values of

[18], dobrą zgodność maksymalnych wartości ugięć i odkształceń istotnych przy wymiarowaniu nawierzchni otrzymanych dla obu modeli lepkosprężystych i modelu sprężystego. Wartości współczynników Poissona warstw asfaltowych założono identycznie dla wszystkich trzech modeli tych warstw według Rozporządzenia [1]. Przyjęto model sprężysty Hooke'a warstw nieasfaltowych nawierzchni KS6 i KN5 o parametrach: moduł sprężystości E i współczynnik Poissona ν o wartościach zestawionych w Tabl. 4 (według [1]).

Table 4. Values of elastic modulus and Poisson's ratio of non-asphalt layers
Tablica 4. Wartości modułu sprężystości i współczynnika Poissona materiałów warstw nieasfaltowych

Layer – Material Warstwa – Materiał	Modulus of elasticity Moduł sprężystości [MPa]	Poisson's ratio Współczynnik Poissona [-]
Sub-base (compacted unbound aggregate) Podbudowa niezwiązana (kruszywo mineralne stabilizowane mechanicznie)	400	0.30
Improved subgrade (soil stabilized with cement $R_m = 2.5$ MPa) Podłoże ulepszone (grunt stabilizowany cementem $R_m = 2.5$ MPa)	300	0.30
Subgrade (natural soil) Podłoże gruntowe (grunt rodzimy)	100	0.35

Obliczenia składowych stanu przemieszczenia, odkształcenia i naprężenia (*dsas*) przeprowadzono (za pomocą programu VEROAD [19, 20]) – dla rozważanych nawierzchni KS6 i KN5, założonych modeli mechanicznych, przyjętych wartości parametrów geometrycznych i materiałowych oraz rodzajów zarówno prędkości, jak i obciążenia – zgodnie z kartezjańskim układem współrzędnych xyz jak na Rys. 3 ($x = 0$ oznacza ustalony, ale dowolny przekrój nawierzchni, a wzdłuż osi x porusza się środek powierzchni obciążenia nawierzchni kołem pojazdu).

Wielkości jakie analizowano, zwane dalej kluczowymi, to: przemieszczenie pionowe u_z , odkształcenia poziome ε_{xx} i ε_{yy} oraz odkształcenie pionowe ε_{zz} . Z uwagi na znaczenie przy wymiarowaniu konstrukcji nawierzchni skoncentrowano się w analizach wyników obliczeń na maksymalnych wartościach ε_{xx} i ε_{yy} na spodzie warstw asfaltowych oraz na maksymalnych wartościach ε_{zz} na powierzchni podłoża gruntowego (rodzimego), zwanych odkształceniami krytycznymi. Z kolei maksymalne ugięcie u_z powierzchni górnej nawierzchni odzwierciedla w pewnym stopniu jej globalną sztywność. Podobną analizę mechanistyczną nawierzchni drogowej podatnej, ale przy znacznie mniejszym zestawie uwzględnionych w analizie czynników, zawierają m.in. prace [21] i [22].

deflections and strains, essential at dimensioning the pavements, obtained for both viscoelastic models and the elastic model. The values of Poisson's ratios of asphalt layers were assumed in the same way for all three models of these layers according to the Regulation [1]. Hooke's elastic model was adopted for non-asphalt layers of the pavements KS6 and KN5 with the following parameters: modulus of elasticity E and Poisson's ratio ν with the values listed in Table 4 (according to [1]).

The calculation of the components of the state of displacement, strain and stress (*dsas*) was performed (using VEROAD programme [19], [20]) – for the analysed pavements KS6 and KN5, the assumed mechanical models, the assumed geometrical and material parameters, as well as for the types of speed and load – according to the Cartesian coordinate system xyz as shown in Fig. 3 ($x = 0$ determines a fixed, but arbitrary cross-section of the pavement, and the center of the surface of the vehicle wheel load moves along the x -axis).

The quantities that were analysed, hereinafter referred to as the key quantities, are: u_z vertical displacement, horizontal strains ε_{xx} and ε_{yy} and vertical strain ε_{zz} . Due to the importance at dimensioning of the pavement structure, the authors focused in the analyses of the calculation results on the maximum values ε_{xx} and ε_{yy} at the bottom of the asphalt layers and on maximum values ε_{zz} on the surface of the subgrade, referred to as the critical strains. On the other hand, the maximum deflection u_z of the top surface of the pavement reflects to some extent its global stiffness. A similar mechanistic analysis of flexible road pavement, but with a much limited number of factors considered in the analysis, is presented, among others, in the papers [21] and [22].

3. WYNIKI OBLICZEŃ I ANALIZA

Na Rys. 7-10 przedstawiono wykresy kluczowych wielkości nawierzchni KS6 i KN5, w ustalonym przekroju ($x = 0$) w śladzie środka powierzchni obciążenia ($y = 0$), w funkcji położenia tego środka (w funkcji współrzędnej x), na podstawie modelu sprężystego przy obciążeniu pionowym oraz przy referencyjnych wartościach modułów sprężystości warstw asfaltowych w temperaturze 10°C .

