



ANDRZEJ POŻARYCKI<sup>1)</sup>  
PRZEMYSŁAW GÓRNAŚ<sup>2)</sup>  
PAWEŁ ZALEWSKI<sup>3)</sup>

## THE INFLUENCE OF CRACKS ON CHANGES IN STIFFNESS MODULI OF ASPHALT MIXTURES BASED ON IN SITU TESTS

## WPŁYW SPĘKAŃ NA ZMIANĘ MODUŁÓW SZTYWNOŚCI MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH OZNACZANYCH W WARUNKACH IN SITU

**STRESZCZENIE.** W prognozowaniu zmian stanu technicznego nawierzchni drogowych decydującą rolę w zakresie potencjalnych potrzeb remontowych oraz ich kosztów stanowi diagnoza nawierzchni. Jednym z zadań diagnozy jest wykrycie czynników, np. spękań, które mogą w znaczącym stopniu przyspieszyć degradację nawierzchni. O ile identyfikacja spękań widocznych na powierzchni warstw ścieralnych jest możliwa przy inwentaryzacji wizualnej lub fotorejestracji, to wykrywanie spękań warstw asfaltowych położonych poniżej warstwy ścieralnej wymaga zastosowania innych metod. W artykule przedstawiono skuteczność identyfikacji uszkodzonych w kontrolowany sposób warstw asfaltowych nawierzchni odcinka testowego przy użyciu techniki obliczeń odwrotnych. Opierając się na wynikach pomiaru ugięć nawierzchni przy zastosowaniu urządzenia typu FWD i pseudo statycznych wartościach, analiza sztywności warstw w modelu trójwarstwowej nawierzchni pozwoliła wskazać poprawną lokalizację wymuszonych uszkodzeń.

**SŁOWA KLUCZOWE:** obliczenia odwrotne, spękania warstw asfaltowych, ugięciomierz dynamiczny FWD.

**ABSTRACT.** The role of diagnosis in predicting changes in the technical condition of pavement within the scope of potential repair needs and their costs is decisive. One of its aims is to detect certain factors, e.g. cracks which can considerably accelerate the degradation of pavement. Whereas the identification of cracks visible on the surface of wearing courses is possible at a visual inventory or photo-based pavement condition survey, revealing cracks in bituminous courses located below the wearing course requires the application of different methods. The present article introduces the effectiveness of identifying in a controlled way damaged bituminous courses of the pavement test section by means of the backcalculation technique. Basing on measurement results with the use of FWD (Falling Weight Deflectometer) device and pseudo-static values, the stiffness analysis of courses in the three-course pavement enabled to indicate the correct location of constrained damage.

**KEYWORDS:** backcalculation, cracks of asphalt layers, Falling Weight Deflectometer (FWD).

DOI: 10.7409/rabdim.015.017

<sup>1)</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Lądowej, Zakład Budownictwa Drogowego; andrzej.pozarycki@put.poznan.pl

<sup>2)</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Lądowej, Zakład Budownictwa Drogowego; przemyslaw.gornas@put.poznan.pl ✉

<sup>3)</sup> BiZ Drog Piotr Buczek i Paweł Zalewski sp. j., Kokorzyce gm. Miękinia; biuro@bizdrog.pl

## 1. WPROWADZENIE

Efektywne zarządzanie nawierzchniami w dużym stopniu zależy od trafności prognozy ich stanu technicznego w określonym czasie. Źródłem prognoz są teoretyczne i empiryczne modele nawierzchni bazujące na wynikach wieloletnich i cyklicznych badań nawierzchni. Do diagnozowania nawierzchni drogowych stosuje się różne techniki pomiarowe, których wykorzystanie dostarcza użytkownikowi zbiór parametrów charakteryzujących warstwę nawierzchni i jej podłoża. Jednym z takich parametrów jest sztywność warstwy, opisana np. modulem sprężystości, która służy do wyznaczenia trwałości zmęczeniowej nawierzchni [1-3]. Oznaczenie wartości modułów sprężystości poszczególnych warstw nawierzchni i jej podłoża w warunkach in situ jest możliwe poprzez wykorzystanie wyników pomiaru przemieszczeń pionowych nawierzchni (ugięć), np. ugięciomierzem dynamicznym typu FWD. Zmierzone ugięcia nawierzchni można wykorzystać do obliczeń odwrotnych [4-9]. W powszechnie stosowanej procedurze obliczeń odwrotnych akceptuje się szereg uproszczeń. Najczęściej do obliczeń wykorzystuje się model oparty na teorii warstw sprężystych spoczywających na półprzestrzeni sprężystej (ang. *Layered Elastic Theory model*, LET) [10]. Jednym z założeń modelu LET jest warunek ciągłości materii ośrodka zbudowanego z poszczególnych warstw. W odniesieniu do spękanych warstw nawierzchni z mieszanek mineralno-asfaltowych założenie ciągłości ma bezpośredni wpływ na oznaczane wartości w obliczeniach odwrotnych. Spękanej warstwie z MMA przypisuje się mniejszy moduł sztywności niż w warstwie niespękanej. W literaturze można znaleźć prace [11-14] dotyczące spękanych warstw nawierzchni z MMA, poddające analizie głównie zagadnienie powstawania spękań oraz metod zapobiegania im. Zagadnienia modelowania spękań nawierzchni podejmowano w pracach [14-17]. Znajomość wpływu spękań warstw z MMA na wartości oznaczonych modułów sztywności przy wykorzystaniu obliczeń odwrotnych jest relatywnie ograniczona [18] i sprowadza się głównie do empirycznie wyznaczonych wartości [9].

## 2. CEL PRACY

Za cel pracy przyjęto ocenę wpływu lokalizacji spękania warstw asfaltowych nawierzchni podatnej na wartości modułu sztywności MMA i modułów sprężystości pozostałych warstw nawierzchni, oznaczonych metodą obliczeń odwrotnych. Podstawą tej oceny są wyniki pomiaru ugięć nawierzchni jezdni odcinka testowego, w której warstwy asfaltowe zostały nacięte w sposób kontrolowany. W celu

## 1. INTRODUCTION

The effective management of pavements depends to a large extent on the accuracy of prognosis of their technical condition in the determined time. Theoretical and empirical pavement models are based on results of long-term and cyclical researches into pavements. Different measuring techniques are applied to diagnose road pavements. Their users receive sets of parameters describing pavement courses and its subgrade. One of such parameters is the course stiffness, expressed e.g. through the elastic modulus, which serves to determine the fatigue life of pavement [1-3]. Determining values of elastic moduli of individual pavement courses and its subgrade is possible in situ by using measurement results of vertical displacements of pavement (deflections), e.g. with the use of FWD. The measured deflections of pavement can be used in backcalculation [4-9]. A number of simplifications have been made in the commonly applied procedure of backcalculation. The model based on the theory of elastic layers laid on the elastic half-space (*Layered Elastic Theory model*, LET) [10] is applied most often to the calculations. The condition of matter continuum of the medium made of separate courses is one of LET model assumptions. The assumption of continuum exerts a direct impact on determining the values of backcalculation with reference to cracked pavement courses made of asphalt mixtures. The lower stiffness modulus is attributed to a cracked HMA course than to its non-cracked equivalent. Some papers [11-14] on that subject can be found in the literature. They analyse mainly cracks development and methods for their prevention. The issues of modelling of pavement cracking have been described in the papers [14-17]. The knowledge about the influence of cracks in courses of HMA on values of determined stiffness moduli with the use of backcalculation is relatively limited [18], and it consists mainly in empirically concluded values [9].

## 2. THE AIM OF RESEARCH

The research was aimed at the assessment of the influence of location of cracks in bitumen courses of flexible pavement on values of HMA stiffness modulus, and elastic moduli of the remaining pavement courses, determined through the backcalculation method. Measurement results of pavement deflections of the roadway test section with bitumen courses cut in a controlled way are the basis of that assessment. The analysis of data in situ was preceded by an independent numerical experiment in order

identyfikacji parametrów modelu teoretycznego nawierzchni z naciętymi warstwami analizę danych in situ poprzedzono niezależnym eksperymentem numerycznym.

