

BARTŁOMIEJ KRAWCZYK<sup>1)</sup>PIOTR MACKIEWICZ<sup>2)</sup>ANTONI SZYDŁO<sup>3)</sup>

## INFLUENCE ANALYSIS OF COUNTERWEIGHT TYPE USED IN STATIC PLATE TEST ON IDENTIFIED PARAMETERS OF PAVEMENT COURSES AND SUBGRADE

## ANALIZA WPŁYWU RODZAJU PRZECIWWAGI NA IDENTYFIKOWANE PARAMETRY WARSTW KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI ORAZ PODŁOŻA W BADANIU VSS

**STRESZCZENIE.** Aktualne wymagania normowe oraz specyfikacje ogólne nie precyzują jednoznacznie, jak skonstruować przeciwwagę podczas pomiarów płytą statyczną VSS. Brak jest przede wszystkim szczegółowych wymagań dotyczących np. ciężaru pojazdu stanowiącego przeciwwagę w badaniu VSS. Autorzy na podstawie pomiarów terenowych wykazali istotny wpływ zastosowanego ciężaru i rodzaju przeciwwagi na wartości wtórnych modułów odkształcenia  $E$ . Dodatkowo, na podstawie obliczeń numerycznych w ośrodku sprężystym, przeanalizowano czasy przemieszczeń, pozwalające wyjaśnić przyczynę tych różnic. Poddano analizie trzy różne układy warstwowe podbudowy oraz podłoża nawierzchni. Przedstawiono różnice w wartościach modułów wtórnych wyznaczonych w badaniu VSS przy zastosowaniu jako przeciwwagi typowego pojazdu ciężarowego oraz łyżki koparki.

**SŁOWA KLUCZOWE:** czasza przemieszczeń, moduł odkształcenia, wpływ ciężaru pojazdu, VSS.

**ABSTRACT.** The requirements of the current standards and specifications do not give clear guidance as to the design of counterweight during the static plate load test. For example, there are no detailed requirements concerning the weight of vehicle used as the counterweight. On the basis of field test results the authors have managed to demonstrate that the weight and the type of counterweight both have a considerable effect on the value of  $E$ -modulus measured after second loading. Moreover, in order to find the cause of the above-mentioned differences the deflection basins were analysed through numerical computations in flexible medium. The analyses were carried out for three different subgrade/base layer systems. The  $E$ -moduli obtained in the second loading cycle were compared between the two types of counterweight used in the test: a typical heavy truck and an excavator bucket.

**KEYWORDS:** deflection basin, deformation modulus, vehicle weight impact, VSS (static plate load test).

DOI: 10.7409/rabdim.015.010

<sup>1)</sup> Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, Zakład Dróg i Lotnisk; b.krawczyk@pwr.edu.pl (✉)

<sup>2)</sup> Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, Zakład Dróg i Lotnisk; piotr.mackiewicz@pwr.edu.pl

<sup>3)</sup> Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, Zakład Dróg i Lotnisk; antoni.szydlo@pwr.edu.pl

## 1. WPROWADZENIE

Badanie VSS polega na pomiarze przemieszczeń pionowych (osiadań) testowanej warstwy konstrukcji nawierzchni lub podłoża pod wpływem nacisku statycznego, wywieranego za pomocą stalowej płyty kołowej. Pomierzone w ten sposób przemieszczenia pionowe są następnie podstawą identyfikacji parametrów badanej warstwy (modułów lub zagęszczenia). Nacisk na płytę stalową wywierany jest za pośrednictwem dźwignika hydraulicznego, zapartego o przeciwwagę – najczęściej pojazd ciężarowy albo łyżkę koparki. Autorzy szczegółowo opisali metodę przeprowadzania badania VSS w [1]. Mimo rozwijających się metod dynamicznych, badanie VSS jest w dalszym ciągu powszechnie stosowane w krajowej technice drogowej i poświęca mu się uwagę w aktualnych pracach badawczych, jak choćby [2, 3]. Problem polega na tym, że obowiązujące przepisy, wytyczne i ogólne specyfikacje [4, 5] nie precyzują ciężaru ani sylwetki pojazdu stanowiącego przeciwwagę w badaniu VSS. Autorzy wykazali, jak istotny wpływ na identyfikowane parametry badanej warstwy ma rodzaj zastosowanej przeciwwagi. Polska norma PN-S-02205:1998 [4] wymaga jedynie, by dźwignik hydrauliczny oparty był o przeciwwagę, której masa powinna być większa od wywieranej siły. Różnice w uzyskiwanych wynikach badań spowodowane są tym, że na obszar badawczy (płyta VSS wraz z czujnikami) ma istotny wpływ oddziaływanie pojazdu (sylwetka i ciężar), znajdującego się w sąsiedztwie płyty. W artykule autorzy wykazali wpływ oddziaływania kół pojazdu ciężarowego w badaniu VSS na trzy układy warstwowe. Wyniki odniesiono do „wzorcowego” obciążenia (łyżka koparki na wysięgu), które nie wpływa na zmianę czasu przemieszczeń w sąsiedztwie płyty naciskowej, z uwagi na większą odległość od punktu przyłożenia siły.