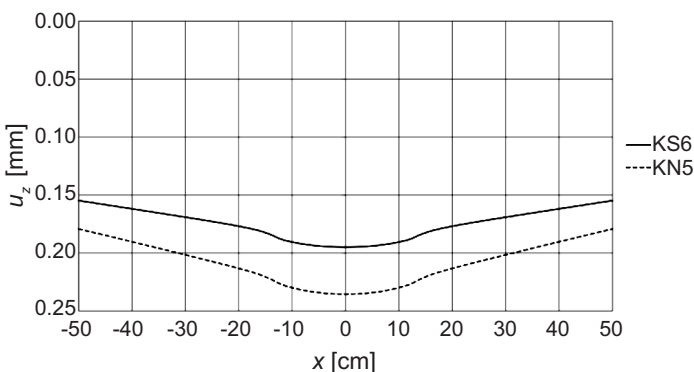


Fig. 7. The deflection u_z on the upper surface of pavement
Rys. 7. Ugięcie u_z na powierzchni górnej nawierzchni

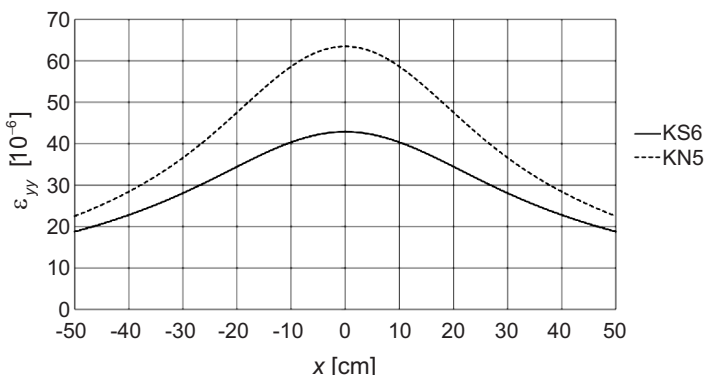


Fig. 9. The strain ε_{yy} at the bottom of asphalt layers
Rys. 9. Odkształcenie ε_{yy} na spodzie warstw asfaltowych

Na Rys. 11-12 przedstawiono przykładowe wykresy kluczowych odkształceń dla nawierzchni KS6 i KN5 w przekroju nawierzchni ($x = 0$) pod środkiem powierzchni obciążenia ($x = 0, y = 0$), w funkcji odległości od powierzchni górnej nawierzchni (w funkcji współrzędnej z), na podstawie modelu sprężystego przy obciążeniu pionowym oraz przy referencyjnych wartościach modułów sprężystości warstw asfaltowych w temperaturze 10°C .

3. CALCULATION RESULTS AND ANALYSIS

Figures 7-10 are graphs of key quantities of the pavements KS6 and KN5, at a predetermined section ($x = 0$) of the track of the load surface centre ($y = 0$) as a function of the position of the centre (as a function of the x coordinate), based on the elastic model at a vertical load and the reference values of elastic moduli of the asphalt layers at the temperature of 10°C .

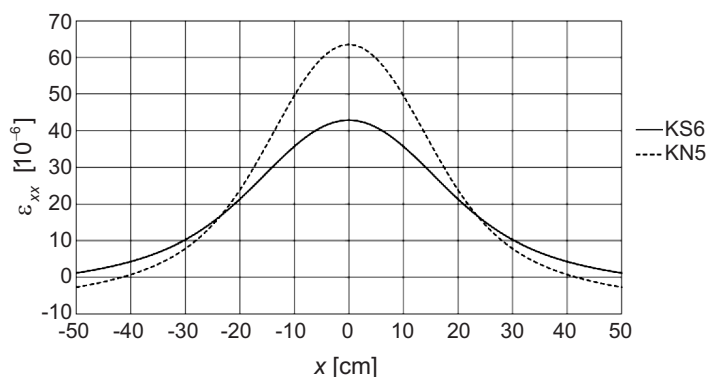


Fig. 8. The strain ε_{xx} at the bottom of asphalt layers
Rys. 8. Odkształcenie ε_{xx} na spodzie warstw asfaltowych

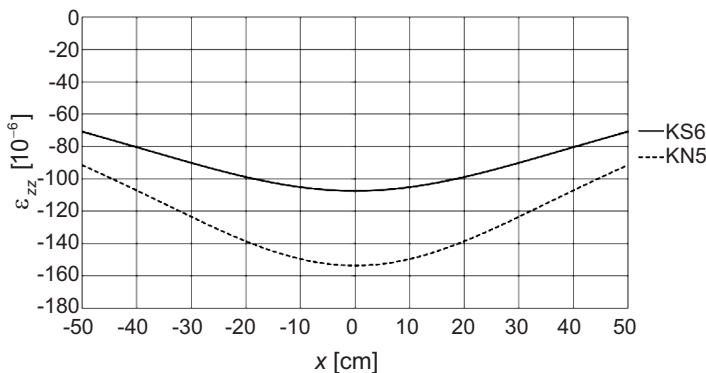


Fig. 10. The strain ε_{zz} on the surface of natural soil subgrade
Rys. 10. Odkształcenie ε_{zz} na powierzchni podłoża gruntowego rodzimego

Figures 11-12 are sample graphs of key strains for the pavements KS6 and KN5 at a pavement section ($x = 0$) below the load surface centre ($x = 0, y = 0$) as a function of a distance from the upper surface of the pavement (as a function of a z coordinate) based on the elastic model at the vertical load and the reference values of elastic moduli of the asphalt layers at the temperature of 10°C .