### 3. METODYKA

#### 3.1. CHARAKTERYSTYKA MODELI WYKORZYSTANYCH DO EKSPERYMENTU NUMERYCZNEGO

Do obliczeń odwrotnych zastosowano dwie odrębne ścieżki analiz. Pierwsza z nich dotyczy obliczeń teoretycznych modeli nawierzchni jezdni. Analizie poddano obliczone wartości przemieszczeń w modelach z warstwami, w których wprowadzono nacięcia imitujące rzeczywiste spękania nawierzchni. Drugą analizę przeprowadzono na podstawie wyników pomiarów in situ wykonanych ugięciomierzem dynamicznym typu FWD na nawierzchni odcinka testowego.

Podstawą przeprowadzonego eksperymentu numerycznego był wygenerowany zbiór danych w postaci obliczonych ugięć nawierzchni według modeli teoretycznych. Z założenia charakterystyka modeli odpowiada w pewnym zakresie warunkom wykonania pomiarów urządzeniami typu FWD, a mianowicie:

- 1) obciążenie modelu nawierzchni przyjęto jako równomiernie rozłożone na powierzchni kołowej o promieniu 15 cm,
- 2) ugięcia na powierzchni najwyższej usytuowanej warstwy w modelu obliczono w odległościach: 0; 0,3; 0,6; 0,9; 1,2; 1,5; 1,8 m od osi obciążenia. Obliczone wartości ugięć oznaczono w dalszej części pracy symbolami – odpowiednio: U1, U2, ..., U7.

Przyjęty model numeryczny nawierzchni oparto na metodzie elementów skończonych MES. Podstawowe parametry modelu numerycznego MES zdefiniowano uwzględniając rezultaty uzyskane w pracy [19]. Schemat przyjętego modelu obliczeniowego przedstawiono na Rys. 1.

Układ i grubości warstw w modelu odpowiadają konstrukcji nawierzchni odcinka testowego. Szczegółowe dane na ten temat zestawiono w Tabl. 1.

to determine parameters of a theoretical model of pavement.

### 3. METHODOLOGY

#### 3.1. CHARACTERISTICS OF MODELS USED IN THE NUMERICAL EXPERIMENT

Two separate methods of analysis were used for backcalculation. The first one concerns calculations of theoretical models of roadway pavement. The computed values of displacements were analysed in models where courses with cuts imitating real cracks in pavements were introduced. The second method of analysis was based on in situ measurement results carried out with the use of the dynamic deflectometer FWD on the pavement test section.

The generated set of data in the form of calculated pavement deflections according to the theoretical models formed the basis of conducting the numerical experiment. Within a certain scope the assumed characteristics of models responded to conditions of performing measurements with the use of FWD devices, namely:

- 1) the loading of pavement model was adopted as a uniformly distributed force on a circular surface with a diameter of 30 cm,
- 2) deflections on the highest course of the model were calculated at distances: 0; 0.3; 0.6; 0.9; 1.2; 1.5 and 1.8 m from the loading axis. In the following part of experiment calculated values of deflections were marked with corresponding symbols: U1, U2, ..., and U7.

The adopted numerical model of pavement was based on the finite element method FEM. The basic parameters of the FEM numerical model were defined taking into consideration results obtained in the research [19]. Fig. 1 presents the scheme of the accepted computational model.

The system and course thicknesses of the model correspond with the construction of pavement test section. The detailed data considering this issue is listed in Table 1.

Table 1. Assumed thickness of individual courses of roadway pavement model  
Tablica 1. Założone grubości poszczególnych warstw modelu nawierzchni jezdni

HMA layers / Warstwy MMA [m]			Layer of crushed stone aggregate layer [m] Warstwa KLSM	Improved subgrade Podłoże ulepszone
Wearing / Ścieralna BA1	Binder / Wiążąca BA2	Base / Podbudowa BA3		
0.05	0.06	0.07	0.20	∞

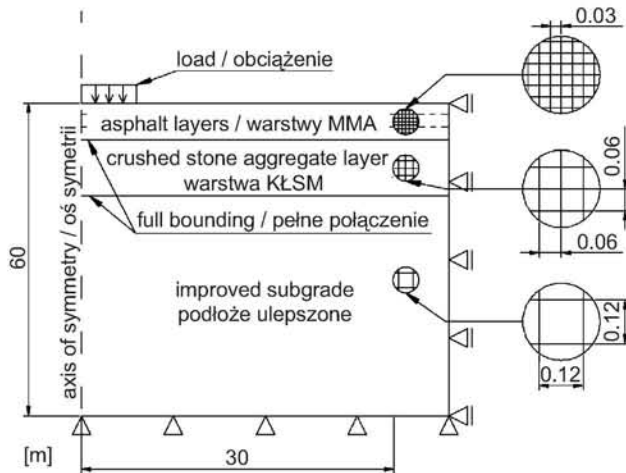


Fig. 1. The scheme of FEM model of the roadway pavement free from cracks (continuous, 8-node, axisymmetric element)  
Rys. 1. Schemat modelu MES nawierzchni jezdni bez spękań (element kontynuacyjny, ośmiowęzłowy, osiowosymetryczny)

W dalszej kolejności wykonano obliczenia zarówno dla modeli statycznych, jak i dynamicznych. W analizie dynamicznej przyjęto model obciążenia w postaci funkcji sinusoidalnej o częstotliwości 20 Hz [20]. Natomiast w analizie statycznej wartość naprężenia była stała. W obu analizowanych wariantach zapewniono zgodne wartości maksymalnych naprężeń, równe 600, 700 i 800 kPa. Jako model fizyczny materiałów wykorzystano model liniowo-sprężysty. Jedynie w przypadku analizy dynamicznej obliczenia przeprowadzono osobno przy dwóch różnych modelach materiałowych: sprężystego oraz lepkosprężystego (przyjęto uogólniony model ciała Maxwella). Modele materiałów lepkosprężystych zdefiniowano przy wykorzystaniu funkcji relaksacji w odniesieniu do modułu sprężystości postacowej (Kirchhoffa). Kierując się potrzebą uzyskania miarodajnych wyników eksperymentu, wartości parametrów modelu materiału lepkosprężystego przyjęto równe wartościom wyznaczonym według procedury opisanej w pracy [21]. Źródłem danych wejściowych do wyznaczenia parametrów modelu lepkosprężystego są wyniki badań laboratoryjnych oznaczania modułu sztywności belki obciążonej stałym momentem zginającym (oznaczanej często symbolem 4PB-PR, według procedury opisanej w normie PN - EN 12697-26:2007). Badania laboratoryjne 4PB-PR przeprowadzono na belkach wyciętych z warstw asfaltowych: ścieralnej, wiążącej i podbudowy nawierzchni niezależnego odcinka testowego [21]. Testy wykonano w temperaturze 10°C przy pięciu różnych częstotliwościach obciążenia: 1, 5, 10, 15, 20 Hz. Wszystkie parametry modeli materiałów i ich wartości zestawiono w Tabl. 2.

Table 2. The list of parameters of materials adopted in numerical models  
Tablica 2. Zestawienie parametrów materiałów przyjętych w modelach numerycznych

Layer Warstwa		Static analysis Analiza statyczna	Dynamic analysis Analiza dynamiczna	
		Models of HMA layers Modele warstw MMA		
		elastic sprężyste	elastic sprężyste	viscoelastic lepkosprężyste
Wearing Ścieralna	BA1	$E_1 = 7200 \text{ MPa}$	$E_1 = 7200 \text{ MPa}$	$G_{01} = 2018,$ $g_1 = 0.5423,$ $\tau_1 = 0.0221$
Binder Wiążąca	BA2	$E_2 = 9800 \text{ MPa}$	$E_2 = 9800 \text{ MPa}$	$G_{02} = 3514,$ $g_2 = 0.4613,$ $\tau_2 = 0.0309$
Base Podbudowa	BA3	$E_3 = 11000 \text{ MPa}$	$E_3 = 11000 \text{ MPa}$	$G_{03} = 2431,$ $g_2 = 0.5789,$ $\tau_3 = 0.0166$
Layer Warstwa	Other layers of the model - elastic Pozostałe warstwy modelu - sprężyste			
Crushed stone aggregate Warstwa KŁSM	$E_4 = 400 \text{ MPa}$			
Improved subgrade Podłoże ulepszone	$E_5 = 120 \text{ MPa}$			
Remark / Uwaga: the constant value of Poisson's ratio equal to 0.3 was adopted for all material models of courses / dla wszystkich modeli materiałowych warstw przyjęto stałą wartość współczynnika Poissona równą 0,3				

Next the calculations for both static and dynamic models were conducted. In the dynamic analysis the loading model in the form of the sine function with a frequency of 20 Hz [20] was adopted, while in the static analysis the value of stress was constant. The compatible values of maximal stresses equal to 600 kPa, 700 kPa and 800 kPa were provided for both analysed variants. The linear elastic model was used as a physical model of materials. Only in case of the dynamic analyses of two different material models: elastic and viscoelastic, calculations were separately performed (generalised Maxwell model was applied). The models of viscoelastic materials were defined with the use of the relaxation function with reference to the shear modulus (Kirchhoff's modulus). Aiming at obtaining reliable results of the experiment, the parameter values

Spękania warstw MMA modelowano poprzez zaburzenie ciągłości warstw (wprowadzono nieciągłość). Obliczenia wykonano dla kilkudziesięciu konfiguracji, obejmując zakresem analiz różne warianty modelu spękań. Rozważaniom poddano:

- różne odległości między lokalizacją nieciągłości a osią obciążenia: 0,07; 0,25; 0,50; 0,75; 1,00 m,
- szerokość modelowych nacięć: 0,001; 0,005; 0,01 m (stała szerokość nacięcia na głębokość równą grubości nacinanych warstw),
- wybrane warianty nacięć umownie oznaczono jako: BA3, BA2+BA3, BA1+BA2+BA3.