## 2. BADANIA TERENOWE

Badania terenowe przeprowadzono w warunkach normowych, przy temperaturze powietrza około 15°C, w przeciętnych warunkach wilgotnościowych. Badania przeprowadzono na trzech układach warstwowych (Rys. 1), na każdym przeprowadzając co najmniej po trzy pomiary. Prezentowane wyniki stanowią średnią arytmetyczną:

- a) podłoże (G2) – pospółka gliniasta,
- b) warstwa kruszywa łamanego 0/63, grubości 20 cm, na podłożu (G2),
- c) warstwa kruszywa łamanego 0/63, grubości 20 cm, na stabilizacji cementowej  $R_m = 2,5$  MPa, grubości 20 cm, dowożonej z węzła, pod spodem podłoże (G2).

## 1. INTRODUCTION

The static plate load test measures the vertical displacement (settlement) of the tested pavement course or subgrade under the static load applied by means of a circular steel plate. The readings are subsequently used for determining the parameters of the tested layer (moduli or relative compaction). The load is applied by a hydraulic jack supported by counterweight, typically a heavy truck or excavator bucket. The details of the static plate load test procedure used in this research are presented in [1]. The continuing development of dynamic methods has not, as yet, excluded the static plate load test from use on the Polish roads and, besides, it is still of interest to researchers [2, 3]. The problem is that the current regulations, guidelines and general specifications [4, 5] are not precise about the weight and outline of the vehicle used in the function of counterweight [4, 5]. However, this research has demonstrated that the type of counterweight exerts a considerable influence on the experimental results obtained for the tested layers. The Polish Standard No. PN-S-02205, 1998 edition [4] requires only that the counterweight must be heavier than the test load applied by the hydraulic jack. The noted differences between the results are attributed to the considerable influence of the vehicle parameters (outline and weight) on the nearby test area where the loading plate and displacement transducers are deployed. The influence of the vehicle wheels on the results of static plate load test will be demonstrated further in this article for three different systems of layers. The test set-up using extended excavator bucket as the counterweight has been used as a reference, since the vehicle does not affect displacements around the loading plate due to a greater distance from the load application point.

## 2. FIELD TESTING

Field tests were carried out under standard conditions at ambient temperature of circa 15°C and moderate air humidity. The tests were performed on three different layer systems (Fig. 1) with at least three tests carried out for each of them. The results presented herein have been calculated as the arithmetic average of the obtained readings:

- a) subgrade (G2) – sand/gravel/clay mix,
- b) 20 cm layer of 0/63 mm crushed stone laid on subgrade (G2),
- c) 20 cm layer of 0/63 mm crushed stone laid on subgrade (G2) strengthened with 20 cm plant-mixed CTB.



