

Magdalena NAGÓRSKA, Roman NAGÓRSKI

## **WPLYW POWIERZCHNI KONTAKTU KOŁA POJAZDU Z NAWIERZCHNIĄ DROGOWĄ PODATNĄ NA JEJ DEFORMACJĘ I TRWAŁOŚĆ. ZASTOSOWANIE MES PRZY WYKORZYSTANIU PROGRAMU ABAQUS**

### *Streszczenie*

*W artykule przedstawiono wpływ na deformację sprężystą i trwałość nawierzchni drogowej podatnej kształtem powierzchni kontaktu koła pojazdu z nawierzchnią, na przykładzie powierzchni zbliżonej kształtem do eliptycznego i na przykładzie typowego (reprezentatywnego) układu warstw nawierzchni. Założono, że modelem mechanistycznym nawierzchni jest wielowarstwowa półprzestrzeń liniowo sprężysta, a obciążenie wynikające z oddziaływania koła na nawierzchnię jest statyczne, prostopadłe do nawierzchni i rozłożone równomiernie na wspomnianej powierzchni oraz – do celów porównawczych – na powierzchni kołowej (o tym samym polu powierzchni). Przyjęto także wariant „powierzchni podwójnej” wynikający z oddziaływania na nawierzchnię koła podwójnego. W tym celu zastosowano MES i wykonano obliczenia z wykorzystaniem programu ABAQUS.*

### **WSTĘP**

Powszechnie (głównie z uwagi na stosowane metody analityczne) przyjmuje się, w tym w programach obliczeniowych (np. BISAR [1] i VEROAD [2]), powierzchnię kołową kontaktu standardowego koła (opony) pojazdu z nawierzchnią (powierzchnia K0 – rys. 1a). Przy tym, oddziaływanie koła na nawierzchnię równe połowie nacisku osi obliczeniowej (np.  $P = 50$  kN) zakłada się jako równomierne o intensywności równej ciśnieniu koła w oponie (np.  $p = 650$  kPa). Z tego wynika pole  $A = P / p$  powierzchni i w efekcie charakterystyczny jej rozmiar – promień koła K0 jest równy

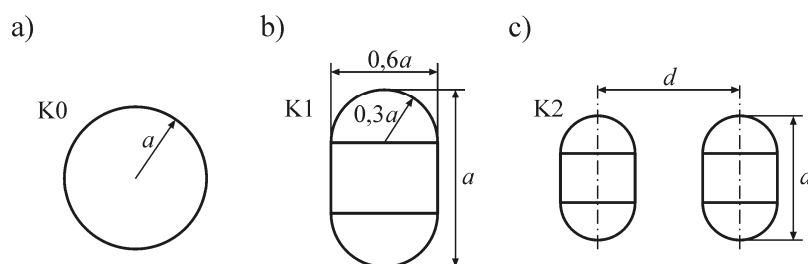
$$a = \sqrt{\frac{P}{p\pi}} \approx 15,65 \text{ cm}, \quad (1)$$

W pracy [3] zaproponowano kształt powierzchni kontaktu koła pojazdu z nawierzchnią zbliżony do eliptycznego (powierzchnia K1 – rys.1b), przy nadal równomiernie rozłożonym nacisku o intensywności  $p$ , a w konsekwencji rozmiarze charakterystycznym równym

$$a = \sqrt{\frac{P}{(0,24 + 0,09\pi)p}} \approx 38,36 \text{ cm}, \quad (2)$$

W przypadku koła podwójnego powierzchnia oddziaływania na nawierzchnię jest „podwójna” (powierzchnia K2 – rys.1c). Przyjmujemy każdą z nich w kształcie jak K1 i przy założeniu, że ciśnienie w oponie jest takie jak w przypadku koła pojedynczego, a więc pole całkowite  $A$  powierzchni K2 się nie zmienia, co implikuje teraz rozmiar charakterystyczny równy (rys.1c)

$$a = \sqrt{\frac{P}{2(0,24 + 0,09\pi)p}} \approx 27,13 \text{ cm}, \quad (3)$$



**Rys. 1.** Kształty powierzchni kontaktu koła pojazdu z nawierzchnią

Obszar prostokątny jako model powierzchni kontaktu koła pojazdu z nawierzchnią przyjęto m. in. w pracy [4], a kwadratowy w pracy [5]. W pracy [6] powierzchnię kontaktu opony z nawierzchnią zamodelowano układem prostokątów ze zróżnicowanymi intensywnościami obciążenia przybliżającymi realny rozkład oddziaływania opony na jezdnię. W pracy [7] jako obciążenie nawierzchni przyjęto oddziaływanie koła podwójnego rozłożone równomiernie na dwóch powierzchniach prostokątnych. W pracy [8] przyjęto różne konfiguracje kół i warianty wartości ciśnienia w oponie oraz obciążenia przyłożonego do osi pojazdu, co odzwierciedla obciążenia nawierzchni ciężkim pojazdem trójosiowym. Kontakt opon z nawierzchnią jest modelowany statycznie obciążeniami rozłożonymi równomiernie na powierzchniach prostokątnych. Natomiast obciążenie nawierzchni oddziaływaniem modelowanego za pomocą MES ruchomego koła pojazdu znajdujemy w pracy [9].

