

SEOYOUNG CHO¹⁾ÉVA LAKATOS²⁾

FINITE ELEMENT AND FATIGUE ANALYSIS OF FLEXIBLE PAVEMENTS BASED ON TEMPERATURE PROFILE MODELING

ANALIZA MES I ZMĘCZENIOWA NAWIERZCHNI PODATNYCH NA PODSTAWIE MODELOWANIA ROZKŁADU TEMPERATURY

STRESZCZENIE. W przypadku podatnych nawierzchni drogowych wpływ temperatury ma bardzo duże znaczenie ze względu na właściwości lepiscza zastosowanego w warstwach asfaltowych. Aby wyeliminować w obliczeniach zmienność właściwości mechanicznych warstw asfaltowych, zastosowano temperaturę ekwiwalentną – stałą pojedynczą wartość temperatury, przy której szkoda zmęczeniowa w ciągu roku powinna w założeniu odpowiadać łącznej wielkości szkód zmęczeniowych przy rzeczywistych zmiennych warunkach pogodowych. Celem przedstawionych badań było obliczeniowe porównanie pracy nawierzchni przy realistycznych danych temperaturowych z okresu jednego roku z wynikami tradycyjnej metody z temperaturą ekwiwalentną. Dane temperaturowe pozyskano z założonej wcześniej stacji meteorologicznej. Lepkość asfaltu i moduł dynamiczny mieszanki mineralno-asfaltowej zostały określone na podstawie profilu temperatury w warstwach asfaltowych podzielonych na 19 podwarstw. Taki podział miał na celu lepsze odzwierciedlenie zmian właściwości mechanicznych warstw asfaltowych w zależności od głębokości. Porównanie z prostszymi obliczeniami wykonanymi z zastosowaniem temperatury ekwiwalentnej wykazało, że opisany w artykule bardziej szczegółowy model może zapewnić lepszą prognozę wytrzymałości zmęczeniowej nawierzchni. Duży nacisk położono na dyskretyzację warstw asfaltowych w celu odzwierciedlenia zmienności temperatury i jej wpływu na właściwości mechaniczne mieszanek asfaltowych. Temperatura każdej z podwarstw została oszacowana zgodnie z zaleteniami niemieckimi, moduły dynamiczne warstw asfaltowych zostały określone z pomocą modelu Witczaka, zaś analiza obliczeniowa konstrukcji nawierzchni została przeprowadzona z zastosowaniem metody elementów skończonych.

SŁOWA KLUCZOWE: metoda elementów skończonych, modelowanie nawierzchni podatnych, modelowanie temperatury, profil temperatury.

ABSTRACT. The effect of temperature on asphalt pavement structure is of great importance due to the nature of binder used in the asphalt layers. An equivalent temperature is commonly applied to eliminate the effect of temperature dependence in calculations of mechanical properties of the asphalt and of the pavement. Equivalent temperatures, applied as constant values, are supposed to have the same effect on fatigue behavior of the pavement in the period of one year as the real varying weather conditions. The aim of the presented research was to compare the behavior of the pavement under realistic temperature data throughout a single year with the results of the traditional pavement design method. Temperature data were obtained from a previously established weather station. Binder viscosity and asphalt dynamic modulus were defined based on the temperature profile for asphalt layers divided into 19 sublayers. This subdivision was introduced to better reflect the changes in strength characteristics of the asphalt layers along the depth of the structure. Comparison with the simple calculation using the equivalent temperature method showed that the detailed model outlined in this paper can provide better prediction of the overall pavement structural capacity. The focus of this study is to apply asphalt layer discretization to reflect temperature variation and its influence on changes in strength properties of asphalt mixtures. Temperature at each sublayer was estimated using the German specification, dynamic modulus was determined using the Witczak model, and the structural analysis was performed employing the finite element method.

DOI: 10.7409/rabdim.022.006

KEYWORDS: finite element method, flexible pavement modeling, temperature modeling, temperature profile.

¹⁾ Budapest University of Technology and Economics, Department of Highway and Railway, Műegyetem rkp. 3, K épület magasföldszint 98, 1111 Budapest; cho.seoyoung@emk.bme.hu (✉)

²⁾ Budapest University of Technology and Economics, Department of Structural Mechanics, Műegyetem rkp. 3, K épület magasföldszint 98, 1111 Budapest; lakatos.eva@emk.bme.hu

1. WSTĘP

Ze względu na lepkosprężysty charakter mieszanek asfaltowych temperatura nawierzchni stanowi istotny czynnik podczas ustalania planu napraw konstrukcji nawierzchni. Moduły warstw asfaltowych zależą od temperatury, a zatem dokładniejszy opis warunków temperaturowych przekłada się na lepsze szacowanie właściwości mechanicznych, co bardzo istotne z punktu widzenia doboru lepiszcza i projektu konstrukcji nawierzchni. Do przewidywania temperatury nawierzchni stosowano dotąd kilka metod. Szeroko stosowana jest metoda regresji liniowej [1, 2]. U podstaw obliczeń temperatury nawierzchni w oparciu o jej parametry termiczne leży praca Barbera z 1957 r. [3], wg której obserwowana temperatura może być skorelowana z temperaturą nawierzchni. Do opisów termiki nawierzchni wybiera się niektóre czynniki pogodowe, takie jak nasłonecznienie, temperatura powietrza, prędkość wiatru czy opady. W 1971 r. Rumney et al. opracowali nomogram do oceny temperatury nawierzchni do głębokości 50 mm [4]. Model ten uwzględniał wartość godzinowego nasłonecznienia. Przybliżone zależności temperatury od głębokości mogą posłużyć do skorygowania pomiarów ugięć belką Benkelmana, zgodnie z opisem przedstawionym przez Southgate'a et al. [5]. Opracowany model umożliwił powiązanie ugięć pomierzonych w dowolnych wartościach temperatury [5]. Najbardziej rozbudowane badania poświęcone szacowaniu temperatury nawierzchni przeprowadzono w USA w ramach programu Long-Term Pavement Performance (LTPP) [1]. Opracowana metoda umożliwiła przewidywanie temperatury w głębi układu warstw nawierzchni na podstawie wartości temperatury pomierzonej na powierzchni drogi. Metoda ta była jednak ograniczona do określonego obszaru geograficznego. W związku z tym prowadzono później liczne prace badawcze mające na celu opracowanie ogólnej metody przewidywania temperatury. Wiele prac poświęcono zastosowaniu i interpretacji właściwości termicznych w przewidywaniu temperatury nawierzchni. Thompson et al. wyliczali temperaturę z pomocą modelu komputerowego, korzystając z wymienionych wyżej parametrów termicznych [6]. W niniejszej pracy zdecydowano się na szacowanie temperatury nawierzchni zgodnie z wytycznymi niemieckimi [2]. Rozkład temperatury nawierzchni w zależności od głębokości może być przewidziany na podstawie pomiarów temperatury na powierzchni. Po określeniu temperatury zgodnie z wytycznymi niemieckimi, moduł dynamiczny mieszanki na danej głębokości wyliczyć można z zastosowaniem modelu Witczaka, uwzględniającego temperaturę jako jedną z wartości wejściowych [1]. Istnieje wiele opracowań poświęconych modelowaniu konstrukcji nawierzchni metodą elementów skończonych [7, 8]. Badania przedstawione w artykule ujawniają różnicę między wynikami