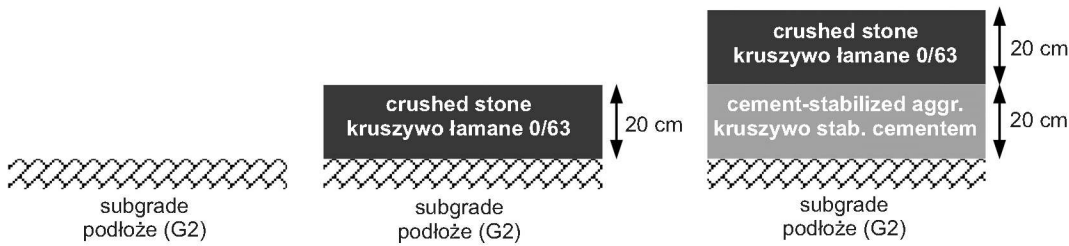


Fig. 1. Diagrams of tested layer systems

Rys. 1. Schematy badanych układów warstwowych

Na każdym z układów przanalizowano dwa przypadki przeciwwagi płyty naciskowej VSS. Odległość statywu od płyty naciskowej wynosiła 2 m. Jako przypadek „wzorcowy”, w którym obciążenie przeciwwagi nie wpływa na kształt czaszy przemieszczeń, zastosowano obciążenie przekazywane z wykorzystaniem łyżki koparki. Wysięg łyżki koparki zastosowany w badaniu wynosił 3 m. Schemat takiego obciążenia pokazano na Rys. 2.

Drugi przypadek stanowiło typowe obciążenie z wykorzystaniem pojazdu ciężarowego (Rys. 3), w którym dźwignik hydrauliczny, przekazujący obciążenie na płytę naciskową, zlokalizowany jest między kołami tylnej osi pojazdu ciężarowego (Rys.4).



Fig. 3. Static plate load test carried out with the use of a heavy truck

Rys. 3. Badanie VSS z wykorzystaniem pojazdu ciężarowego

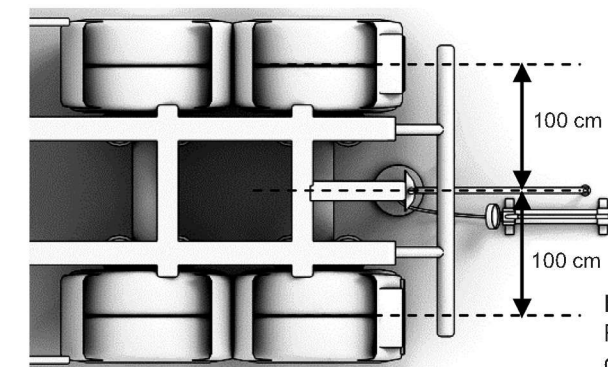


Fig. 4. Loading plate location in relation to rear wheels of a heavy truck  
Rys. 4. Lokalizacja płyty naciskowej VSS względem kół tylnej osi pojazdu ciężarowego

Each system of layers was tested using two different counterweight configurations. The support frame was spaced from the loading plate by 2 m. The test set-up with the counterweight provided by an excavator bucket was used as a reference since in that configuration the vehicle does not affect the shape of deflection basin. The excavator used in the test had 3 m range of motion of the bucket. The test set-up is presented in Fig. 2 below.

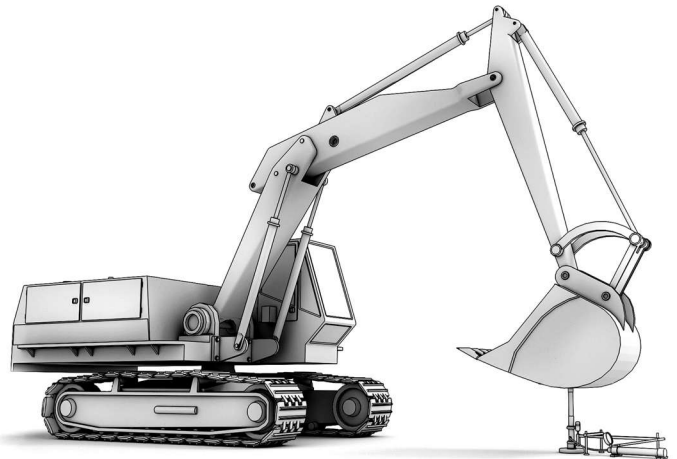


Fig. 2. Load applied on the loading plate with an excavator bucket used as the counterweight

Rys. 2. Obciążenie na płytę naciskową przekazywane przez łyżkę koparki

The second test set-up (Fig. 3) used a typical counterweight, namely a heavy truck with the hydraulic jack placed between the rear wheels (Fig. 4).