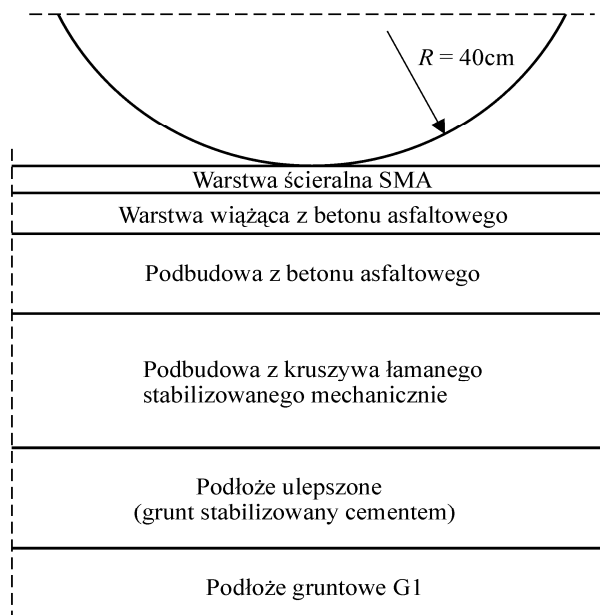
Celem tego artykułu jest przedstawienie wpływu na trwałość i wyteżenie nawierzchni drogowej powierzchni w kształcie K1 i K2 w stosunku do powierzchni K0, na których działa obciążenie siłami pionowymi rozłożonymi równomiernie (o intensywności  $p$ ), o wypadkowej  $P$ . Wpływ ten określono na podstawie modeli skończone elementowych zbudowanych dla przykładowej (typowej, reprezentatywnej) struktury nawierzchni – w ramach modelu mechanicznego (mechanistycznego, matematyczno-fizycznego) w postaci wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej, rekomendowanego do stosowania w przepisach technicznych (Załącznik nr 5 do Rozporządzenia [10]). Wykorzystano zarówno opis powyższych modeli, ich weryfikację jak też analizę zawarte w pracy [11].

## 1. MODELE NAWIERZCHNI PODATNEJ – MODEL FIZYCZNY I MODELE OBLICZENIOWE

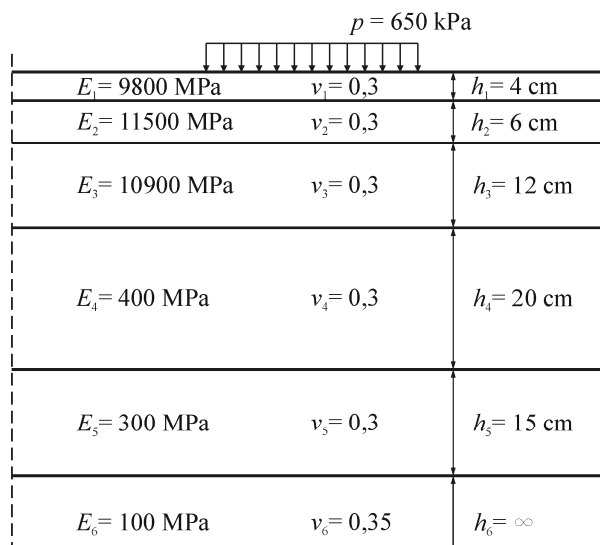
Przedmiotem analizy jest układ konstrukcyjny warstw i podłoża gruntowego podatnej nawierzchni drogowej, którego typowy (reprezentatywny) przykład przedstawiono schematycznie na rys. 2 i który znajduje się w stanie deformacji statycznej pod działaniem standardowego koła pojazdu ciężkiego. Przyjęte modele oddziaływania koła na nawierzchnię opisano w p.1.

Jako model mechaniczny (MM) powyższej nawierzchni przyjęto, zgodnie z [10], wielowarstwową półprzestrzeń liniowo sprężystą o układzie warstw jak na rys. 3. Warstwy są jednorodne, izotropowe, a warstwy konstrukcyjne o stałej grubości. Założono pełną ciągłość

przemieszczeń na powierzchniach kontaktu warstw. Na rys.3 zaznaczono stałe materiałowe poszczególnych warstw – moduły Younga  $E_i$  i współczynniki Poissona  $\nu_i$ , a także grubości warstw  $h_i$ .



**Rys. 2.** Schemat przykładowego układu warstw podatnej nawierzchni drogowej



**Rys. 3.** Oznaczenia parametrów geometrycznych i materiałowych modelu mechanicznego nawierzchni drogowej

Ważne znaczenie (w procesie projektowania nawierzchni) mają, oprócz składowych przemieszczeń, odkształceń i naprężeń, następujące dwie syntetyczne wielkości charakteryzujące konstrukcję nawierzchni (w relacji do obciążenia ruchem pojazdów), a mianowicie trwałość zmęczeniowa (odporność na spękania zmęczeniowe) i trwałość deformacyjna (odporność na deformacje trwałe – koleiny strukturalne) wg Instytutu Asfaltowego (por.[11]):

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

$$M = 4,84 \left( \frac{V_a}{V_v} - 0,69 \right), \quad (5)$$

gdzie:

$N_z$  - trwałość zmęczeniowa (w [liczba osi obliczeniowych / pas ruchu]),

$E$  - moduł sztywności najniższej położonej warstwy asfaltowej (w [MPa]),

$\varepsilon_a$  - maksymalne odkształcenie rozciągające (w kierunku poziomym) na spodzie warstw asfaltowych (w [1]),

$V_a$  - zawartość objętościowa asfaltu w mieszance (w [% v/v])

$V_v$  - zawartość objętościowa wolnych przestrzeni w mieszance (w [% v/v])

oraz

$$N_d = \left( \frac{k}{\varepsilon_p} \right)^{1/m}, \quad (6)$$

przy czym:

$N_d$  - trwałość deformacyjna (w [liczba osi obliczeniowych / pas ruchu]),

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

$\varepsilon_p$  - maksymalne odkształcenie ściskające (w kierunku pionowym) na powierzchni górnej podłoża gruntowego (w [1]).

Do obliczeń przyjęto

$$V_a = 9,6 \text{ [% v/v]}, \quad V_v = 8 \text{ [% v/v]}. \quad (7)$$

Aby określić wartości trwałości (4) i (6) z modelu mechanicznego należy wyznaczyć odkształcenia  $\varepsilon_a$  i  $\varepsilon_p$  oraz odpowiednio przyjąć moduł sztywności  $E$ . W tym celu możemy wykorzystać metody analityczne (w ograniczonym zakresie odnośnie modeli mechanicznych i zagadnień do rozwiązania) lub metody numeryczne, zwłaszcza MES.

W celu budowy modelu skończenie elementowego (MES) rozpatrywanej nawierzchni wyodrębniamy z półprzestrzeni ośrodka obszar prostopadłościenny  $\mathcal{V}$  o rozmiarach  $l \times b \times h$ , przyjmując osie współrzędnych kartezjańskich  $x$ ,  $y$ ,  $z$  równoległe do krawędzi i o początku w środku geometrycznym powierzchni obciążenia odpowiednio K0, K1 lub K2 (rys.4).

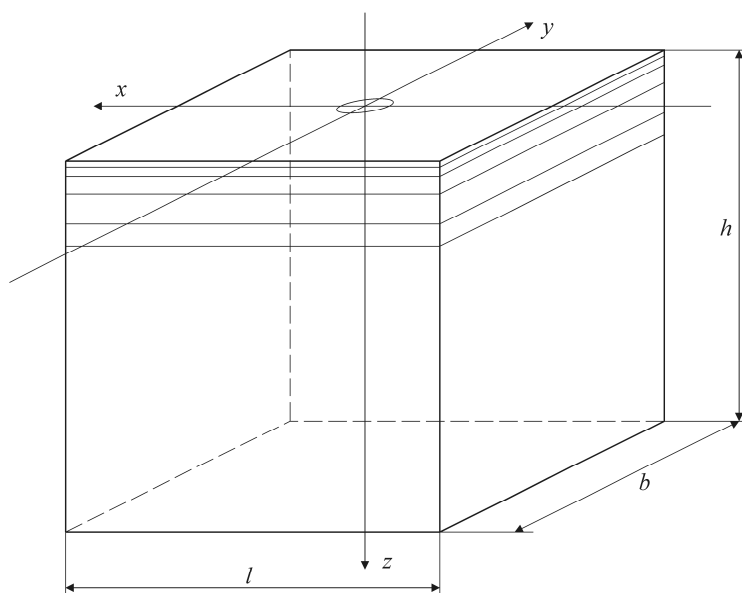
Na powierzchniach bocznych i na podstawie dolnej obszaru  $\mathcal{V}$  przyjmujemy warunki brzegowe (oznaczone jako WB-1) braku możliwości przemieszczenia w kierunku prostopadłym do powierzchni oraz swobodnej przesuwności w płaszczyznach stycznych do tych powierzchni.

Z uwagi na bisymetrię obszaru  $\mathcal{V}$  i jego deformacji (przy założonym obciążeniu i warunkach brzegowych) do modelowania skończenie elementowego wystarczy przyjąć podobzdar  $\mathcal{U}$  (przy  $x \geq 0$ ,  $y \geq 0$ ).

Przyjęto następujące parametry modelu obliczeniowego MES, który został poddany wszechstronnie walidacji w pracy [12]. Rozmiary obszaru  $\mathcal{U}$  są równe:  $l/2 = b/2 = 3,5$  m i  $h = 10,39$  m. Dobrano je na podstawie zaproponowanego w pracy [12] sposobu postępowania zapewniającego zgodność wyników z rozwiązaniem za pomocą transformacji całkowych otrzymanym z wykorzystaniem programu VEROAD.