1. INTRODUCTION

Due to the viscoelastic nature of asphalt, pavement temperature is an important factor in establishing rehabilitation plans for a pavement structure. Modulus of the pavement depends on the temperature; therefore, a closer estimation of strength characteristics can be achieved with proper temperature prediction, which is important in terms of selection of appropriate binder grade and design. Several empirical methods have been used in predictions of pavement temperature. Linear regression method with weather forecast is widely used in such predictions [1, 2]. Calculation of pavement temperature based on thermal properties of pavements originates in the work of Barber (1957) [3], according to which the observed temperature can be correlated with pavement temperature. Some weather factors are selected for representation of thermal properties of the pavements, such as solar radiation, air temperature, wind and precipitation. In 1971, Rumney et al. determined a nomograph for temperature estimation for depths of up to 50 mm [4]. This model considered solar radiation per hour. The approximate temperature-depth relationships may be used to adjust Benkelman beam deflections due to temperature effects, as described by Southgate et al. [5]. With the developed model, it is possible to relate the deflections taken at any temperature [5]. The most elaborate study on temperature estimation was completed in the United States' under the Long-Term Pavement Performance project (LTPP) [1]. Using the method, the temperature within the pavement system can be predicted based on pavement surface temperature measured on site. However, it is limited to a specific area. Accordingly, a temperature prediction method suitable for general purposes was the focus of subsequent research. Numerous studies were devoted to application and treatment of thermal properties in prediction of pavement temperature. Thompson et al. quantified the temperature with a computer model using the aforementioned thermal properties [6]. In this work, the German guide method is chosen for temperature estimation [2]. Temperature of the pavement along the depth can be predicted from surface temperature measurements. Based on the prediction model of the German guide, the dynamic modulus of asphalt layers is calculated using the Witczak model, which includes temperature as input for modulus calculation [1]. Many studies deal with modeling of the pavement system with the finite element method [7, 8]. The current research reveals the differences in the solutions of asphalt performance obtained based on equivalent temperatures and a detailed finite element model simulation based on a realistic temperature profile.

trwałości zmęczeniowej nawierzchni asfaltowych uzyskanymi na podstawie temperatur ekwiwalentnych oraz na podstawie symulacji metodą elementów skończonych w oparciu o realistyczny profil temperatury.

Ponadto bardzo kompleksowe, oparte na probabilistyce podejście do projektowania nawierzchni przedstawia metoda francuska. Zawiera ona dość złożoną metodę ustalania temperatury ekwiwalentnej, wykorzystywaną na świecie w różnych zastosowaniach [9-11]. Metoda elementów skończonych była stosowana jako jeden ze sposobów na określenie reakcji nawierzchni na obciążenia podczas prac nad metodą MEPDG [12]. Jako obiekty liniowe, drogi mają jednorodną konstrukcję nawierzchni w kierunku podłużnym. Możliwe jest zatem ich projektowanie z zastosowaniem modeli osiowosymetrycznych [13]. Prowadzono badania nad przygotowaniem modeli numerycznych nawierzchni, mające na celu odzwierciedlenie rzeczywistych warunków granicznych nawierzchni drogowej. Nagórski et al. przeprowadzili analizę parametryczną w celu wyznaczenia odpowiednich warunków brzegowych; analiza wykazała, że ograniczenie przemieszczeń spodu oraz płaszczyzn bocznych domeny obliczeniowej wspomaga ustalenie maksymalnego ugięcia nawierzchni [14].

Celem niniejszego badania jest odzwierciedlenie zmian właściwości mechanicznych warstw asfaltowych związanych z rozkładem temperatury w zależności od głębokości. Znane wartości temperatur pomierzone na powierzchni drogi zostały podzielone na 22 grupy, odzwierciedlające warunki temperaturowe na Węgrzech. Uzyskane profile temperatur w konstrukcji nawierzchni zostały zastosowane w modelu numerycznym. Aby zweryfikować wpływ rozkładu właściwości mechanicznych w zależności od głębokości, model poddano obciążeniu statycznemu i wyliczono trwałość nawierzchni na podstawie wzoru Minera.

2. ZMIENNOŚĆ WARTOŚCI TEMPERATURY NA POWIERZCHNI DROGI O NAWIERZCHNI ASFALTOWEJ

Częstość występowania temperatury w poszczególnych zakresach obliczono na podstawie danych temperaturowych uzyskanych z założonej wcześniej stacji meteorologicznej. Stację zbudowano w roku 2006, a zebrane dane obejmują okres od 1.08.2006 do 31.07.2007. Na stacji dokonywano pomiarów i zapisów co 10 minut, co zaowocowało zebraniem 48 441 rekordów. Każdy rekord składał się z wartości temperatury powietrza, temperatury na powierzchni drogi oraz temperatury w głębi nawierzchni, odpowiednio na głębokościach: 2 cm, 7 cm, 14 cm, 29 cm i 49 cm. Wyniki były zbierane nie tylko z bardzo dużą częstotliwością, lecz również w wielu punktach

Apart from the methods mentioned, the French pavement design method provides a very comprehensive, probability-based design approach as well. It also provides a fairly sophisticated method for establishing the equivalent pavement temperature, which has been used worldwide in different applications [9-11]. The finite element analysis was used as a method to obtain the structural response when MEPDG was introduced [12]. Road structures are linear and have structural unity in the longitudinal direction. Therefore, it is possible to simply design them with an axisymmetric figure [13]. Studies on preparation of the numerical model of pavement system have been conducted to reflect the actual boundary conditions of the road system. Nagórski et al. carried out a parametric study to find proper boundary conditions, and their study shows that the constrain at the base and at the side wall of the domain helps to verify the maximum deflection [14].

The purpose of this study is to reflect the change in modulus of the asphalt layers according to temperature distribution by depth. The known road surface temperatures were divided into 22 groups according to the temperature conditions in Hungary, and temperature distribution by depth was applied to the numerical model. In order to verify the effect of distribution of strength properties by depth of asphalt pavement, static load was applied and serviceability was confirmed using the Miner formula.

2. SURFACE TEMPERATURE DISTRIBUTION IN AN ASPHALT PAVEMENT

The relative frequency of temperature distribution was calculated from temperature data obtained from a previously established weather station. The weather station was installed in 2006, and the data were recorded from 1 August 2006 to 31 July 2007. The weather station measured and logged the data every 10 minutes, which resulted in collection of 48,441 data sets. Each data set contains ambient temperature, surface temperature of the pavement structure, and in-depth temperatures at 2 cm, 7 cm, 14 cm, 29 cm and 49 cm. The results were collected at a very high frequency and a high number of locations to enable a detailed analysis. Fig. 1 shows the surface temperature variation throughout one year. For the Hungarian climatic conditions (Central Europe), the data show relatively high pavement surface temperatures, which may be explained by the local climatic conditions around the weather station. The station is located in an asphalt manufacturing yard next to the company building, which is located on the

konstrukcji, aby umożliwić szczegółową analizę. Na Rys. 1 przedstawiona jest zmienność temperatury na powierzchni drogi w obrębie roku. Dla warunków klimatycznych panujących na Węgrzech (Europa Środkowa) dane przedstawiają stosunkowo wysokie temperatury na powierzchni drogi, co można wytłumaczyć lokalnymi warunkami klimatycznymi w okolicach stacji meteorologicznej. Stacja zlokalizowana jest w pobliżu budynku biurowego na terenie zakładu produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych na obrzeżach Budapesztu. W ciągu analizowanego roku zdarzył się dwutygodniowy okres, gdy stacja nie funkcjonowała. Dane z tego krótkiego okresu nie są zatem dostępne, stwierdzono jednak, że wpływ tego braku na analizę rocznego rozkładu temperatur jest zanedbywalny.

Histogram na Rys. 2 pokazuje rozkład zebranych danych temperaturowych. Na potrzeby analizy podzielono cały zakres temperatury na 22 przedziały, gdzie każdy z nich obejmuje jej wzrost o kolejne 3°C. Na podstawie rozkładu przedstawionego na Rys. 2 widać, że największą częstość występowania odnotowano dla wartości temperatury z zakresu 19–22°C. Temperatura na powierzchni drogi utrzymywała się w tym przedziale przez 10,22% całego roku ($4951 / 48441 = 0,1022$).

outskirts of Budapest. There was a two-week period during which the weather station was inoperative. Therefore, data were not collected for this short period, which is considered to have a negligible effect on the yearly temperature distribution.