Podczas badania dla dwóch cykli obciążenia odczytywano wartości przemieszczeń po ustabilizowaniu się osiadań w czasie. Obliczenia modułów odkształcenia przeprowadzono zgodnie z normą [4] oraz [6], według zależności (1), odpowiadającej w przybliżeniu obciążeniu sztywnym stępem:

$$E_i = \frac{3 \cdot \Delta p}{4 \cdot \Delta s} \cdot D, \quad (1)$$

gdzie:

$E_i$  – moduł odkształcenia [MPa],

$\Delta p$  – różnica nacisków [MPa],

$\Delta s$  – przyrost przemieszczeń odpowiadający różnicy nacisków [mm],

$D$  – średnica płyty 300 mm.

Wyniki pomiarów dla wybranych poziomów z drugiego cyklu obciążenia przedstawiono w Tabl. 1-3.

The tests included two load cycles with the readings taken when the settlements became constant over time. The deformation moduli were calculated according to [4] and [6] with equation (1) which approximates loading with a rigid ram:

$$E_i = \frac{3 \cdot \Delta p}{4 \cdot \Delta s} \cdot D, \quad (1)$$

where:

$E_i$  – deformation modulus [MPa],

$\Delta p$  – increase of contact pressure [MPa],

$\Delta s$  – increase of settlement corresponding to the increase of contact pressure [mm],

$D$  – loading plate diameter (300 mm).

The readings for pre-selected steps of the second loading cycles are presented in Tables 1-3.

Table 1. Field test results for subgrade (G2)  
Tablica 1. Wyniki pomiarów dla podłoża (G2)

Heavy vehicle / Pojazd ciężki					Difference / Różnica [%]
Pressure reading Odczyt ciśnienia $p$ [MPa]	Displacement reading Odczyt przemieszczenia $s$ [mm]	$\Delta p$ [MPa]	$\Delta s$ [mm]	$E_2$ [MPa]	
0.05	1.30	0.10	0.67	33.8	13
0.15	1.97				
Excavator / Koparka					
Pressure reading Odczyt ciśnienia $p$ [MPa]	Displacement reading Odczyt przemieszczenia $s$ [mm]	$\Delta p$ [MPa]	$\Delta s$ [mm]	$E_2$ [MPa]	
0.05	1.17	0.10	0.76	29.8	
0.15	1.93				

Table 2. Field test results for crushed stone layer laid on subgrade (G2)  
Tablica 2. Wyniki pomiarów dla kruszywa łamanego na podłożu (G2)

Heavy vehicle / Pojazd ciężki					Difference / Różnica [%]
Pressure reading Odczyt ciśnienia $p$ [MPa]	Displacement reading Odczyt przemieszczenia $s$ [mm]	$\Delta p$ [MPa]	$\Delta s$ [mm]	$E_2$ [MPa]	
0.15	1.02	0.10	0.22	103.3	20
0.25	1.24				
Excavator / Koparka					
Pressure reading Odczyt ciśnienia $p$ [MPa]	Displacement reading Odczyt przemieszczenia $s$ [mm]	$\Delta p$ [MPa]	$\Delta s$ [mm]	$E_2$ [MPa]	
0.15	0.98	0.10	0.27	86.2	
0.25	1.25				



Table 3. Field test results for multi-layered system: crushed stone, CTB, subgrade (G2)  
 Tablica 3. Wyniki pomiarów dla układu warstw: kruszywo łamane, stabilizacja cementowa, podłoże (G2)

Heavy vehicle / Pojazd ciężki					Difference / Różnica [%]
Pressure reading Odczyt ciśnienia $p$ [MPa]	Displacement reading Odczyt przemieszczenia $s$ [mm]	$\Delta p$ [MPa]	$\Delta s$ [mm]	$E_2$ [MPa]	
0.25	0.81	0.20	0.15	294.2	54
0.45	0.96				
Excavator / Koparka					
Pressure reading Odczyt ciśnienia $p$ [MPa]	Displacement reading Odczyt przemieszczenia $s$ [mm]	$\Delta p$ [MPa]	$\Delta s$ [mm]	$E_2$ [MPa]	
0.25	0.79	0.20	0.23	191.6	
0.45	1.02				

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić istotne różnice w wartościach identyfikowanych wtórnych modułów odkształcenia, w zależności od rodzaju zastosowanej przeciwwagi. Moduły uzyskane przy użyciu pojazdu ciężarowego jako przeciwwagi są generalnie większe (zawyżone) w stosunku do modułów uzyskanych przy zastosowaniu obciążenia przekazywanego przez łyżkę koparki jako wzorcowe. Różnice te są najmniejsze w przypadku badania podłoża G2 i największe w przypadku badania najmocniejszej konstrukcji – z warstwą kruszywa stabilizowanego cementem. Spowodowane jest to większym oddziaływaniem kół sąsiadującego pojazdu ciężarowego na obszar pomiarowy z płytą VSS. Wraz ze wzrostem sztywności badanego układu warstw nakładają się czasie przemieszczeń od kół i płyty naciskowej.