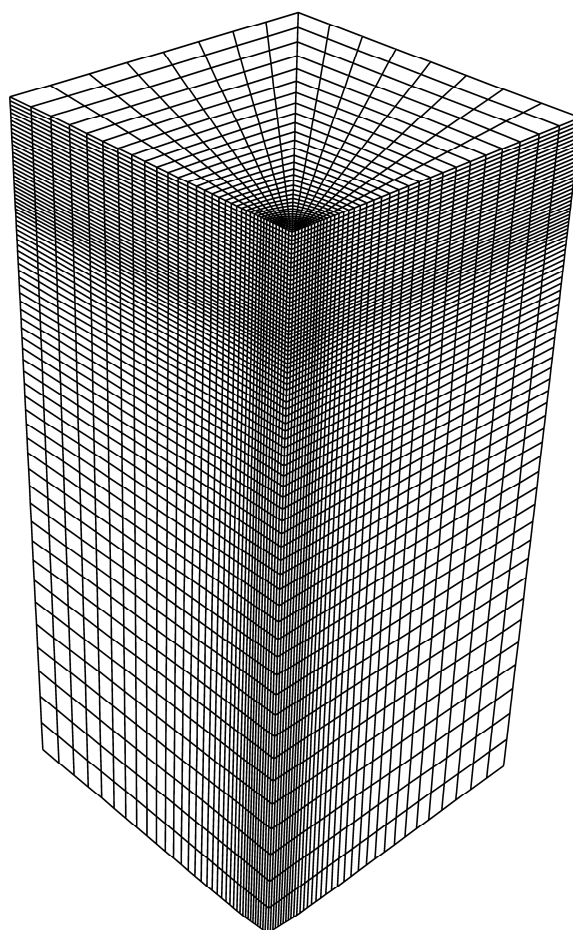
Wartość  $h = 10,39$  m wysokości obszaru  $\mathcal{V}$  można zredukować do  $h_z = 5,0$  m, modyfikując warunki brzegowe WB-1 przez przyjęcie na podstawie dolnej prostopadłościenu  $\mathcal{U}$  podparcia sprężystego typu Winklera o współczynniku sztywności  $k_z$  (WB-2), zgodnie ze wzorami

$$k_z = \frac{E'}{h'} = 29,78 \text{ MN/m}^3, \quad h' = h - h_z = 5,39 \text{ m}, \quad E' = \frac{(1 - \nu_6) E_6}{(1 + \nu_6)(1 - 2\nu_6)} = 160,5 \text{ Mpa}. \quad (8)$$



**Rys. 4.** Prostopadłościenny obszar  $\mathcal{V}$  modelu skończenie elementowego nawierzchni

Jeżeli po redukcji wysokości  $h$  obszaru  $\mathcal{V}$  pozostawi się warunki brzegowe WB-1, to nie wpłynie to praktycznie na dokładność obliczonych wartości naprężeń i odkształceń.



**Rys. 5.** Podział modelowanego obszaru  $\mathcal{U}$  konstrukcji nawierzchni na elementy skończone

Przykładowy możliwy podział  $\mathcal{U}$  na elementy skończone przedstawiono na rys.5. Elementy są w kształcie graniastosłupów prostych o podstawach czworokątnych położonych

na granicach warstw lub płaszczyznach równoległych. Rozmiary najmniejszych elementów położonych pod powierzchnią obciążenia są równe ok. 2 cm, a ich wysokość wzrasta mniej więcej proporcjonalnie do wartości rzędu 10 cm przy  $h = 5,0$  m lub do wartości rzędu 20 cm przy  $h = 10,39$  m wraz ze zbliżaniem się do podstawy dolnej obszaru  $\mathcal{U}$  ( $z = h$  lub  $z = h_z$ ), natomiast szerokość elementów skończonych wzrasta proporcjonalnie do wartości rzędu 10 cm wraz ze zbliżaniem się do ściany bocznej obszaru  $\mathcal{U}$  ( $x = l/2$  lub  $y = b/2$ ). Elementy są 20-węzłowe z parametrami węzłowymi w wierzchołkach i w środkach krawędzi postaci składowych przemieszczeń  $w_x$ ,  $w_y$ ,  $w_z$  i z kwadratowymi funkcjami kształtu. Zastosowano całkowanie dokładne metodą Gaussa. Obliczenia wykonano przy wykorzystaniu programu ABAQUS.

## 2. WYNIKI OBLICZEŃ

Przeprowadzono serię obliczeń dla przyjętych danych i wariantów powierzchni obciążenia K0, K1 i K2. Obliczenia na podstawie modeli skończenie wymiarowych z wykorzystaniem programu ABAQUS / Standard wykonano przy użyciu klastra wieloprocesorowego na Wydziale IL PW. Obliczenia dla modelu mechanicznego wyjściowego MM (półprzestrzeń wielowarstwowa) przy powierzchni obciążenia K0 przeprowadzono za pomocą programu VEROAD (na PC – program nie wymaga instalacji).

W wyniku przeprowadzanych obliczeń wyznaczano wartości przemieszczeń  $w_x$ ,  $w_y$ ,  $w_z$  w węzłach oraz wartości w wierzchołkach elementów naprężeń  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$  i odkształceń  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$ ,  $\varepsilon_{zz}$ , a następnie obliczano także trwałości nawierzchni wg wzorów (4) - (7). Dalej przedstawiamy wybrane rezultaty tych obliczeń.