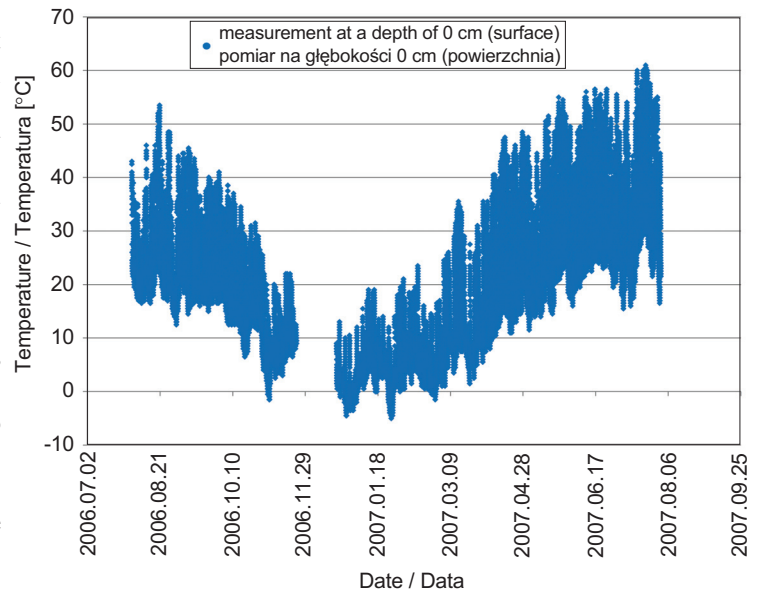


Fig. 1. Surface temperature variation throughout a one-year period
Rys. 1. Zmienność temperatury powierzchni drogi na przestrzeni jednego roku

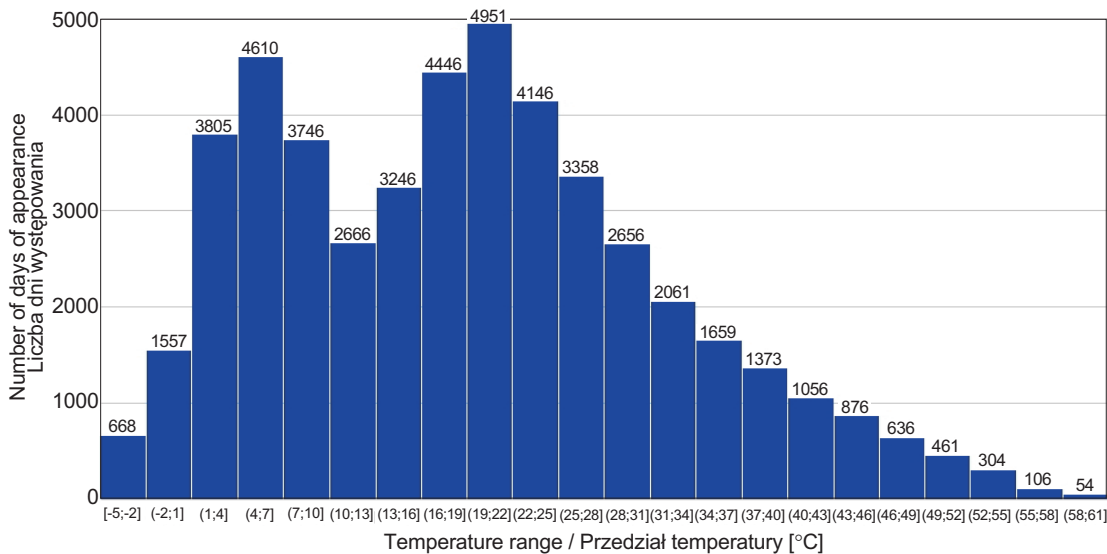


Fig. 2. Surface road temperature distribution
Rys. 2. Rozkład wystąpień temperatury pomierzonej na nawierzchni drogowej

3. OSZACOWANIE TEMPERATURY NA DANEJ GŁĘBOKOŚCI NAWIERZCHNI ASFALTOWEJ

Jako model nawierzchni do analiz wybrano wielowarstwową konstrukcję o łącznej grubości warstw asfaltowych wynoszącej 19 cm. Takie nawierzchnie są typowe na Węgrzech

The histogram in Fig. 2 shows the distribution of the collected data set. For the analysis, the temperature domain was split into 22 temperature bins using the step of 3°C. From the temperature distributions (Fig. 2) it can be concluded that the 19–22°C bin shows the highest frequency. The pavement surface temperature was within this range during 10.22% of the entire year ($4,951 / 48,441 = 0.1022$).

w przypadku dróg o średnim ruchu. Składają się one z następujących warstw:

- warstwa ścieralna – 4 cm,
- warstwa wiążąca (MK22-F-47) – 6 cm,
- warstwa podbudowy asfaltowej – 9 cm.

Temperatura poszczególnych warstw (oraz podwarstw) na dowolnej głębokości obliczana była według metody niemieckiej [2], w której stosuje się następujące równanie:

$$y = a \cdot \ln(0,01 \cdot x + 1) + T, \quad (1)$$

gdzie:

- y – temperatura nawierzchni na głębokości x [°C],
- x – głębokość poniżej powierzchni drogi [mm],
- T – temperatura powierzchni drogi [°C],
- a – parametr będący funkcją T (Tabl. 1).

Stosując powyższą metodę oszacowano temperaturę nawierzchni na głębokości odpowiednio 2 cm, 7 cm i 14 cm. Uzyskane wyniki porównano z danymi rzeczywistymi uzyskanymi z pomiarów wykonanych przez stację meteorologiczną. Zaobserwowano silną korelację pomiędzy uzyskanymi wynikami, na co wskazują następujące wartości współczynnika determinacji R^2 :

- 0,98 – na głębokości 2 cm,
- 0,89 – na głębokości 7 cm,
- 0,79 – na głębokości 14 cm.

Table 1. Parameter a as a function of surface temperature
Tablica 1. Parametr a jako funkcja temperatury na powierzchni drogi

Temperature / Temperatura [°C]	a
< -10	6.5
< -5	4.5
< 0	2.5
< 5	0.7
< 10	0.1
< 15	0.3
< 20	0.4
< 25	-1.6
< 30	-4.0
< 35	-6.2
< 40	-8.5
< 45	-10.5
> 45	-12.0

3. ESTIMATING THE TEMPERATURE OF AN ASPHALT PAVEMENT AT A GIVEN DEPTH

A 19-cm-thick, multilayered structure was chosen as the model pavement for the analysis. Such structures are typical for medium volume roads in Hungary and consist of the following layers:

- 4 cm wearing course,
- 6 cm intermediate (binder, MK22-F-47) course,
- 9 cm asphalt base course.

The temperatures of the individual asphalt layers (and sublayers) at any depth were estimated using the German method [2], which employs the following equation:

$$y = a \cdot \ln(0.01 \cdot x + 1) + T, \quad (1)$$

where:

- y – asphalt temperature at depth x [°C],
- x – the depth below the surface of the pavement structure [mm],
- T – the surface temperature [°C],
- a – the parameter as a function of T (Table 1).

Pavement temperatures at the depths of 2 cm, 7 cm and 14 cm were estimated using the German method as explained above. The estimated data were compared with the data collected from the weather station measurements. A strong correlation was observed, as the obtained R^2 values were as follows:

- for depth of 2 cm: 0.98,
- for depth of 7 cm: 0.89,
- for depth of 14 cm: 0.79.

Fig. 3 shows the estimated temperature versus the measured temperature at various depths.