Przykładową konfigurację przedstawiono na Rys. 2.

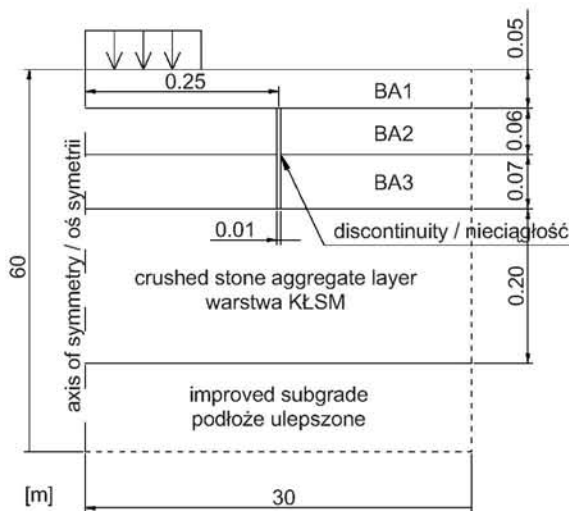


Fig. 2. The exemplary configuration of numerical model with a cut (the discontinuity BA2+BA3)

Rys. 2. Przykładowa konfiguracja modelu numerycznego z nacięciem (nieciągłość BA2+BA3)

### 3.2. CHARAKTERYSTYKA NAWIERZCHNI ODCINKA TESTOWEGO

Schemat układu warstw nawierzchni jezdni odcinka testowego przedstawiono na Rys. 3. W trakcie budowy nawierzchni warstwy - wiążąca i podbudowa - zostały nacięte na dwa sposoby. W pierwszym przypadku nacięto wyłącznie warstwę podbudowy z MMA, a w drugim nacięte zostały zarówno warstwa podbudowy, jak i warstwa wiążąca z MMA. Nacięcia wykonano na głębokość równą odpowiednio grubości bądź łącznej grubości warstw asfaltowych w zależności od wspomnianych wcześniej wariantów.

of the viscoelastic model were approved as equal to the values concluded according to the procedure described in the paper [21]. The source of the input data for determining parameters of the viscoelastic model is an outcome of laboratory tests, which concerned determining the stiffness modulus of a beam loaded with the constant bending moment (often marked with the symbol 4PB-PR according to the procedure described in the standard PN-EN 12697-26:2007). The laboratory tests 4PB-PR were performed on beams cut out of the wearing course, binder course and base course of an independent pavement test section [21]. The tests were carried out at the temperature of 10°C, and five different load frequencies: 1, 5, 10, 15 and 20 Hz. All parameters of models of materials with their values are compiled in Table 2.

Cracks in HMA courses were modelled through disturbances in the continuity of courses (discontinuity was introduced). Calculations were made in case of several dozen configurations, covering within the scope of analysis different variants of the model of cracks. The following issues were considered:

- different distances between the location of discontinuity and the loading axis: 0.07, 0.25, 0.50, 0.75 and 1.00 m,
- the width of model cuts: 0.001 m, 0.005 m, and 0.01 m (the constant width of a cut at the depth equal to the thicknesses of the cut),
- selected variants of cuts, marked as BA3, BA2+BA3, BA1+BA2+BA3.

Fig. 2 shows the exemplary configuration.

### 3.2. CHARACTERISTICS OF A PAVEMENT TEST SECTION

Fig. 3 presents the scheme of the system of courses of pavement test section. The courses, binder and subbase were cut during their construction. The cuts were made in two ways. In the first case only the subbase of HMA was cut, while in the second one both the subbase course and binder course of HMA were cut. The cuts were made at the depth equal to the thickness of bitumen courses or the total thickness of bitumen courses depending on the above mentioned variants.

Measurements with the use of dynamic deflectometer were performed after 5 years of exploitation of pavement test section. That section was created on the developing industrial area which is loaded with a very sporadic road

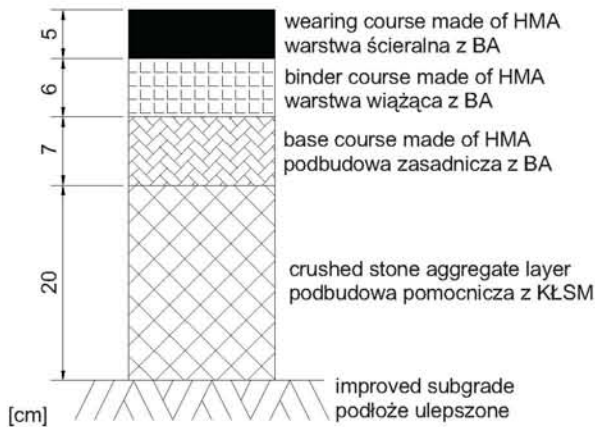


Fig. 3. The scheme of the system of courses of roadway pavement test section  
Rys. 3. Schemat układu warstw nawierzchni jezdni odcinka testowego

Pomiary ugięciomierzem dynamicznym wykonano po pięciu latach eksploatacji nawierzchni odcinka testowego, który powstał na obszarze rozwijającej się strefy przemysłowej i na dzień dzisiejszy jest obciążony ruchem bardzo sporadycznie (obciążenie ruchem  $\ll$  KR1). W trakcie pomiarów przeprowadzono wizualną inwentaryzację. Analiza jej wyników nie wykazała spękań na powierzchni warstwy ścieralnej, które mogły powstać w efekcie wykonanych nacięć podczas budowy odcinka w 2010 roku. Pomiary ugięć nawierzchni zrobiono w 18 miejscach, których lokalizację względem nacięć warstw asfaltowych przedstawiono na Rys. 4.

traffic (the traffic loading is much lower than KR1). The visual inventory was performed during measurements. The analysis of its results did not reveal cracks on the surface of wearing course, which could have appeared as a result of cuts made during construction of the section in 2010. The deflection measurements were carried out in 18 places situated towards the cuts in bitumen courses, as it can be observed in Fig. 4.