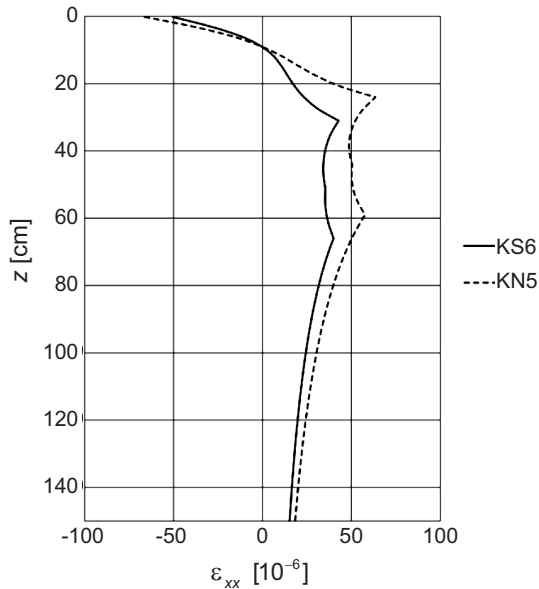


Fig. 11. The strain $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy}$ along the axis z
 Rys. 11. Odształcenie $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy}$ wzdłuż osi z

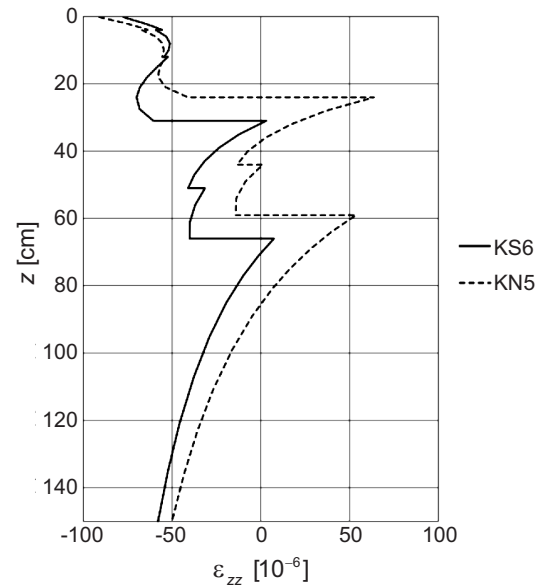


Fig. 12. The strain ε_{zz} along the axis z
 Rys. 12. Odształcenie ε_{zz} wzdłuż osi z

Widać wyraźnie (Rys. 11), że rozkład odkształceń ε_{xx} po grubości w układzie warstw asfaltowych konstrukcji KN5 nawierzchni jest charakterystyczny dla stanu zginania płyty, podczas gdy w konstrukcji KS6 rozkład ten jest bardziej zbliżony do charakterystycznego dla układu warstw jako ośrodka trójwymiarowego. Wynika to z mniejszej grubości całkowitej układu warstw asfaltowych nawierzchni w konstrukcji KN5.

W Tabl. 5-6 zamieszczono maksymalne wartości ugięć i odkształceń krytycznych nawierzchni KS6 i KN5 na podstawie modeli Hooke'a (H), Bürgersa (B) i Hueta-Sayegha (H-S) przy obciążeniu pionowym VL dla obu wariantów prędkości (HS i LS) oraz przy obciążeniu pionowym i poziomym łącznie (VL+HL) dla ruchu powolnego LS – z uwzględnieniem trzech wartości temperatury warstw asfaltowych.

W temperaturze warstw asfaltowych 23°C występuje odpowiednio 2,1 razy większe krytyczne odkształcenie poziome na spodzie warstw asfaltowych niż w temperaturze -2°C przy obciążeniu z typową prędkością oraz 2,4 razy większe przy ruchu powolnym. Podobnie, maksymalne odkształcenie pionowe na powierzchni podłoża gruntowego przy temperaturze warstw asfaltowych 23°C jest 1,7-1,8 razy większe niż w temperaturze -2°C. Jest tu widoczny w sposób bezpośredni wpływ spadku sztywności układu warstw asfaltowych, co w sposób strukturalny osłabia całą konstrukcję i generuje większe odkształcenia.

It can be seen (Fig. 11) that the strain distribution ε_{xx} in the thickness in the system of asphalt layers of the pavement structure KN5 is characteristic for the state of bending a plate, while in the pavement structure KS6 this distribution is similar to a three-dimensional continuum, characteristic for this layer system. This is due to the smaller total thickness of the asphalt layers in the KN5 pavement structure.

Tables 5-6 show maximum deflections and critical strains of the pavements KS6 and KN5 on the basis of the Hooke's model (H), Bürgers model (B) and Huet-Sayegh model (H-S) at a vertical load VL for both variants of speed (HS and LS) and at a vertical and horizontal load combination (VL + HL) for slow traffic LS, taking into account the three temperature values of asphalt layers.

At temperature 23°C of the asphalt layers, occurs respectively 2.1 times more critical horizontal strain at the bottom of the asphalt layers than at temperature of -2°C at load of typical speed, and 2.4 times higher than in slow traffic. Similarly, the maximum vertical strain on the surface of subgrade at temperature of 23°C of the asphalt layers is 1.7-1.8 times greater than at a temperature of -2°C. It can be seen, in a direct way, the impact of the stiffness decrease of the set of asphalt layers, which in a structured way weakens the entire structure and generates greater strains.

Table 5. Maximum deflections and critical strains of pavements according to the Hooke's model (H) for various elastic moduli of asphalt layers

Tablica 5. Maksymalne ugięcia i odkształcenia krytyczne nawierzchni według modelu sprężystego H przy różnych modułach sprężystości warstw asfaltowych