W tabelach 1 i 2 zestawiono kluczowe wartości podstawowych wielkości w określonych miejscach struktury nawierzchni, w tym wartości ugięć  $w_z$  powierzchni górnej, wartości naprężeń  $\sigma_{xx}$  pod powierzchnią górną, wartości odkształceń w kierunku poziomym  $\varepsilon_{xx}$  i ewentualnie  $\varepsilon_{yy}$  na spodzie warstw asfaltowych, wartości odkształceń w kierunku pionowym  $\varepsilon_{zz}$  na górze podłoża gruntowego i ewentualnie na górze podłoża ulepszanego – wszystkie pod środkiem powierzchni obciążenia ( $x = 0$ ,  $y = 0$ ). W tabeli 2 zamieszczono także wartości trwałości nawierzchni. Tabela 3 obrazuje wielkość zadania obliczeniowego (zadanie duże).

**Tab. 1.** Zestawienie kluczowych wartości wybranych wielkości dla modeli MM i MES (przy  $l = b = 7,0$  m,  $h = 5,0$  m) z powierzchnią obciążenia K0

Lp.	Model nawierzchni/ /warunki brzegowe	$w_z$ [mm]	$\sigma_{xx}$ [MPa]	$\varepsilon_{xx}$ [ $10^{-6}$ ]	$\varepsilon_{zz}^{1)}$ [ $10^{-6}$ ]	$\varepsilon_{zz}^{2)}$ [ $10^{-6}$ ]
1.	MM	0,241	-1,194	62,42	-164,5	-107,5
3.	MES / WB-1	0,199	-1,184	62,04	-163,8	-107,1
2.	MES / WB-2	0,242	-1,185	62,27	-163,9	-107,1

1) podłoże gruntowe 2) podłoże ulepszone

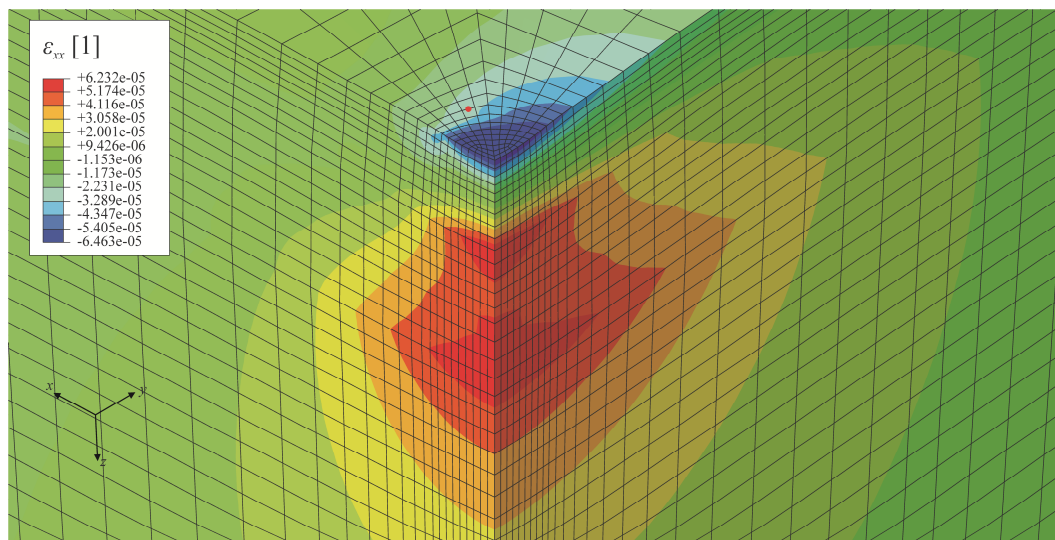
**Tab. 2.** Zestawienie wartości trwałości zmęczeniowej  $N_z$  i trwałości deformacyjnej  $N_d$  przy różnych powierzchniach obciążenia (przy warunkach brzegowych WB-1) wraz z odpowiednimi wartościami odkształceń we wzorach (4)-(7)

Lp.	Powierzchnia obciążenia	$\varepsilon_{xx}$ [ $10^{-6}$ ]	$\varepsilon_{yy}$ [ $10^{-6}$ ]	$N_z$ [mln osi obl.]	$\varepsilon_{zz}$ [ $10^{-6}$ ]	$N_d$ [mln osi obl.]
1.	K0	62,04	62,04	5,67	-163,8	126,64
2.	K1	57,01	64,93	4,88	-163,2	128,71
3.	K2	53,29	39,39	9,35	-154,8	163,17