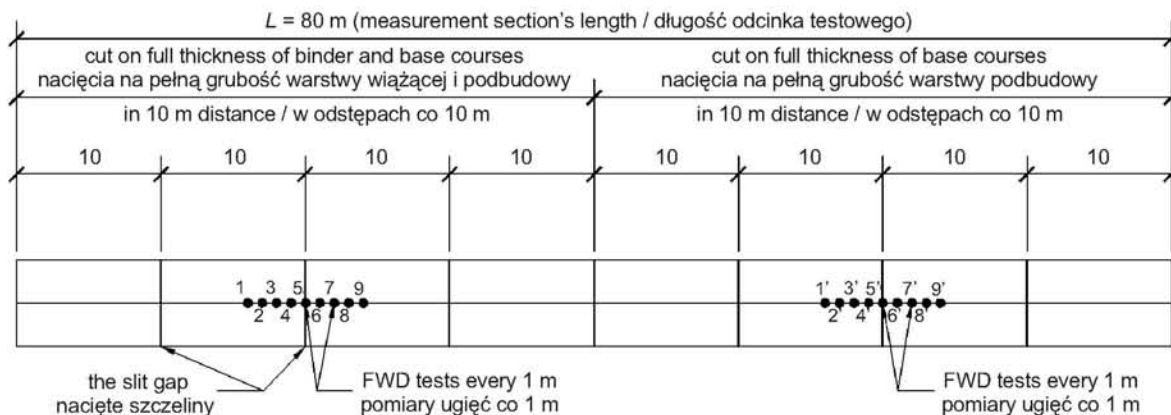


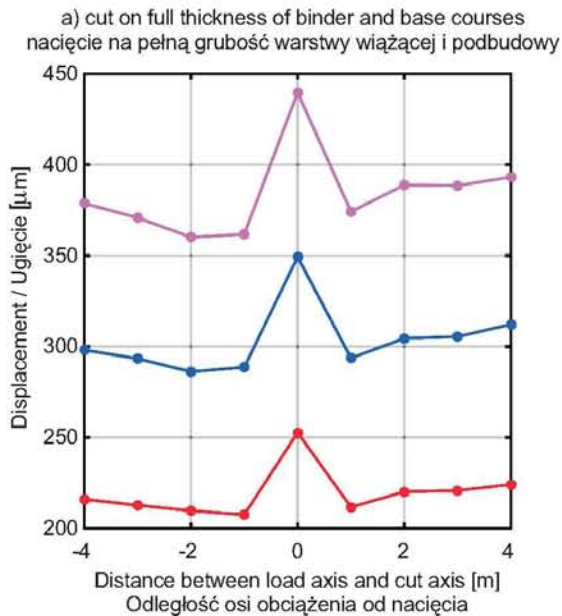
Fig. 4. The scheme of traffic lane with marked locations of cuts in the binder course and subbase of HMA, and measurements with the use of dynamic deflectometer FWD on the surface of pavement test section

Rys. 4. Schemat pasa ruchu z zaznaczonymi lokalizacjami nacięć warstw wiążącej i podbudowy z MMA oraz pomiarów ugięciomierzem dynamicznym typu FWD na nawierzchni odcinka testowego

Na Rys. 5 przedstawiono wykresy, na których pokazano maksymalne wartości pomierzonych ugięć nawierzchni w osi obciążenia, w zależności od jej lokalizacji względem

Fig. 5 presents charts showing the maximal values of measured pavement deflections in the loading axis, depending on its location towards cuts in bitumen courses.

nacięć warstw asfaltowych. Wyniki pomiaru dotyczą badań nawierzchni wykonanych przy temperaturze warstw asfaltowych równej  $8,1^{\circ}\text{C}$ . Analizując pokazane na Rys. 5 wartości przemieszczeń w funkcji odległości od osi nacięcia warto zauważyć, że uszkodzenie warstw asfaltowych ujawnia się poprzez wyraźnie największą wartość ugięć nawierzchni w osi obciążenia tylko w przypadku pomiaru bezpośrednio w miejscu lokalizacji nacięcia.



Measurement results relate to investigations into pavements carried out at the temperature of bitumen courses equal to  $8,1^{\circ}\text{C}$ . When analysing the values of displacements as a function of distance from the axis of a cut, it is worth noticing that the damage to bitumen courses becomes apparent through the clearly highest value of pavement deflections in the loading axis only in case of the measurement performed directly in the place of a cut location.

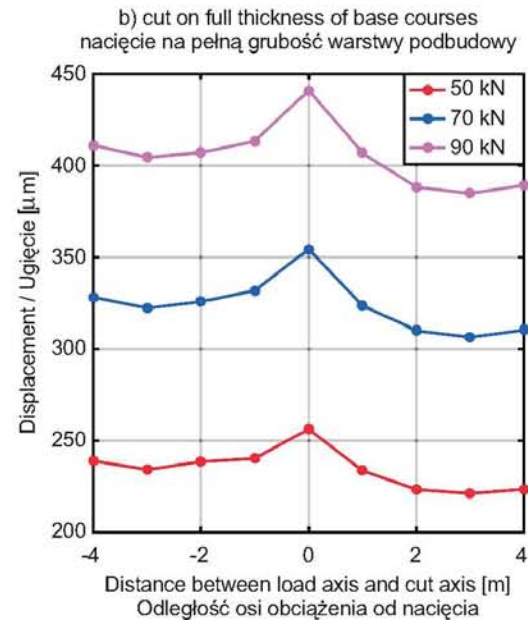


Fig. 5. The values of measured deflections of pavement in the loading axis depending on their location towards the cuts in bitumen courses (the direction of FWD device during measurements is in accordance with an increase in values of the argument axis)  
Rys. 5. Pomierzone wartości ugięć nawierzchni w osi obciążenia w zależności od ich lokalizacji względem nacięć warstw asfaltowych (kierunek jazdy urządzeniem FWD podczas pomiaru jest zgodny ze wzrostem wartości osi argumentów)

#### 4. WYNIKI OBLICZEŃ

W pierwszym etapie przeprowadzono ocenę zależności między obliczonymi wartościami ugięć a wartościami naprężeń (600, 700, 800 kPa). Przykładowy trójwymiarowy wykres funkcji regresji dla poszukiwanych zależności pomiędzy przemieszczeniem pionowym, naprężeniem i odległością (nieciągłości od osi obciążenia) przedstawiono na Rys. 6. Wykres przedstawia zależności, które otrzymano w przypadku modelu statycznego z nieciągłością oznaczoną jako BA1+BA2+BA3.

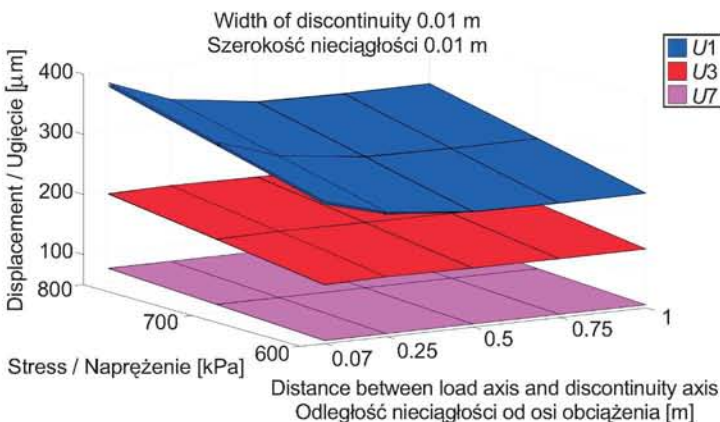
We wszystkich rodzajach analiz (tj. statycznych i dynamicznych) uzyskano zbliżoną formę zależności. Najbardziej wyraźne różnice między wartościami ugięć ujawniły się w przypadku modelu z konfiguracją nieciągłości BA1+BA2+BA3. W wariancie nieciągłości warstw, zło-

#### 4. RESULTS OF CALCULATIONS

At the first stage the assessment of dependencies between calculated values of deflections and values of stresses (600, 700, 800 kPa) was performed. Fig. 6 presents the three-dimensional exemplary chart of regression function for the searched relations between vertical displacements, stresses and distances (discontinuities from the loading axis). The chart illustrates dependencies obtained in case of the static model with discontinuity marked as BA1+BA2+BA3.

A similar form of dependencies was obtained in all types of analyses (static and dynamic). The most apparent differences between values of deflections emerged in case of model with the configuration of discontinuity BA1+BA2+BA3. In the variant of discontinuity of

kalizowanych w odległości od osi obciążenia od 0,07 do 0,5 m, względna różnica między wartościami ugięć  $U1$  w modelu z nacięciami i bez mieściła się w zakresie od 3 do 23%. W pozostałych konfiguracjach nacięć względna różnica między wartościami ugięć obliczonych na podstawie analizowanych modeli jest mniejsza niż 3%.