No. Lp.	Pavement variant - Model H Wariant nawierzchni - Model H	Temperature Temperatura [°C]	Deflection Ugięcie u_z [mm]	Strain Odkształcenie ε_{xx} [10^{-6}]	Strain Odkształcenie ε_{yy} [10^{-6}]	Strain Odkształcenie ε_{zz} [10^{-6}]
1	KS6 Obciążenie / Load: VL Moduły / Moduli: S_{ref}	-2	0.160	27.1	27.1	-77.4
2		10	0.195	42.9	42.9	-107.4
3		23	0.275	87.0	87.0	-173.3
4	KN5 Obciążenie / Load: VL Moduły / Moduli: S_{ref}	-2	0.197	40.7	40.7	-114.0
5		10	0.235	63.5	63.5	-153.6
6		23	0.319	125.2	125.2	-232.9
7	KS6 Obciążenie / Load: VL Moduły / Moduli: S_{10Hz} (HS)	-2	0.157	25.6	25.6	-74.8
8		10	0.181	35.3	35.3	-95.2
9		23	0.221	54.0	54.0	-130.2
10	KN5 Obciążenie / Load: VL Moduły / Moduli: S_{10Hz} (HS)	-2	0.194	38.6	38.6	-111.0
11		10	0.221	52.9	52.9	-139.0
12		23	0.266	80.1	80.1	-185.8
13	KS6 Obciążenie / Load: VL Moduły / Moduli: S_{1Hz} (LS)	-2	0.168	29.9	29.9	-83.9
14		10	0.202	44.8	44.8	-113.4
15		23	0.262	72.3	72.3	-160.2
16	KN5 Obciążenie / Load: VL Moduły / Moduli: S_{1Hz} (LS)	-2	0.206	44.9	44.9	-123.4
17		10	0.245	66.7	66.7	-163.8
18		23	0.310	106.2	106.2	-224.1
19	KS6 Obciążenie / Load: VL+HL Moduły / Moduli: S_{1Hz} (LS)	-2	0.169	30.5	30.9	-84.9
20		10	0.203	46.0	46.8	-115.3
21		23	0.263	74.7	77.4	-164.0
22	KN5 Obciążenie / Load: VL+HL Moduły / Moduli: S_{1Hz} (LS)	-2	0.207	45.6	46.5	-124.8
23		10	0.247	68.2	69.9	-166.3
24		23	0.312	109.2	114.4	-229.3

Table 6. Maximum deflections and critical strains of pavements by models: Bürgers (B) and Huet-Sayegh (H-S) of asphalt layers

Tablica 6. Maksymalne ugięcia i odkształcenia krytyczne nawierzchni według modeli B i H-S warstw asfaltowych

No. Lp.	Pavement variant - Model Wariant nawierzchni - Model	Temperature Temperatura [°C]	Deflection Ugięcie u_z [mm]	Strain Odkształcenie ε_{xx} [10^{-6}]	Strain Odkształcenie ε_{yy} [10^{-6}]	Strain Odkształcenie ε_{zz} [10^{-6}]
1	KS6 Obciążenie / Load: VL-HS Model B	-2	0.163	25.5	27.4	-79.1
2		10	0.191	34.9	38.9	-103.9
3		23	0.231	52.0	59.2	-142.9

Table 6 (continued). Maximum deflections and critical strains of pavements by models: Bürgers (B) and Huet-Sayegh (H-S) of asphalt layers

Tablica 6 (cd.). Maksymalne ugięcia i odkształcenia krytyczne nawierzchni według modeli B i H-S warstw asfaltowych

No. Lp.	Pavement variant - Model Wariant nawierzchni - Model	Temperature Temperatura [°C]	Deflection Ugięcie u_z [mm]	Strain Odkształcenie ε_{xx} [10^{-6}]	Strain Odkształcenie ε_{yy} [10^{-6}]	Strain Odkształcenie ε_{zz} [10^{-6}]
4	KN5 Obciążenie / Load: VL-HS Model B	-2	0.199	38.1	40.7	-115.9
5		10	0.231	51.5	56.9	-149.0
6		23	0.275	75.6	85.0	-199.0
7	KS6 Obciążenie / Load: VL-LS Model B	-2	0.177	30.1	33.0	-91.5
8		10	0.213	44.7	49.3	-124.3
9		23	0.270	72.9	80.5	-177.3
10	KN5 Obciążenie / Load: VL-LS Model B	-2	0.215	44.7	48.6	-132.3
11		10	0.255	65.5	71.6	-175.9
12		23	0.316	104.6	115.1	-243.0
13	KS6 Obciążenie / Load: VL+HL Model B	-2	0.177	32.0	33.1	-92.5
14		10	0.212	48.5	49.5	-126.0
15		23	0.274	80.6	82.0	-181.0
16	KN5 Obciążenie / Load: VL+HL Model B	-2	0.215	47.2	48.8	-133.5
17		10	0.255	70.7	72.3	-178.0
18		23	0.321	114.6	118.1	-247.4
19	KS6 Obciążenie / Load: VL-HS Model H-S	-2	0.158	23.8	25.5	-75.5
20		10	0.182	31.4	35.0	-96.7
21		23	0.222	47.5	54.6	-135.3
22	KN5 Obciążenie / Load: VL-HS Model H-S	-2	0.194	35.5	38.0	-111.0
23		10	0.221	46.4	51.4	-139.5
24		23	0.265	68.9	78.8	-190.1
25	KS6 Obciążenie / Load: VL-LS Model H-S	-2	0.172	28.2	30.9	-87.3
26		10	0.206	40.7	46.3	-119.5
27		23	0.260	66.1	76.4	-170.3
28	KN5 Obciążenie / Load: VL-LS Model H-S	-2	0.209	41.8	45.6	-126.7
29		10	0.248	59.4	67.2	-169.4
30		23	0.305	94.5	108.4	-232.4
31	KS6 Obciążenie / Load: VL+HL Model H-S	-2	0.172	29.4	31.3	-88.1
32		10	0.206	43.2	46.8	-120.7
33		23	0.261	73.0	78.4	-173.5
34	KN5 Obciążenie / Load: VL+HL Model H-S	-2	0.209	43.5	46.3	-127.7
35		10	0.248	63.1	68.0	-170.9
36		23	0.306	104.5	111.9	-236.3