To provide more accurate temperature values for a detailed analysis, the total asphalt depth of 19 cm was divided into 19 individual sublayers in steps of 1 cm. As shown above, the German prediction model provides an accurate methodology; therefore, it was used for predicting the temperature of each 1-cm-thick sublayer. Considering that the surface temperature was split into 22 temperature bins as explained above, the pavement temperatures at various depths were predicted as summarized in Table 2. For this prediction the mid-value of each bin was used as input parameter.

Rys. 3 przedstawia porównanie wartości temperatury oszacowanych metodą niemiecką z wartościami pomierzonymi na różnych głębokościach nawierzchni.

W celu zapewnienia uzyskania dokładniejszych wartości temperatury na różnych głębokościach w ramach szczegółowej analizy, całkowita grubość warstw asfaltowych została podzielona na 19 podwarstw o grubości 1 cm. Jak pokazano powyżej, niemiecka metoda obliczania temperatury w głębi nawierzchni zapewnia wystarczająco dokładne szacowanie jej wartości; została ona zatem zastosowana do obliczenia temperatury dla każdej spośród 19 jednocentymetrowych podwarstw. Pomierzone na powierzchni jezdni wartości temperatury podzielono na opisane powyżej 22 przedziały, a prognozowane – w oparciu o modele – wartości temperatury nawierzchni na różnych jej głębokościach zestawiono odpowiednio w Tabl. 2. Na potrzeby obliczeń dla każdego z określonych przedziałów temperatury przyjęto jako parametr wejściowy jej wartość uśrednioną w danym przedziale.

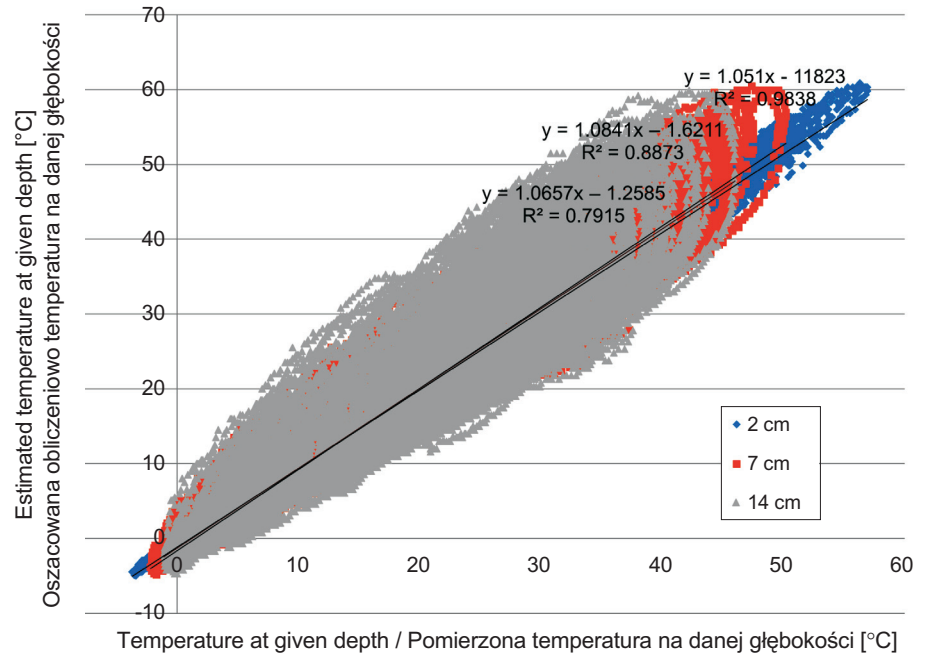


Fig. 3. Estimated temperature versus the measured temperature at various depths of the pavement (2 cm, 7 cm, 14 cm)

Rys. 3. Porównanie temperatury oszacowanej obliczeniowo oraz temperatury zmierzonej na różnych głębokościach w nawierzchni (2 cm, 7 cm, 14 cm)

Table 2. Pavement temperature prediction at given depth

Tablica 2. Przewidywana temperatura w zależności od głębokości

Pavement model number / Numer modelu nawierzchni		1	2	3	...	20	21	22
Lower limit of the temperature bin / Dolna granica zakresu temperatury [°C]		-5	-2	1	...	52	55	58
Upper limit of the temperature bin / Górna granica zakresu temperatury [°C]		-2	1	4	...	55	58	61
Mid-value of the temperature bin / Wartość środkowa zakresu temperatury [°C]		-3.5	-0.5	2.5	...	53.5	56.5	59.5
Depth below the pavement surface [mm] Głębokość poniżej powierzchni jezdni	10	-3.3	-0.3	2.6	...	52.4	55.4	58.4
	20	-3.0	0.0	2.6	...	51.3	54.3	57.3
	30	-2.8	0.2	2.7	...	50.4	53.4	56.4
	40	-2.7	0.3	2.7	...	49.5	52.5	55.5
	50	-2.5	0.5	2.8	...	48.6	51.6	54.6
	60	-2.3	0.7	2.8	...	47.9	50.9	53.9
	70	-2.2	0.8	2.9	...	47.1	50.1	53.1
	80	-2.0	1.0	2.9	...	46.4	49.4	52.4
	90	-1.9	1.1	2.9	...	45.8	48.8	51.8
	100	-1.8	1.2	3.0	...	45.2	48.2	51.2
	110	-1.6	1.4	3.0	...	44.6	47.6	50.6
	120	-1.5	1.5	3.1	...	44.0	47.0	50.0
	130	-1.4	1.6	3.1	...	43.5	46.5	49.5
	140	-1.3	1.7	3.1	...	43.0	46.0	49.0
	150	-1.2	1.8	3.1	...	42.5	45.5	48.5
	160	-1.1	1.9	3.2	...	42.0	45.0	48.0
	170	-1.0	2.0	3.2	...	41.6	44.6	47.6
	180	-0.9	2.1	3.2	...	41.1	44.1	47.1
	190	-0.8	2.2	3.2	...	40.7	43.7	46.7

4. PARAMETRY LEPISTWA I MIESZANKI W FUNKCJI TEMPERATURY

Do przeprowadzenia obliczeń przyjęto właściwości lepiszcza zgodne z rodzajem funkcjonalnym PG 64-22. Zależność lepkości od temperatury opisana jest równaniami (2a) i (2b) [15].

$$\log \log(\eta) = A + VTS \log(T_R) \quad \text{dla } T_R > T_{critical}, \quad (2a)$$

$$\log \log(\eta) = 1,095 \quad \text{dla } T_R \leq T_{critical}, \quad (2b)$$

gdzie: η jest lepkością [cP], T_R to temperatura [°R], A i VTS są stałymi współczynnikami dla danego rodzaju lepiszcza.

W przypadku lepiszcza PG 64-22 właściwe są następujące wartości tych parametrów: $A = -3,680$ oraz $VTS = 10,980$.