Dopełnieniem prezentowanych tu wyliczeń jest obliczenie modułów sprężystości, które przeprowadzono przy wykorzystaniu modelu warstw sprężystych spoczywających na półprzestrzeni sprężystej (model obliczeniowy LET) [10]. Do obliczeń odwrotnych wykorzystano algorytm optymalizacyjny Nelder-Mead [22], a do oceny dopasowania krzywych ugięć z modelu referencyjnego i obliczeń odwrotnych przyjęto kryterium AVCF (ang. *Area Value with Correction Factor*), które opisują wzory (1) i (2). Korzyści wynikające z wykorzystania takiej postaci kryterium zostały szczegółowo przedstawione w pracy [23].

$$\delta_{AVCF} = \left\{ \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^{n-1} \left( \frac{A_k^c - A_k^m}{A_k^m} \right)^2 \right\}^{1/2} + \left| \frac{d_1^c - d_1^m}{d_1^m} \right|, \quad (1)$$

$$A_k = \frac{\sum_{i=1}^{k-1} (d_i + d_{i+1}) \cdot (r_{i+1} - r_i)}{2 \cdot d_1}, \quad (k \leq n), \quad (2)$$

gdzie:

- $n$  – liczba punktów składających się na krzywą ugięć,
- $A_k$  – pole powierzchni ograniczone krzywą ugięć dla pierwszych  $k$ -punktów pomiaru ugięć,
- $d_i$  – wartość ugięcia w  $i$ -tym punkcie obliczeniowym,

where:

- $n$  – number of points forming deflection curve,
- $A_k$  – area of the field bounded by the deflection curve for the first  $k$ -points of deflection measurements,
- $d_i$  – value of deflection at the analytical  $i$ -point,
- $r_i$  – distance of the  $i$ -point from the loading axis,

courses located at a distance from 0.07 to 0.5 m from the loading axis, the relative difference between values of deflections  $U1$  in the models with cuts and free from them, stayed within the limits from 3 to 23%. In remaining configurations of cuts the relative difference between values of deflections calculated through the analysed models was lower than 3%.

Fig. 6. The exemplary diagram of the regression function of dependencies between values of calculated displacements and values of given stresses, as well as distances of discontinuities from the loading axis in case of the static analysis of the model BA1+BA2+BA3

Rys. 6. Przykładowy wykres funkcji regresji zależności między wartościami obliczonych przemieszczeń a wartościami zadanego napężenia i odległości nieciągłości od osi obciążenia w przypadku analizy statycznej modelu BA1+BA2+BA3

The calculation of elastic moduli performed by means of the modelled elastic courses laid on the elastic half-space (the analytical model LET) [10] is a supplement to the presented calculations. Nelder-Mead [22] optimisation algorithm was used for backcalculation, while the criterion AVCF (Area Value with Correction Factor) described in formulae (1) and (2), was adopted to assess the match of deflection curves of the reference model and backcalculation. Advantages resulting from the use of such a form of criterion were presented in detail in the paper [23].



$r_i$  – odległość  $i$ -tego punktu obliczeniowego od osi obciążenia,

$c, m$  – indeksy wskazujące odpowiednio na obliczone i zmierzone (wyniki pomiarów FWD lub obliczeń wprzód dla modeli) wartości ugięć.

$c, m$  – indices indicating respectively calculated and measured (results of FWD measurements or calculations first for models) values of deflections.

Fig. 7 depicts results of backcalculation.

Wyniki obliczeń odwrotnych przedstawiono na Rys. 7.

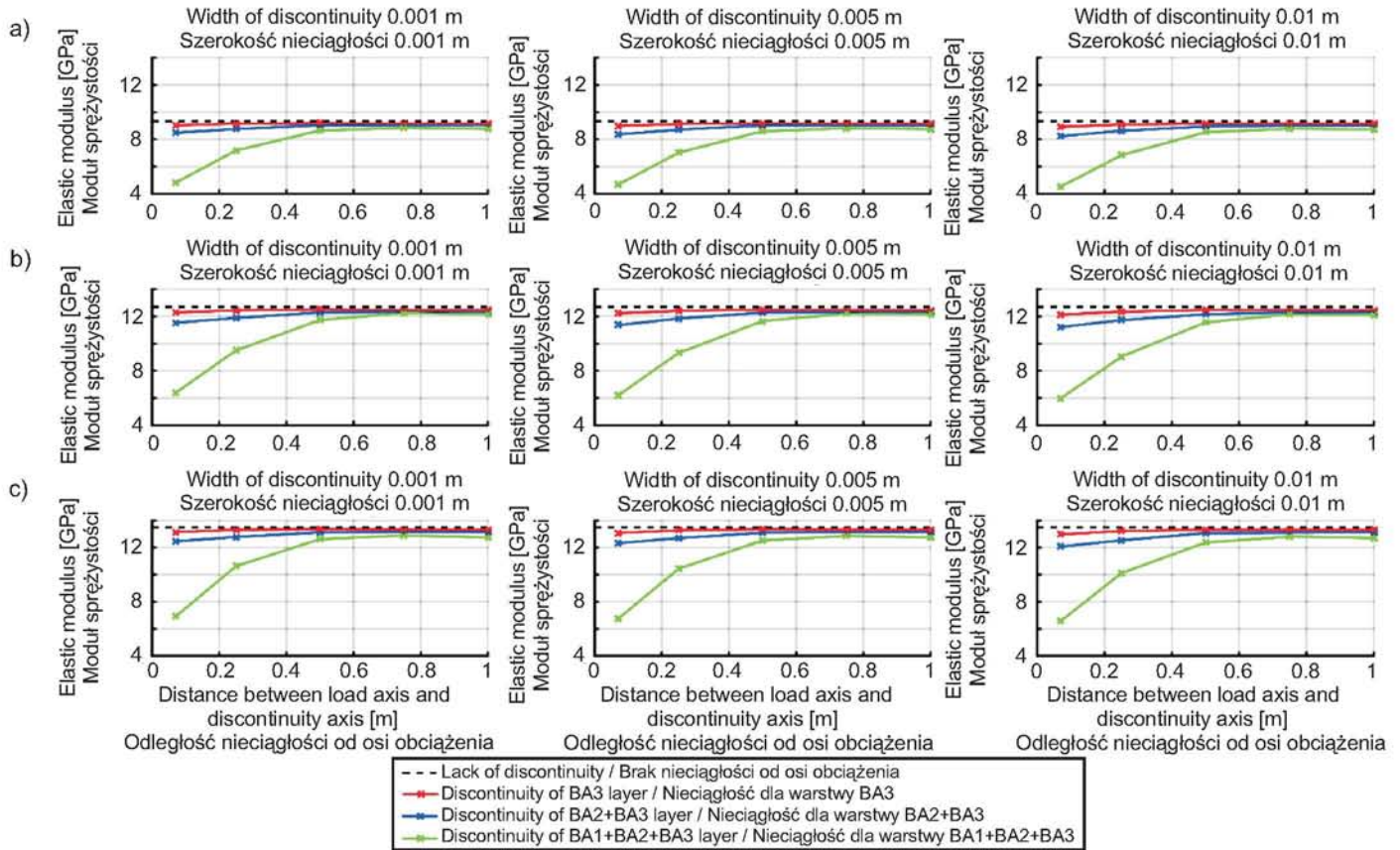


Fig. 7. Calculation results of elastic moduli of HMA courses based on numerical models carrying: a) static loading, b) dynamic loading with HMA elastic courses, c) dynamic loading with HMA viscoelastic courses

Rys. 7. Wyniki obliczenia modułów sprężystości warstw z MMA na podstawie modeli numerycznych z obciążeniem: a) statycznym, b) dynamicznym ze sprężystymi warstwami MMA, c) dynamicznym z lepkosprężystymi warstwami MMA

W celu uniknięcia w obliczeniach odwrotnych tzw. efektu kompensacji [24, 25] oznaczaniu poddano wyłącznie wartości modułu zastępczego warstw (poszczególne warstwy z MMA traktowano jako pojedynczą warstwę). Grubość warstwy w modelu przyjęto równą łącznej grubości każdej z nich. Moduły sprężystości pozostałych warstw modelu (warstwy z KŁSM i podłoża) traktowano jako wartości znane (pkt 3.1). Najbardziej wyraźne zmiany wartości modułów sprężystości wyznaczonych w obliczeniach odwrotnych zaobserwowano w przypadku modelu z nieciągłością

In order to avoid the so-called compensation effect [24, 25], only values of the equivalent modulus of courses were determined in backcalculation (separate courses of HMA were considered as a single course). The thickness of a model course was adopted as equal to the total thickness of each of them. The elastic moduli of the remaining courses of the model (courses of mechanically stabilised crushed stone and the subgrade) were regarded as the known values (section 3.1). The most visible changes to the elastic moduli determined through the backcalculation

BA1+BA2+BA3. Widoczny zakres zmian dotyczy wyników uzyskanych przy lokalizacji nieciągłości względem osi obciążenia w odległości od 0,07 do 0,5 m (różnica między wartościami wyznaczonych modułów a wartościami wyznaczonymi w przypadku modelu bez spękania > 2 GPa). Przy pozostałych konfiguracjach nacięć nie zauważono różnic większych od 2 GPa. Zwrócono również uwagę na uzyskane wartości kryterium dopasowania AVCF, które zostały zestawione na wykresach (Rys. 8).

were observed in case of the model with the discontinuity BA1+BA2+BA3. The clear scope of changes concerns results obtained at the location of discontinuities towards the loading axis at the distance from 0.07 to 0.5 m (the difference between determined values of moduli and values concluded in case of a model free from cracks is greater than 2 GPa). Differences higher than 2 GPa at the remaining configurations of cuts were unnoticed. Consequently, close attention was paid to obtained values of the AVCF match criterion, which were presented on charts (Fig. 8).