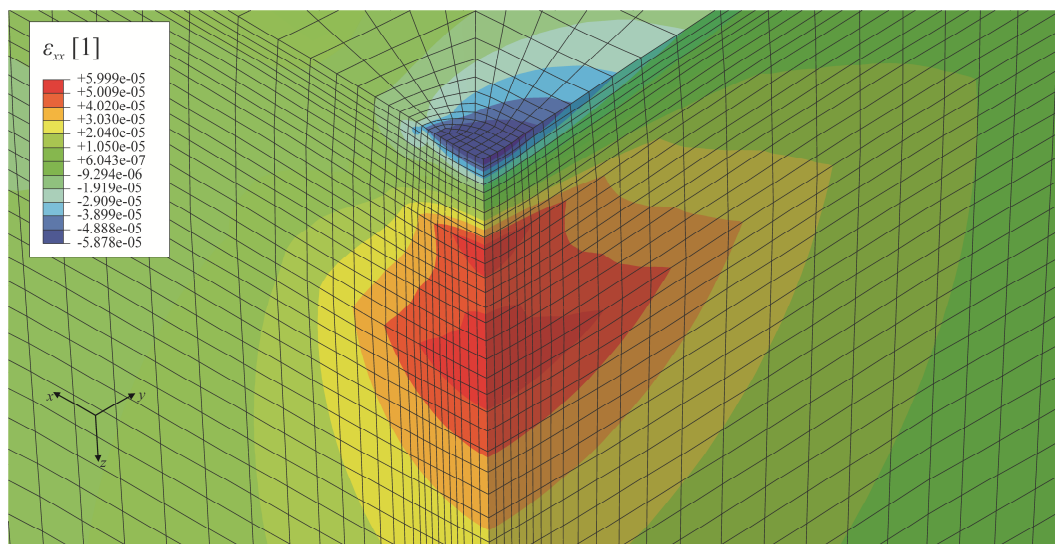
Rysunki 6-11 przedstawiają mapy warstwiczne wybranych wielkości w obszarze  $\mathcal{U}$  wraz ze zdeformowaną siatką podziału na elementy skończone przy warunkach brzegowych WB-2.

**Tab. 3.** Rozmiar zadania obliczeniowego dla modelu MES (przy  $l = b = 7,0$  m,  $h = 5,0$  m) przy warunkach brzegowych WB-1

Typ elementów ABAQUS	Liczba węzłów	Liczba stopni swobody	Czas obliczeń [s]	Wielkość pliku z wynikami [MB]
C3D20	108501	325503	321	121



**Rys. 6.** Mapa warstwiczna odkształceń  $\varepsilon_{xx}$  wg modelu MES z powierzchnią obciążenia K0



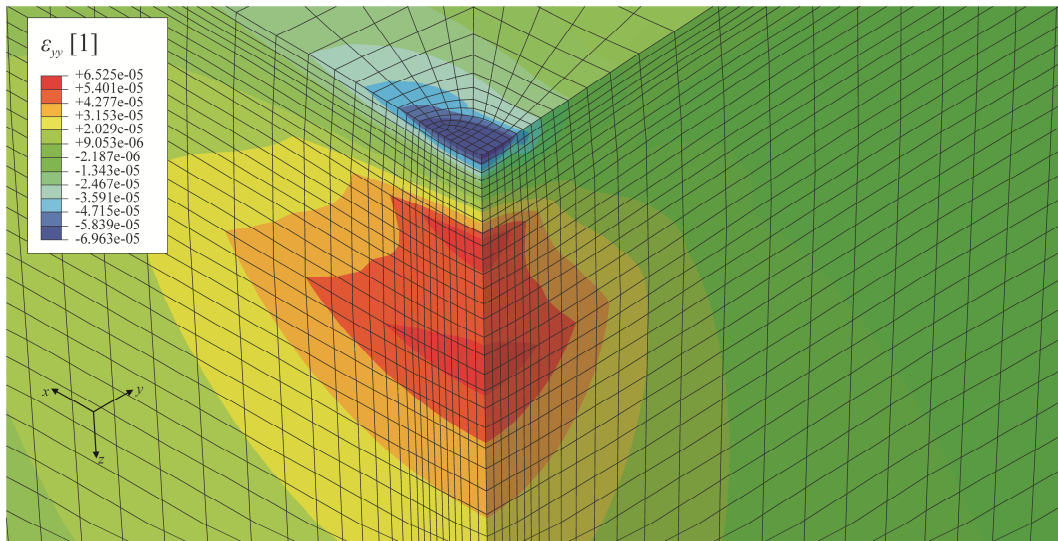
**Rys. 7.** Mapa warstwiczna odkształceń  $\varepsilon_{xx}$  wg modelu MES z powierzchnią obciążenia K1

## PODSUMOWANIE

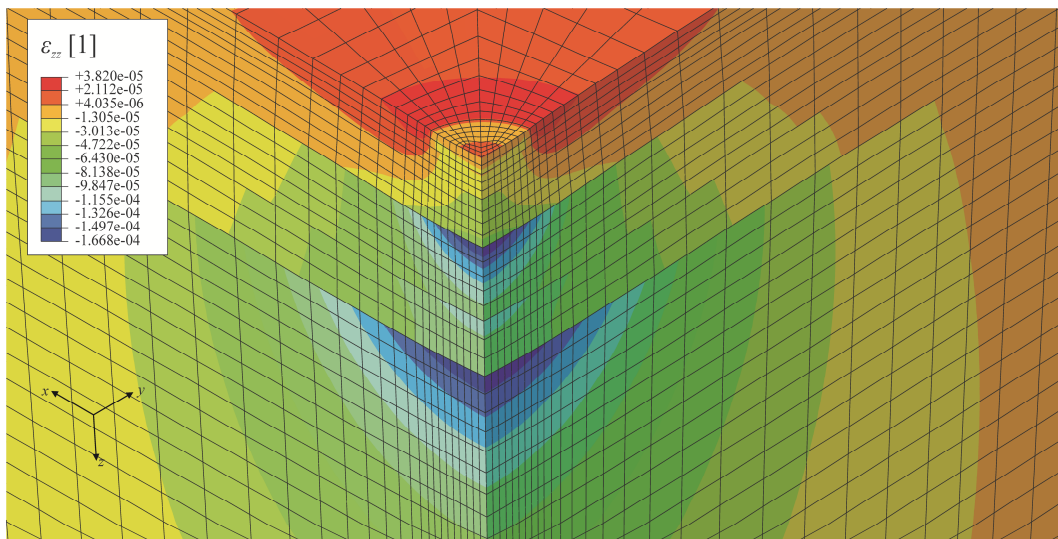
Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można wnioskować, że:

1. odwierciedlająca kontakt koła pojazdu z nawierzchnią powierzchnia obciążenia w kształcie podobnym do eliptycznego (wg [3] – rys.1) implikuje, iż w stosunku do powierzchni kołowej tego obciążenia wzrasta na spodzie warstw asfaltowych odkształcenie  $\varepsilon_{yy}$  a maleje odkształcenie  $\varepsilon_{xx}$  (rys. 4), co z kolei oznacza możliwość pojawienia się najpierw spękań w kierunku osi drogi, a następnie w kierunku

poprzecznym i w konsekwencji zmniejszenie wartości trwałości zmęczeniowej (o ok. 14%);



**Rys. 8.** Mapa warstwicowa odkształceń  $\varepsilon_{yy}$  wg modelu MES z powierzchnią obciążenia K1

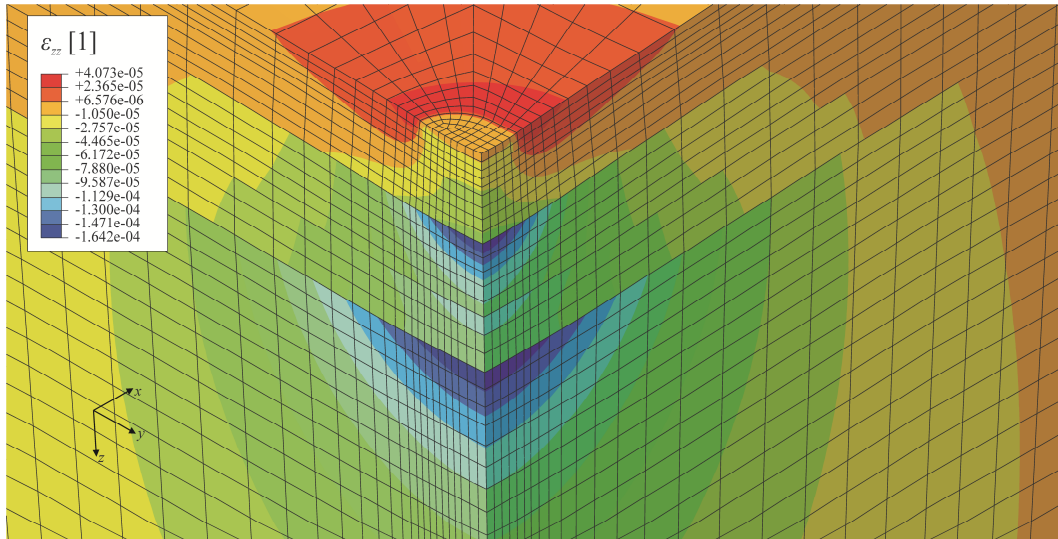


**Rys. 9.** Mapa warstwicowa odkształceń  $\varepsilon_{zz}$  wg modelu MES z powierzchnią obciążenia K0

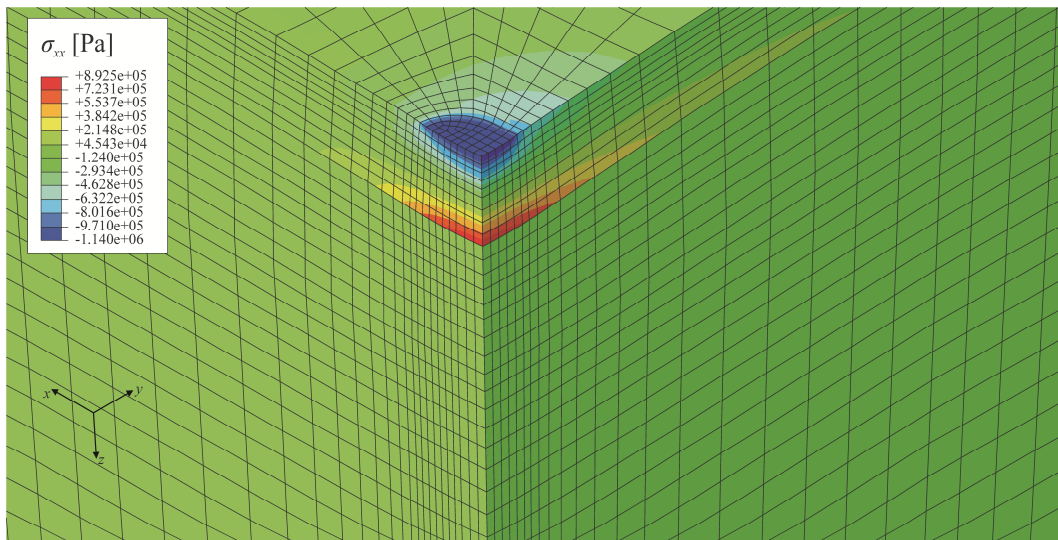
2. biorąc pod uwagę przybliżony charakter empirycznych formuł obliczania (szacowania) trwałości nawierzchni podana wyżej różnica w wartościach tej trwałości może być potraktowana jako mniej istotna, gdyż przyjęcie niekołowej powierzchni obciążenia mogłoby powodować utratę obrotowej symetrii deformacji nawierzchni, która oznacza wydatne uproszczenie modelu obliczeniowego w stosunku do modelu trójwymiarowego (możliwość skorzystania z metod analitycznych, zdecydowane zmniejszenie rozmiaru zadania obliczeniowego);
3. wydłużony kształt powierzchni obciążenia (elipsopodobny) nie ma wpływu na wartości odkształceń  $\varepsilon_{zz}$  na powierzchni górnej podłoża gruntowego, co oznacza również brak wpływu tego kształtu na wartość trwałości deformacyjnej nawierzchni (odporności na deformacje trwałe strukturalne);
4. uwzględnienie w modelu nawierzchni powierzchni kontaktu koła podwójnego wpływa zdecydowanie na zmniejszenie wartości wielu wielkości pod powierzchnią obciążenia,