Rozpatrując pierwszą kolumnę Tabl. 2, odpowiadającą przedziałowi temperatury na powierzchni drogi od -5°C do -2°C (wartość środkowa -3.5°C), możliwe jest wyliczenie temperatury na różnych głębokościach z zastosowaniem wzoru (1). W szczegółowym modelu obliczeń temperatura jest szacowana dla każdej podwarstwy w obrębie 19 cm warstw asfaltowych, tj. co 1 cm. Uzyskane wartości temperatury stanowią następnie dane wejściowe do obliczeń lepkości dynamicznej lepiszcza według wzorów (2a) i (2b). W przypadku kolejnego roku do wyznaczania temperatury stosuje się wzór (3). Jest to tzw. model Witczaka, pozwalający na przewidywanie modułu dynamicznego warstwy asfaltowej w funkcji lepkości dynamicznej lepiszcza oraz parametrów mieszanki [1].

$$\log|E^*| = 6.940166 - 0.00176 (p_{200}) + 0.003889 (p_4) - 0.08776 (V_a) - 1.33426 \frac{V_{b\text{eff}}}{V_{b\text{eff}} + V_a} + \frac{-3.63992 - 0.03114 (p_4) + 0.015546 (p_{38}) + 0.010469 (p_{34})}{1 + \exp(-0.09942 + 0.162727 \cdot \log f + 0.180695 \cdot \log \eta)}, \quad (3)$$

gdzie:

p_{34} – procent kruszywa zatrzymanego na sicie 3/4 cala,

p_{38} – procent kruszywa zatrzymanego na sicie 3/8 cala,

p_4 – procent kruszywa zatrzymanego na sicie #4,

p_{200} – procent kruszywa przechodzącego przez sito #200,

$V_{b\text{eff}}$ – efektywna procentowa zawartość lepiszcza w objętości mieszanki,

V_a – procentowa zawartość wolnych przestrzeni w całkowitej objętości mieszanki,

f – częstotliwość obciążenia [Hz],

η – lepkość lepiszcza [cP].

W celu uzyskania dokładniejszego modelu, dla poszczególnych warstw asfaltowych założono różne wartości parametrów we wzorze (3), co odzwierciedla rzeczywiste różnice między

4. BINDER AND ASPHALT PARAMETERS AS A FUNCTION OF TEMPERATURE

For the calculations, the binder properties were assumed to comply with the PG 64-22 grade. The viscosity-temperature relationship was established in (2a) and (2b) [15].

$$\log \log(\eta) = A + VTS \log(T_R) \quad \text{for } T_R > T_{critical}, \quad (2a)$$

$$\log \log(\eta) = 1.095 \quad \text{for } T_R \leq T_{critical}, \quad (2b)$$

where: η is viscosity [cP], T_R is temperature [°R], A and VTS are constant coefficients for a given type of binder.

For a PG 64-22 binder, the following applies: $A = -3.680$ and $VTS = 10.980$.

Considering the first column of Table 2, which is the surface temperature bin of -5°C to -2°C (mid-value equal to -3.5°C), as an example, pavement temperatures at various depths can be calculated according to (1). The temperature is estimated according to the detailed model at every 1 cm of the total 19 cm of the asphalt layers. The estimated temperature values provide input parameters for subsequent prediction of the dynamic viscosity of the binder, which is calculated according to (2a) and (2b). In the next step (3) is used. This equation is the so-called Witczak equation, which can predict the dynamic modulus of the asphalt layer as a function of dynamic viscosity of the binder and the properties of the asphalt mix [1].

where:

p_{34} – percentage of aggregate retained on 3/4-inch sieve,

p_{38} – percentage of aggregate retained on 3/8-inch sieve,

p_4 – percentage of aggregate retained #4 sieve,

p_{200} – percentage of aggregate passing #200 sieve,

$V_{b\text{eff}}$ – effective asphalt content as percentage of the total mix volume,

V_a – air voids as percentage of the total volume,

f – loading frequency [Hz],

η – binder viscosity [cP].

In order to obtain a more detailed model, different values of parameters were considered for individual asphalt layers. This is in line with real life applications; the parameters are summarized in Table 3 [16]. For the -5°C to -2°C

właściwościami warstw nawierzchni. Parametry zostały zestawione w Tabl. 3 [16]. Dla przedziału temperatury na powierzchni od -5°C do -2°C , dalej zwanego przedziałem $-3,5^{\circ}\text{C}$, wyliczone moduły warstw asfaltowych przedstawiono w Tabl. 4. Tablica ta zawiera jako przykłady wartości wyliczone dla przedziału $-3,5^{\circ}\text{C}$, ale identyczne obliczenia przeprowadzono dla każdego z przedziałów przedstawionych w Tabl. 2. Na podstawie danych przedstawionych graficznie na Rys. 1 możliwe jest wykonanie obliczeń z zastosowaniem 22 osobnych modeli, przy czym każdy z nich odzwierciedla parametry wyliczone dla wartości środkowej odpowiedniego przedziału temperatury.

temperature bin, hereinafter referred to as the -3.5°C bin, the asphalt layer dynamic modulus is estimated as summarized in Table 4. While this table provides an example for the temperature bin of -3.5°C , the same calculation was performed for each temperature bin outlined in Table 2. Based on Fig. 1, a one-year period can be modelled with 22 distinctive pavement models, with each of these models corresponding to the mid-range temperature of the relevant temperature bin.

Table 3. Asphalt mix parameters for various pavement layers

Tablica 3. Parametry mieszanek mineralno-asfaltowych dla różnych warstw nawierzchni

Pavement layer / Warstwa nawierzchni ^{*)}	p_{34}	p_{38}	p_4	p_{200}	V_{beff}	V_a	f
Wearing course / Warstwa ścieralna	0	38.75	72.5	10	3.08	12.2	25
Intermediate course / Warstwa wiążąca	2.5	24	45	6	4.159	10.5	25
Asphalt base course / Podbudowa asfaltowa	13	35	51	4	3.777	9.3	25

^{*)} explanations of the individual parameters of the pavement layers is the same as for eq. (3)
 objaśnienia poszczególnych parametrów dotyczących warstw nawierzchni takie same jak w przypadku wzoru (3)

Table 4. Material parameters calculated for the -3.5°C temperature bin

Tablica 4. Parametry materiałowe obliczone dla przedziału temperatury oznaczonego jako -3.5°C

Pavement layer Warstwa nawierzchni	Depth Głębokość [mm]	Dynamic viscosity of the binder Lepkość dynamiczna lepiszcza [10^6 Poise]	Asphalt dynamic modulus Moduł dynamiczny mieszanki mineralno-asfaltowej [MPa]
Wearing course Warstwa ścieraln	10	25 820	23 211
	20	23 725	22 832
	30	21 955	22 489
	40	20 438	22 176
Intermediate course Warstwa wiążąca	50	19 125	27 784
	60	17 976	27 489
	70	16 963	27 215
	80	16 062	26 959
	90	15 255	26 719
	100	14 529	26 494
Asphalt base course Podbudowa asfaltowa	110	13 872	32 697
	120	13 275	32 452
	130	12 729	32 220
	140	12 228	31 999
	150	11 768	31 789
	160	11 342	31 589
	170	10 947	31 398
	180	10 581	31 214
	190	10 239	31 039

5. ANALIZA MODELI NAWIERZCHNI Z ZASTOSOWANIEM MES

W przyjętym modelu nawierzchni rozpatrywano warstwy asfaltowe o łącznej grubości 19 cm (podzielone na podwarstwy o grubości 1 cm), pod którymi znajdowała się warstwa podbudowy z kruszywa o grubości 20 cm i module 350 MPa oraz podłoże o module 50 MPa, zgodnie ze specyfikacjami stosowanymi na Węgrzech. Cała konstrukcja nawierzchni, składająca się z wymienionych warstw, przedstawiona została w sześciennej domenie obliczeniowej o wymiarach 9 m × 9 m × 9 m, zgodnie z wynikami badań poświęconych modelowaniu numerycznemu konstrukcji nawierzchni [7, 8, 13], aby pozioma granica domeny na spodzie oraz pionowe granice boczne nie znalazły się bliżej powierzchni obciążonej niż zalecane, odpowiednio, 50- i 12-krotność promienia koła. Konstrukcję obciążono na górnej płaszczyźnie (górnej płaszczyźnie pierwszej podwarstwy asfaltowej) obciążeniem 50 kN, które było równomiernie rozłożone na powierzchnię kołową o promieniu 15 cm. Ciężar objętościowy mieszanek mineralno-asfaltowych, podbudowy z kruszywa oraz gruntu podłoża przyjęto odpowiednio jako: 2,3 t/m³, 2,0 t/m³ oraz 1,5 t/m³. Ze względu na symetrię domeny, w modelu MES prowadzono obliczenia dla jednej czwartej domeny, z założonymi symetrycznymi warunkami brzegowymi na płaszczyznach symetrii. Na spodzie warstwy podłoża przyjęto ograniczenie przemieszczeń pionowych. Uniemożliwiono również przesunięcia całej domeny jako ciała sztywnego.