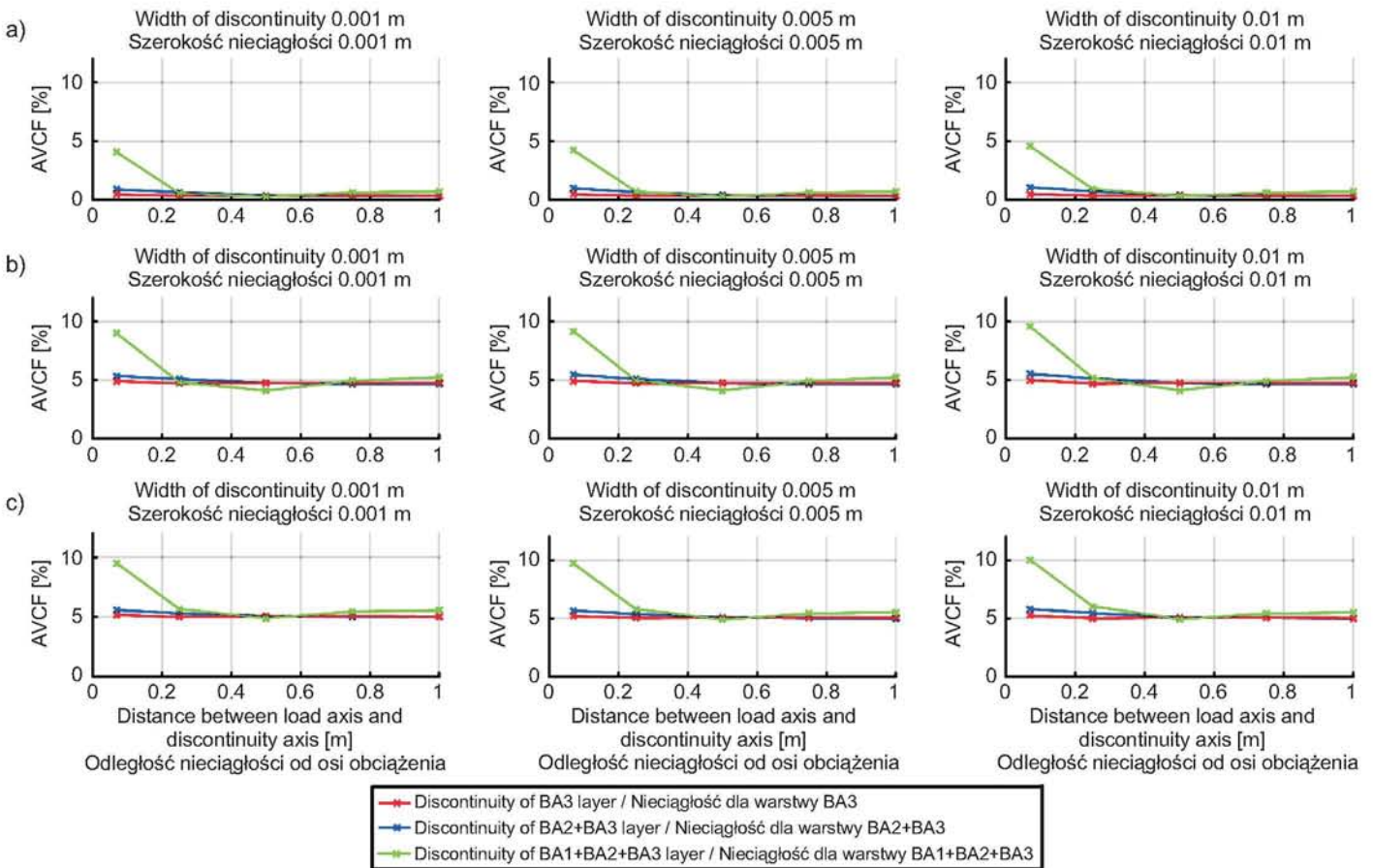


Fig. 8. The diagrams of obtained values of the match criterion AVCF for the model carrying: a) the static load, b) the dynamic load with elastic courses of HMA, c) the dynamic load with viscoelastic courses of HMA  
Rys. 8. Wykresy uzyskanych wartości kryterium dopasowania AVCF dla modelu z obciążeniem: a) statycznym, b) dynamicznym ze sprężystymi warstwami MMA, c) dynamicznym z lepkosprężystymi warstwami MMA

Zgodnie z oczekiwaniami największą wartość błędu AVCF uzyskano w obliczeniach odwrotnych w przypadku modelu, w którym nieciągłość dotyczyła wszystkich trzech warstw (BA1+BA2+BA3). Wartość ta jest dwukrotnie większa w porównaniu do pozostałych wariantów. Z obliczeń odwrotnych, które dotyczą modeli z nieciągłością zlokalizowaną w odległości większej niż 30 cm od osi obciążenia

As expected, the highest value of the AVCF error appeared in case of backcalculation of the model with discontinuity concerning all three courses (BA1+BA2+BA3). That value is two times higher in comparison to the remaining variants. From the backcalculation which regard models with discontinuity situated at the distance longer than 30 cm from the loading axis, it results that AVCF value

wynika, że wartość AVCF nie zależy już od usytuowania nacięć. W podsumowaniu należy stwierdzić, że przyjęte w eksperymencie teoretycznym założenia stanowią dobry punkt wyjścia do oceny kontrolowanych spękań warstw nawierzchni odcinka testowego. Efekty analizy w oparciu o rzeczywiste wyniki badań omówione są w dalszej części artykułu.

## 5. WYNIKI OBLICZEŃ NA PODSTAWIE POMIARÓW IN SITU

W pierwszym etapie obliczeń odwrotnych wykonanych na podstawie pomiarów ugięć nawierzchni in situ przeprowadzono ocenę liniowości zależności naprężenie – ugięcie. Funkcje regresji dla tej relacji przedstawiono na Rys. 9. Zestawione na Rys. 9 funkcje opracowane są na podstawie wszystkich wyników pomiaru ugięciomierzem dynamicznym typu FWD (Rys. 2). Należy zauważyć, że bez względu na odległość spękania od osi obciążenia uzyskane wykresy są liniowe (minimalna wartość współczynnika determinacji spośród wszystkich obliczonych spełnia warunek  $R^2 \geq 0,97$ ). Więcej informacji na temat tej zależności dla różnych rodzajów nawierzchni można znaleźć w pracy [26].

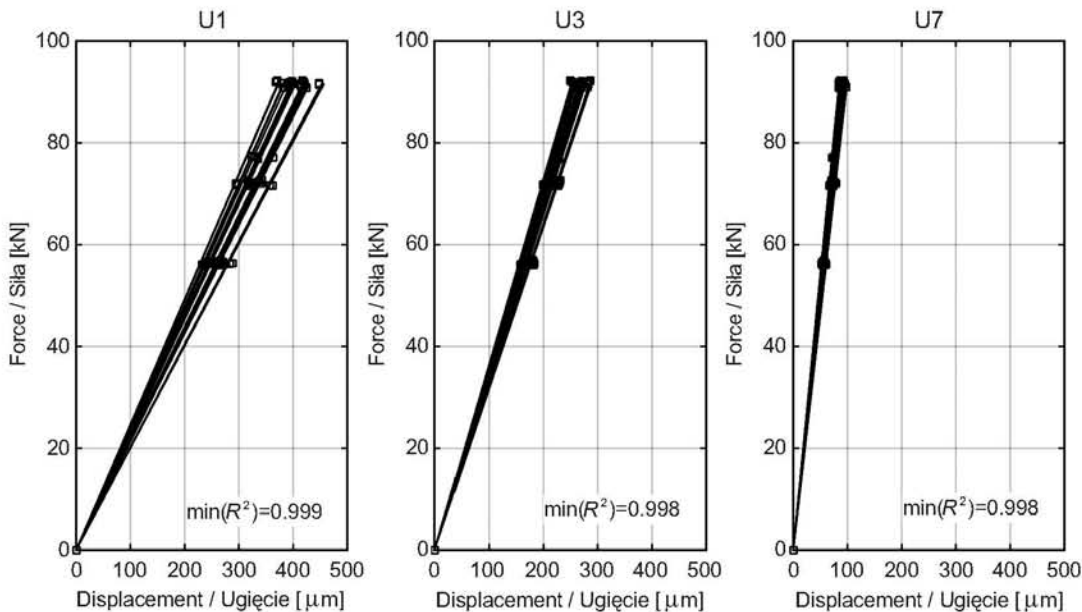


Fig. 9. Regression functions of the relation force – deflection Rys. 9. Funkcje regresji dla relacji siła – ugięcie

Obliczenia odwrotne na podstawie pomiarów ugięć in situ, przedstawionych na Rys. 2, wykonano przyjmując następujące założenia:

- 1) model obliczeniowy LET,
- 2) algorytm optymalizacyjny Nelder-Mead,
- 3) kryterium dopasowania AVCF.

does not depend on the location of cuts. To conclude, it should be emphasized that the assumptions adopted in the theoretical experiment form a good working basis for an assessment of controlled cracks in the pavement test section. The effects of analysis based on real test results are discussed in the following part of the paper.