w tym na zmniejszenie odkształceń poziomych na spodzie warstw asfaltowych i odkształceń pionowych na powierzchni górnej podłoża, co powoduje także wzrost wartości obu trwałości nawierzchni; z punktu widzenia projektowania (wymiarowania) nawierzchni oznacza to jednak działanie po „niekorzystnej stronie” dla zapewnienia trwałości nawierzchni – bezpieczniejsze jest zatem przyjmowanie w analizie mechanicznej nawierzchni tylko kół pojedynczych (o naciskach dopuszczalnych na nawierzchnie).



**Rys. 10.** Mapa warstwiczna odkształceń  $\epsilon_{zz}$  wg modelu MES z powierzchnią obciążenia K1



**Rys. 11.** Mapa warstwiczna naprężeń  $\sigma_{xx}$  wg modelu MES z powierzchnią obciążenia K1

# EFFECT OF CONTACT SURFACE OF TRUCK WHEEL WITH THE ROAD FLEXIBLE PAVEMENT ON ITS DEFORMATION AND DURABILITY. APPLICATION OF FEM WITH USE OF ABAQUS SOFTWARE

## *Abstract.*

*The effect of the contact surface of standard truck wheel (in the shape of area close to an elliptical one) with the road pavement (of a typical, representative set of layers) on the elastic deformation and durability of the pavement is shown in the paper. It was assumed that the pavement model is multi-layered linear elastic half-space and the load resulting from the impact of the wheel on the pavement is static, perpendicular to the pavement surface and uniformly distributed on the undertaken surface, and – for comparison purposes – on being frequently in use circular surface (of the same surface area). Also the variant of "double surface" due to the impact of dual wheel is taken into account. For this aim Finite Element Method was applied and ABAQUS software was used.*

## **BIBLIOGRAFIA**

1. BISAR 3.0, Shell Bitumen, 1998. Shell International Oil Products BV.
2. Hopman P.C.: *The Visco-Elastic Multilayer Program VEROAD*. Heron, Vol. 41, 1996, No 1.
3. Rolla S.: *Projektowanie nawierzchni*. WKŁ, Warszawa 1987.
4. Kuo C.-M., Chou F.-J.: *Development of 3-D finite element model for flexible pavements*. Journal of the Chinese Institute of Engineers (2004), 27 (5), 707 – 717.
5. Cho Y.-H., Koo H. –M.: *A behavior analysis of concrete overlay based on the characteristics of asphalt pavements*. Proceedings of 82<sup>nd</sup> Transportation Research Board Meeting, Washington, D. C., 2003.
6. Su K., Sun L., Hachiya Y., Maekawa R.: *Analysis of shear stress in asphalt pavements under actual measured tire-pavement contact pressure*. 6th ICPT, Sapporo, Japan, 2008.
7. Akbulut H., Aslantas K.: *Finite element analysis of stress distribution on bituminous pavement and failure mechanism*. Materials and Design (2005), 26 (4), 383–387.
8. Mulungye R. M., Owende P. M. O., Mellon K.: *Finite element model ling of flexible pavements on soft soil subgrades*. Materials and Design (2007), 28 (3), 739–756.
9. Chiroux R.C., Foster W.A. Jr., Johnson C.E., Shoop S.A., Raper R.L.: *Three-dimensional finite element analysis of soil interaction with a rigid wheel*. Appl. Math. and Comp. (2005), 162 (2), 707-722 .
10. *Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie* (Dz. U. z dnia 14 maja 1999 r.).
11. Piłat J., Radziszewski P.: *Nawierzchnie asfaltowe*. WKŁ, Wyd. II, Warszawa 2007.
12. Nagórska M.: *Wpływ warunków brzegowych na deformację statyczną, wyteżenie i trwałość nawierzchni drogowej podatnej. Zastosowanie MES przy wykorzystaniu programu ABAQUS*. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Warszawa 2012.

## **Recenzent:**

## **Autorzy:**

**mgr inż. Magdalena Nagórska** – Politechnika Warszawska  
**prof. dr hab. inż. Roman Nagórski** – Politechnika Warszawska