Zastosowano ośmiowęzłowe elementy bryłowe 3D (typu SOLID185 w oprogramowaniu ANSYS), o trzech stopniach swobody dla każdego węzła. Powierzchnie styku dziewiętnastej podwarstwy mieszanki asfaltowej z podbudową z kruszywa, jak również podbudowy z podłożem, zamodelowano z zastosowaniem elementów kontaktowych bez tarcia.

W ramach analizy wyznaczono odkształcenie poziome na spodzie warstw asfaltowych oraz przemieszczenie pionowe górnej płaszczyzny podłoża (Rys. 4). Odkształcenia wyliczono dla wszystkich 22 modeli nawierzchni z zastosowaniem MES, a wyniki zestawiono w Tabl. 5.

6. PROSTY MODEL NAWIERZCHNI Z ZASTOSOWANIEM TEMPERATURY EKWIWALENTNEJ

Pierwotnie przyjęta konstrukcja nawierzchni, w której skład wchodził pakiet warstw asfaltowych o łącznej grubości 19 cm, została przeanalizowana również z uwzględnieniem temperatury ekwiwalentnej. Taka nawierzchnia jest na Węgrzech często rozpatrywana w przypadku dróg o średnim ruchu.

5. ANALYSIS OF THE PAVEMENT MODELS USING FEM

In the adopted pavement model, the considered 19 cm of asphalt layers (divided into 1-cm-thick sublayers), were supported by a 20-cm-thick 350 MPa unbound granular base layer and 50 MPa subgrade, as suggested in Hungarian specification. The entire pavement structure, consisting of the aforementioned layers, was represented by a 9 m × 9 m × 9 m cubic domain, according to the studies on numerical modeling of pavement structure [7, 8, 13], to ensure that the horizontal boundary at the bottom and the vertical boundaries on the sides are no closer to the loading area than the advised 50 and 12 values of wheel radius, respectively. The structure was loaded on the top surface of the first asphalt sublayer. 50 kN load was distributed uniformly over a circular area with 15 cm radius in the center of the top surface. The weight of the asphalt pavement, the granular base and the subgrade was approximated as 2.3 t/m³, 2.0 t/m³ and 1.5 t/m³, respectively. In the finite element model, one fourth of the domain was considered and symmetric boundary conditions were applied on the surfaces of symmetry. The bottom of the subgrade was constrained against vertical displacements, and the whole domain was constrained against rigid body motions.

Eight-node 3D structural solid elements (element type SOLID185 in ANSYS software) were applied, with three degrees of freedom at each node. Layer interfaces between the 19th asphalt sub-layer and the granular base, as well as between the granular base and the subgrade, were modeled using frictionless contact elements.

Horizontal strain at the bottom of the asphalt layers and vertical displacement on top of the subgrade were measured (Fig. 4). The strains were calculated for all 22 pavement models using FEM; the results are summarized in Table 5.

6. SIMPLE PAVEMENT MODEL CALCULATED USING THE EQUIVALENT PAVEMENT TEMPERATURE

The original pavement structure, with 19 cm of asphalt layers in total, was modeled using the equivalent pavement temperature method. As mentioned earlier, a 19-cm-thick pavement structure is considered for medium volume traffic in Hungary.

Table 5. Horizontal strain at the bottom of the asphalt layer, calculated using FEM

Tablica 5. Poziome odkształcenie na spodzie warstwy asfaltowych, obliczone za pomocą MES

Pavement model no. Nr modelu nawierzchni	Calculated horizontal strain, asphalt Obliczone odkształcenie poziome, spód warstw asfaltowych	Allowable traffic $N_{i,allow}$ according to eq. (4) Dopuszczalny ruch $N_{i,allow}$ wg wzoru (4)
1	48	30 039 423
2	56	20 120 211
3	60	15 579 040
4	68	10 986 355
5	79	7 431 197
6	91	4 999 914
7	105	3 460 413
8	120	2 412 376
9	127	1 974 324
10	143	1 422 479
11	149	1 216 528
12	167	899 067
13	174	771 340
14	181	670 285
15	201	512 766
16	210	444 640
17	231	348 753
18	244	299 301
19	267	240 659
20	290	196 196
21	314	16 043
22	339	135 481

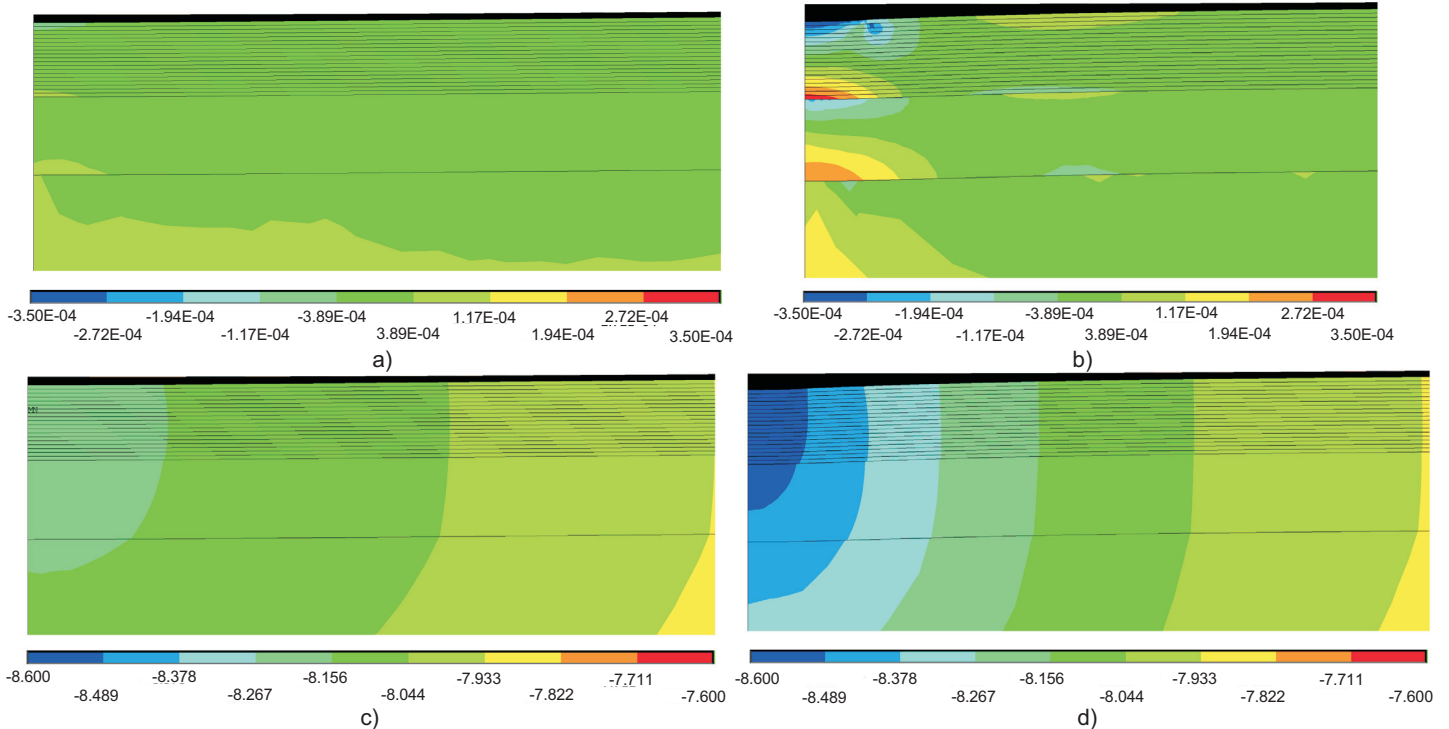


Fig. 4. Horizontal strain [-] distribution in pavement: a) model 1, b) model 22, and vertical displacements [mm]: c) model 1, d) model 22