## 5. RESULTS OF CALCULATIONS BASED ON IN SITU MEASUREMENTS

The assessment of linear dependency between force and displacement was performed at the first stage of backcalculation, based on in situ measurements of pavement deflections. Regression functions of that relation depicts Fig. 9. The functions presented on Fig. 9 were elaborated on the basis of all measurement results using the FWD dynamic deflectometer (Fig. 2). It should be noted that the charts are linear regardless of the distance between cracks and the loading axis (out of all calculated the minimal value of the determination coefficient meets the condition  $R^2 \geq 0.97$ ). More information on that subject can be found in the paper [26].

Backcalculation based on deflection in situ measurements presented on Fig. 2 was performed with the following assumptions:

- 1) the computational model LET,
- 2) Nelder-Mead's optimization algorithm,
- 3) the AVCF match criterion.

Wyznaczono wartości modułów sztywności i sprężystości trzech warstw modelu nawierzchni odcinka testowego, zgodnie ze schematem układu i grubościami warstw na Rys. 3 (numer 5 na osi argumentów odpowiada miejscu pomiarowemu, w którym zlokalizowane jest nacięcie). Wyniki obliczeń odwrotnych przedstawiono na Rys. 10.

The values of stiffness and elastic moduli of three courses of the pavement test section, according to the layout scheme and course thicknesses shown on Fig. 3, were determined (number 5 on the argument axis corresponds to measurement place where the cut was located). Fig. 10 shows the results of backcalculation.

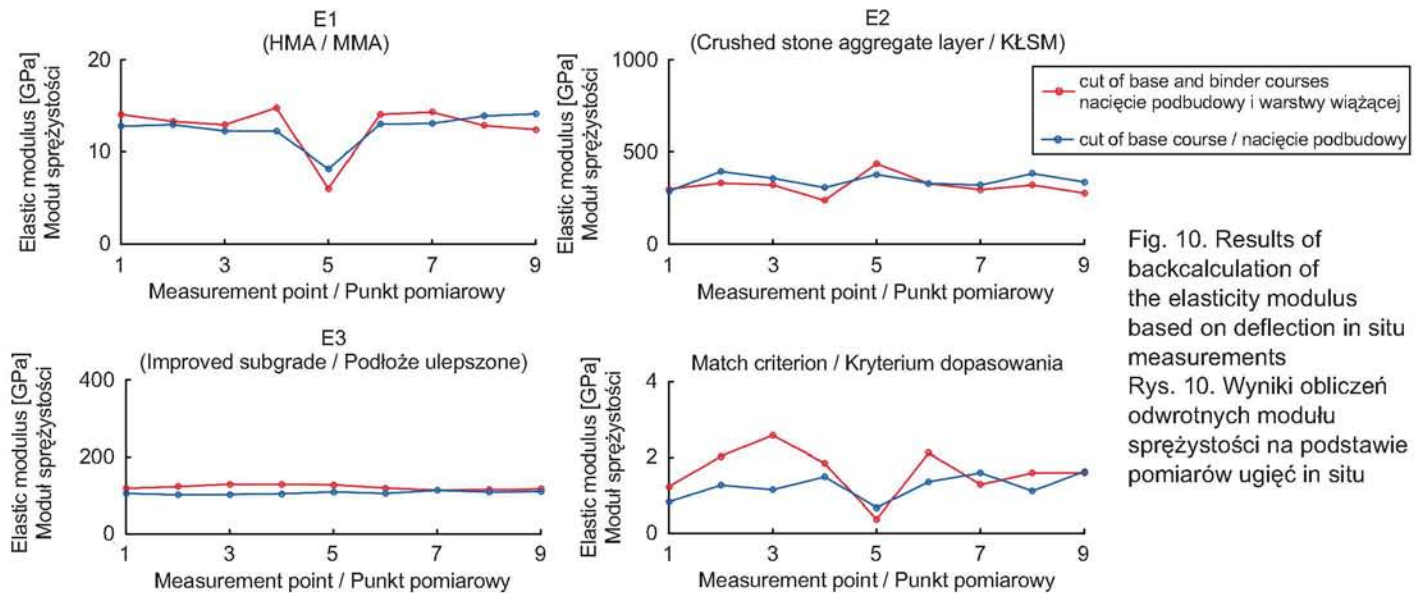


Fig. 10. Results of backcalculation of the elasticity modulus based on deflection in situ measurements  
Rys. 10. Wyniki obliczeń odwrotnych modułu sprężystości na podstawie pomiarów ugięć in situ

W odróżnieniu od standardowych procedur w obliczeniach odwrotnych zastosowano element normalizacji warunków pomiaru i modelu obliczeniowego. Wiedząc, że badania urządzeniem typu FWD wywołują w nawierzchni reakcje dynamiczne w odniesieniu do modelu nawierzchni z obciążeniem statycznym wykorzystano metodę opisaną w pracy [27, 28]. Kierując się potrzebą uzyskania pseudostatycznych wartości ugięć z pomiarów nawierzchni in situ, wartości ugięć uzyskane za pośrednictwem urządzenia typu FWD przeliczono do wartości odpowiadających częstotliwości równej 0 Hz.

As opposed to standard backcalculation procedures, an element of normalisation of measurement conditions and of the computational model was adopted. Knowing that investigations conducted with the use of FWD device cause dynamic reactions in the pavement with reference to the pavement model with a static loading, the method described in the paper [27, 28] was applied. Aiming at acquiring pseudo-static values of deflections by means of in situ pavement measurements, values of deflections obtained using devices of FWD type were recalculated to the values corresponding to the frequency equal to 0 Hz.

## 6. WNIOSKI

Przeprowadzone obliczenia odwrotne dotyczyły modelu nawierzchni ze sztucznie wprowadzonymi nacięciami warstw asfaltowych oraz zmierzonych ugięć na odcinku testowym nawierzchni jezdni asfaltowej. Cechą charakterystyczną jej badanego odcinka było celowe uszkodzenie warstw asfaltowych polegające na ich nacięciu podczas budowy. W rezultacie wykonanych obliczeń odwrotnych uzyskano parametry sztywności poszczególnych warstw modelu. Z analizy wyników można wyprowadzić następujące dwa wnioski:

## 6. CONCLUSIONS

The performed backcalculation concerned the model of pavement with artificially introduced cuts in bituminous courses and measured deflections of the test section of the bituminous roadway pavement. The intentional damage to bituminous courses consisting in cutting them during construction was a distinctive feature of the pavement test section. As a result of performed backcalculation the stiffness parameters of individual model courses were obtained. Finally, the following two conclusions may be drawn from the analysis of results:

1. Wpływ lokalizacji spękania warstw asfaltowych na wartość oznaczonego modułu sztywności warstw MMA metodą obliczeń odwrotnych jest wyraźnie widoczny w przypadku, gdy oś obciążenia podczas pomiaru ugięć nawierzchni znajduje się w bliskim sąsiedztwie spękania. Gdy odległość ta jest  $\geq 1$  m, wartość oznaczonego modułu sztywności warstw MMA odpowiada wartości oznaczonej w miejscu nawierzchni bez uszkodzeń.
2. Wartość kryterium dopasowania krzywych ugięć w obliczeniach odwrotnych AVCF jest najmniejsza w przypadku, gdy oś obciążenia podczas pomiaru ugięć nawierzchni znajduje się w bliskim sąsiedztwie spękania ( $< 0,5$  m). Wniosek ten nie potwierdza uwag sformułowanych w eksperymencie numerycznym, gdzie zaobserwowano zjawisko odwrotne.