Dla modelu sprężystego, w warunkach ruchu powolnego w porównaniu z ruchem z prędkością typową, krytyczne odkształcenia poziome na spodzie warstw asfaltowych w KN5 (w temperaturze warstw asfaltowych 23°C) zwiększają się z 80 $\mu\epsilon$ do 106 $\mu\epsilon$ (tj. o ponad 30%). W podobnie znaczący sposób uwidocznia się zmniejszenie prędkości obciążenia na konstrukcję KS6, w której odkształcenia generujące spełkania zmęczeniowe w temperaturze warstw asfaltowych 23°C, wzrastają z 54 $\mu\epsilon$ do 72 $\mu\epsilon$ (też o ponad 30%). Wartości krytycznych odkształceń rozciągających na spodzie warstw asfaltowych różnią się znacząco przy zmianie grubości podbudowy asfaltowej: 106 $\mu\epsilon$ w KN5 (12 cm) wobec 72 $\mu\epsilon$ w KS6 (19 cm) – w temperaturze warstw asfaltowych 23°C i w ruchu powolnym. Należy dodać, że w podobny sposób kształtują się podane relacje wyników obliczeń w przypadku zastosowania modeli lepkosprężystych (Bürgersa i Hueta-Sayegha) warstw asfaltowych.

W przypadku nawierzchni znajdującej się w warunkach ruchu powolnego z występującym obciążeniem poziomym od hamowania pojazdów widoczne jest zwiększenie odkształceń krytycznych na spodzie warstw asfaltowych w stosunku do ruchu powolnego bez hamowania, ale zwiększenie nie jest tak duże jak wzrost odkształceń w ruchu powolnym w stosunku do ruchu z prędkością typową. Przykładowo, dla modelu sprężystego przy temperaturze warstw asfaltowych 23°C, w warunkach ruchu powolnego z hamowaniem w stosunku do ruchu powolnego bez hamowania, odkształcenia w KN5 zwiększają się z 106 $\mu\epsilon$ na 114 $\mu\epsilon$. Nawierzchnia KS6 zachowuje większą rezerwę sztywności, ponieważ przy większej grubości układu warstw asfaltowych powstające odkształcenia krytyczne zwiększają się tylko z 72 $\mu\epsilon$ na 77 $\mu\epsilon$.

Zmniejszenie o 7 cm grubości układu warstw asfaltowych w konstrukcji KN5 w stosunku do konstrukcji KS6 powoduje znaczący wzrost maksymalnych odkształceń na spodzie tych warstw oraz na powierzchni górnej podłoża, rzędu 1,4-1,5 razy. Maksymalne ugięcia zaś wzrastają około 1,2 razy. Interesujące jest jednak, że zmiany te nie zależą lub zależą nieznacznie od rodzaju i prędkości obciążenia oraz od rodzaju przyjętego w obliczeniach modelu (Tabl. 7).

Nieco większa jest zależność tych względnych zmian od temperatury. Jednak, mimo że wartości maksymalne kluczowych wielkości dla skrajnych wartości temperatury -2°C i +23°C warstw asfaltowych są znacząco różne (dla danego wariantu modelu mechanicznego oraz obciążenia i jego prędkości), to różnice pomiędzy omawianymi ilorazami tych wielkości (KN5/KS6) nie są duże: do 4% w przypadku ilorazu maksymalnych wartości ugięć u_z i ilorazu maksymalnych wartości odkształceń poziomych na spodzie warstw

For the elastic model, in the conditions of slow traffic compared to the traffic with the typical speed, the critical horizontal strains at the bottom of the asphalt layers in KN5 (in the temperature 23°C of asphalt layers) increase from 80 $\mu\epsilon$ to 106 $\mu\epsilon$ (i.e. more than 30%). The same is evidenced by significantly reducing the load speed on the KS6 structure, in which the strains generating fatigue cracking at the temperature of 23°C of the asphalt layers increase from 54 $\mu\epsilon$ to 72 $\mu\epsilon$ (also more than 30%). The values of the critical tensile strains at the bottom of the asphalt layers differ significantly when changing the thickness of the asphalt base course: 106 $\mu\epsilon$ in KN5 (12 cm) to 72 $\mu\epsilon$ in KS6 (19 cm) – at the temperature 23°C of the asphalt layers and in slow traffic. It should be added that the presented relationships of the calculations results are formed in a similar ways in case of using viscoelastic models (of Bürgers and Huet-Sayegh) of the asphalt layers.

In case of the pavement in the slow traffic conditions occurring with horizontal load of vehicle braking, the increase of critical strains can be seen at the bottom of the asphalt layers in relation to the slow traffic without braking, but the increase is not as great as the increase of strains in slow traffic in relation to the traffic with the typical speed. For example, for the elastic model at a temperature of 23°C of asphalt layers, in the conditions of slow traffic with braking in relation to the slow traffic without braking, the strains in KN5 increase from 106 $\mu\epsilon$ to 114 $\mu\epsilon$. The pavement KS6 maintains a greater reserve of stiffness, because at a greater thickness of the asphalt layers, the critical strains increase only from 72 $\mu\epsilon$ to 77 $\mu\epsilon$.

Reducing by 7 cm the thickness of the asphalt layers in the KN5 structure in relation to the structure KS6 causes a significant increase of the maximum strains at the bottom of the layers and on the top surface of subgrade, between 1.4-1.5 times. The maximum deflections increase about 1.2 times. It is interesting, however, that these changes do not depend or depend only to some extent on the type and speed of the load and on the type of the model adopted to the calculations (Table 7).