Rys. 4. Rozkład odkształceń poziomych [-] w nawierzchni: a) model 1, b) model 22, oraz przemieszczenia pionowe [mm]: c) model 1, d) model 22

W obliczeniach przyjęto jeden model nawierzchni zgodnie z założeniem temperatury ekwiwalentnej. W związku z tym parametry mieszanek asfaltowych odpowiadają pojedynczej temperaturze ekwiwalentnej. Takie podejście obliczeniowe jest szeroko stosowane ze względu na jego prostotę, ograniczony zakres niezbędnych danych wejściowych oraz małe zapotrzebowanie na moc obliczeniową. Temperatura ekwiwalentna to wartość wynikowa kilku czynników, a sposób jej obliczania nie należy do zakresu niniejszej pracy. Temperatura ekwiwalentna dla Węgier została ustalona na 20°C, a rozpatrywane wartości modułów podane w Tabl. 6 zostały wyznaczone właśnie dla tej temperatury.

Odształcenia poziome na spodzie warstw asfaltowych wyliczone dla tego modelu wyniosły 143 mikrostrajny. Na tym poziomie odształceń oraz przy poziomie ufności 95%, trwałość zmęczeniowa wyliczona z zastosowaniem wzoru (4) wyniosła 4 250 836 standardowych osi obliczeniowych (w przybliżeniu 4,25 mln osi).

Table 6. Pavement model for the simple method

Tablica 6. Model nawierzchni zastosowany w metodzie uproszczonej

Pavement layers / Warstwy nawierzchni	Modulus values / Wartości modułu [MPa]
Wearing course / warstwa ścieralna – 4 cm	4000
Intermediate layer / warstwa wiążąca – 6 cm	5800
Asphalt base layer / podbudowa asfaltowa – 9 cm	4500
Unbound granular base layer / podbudowa z kruszywa – 20 cm	350
Subgrade / podłoże	50

7. SUMARYCZNA SZKODA ZMĘCZENIOWA NAWIERZCHNI

Na potrzeby analizy założono, że roczne obciążenie ruchem wynosi 1 mln równoważnych osi obliczeniowych i jest rozłożone równomiernie na przestrzeni całego roku. Z przyjętego założenia wynika, że odształcenia obliczone dla każdego z 22 modeli występują z tą samą częstością, co temperatury na powierzchni drogi w odpowiednich przedziałach (Tabl. 7).

Trwałość zmęczeniowa wyrażona dopuszczalną liczbą przejeżdżających osi została wyliczona zgodnie z wytycznymi australijskimi [17], według następującego wzoru:

$$N = \frac{SF}{RF} \left(\frac{6918 (0,856 V_b + 1,08)}{E^{0,36} \mu\epsilon} \right)^5, \quad (4)$$

gdzie:

N – dopuszczalna liczba powtórzeń odształcenia rozciągającego wywołanego obciążeniem,

$\mu\epsilon$ – odształcenie na spodzie warstw asfaltowych wywołane obciążeniem [mikrostrajny],

In this calculation a single pavement model was established, in line with the equivalent pavement temperature method. Consequently, the asphalt parameters are representative for the equivalent pavement temperature. This calculation, requiring limited input data and low level of computing power, is widely used due to its simplicity. The equivalent temperature is an aggregated value and its calculation is not covered in this paper. The equivalent pavement temperature for Hungary was established as 20°C and the considered modulus values were determined for this temperature, as outlined in Table 6.

The calculated horizontal strain at the bottom of the asphalt layers for the above pavement model was 143 microstrain. At this strain level and 95% reliability level, the allowable loading was calculated using eq. (4) as 4,250,836 ESALs (rounded to 4.25 million ESALs).

7. CUMULATIVE FATIGUE OF THE PAVEMENT STRUCTURE

For this analysis it was assumed that the traffic loading is 1 million ESAL, which is evenly distributed throughout the year. Consequently, the strains calculated for each of the 22 pavement models occur with the same relative frequency as the surface temperatures falling into individual bins, as shown in Table 7.

The number of allowable ESALs was calculated according to the Australian Guide to Pavement Technology [17], using the following equation:

$$N = \frac{SF}{RF} \left(\frac{6918 (0,856 V_b + 1,08)}{E^{0,36} \mu\epsilon} \right)^5, \quad (4)$$

where:

N – the allowable number of repetitions of the load-induced tensile strain,

$\mu\epsilon$ – load-induced tensile strain at the base of the asphalt layers [microstrain],

V_b – zawartość lepiszcza w objętości mieszanki asfaltowej [%],
 E – moduł mieszanki asfaltowej [MPa],
 SF – współczynnik przesunięcia między trwałością zmęczeniową określoną laboratoryjnie a wartością rzeczywistą (zakładana wartość = 6),
 RF – współczynnik niezawodności przy obliczaniu zmęczenia warstw asfaltowych (Tabl. 8).

V_b – percentage of bitumen in the asphalt mix by volume [%],
 E – asphalt mix modulus [MPa],
 SF – shift factor between laboratory and in-service fatigue lives (presumptive value = 6),
 RF – reliability factor for asphalt fatigue (Table 8).

Table 7. Relative frequency of temperature and traffic distribution

Tablica 7. Częstość występowania temperatury i odpowiadający jej ruch drogowy

Pavement model number Numer modelu nawierzchni	Temperature occurrences [-] Wystąpienia temperatury	Temperature relative frequency [%] Częstość występowania temperatury	Design traffic $N_{i,allow}$ [ESALs] Założony ruch projektowy $N_{i,allow}$
1	668	1.38	13 790
2	1 557	3.21	32 142
3	3 805	7.85	78 549
4	4 610	9.52	95 167
5	3 746	7.73	77 331
6	2 666	5.50	55 036
7	3 246	6.70	67 009
8	4 446	9.18	91 782
9	4 951	10.22	102 207
10	4 146	8.56	85 589
11	3 358	6.93	69 321
12	2 656	5.48	54 830
13	2 061	4.25	42 547
14	1 659	3.42	34 248
15	1 373	2.83	28 344
16	1 056	2.18	21 800
17	876	1.81	18 084
18	636	1.31	13 129
19	461	0.95	9 517
20	304	0.63	6 276
21	106	0.22	2 188
22	54	0.11	1 115
Total	48 441	100.00	1 000 000

Table 8. Reliability factors RF for asphalt fatigueTablica 8. Współczynniki niezawodności RF stosowane dla kryterium zmęczeniowego

RF [-]	Desired project reliability / Oczekiwany poziom niezawodności [%]					
	50	80	85	90	95	97.5
	1.0	2.4	3.0	3.9	6.0	9.0

W celu obliczenia sumarycznej szkody zmęczeniowej CDF skorzystano z hipotezy Minera (5):

$$\sum \text{MINER} = \frac{N_{1,actual}}{N_{1,allow}} + \frac{N_{2,actual}}{N_{2,allow}} + \frac{N_{3,actual}}{N_{3,allow}} + \dots + \frac{N_{22,actual}}{N_{22,allow}} \leq 1 \quad (5)$$

gdzie:

$N_{i,actual}$ – rzeczywista liczba osi obliczeniowych stwierdzona dla danego modelu nawierzchni (i od 1 do 22),

The cumulative damage factor CDF was calculated using the Miner hypothesis (5).

where:

$N_{i,actual}$ – the actual number of ESALs for a given pavement model (i from 1 to 22),

$N_{i,allow}$ – dopuszczalna liczba osi obliczeniowych obliczona dla danego modelu nawierzchni (i od 1 do 22, Tabl. 8).