Drugi z wniosków jest zgodny z poglądem, że kryterium dopasowania krzywych ugięć w obliczeniach odwrotnych nawierzchni jest warunkiem koniecznym, lecz niewystarczającym do oceny jakości oznaczonych parametrów sztywności warstw modelu. Konieczne jest opracowanie kolejnych kryteriów dla każdego etapu obliczeń odwrotnych. Nie zmienia to jednak faktu, że przedstawiona metodyka umożliwi wykrycie spękań warstw asfaltowych ułożonych poniżej warstwy ścieralnej, a zastosowanie modelu liniowego jest w pełni uzasadnione za sprawą sprężystej odpowiedzi modelowanego ośrodka. Zostało to potwierdzone w ocenie liniowości między siłą a przemieszczeniem.

Sformułowane wnioski sugerują też pewną prawidłowość, którą warto tu podkreślić. Diagnozowanie nawierzchni przy wykorzystaniu metody obliczeń odwrotnych i pomiaru ugięć in situ powinno być analizowane w ścisłym powiązaniu z wynikami wizualnej inwentaryzacji. Pomijanie podczas badań miejsc nawierzchni, gdzie wyniki wizualnej inwentaryzacji wskazują na określone rodzaje uszkodzeń, może w efekcie prowadzić do przypisania nawierzchni z uszkodzeniami wskaźników znacznie lepszych, aniżeli wynika to ze stanu faktycznego w miejscach miarodajnych.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Final Report, Part 3 - Design and Analysis, NCHRP, TRB, NRC, Illinois, 2004
- [2] *Judycki J.*: Budowa i kalibracja modeli spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych nawierzchni drogowych w mechanistyczno-empirycznej metodzie AASHTO 2004. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, 4, 2011, 31-53

1. The influence of location of cracks in bitumen courses on values of stiffness modulus of HMA layers, determined by means of the backcalculation method, is clearly noticeable in case where the load axis during measuring pavement deflections is located in close proximity to the crack. For distances  $\geq 1$  m, the value of determined stiffness modulus of HMA layers corresponds to the value determined in a section of pavement free from damages.
2. The value of match criterion for deflection curves in AVCF backcalculation is minimal in case when the load axis is situated close to the crack ( $< 0.5$  m). That conclusion does not confirm the remarks expressed in a numerical experiment where a reverse phenomenon was observed.

The second conclusion simply confirms the view that match criterion for deflection curves in backcalculation is the essential but not sufficient condition for quality assessment of stiffness parameters of the modelled courses. It is necessary to develop further criteria for each stage of backcalculation. However, the fact remains that the presented methodology enables detecting cracks in bitumen courses located below the wearing course, and the application of a linear model is fully justified due to the elastic response of a modelled body. It was confirmed in the assessment of linear relation between force and displacement.

It is worth noting that the formulated conclusions suggest certain regularity. The pavement diagnosis using the backcalculation method and in situ deflection measurements should be analysed in close connection with the results of a visual inventory. Omitting during measurements the pavement sections where the results of visual inventory indicate determined types of damage may lead to assigning considerably better indices to the damaged pavement than those resulting from the actual state in reliable places.

- [3] Research and development of the asphalt institute's thickness design manual (MS-1). Asphalt Institute, Lexington, 1982
- [4] *Hilmi Lav A., Burak Goktepe A., Aysen Lav M.*: Backcalculation of flexible pavements using soft computing. Intelligent and Soft Computing in Infrastructure Systems Engineering, 259, 2009, 67-106

- [5] *Irwin L.*: Backcalculation: Basics and Beyond. FWD Users Group, West Lafayette, 2004
- [6] *Lee S.H., Kim J.*: Backcalculation of dynamic modulus from resilient modulus test data. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **38**, 2011, 582-592
- [7] *Saltan M., Terzi S., Küçükşille E. U.*: Backcalculation of pavement layer moduli and Poisson's ratio using data mining. *Expert Systems with Applications*, **38**, 3, 2011, 2600-2608
- [8] *Sharma S., Das A.*: Backcalculation of pavement layer moduli from falling weight deflectometer data using artificial neural network. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **35**, 1, 2008, 57-66
- [9] *Szydło A.*: Statyczna identyfikacja parametrów modeli nawierzchni lotniskowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1995
- [10] *Firlej S.*: *Mechanika nawierzchni drogowej*. Petit s.c., Lublin, 2007
- [11] *Al-Qadi I.L., Scarpas T., Loizos A.*: *Pavement cracking mechanisms modeling detection testing and case histories*. CRC Press, Boca Raton, 2008
- [12] *Baek J.*: *Modeling reflective cracking development in hot-mix asphalt overlays and quantification of control techniques*. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, 2010
- [13] *Myers L.A., Roque R., Ruth B.E.*: Mechanisms of surface-initiated longitudinal wheel path cracks in high-type bituminous pavements. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **76**, 1998, 401-432
- [14] *Scarpas A., Kringos N., Al-Qadi I.*: 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements Mechanisms, Modeling, Testing, Detection and Prevention Case Histories. RILEM Bookseries, Londyn, 2012
- [15] *Ameri M., Mansourianb A., Heidary Khavasc M., Alihac M.R.M., Ayatollahi M.R.*: Cracked asphalt pavement under traffic loading - A 3D finite element analysis. *Engineering Fracture Mechanics*, **78**, 8, 2011, 1817-1826
- [16] *Gajewski J., Sadowski T.*: Sensitivity analysis of crack propagation in pavement bituminous layered structures using a hybrid system integrating Artificial Neural Networks and Finite Element Method. *Computational Materials Science*, **82**, 2014, 114-117
- [17] *Ozer H., Al-Qadi I., Duarte C.*: A three-dimensional generalized finite element analysis for the near-surface cracking problem in flexible pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, **12**, 4, 2011, 407-419
- [18] *Miao Y., He T.G., Yang Q., Zheng J.J.*: Multi-domain hybrid boundary node method for evaluating top-down crack in asphalt pavements. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, **34**, 9, 2010, 755-760
- [19] *Górnaś P., Pożarycki A.*: Wybrane cechy numerycznych modeli MES w analizie odwrotnej konstrukcji nawierzchni. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **13**, 3, 2014, 203-222
- [20] *Maina J.W., Yokota H., Matsui K.*: Effect of errors in layer thickness on backcalculated layer moduli. *Journal of JSCE (Japan Society of Civil Engineering)*, **3**, 1998, 49-56
- [21] *Pożarycki A., Górnaś P.*: Numeryczny model właściwości lepkosprężystych warstw nawierzchni jezdni z betonu asfaltowego. *Budownictwo i Architektura*, **13**, 4, 2014, 101-107
- [22] *Fuchang G., Lixing H.*: Implementing the Nelder-Mead simplex algorithm with adaptive parameters. *Computational Optimization and Applications*, **51**, 1, 2012, 259-277
- [23] *Sangghaleh A., Pan E., Green R., Wang R., Liu X., Cai Y.*: Backcalculation of pavement layer elastic modulus and thickness with measurement errors. *International Journal of Pavement Engineering*, **15**, 6, 2013, 521-531
- [24] *Irwin L.H., Yang W.S., Stubstad R.N.*: Deflection Reading Accuracy and Layer Thickness Accuracy in Backcalculation of Pavement Layer Moduli. *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli*. American Society of Testing and Materials, ASTM, Philadelphia, 1989, 229-244
- [25] *Ullidtz P., Coetzee N.F.*: Analytical procedures in non-destructive testing pavement evaluation. *Pavement design and analysis*. *Transportation Research Record*, **1482**, 1995, 61-66
- [26] *Pożarycki A., Górnaś P.*: Zagadnienia liniowej normalizacji wartości ugięć nawierzchni jezdni poddanej obciążeniom ponadnormatywnym. *Drogownictwo*, **LXIX**, 11, 2014, 352-359
- [27] *Guzina B.B., Osburn R.H.*: Effective tool for enhancing elastostatic pavement diagnosis. *Transportation Research Record*, **1806**, 2002, 30-37
- [28] *Kang Y.*: Multifrequency back-calculation of pavement-layer moduli. *Journal of Transportation Engineering*, **124**, 1, 1998, 73-81