There is a slightly greater dependence of these relative changes on the temperature. However, although the maximum values of key quantities for temperature extremes -2°C and +23°C of asphalt layers are significantly different (for the assumed variant of the mechanical model and load speed), the differences between the quotients of these quantities (KN5/KS6) are not large: up to 4% for a quotient of the maximum u_z deflection values and the quotient of the maximum horizontal strains on the bottom of asphalt layers ϵ_{xy} and up to 6.5% in case of the quotient of

asfaltowych ε_{yy} oraz do 6,5% w przypadku ilorazu maksymalnych wartości odkształceń pionowych na powierzchni podłoża gruntowego ε_{zz} . Można także zauważyć, że im wyższa temperatura nawierzchni, tym mniejsze są różnice między odkształceniami powstającymi w nawierzchniach KN5 i KS6.

the maximum value of the vertical strains on the subgrade surface subgrade ε_{zz} . It can also be seen that the higher the pavement temperature, the smaller are the differences between the strains arising in the pavements KN5 and KS6.

Table 7. The quotients of maximum deflections and critical strains of pavement KN5 to analogical values of pavement KS6

Tablica 7. Ilorazy maksymalnych ugięć i odkształceń krytycznych nawierzchni KN5 do analogicznych wielkości nawierzchni KS6

No. Lp.	Load variant - Model Wariant obciążenia - Model	Temperature Temperatura [°C]	$\frac{u_z^{KN5}}{u_z^{KS6}}$	$\frac{\varepsilon_{xx}^{KN5}}{\varepsilon_{xx}^{KS6}}$	$\frac{\varepsilon_{yy}^{KN5}}{\varepsilon_{yy}^{KS6}}$	$\frac{\varepsilon_{zz}^{KN5}}{\varepsilon_{zz}^{KS6}}$
1	Obciążenie / Load: VL-HS Model H	-2	1.24	1.51	1.51	1.48
2		10	1.22	1.50	1.50	1.46
3		23	1.20	1.48	1.48	1.43
4	Obciążenie / Load: VL-HS Model B	-2	1.22	1.49	1.49	1.47
5		10	1.21	1.48	1.46	1.43
6		23	1.19	1.45	1.44	1.39
7	Obciążenie / Load: VL-HS Model H-S	-2	1.23	1.49	1.49	1.47
8		10	1.21	1.48	1.47	1.44
9		23	1.19	1.45	1.44	1.41
10	Obciążenie / Load: VL-LS Model H	-2	1.23	1.50	1.50	1.47
11		10	1.21	1.49	1.49	1.44
12		23	1.18	1.47	1.47	1.40
13	Obciążenie / Load: VL-LS Model B	-2	1.21	1.49	1.47	1.45
14		10	1.20	1.47	1.45	1.42
15		23	1.17	1.43	1.43	1.37
16	Obciążenie / Load: VL-LS Model H-S	-2	1.22	1.48	1.48	1.45
17		10	1.20	1.46	1.45	1.42
18		23	1.17	1.43	1.42	1.36
19	Obciążenie / Load: VL+HL Model H	-2	1.22	1.50	1.50	1.47
20		10	1.22	1.48	1.49	1.44
21		23	1.19	1.46	1.48	1.40
22	Obciążenie / Load: VL+HL Model B	-2	1.21	1.49	1.47	1.45
23		10	1.20	1.47	1.45	1.42
24		23	1.17	1.43	1.43	1.37
25	Obciążenie / Load: VL+HL Model H-S	-2	1.22	1.48	1.48	1.45
26		10	1.20	1.46	1.45	1.42
27		23	1.17	1.43	1.43	1.36

Prezentowane wyniki obliczeń dotyczące kluczowych odkształceń przenoszą się odpowiednio na wyznaczone trwałości nawierzchni (ze względu na spękania zmęczeniowe i deformacje strukturalne – dwa podstawowe kryteria wymiarowania konstrukcji nawierzchni). Większość stosowanych formuł empirycznych określania wymienionych trwałości (mającej w rozważanej konstrukcji podstawowe znaczenie) ma postać [23]:

$$N_z = Ck_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_a} \right)^{k_2} \left(\frac{1}{E} \right)^{k_3}, \quad N_d = Dk_4 \left(\frac{1}{\varepsilon_p} \right)^{k_5}, \quad (2)$$

gdzie:

- N_z, N_d – trwałość zmęczeniowa i deformacyjna, mierzona liczbą przejazdów osi standardowej o naciśku 100 kN (do umownego zniszczenia nawierzchni),
- C, D – współczynniki zależne od materiału warstwy, w której generują się zniszczenia (mogą one zależeć od parametrów fizycznych materiału tej warstwy),
- $k_1 \div k_5$ – współczynniki regresji (k_1, k_4 – zawierają współczynniki kalibracyjne, zależne od jednostek),
- E – moduł sztywności warstwy, w której generują się spękania zmęczeniowe,
- $\varepsilon_a, \varepsilon_p$ – maksymalna wartość odkształcenia rozciągającego spośród ε_{xx} i ε_{yy} na spodzie warstwy, w której generują się spękania zmęczeniowe oraz maksymalna wartość odkształcenia ściskającego ε_{zz} dla danego obciążenia kołem pojazdu (odkształcenia krytyczne).

Zatem, jako że k_3 i k_5 mają zwykle wartości znacząco większe od jedności, trwałości obliczeniowe są wrażliwe na zmianę wartości odkształceń krytycznych. Na przykład, we wzorach Instytutu Asfaltowego $k_3 = 3,291$ i $k_5 = 4,484$, a więc wzrost odkształceń krytycznych ε_a i ε_p o 10% skutkuje spadkiem trwałości zmęczeniowej o 27%, a trwałości deformacyjnej o 35%.