Przy założeniu ruchu drogowego jako 1 mln osi obliczeniowych oraz poziomie ufności 95%, wyliczona sumaryczna szkoda zmęczeniowa wyniosła 0,72. Konstrukcja nawierzchni wykazała więc trwałość zmęczeniową większą od wymaganej. Po zwiększeniu obciążenia ruchem do 1,34 mln osi obliczeniowych, sumaryczna szkoda zmęczeniowa wyniosła 0,99; konstrukcja osiągnęła stan krytyczny, powyżej którego nie mogłaby przenieść dodatkowego obciążenia. Wyliczona wartość znacząco różni się od liczby 4,25 mln osi obliczeniowych, uzyskanej z zastosowaniem temperatury ekwiwalentnej (rozdział 6). Powyższa różnica wartości wynika z faktu, że mniej skomplikowana metoda obliczania nie uwzględniła szczegółowo wpływu temperatury na właściwości mieszanek asfaltowych.

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wpływ temperatury na nawierzchnie asfaltowe to jeden z najważniejszych czynników w projektowaniu nawierzchni. W artykule oszacowano temperaturę na różnych głębokościach w obrębie nawierzchni, stosując wytyczne niemieckie. Wyliczone wartości porównano z rzeczywistymi danymi pozyskanymi z założonej wcześniej stacji meteorologicznej; zaobserwowano dobrą korelację wyników. Następnie ustalono częstotliwość występowania temperatury w różnych jej przedziałach. W modelu nawierzchni, zbudowanym ze sprężystych i izotropowych elementów, pakiet warstw asfaltowych został podzielony na 19 podwarstw, co pozwoliło na lepsze odzwierciedlenie zmian temperatury w zależności od głębokości w obrębie nawierzchni. Wyliczone wartości temperatury zostały następnie wykorzystane jako dane wejściowe do wyliczeń lepkości asfaltu i modułu dynamicznego mieszanek mineralno-asfaltowych. W pracy zaprezentowano porównanie między prostym modelem opartym na zastosowaniu jednej temperatury obliczeniowej dla 19 cm warstw asfaltowych – z jedną wartością sztywności dla każdej z trzech warstw – a modelem zakładającym podział pakietu warstw asfaltowych na 19 podwarstw o 1 cm grubości każda. Uzyskane wyniki wykazały, że model z do- kładniejszym podziałem zapewnia lepszą prognozę ogólnej trwałości zmęczeniowej, prostsza metoda nie uwzględnia bowiem szczegółowo wpływu temperatury na właściwości mieszanek asfaltowych. Potwierdzono, że zastosowanie szczegółowego profilu temperatury w nawierzchni zapewnia realistyczne dane wejściowe do jej projektowania i pozwala na uwzględnienie na tym etapie zróżnicowanych właściwości mechanicznych materiałów w mieszankach, np. z asfaltem modyfikowanym gumą czy o wysokim module sztywności.

$N_{i,allow}$ – the allowable number of ESALs for a given pavement model (i from 1 to 22, Table 8).

At 1 million ESALs and 95% reliability level, the calculated CDF value equaled 0.72. Consequently, the pavement structure shows more than enough structural capacity. When the traffic loading is increased to 1.34 million, the calculated CDF value is 0.99, i.e. the pavement structure reaches its limit, beyond which it cannot carry more traffic loading. The value is in contrast with the 4.25 million ESALs calculated using the equivalent temperature method (Section 6). This is due to the fact that the simple method does not take into account the detailed impact of temperature on the asphalt pavement structure.

8. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The effect of temperature on asphalt pavement structures is a crucial factor in pavement structural design. In this paper, the temperature at various depths was estimated using the German guidelines. The prediction was compared with real data collected from a previously established weather station and good correlation was observed. Following this step, relative frequency of temperature distribution was established. The pavement model, built of elastic and isotropic solid elements, was divided into 19 sublayers of asphalt in order to better reflect the temperature variation. The temperature data were subsequently used as input in binder viscosity and asphalt dynamic modulus prediction. In this study, comparison between the simple model with equivalent temperature considered for the full 19 cm depth – which had one stiffness value per each asphalt course – and the discretized 19-layer model (by 1 cm) is presented. The results show that the discretized model provides better prediction of the overall structural capacity. This is due to the fact that the simple method does not enable a detailed consideration of the impact of temperature on the asphalt pavement structure. The obtained results highlight that calculations using a detailed temperature profile provide realistic input into pavement design and enable realistic consideration of performance of various asphalt materials, such as crumb rubber asphalt or high modulus asphalt.

REFERENCES / BIBLIOGRAFIA

- [1] Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), 1-47A Report, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, 2004
- [2] Guidelines for mathematical dimensioning of foundations of traffic surfaces with a course asphalt surface RDO. Research Society for Roads and Traffic, Berlin, 2009

- [3] Barber S.E.: Calculation of Maximum Pavement Temperatures from Weather Reports. Highway Research Board Bulletin, **168**, 1957, 1-8
- [4] Rumney T.N., Jimenez R.A.: Pavement Temperatures in the Southwest. 50th Annual Meeting of the Highway Research Board, Washington, 1971
- [5] Southgate H.F., Deen R.C.: Temperature Distribution Within Asphalt Pavements and Its Relationship to Pavement Deflection. Highway Research Record, **291**, 1969, 116-131
- [6] Thompson R.M., Dempsey J.B., Hill H., Vogel J.: Characterizing temperature effects for pavement analysis and design. 66th Annual Meeting of the Transportation Board, Washington, 1987, <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1987/1121/1121-003.pdf> (21.12.2021)
- [7] Duncan J.M., Monismith L.C., Wilson L.E.: Finite Element Analyses of Pavements. Highway Research Record, **228**, 1968, 18-33
- [8] Burmister D.M.: The general Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems I. Journal of Applied Physics, **16**, 2, 1945, 89-94, DOI: 10.1063/1.1707558
- [9] Tóth C., Primusz P.: New Hungarian mechanistic-empirical design procedure for asphalt pavements. Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, **15**, 1, 2020, 161-186, DOI: 10.7250/bjrbe.2020-15.466
- [10] Tóth C., Pethő L.: Calculating the equivalent temperature for mechanistic pavement design according to the French method for Hungarian climatic conditions. Acta Technica Jaurinensis, **14**, 3, 2021, DOI: 10.14513/actatechjaur.00602
- [11] Pszczola M., Judycki J.: Equivalent temperature for design of airport pavements using mechanistic-empirical methods. 2nd Annual International Conference “Airport pavements”, Strbske Pleso, Slovak Republic, 2014, https://www.researchgate.net/publication/262186813_Equivalent_temperature_for_design_of_airport_pavements_using_mechanistic-empirical_methods (21.12.2021)
- [12] AASHTO: Mechanistic-empirical pavement design guide. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, 2008
- [13] Monismith L.C., Hicks G.R., Finn N.F., Sousa J., Harvey J., Weissman S., Deacon J., Coplantz J., Paulsen G.: Permanent deformation response of asphalt aggregate mixes. National Research Council, Washington, 1994
- [14] Nagórski R., Tutka P., Złotowska M.: Defining the domain and boundary conditions for finite element model of flexible road pavement. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **16**, 4, 2017, 265-277, DOI: 10.7409/rabdim.017.017
- [15] LTPP Computed Parameter: Dynamic modulus. Federal Highway Administration, McLean, 2011
- [16] Mechanistic-empirical pavement design specification. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), Seoul, 2015
- [17] Guide to Pavement Technology, Part 2: Pavement Structural Design. Austroads Ltd., Sydney, 2017