4. WNIOSKI

Przedstawione wyniki obliczeń i ich analiza pozwalają sformułować następujące wnioski

1. Wpływ takich czynników jak temperatura warstw asfaltowych oraz prędkość obciążenia na bezwzględne wartości kluczowych wielkości dla każdej z nawierzchni KN5 i KN6 jest bardzo znaczący. Ponadto wpływ dodatkowego obciążenia poziomego od hamowania przy ruchu powolnym na maksymalne wartości kluczowych wielkości jest

The presented calculation results of the key strains refer respectively to the determined pavement durability (due to fatigue cracking and due to structural deformations – two basic criteria of pavement structure dimensioning). Most of the empirical formulas used in the determination of the durability (having fundamental importance in the considered structure) have the form [23]:

where:

- N_z, N_d – fatigue and deformation durability, as measured by the number of passings of the standard axle with the load of 100 kN (up to the contractual destruction of the pavement),
- C, D – coefficients dependent on the layer material, in which the destruction is generated (they may depend on the physical characteristics of the material of this layer),
- $k_1 \div k_5$ – regression coefficients (k_1, k_4 – include calibration coefficients, dependent on the units),
- E – stiffness modulus of the layer in which fatigue cracks are generated,
- $\varepsilon_a, \varepsilon_p$ – the maximum value of the tensile strain among ε_{xx} and ε_{yy} on the bottom of the layer, in which fatigue cracks are generated and the maximum value of the compressive strain ε_{zz} for the vehicle wheel load (critical strains).

Thus, since k_3 and k_5 have usually values significantly greater than unity, the calculation durability values are sensitive to changes in the value of critical strains. For example, in the formulas of the Asphalt Institute $k_3 = 3.291$ and $k_5 = 4.484$, and therefore the increase of the critical strains ε_a and ε_p by 10%, results in the decrease in fatigue durability by 27%, and in the deformation durability by 35%.

4. CONCLUSIONS

The results of the calculations and their analysis allow for the formation of the following conclusions:

1. The influence of such factors as the temperature of asphalt layers and the load speed on the absolute values of key quantities for each KN5 and KN6 pavement is very significant. Moreover, the impact of the additional horizontal load of braking in the slow traffic on the maximum values of key quantities is noticeable, however, it

zauważalny, jednakże znacznie mniejszy niż wpływ prędkości obciążenia. Niezbyt duże jest zróżnicowanie wartości kluczowych wielkości w zależności od modelu warstw asfaltowych, co jest efektem pozytywnym, gdyż świadczy o tym, że zastosowane modele są w dużym stopniu równoważne (co nie znaczy jednak, że otrzymane wyniki są identyczne). Stosunkowo bliskie są maksymalne wartości kluczowych wielkości dla modelu Hooke'a i Hueta-Sayegha.

2. Interesujące i warte podkreślenia jest to, że o ile wpływ na bezwzględne wartości analizowanych wielkości kluczowych takich rozpatrywanych czynników jak temperatura warstw asfaltowych i prędkość obciążenia jest bardzo duży dla obu nawierzchni KS6 i KN5, to wpływ wymienionych czynników na ilorazy (względne zmiany) wartości tych wielkości odpowiednio dla nawierzchni KS6 i dla nawierzchni KN5 jest nieznaczący lub drugorzędny. Co więcej, względne zmiany poszczególnych analizowanych wielkości przy zmianie grubości podbudowy asfaltowej są niemal identyczne dla wszystkich trzech modeli warstw asfaltowych.

Sformułowane spostrzeżenia i wnioski o charakterze poznawczym mają między innymi następujące implikacje praktyczne:

3. Prezentowane wyniki obliczeń dotyczące kluczowych odkształceń przenoszą się odpowiednio na wyznaczone trwałości nawierzchni (ze względu na spękania zmęczeniowe i deformacje strukturalne). Przy tym wyniki te są niezależne od metody wyznaczania trwałości – zarówno metodą badań zmęczeniowych mieszanki z podbudowy asfaltowej, jak i metodą obliczeniową za pomocą formuł empirycznych. Według tych formuł zmiana wartości kluczowych odkształceń skutkuje spotęgowaną zmianą trwałości obliczeniowych.
4. Przy dużym ruchu ciężkim powinno się uwzględniać w projektowaniu nawierzchni to, że znaczący wzrost odkształceń w strefie ruchu powolnego oznacza znaczne (spotęgowane) zmniejszenie trwałości nawierzchni w tej strefie. Oznacza to także, że strefy ruchu powolnego (np. skrzyżowania) powinny być projektowane indywidualnie z uwzględnieniem przewidywanych wartości prędkości pojazdów.
5. Przy wymiarowaniu nawierzchni, jeśli potrzebne jest iteracyjne przeliczanie konstrukcji nawierzchni dla wielu wariantów grubości warstw, nie trzeba każdorazowo (dla każdego wariantu) wyznaczać kluczowych wielkości dla wszystkich wartości prędkości obciążenia i temperatury warstw asfaltowych, jakie należy w projektowaniu nawierzchni przyjąć.

is much smaller than the impact of load speed. There are no significant differences in the key values depending on the model of asphalt layers, which is a positive effect, as it gives evidence that the models used are largely equivalent (which does not mean, however, that the results obtained are identical). The maximum values of the key quantities for the Hooke's model and Huet-Sayegh model are relatively similar.

2. It is interesting and worth emphasizing that although the impact on the absolute values of the analysed key quantities of the considered factors such as the temperature of the asphalt layers and the load speed is very high for both pavements KS6 and KN5, the impact of these factors on the quotients (relative changes) of the values of these quantities, respectively for the KS6 and KN5 pavements, is insignificant or secondary. Moreover, the relative changes in individual analysed values when changing the thickness of the asphalt base course are almost identical for all three models of the asphalt layers.

The formulated observations and conclusions have, inter alia, the following practical implications:

3. The presented results of the calculations of the key strains refer respectively to the determined pavement durability (due to fatigue cracking and structural deformations). Besides, these results are independent of the method for determining the durability both by fatigue testing of the mix from the asphalt base course, as well as by the method of calculation using empirical formulas. According to these formulas, the change in the key strains results in the enhanced change of computational durability.
4. It should be taken into account in the design of the pavement with large heavy traffic that the significant increase in the strains in the slow traffic zone means significant (enhanced) reduction in the durability of the pavement in this zone. This also means that the zone of slow traffic (e.g. crossroads) should be designed individually, taking into account the expected values of the vehicles speed.
5. When dimensioning the pavement, if the iterate conversion of pavement structures for many variants of the thickness of the layers is needed, it is not necessary to determine each time (for each variant) the key quantities for all values of load speed and the temperature of asphalt layers which should be adopted in the pavement design.

6. Stosowanie modelu sprężystego Hooke'a warstw nawierzchni przy ich wymiarowaniu jest uprawnione, jeśli jako moduły sprężystości warstw asfaltowych przyjąć moduły sztywności dynamicznej mieszanek mineralno-asfaltowych tych warstw dla częstotliwości odpowiadającej prędkości obciążenia. Z drugiej strony, niestosowanie w praktyce wymiarowania nawierzchni modeli lepkosprężystych z uwagi na ich niedostateczną weryfikację (walidację) wydaje się nieuzasadnione.

6. The use of the elastic Hooke's model of the pavement layers at their dimensioning is possible, if as the elastic moduli of asphalt layers dynamic stiffness moduli of asphalt mixtures of these layers are adopted for the frequency corresponding to the load speed. On the other hand, the fact of not using in pavement dimensioning the viscoelastic models due to their lack of verification (validation) seems unjustified.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. Załącznik 5. Projektowanie konstrukcji nawierzchni dróg. Dziennik Ustaw RP nr 43. poz. 430. Warszawa, 1999
- [2] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. GDDP - IBDiM, Warszawa, 1997
- [3] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. GDDKiA - Katedra Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2013
- [4] *Reiner M., Ward A.G.*: Building Materials. Their Elasticity and Inelasticity. North Holland Publishing Co., Amsterdam - New York, 1954
- [5] *Secor K.E., Monismith C.L.*: Viscoelastic Properties of Asphalt Concrete Pavements. Proceedings, Highway Research Board, 1962, 728-760
- [6] *Nowacki W.*: Teoria pełzania. Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1963
- [7] *Huang Y.H.*: Stresses and Displacements in Viscoelastic Layered Systems under Circular Loaded Areas. International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Second Proceedings, University of Michigan, 1968, 225-244
- [8] *Judycki J.*: Modele reologiczne betonu asfaltowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej. Budownictwo Lądowe, **368**, 39, 1984, 124-147
- [9] *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
- [10] *Lee H.J., Kim Y.R.*: A Uniaxial Viscoelastic Constitutive Model for Asphalt Concrete under Cyclic Loading. Journal of Engineering Mechanics, **124**, 1, 1998, 32-40
- [11] *Zbiciak A.*: Mathematical description of rheological properties of asphalt-aggregate mixes. Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, **61**, 1, 2013, 65-72
- [12] *Nagórski R., Wiśniakowski P., Błażejowski K., Nagórska M.*: Analiza porównawcza właściwości materiałów Bùrgersa, Boguslavskich i Zenera w świetle testów naprężenia i odkształcenia w odniesieniu do właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **11**, 1, 2012, 5-32
- [13] *Pronk A.C.*: Revival of the Huet-Sayegh Response Model. DWW-2003-29. RHED. Delft, 2003
- [14] *Pronk A.C.*: The Variable Dashpot. DWW-2003-030. RHED. Delft, 2003
- [15] Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych. GDDP - IBDiM. Warszawa, 2001. GDDKiA - IBDiM. Warszawa, 2013
- [16] Wytyczne Techniczne: WT SMA 11 S. WT AC 16 W. WT AC 22 P. Zarząd Dróg Wojewódzkich w Katowicach, Katowice, 2013
- [17] PN-EN 12697-26: Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco - Część 26: Sztywność
- [18] *Nagórski R., Nagórska M., Błażejowski K.*: Model sprężysty w projektowaniu nawierzchni drogowej podatnej a właściwości lepkosprężyste warstw asfaltowych. Logistyka, 3, 2014, 4540-4553
- [19] *Hopman P.C.*: The Visco-Elastic Multilayer Program VEROAD. Heron, **41**, 1, 1996, 72-80
- [20] VEROAD. User Manual. KOAC-NPC. The Netherlands, April 2000
- [21] *Błażejowski K., Nilsson R., Hopman P., Sybilski D.*: Analiza polskiej typowej nawierzchni podatnej przy zastosowaniu modelu lepkosprężystego i programu VEROAD. 2nd International Conference Durable and Safe Road Pavements, Kielce, 1996, 12-23
- [22] *Mejtun Ł., Judycki J.*: Analiza konstrukcji nawierzchni asfaltowych oparta o teorię lepkosprężystości. Drogownictwo, **LXVII**, 10, 2012, 315-320
- [23] *Judycki J.*: Budowa i kalibracja modeli spekań zmęczenia warstw asfaltowych nawierzchni drogowych w mechanistyczno-empirycznej metodzie AASHTO 2004. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **10**, 4, 2011, 31-53