### 3. OBLICZENIA NUMERYCZNE

Obliczenia numeryczne wykonano z wykorzystaniem programu ELSYM5 oraz UNOR [7]. Warstwy konstrukcji nawierzchni oraz podłoże zamodelowano odpowiednio jako sprężystą półprzestrzeń warstwową oraz półprzestrzeń sprężystą. Przeanalizowano dwa przypadki obciążenia, symulujące badanie VSS z wykorzystaniem typowego pojazdu ciężarowego oraz łyżki koparki. Przyjęto powszechnie stosowane dla analizowanych warstw parametry materiałowe (moduł sprężystości  $E$  i współczynnik Poissona  $\nu$ ). Schematy obliczeniowe wraz z przyjętymi parametrami materiałowymi pokazano na Rys. 5.

Głównym celem zastosowania modelu była analiza czasz przemieszczeń pojawiających się od obciążenia łyżką koparki, pojazdu, płyty VSS. W modelu obciążenia płyty VSS

As it can be seen from the measurement results there are significant differences between the moduli after second loading cycle depending on the type of the counterweight used in the test. The moduli obtained with the truck-based set-up are generally higher than the reference values obtained with the use of excavator bucket (i.e. they are over-rated). The differences are the smallest in the case of G2 subgrade alone and the greatest in the case of the strongest structure, i.e. multi-layered system including CTB. This is due to increased magnitude of impact of the heavy truck on the test area. With the increase in stiffness of the tested structural system the wheels and plate induced deflection basins begin to overlap.

### 3. NUMERICAL CALCULATIONS

The numerical calculations under this research were carried out using software programs ELSYM5 and UNOR [7]. The subgrade and the pavement courses are represented by elastic half-space single-layer and multi-layered as appropriate. Two loading cases were analysed representing the two test set-ups: using a heavy truck and an excavator bucket as the counterweight. The two typically used material parameters were used for the analysed layers, namely the elastic modulus  $E$  and Poisson's ratio  $\nu$ . Schematic diagrams and material parameters used in the calculations are presented on Fig. 5.

The main purpose of using the above-described model was to analyse the deflection basins induced by the excavator bucket, vehicle weight and the loading plate respectively. In the model including a heavy truck three load application areas can be distinguished (Fig. 5) – loading

z wykorzystaniem pojazdu ciężarowego zastosowano trzy pola obciążenia (Rys. 5) – płyta (II) oraz dwa koła (I). Płytę naciskową VSS zamodelowano jako sztywny stempel. W przypadku modelu obciążenia płyty VSS, którego przeciwwagę stanowiła łyżka koparki, uwzględniano jedynie sam nacisk na płytę (II) – Rys. 5, z uwagi na znaczną odległość kół lub gaśnic koparki od płyty naciskowej i brak istotnego wpływu obciążenia koparką na kształt cząstki przemieszczeń w sąsiedztwie płyty naciskowej.

Dla obciążenia pojazdem ciężarowym przyjęto nacisk 100 kN na oś. Uwzględniano odciążanie kół pojazdu (zmniejszanie nacisku na badaną warstwę – Rys. 6) wraz ze wzrostem obciążenia wywieranego przez płytę naciskową, co jak wykazano w dalszej części artykułu, ma kluczowe znaczenie przy identyfikacji parametrów badanej warstwy. Z uwagi na podparcie płyty za pośrednictwem dźwignika hydraulicznego przenoszona jest siła na elementy konstrukcyjne pojazdu. Podczas zwiększania obciążenia  $Q_i$  na płytę naciskową zmniejsza się oddziaływanie kół pojazdu na podłoże i wynosi dla każdego z kół:  $P=50 \text{ kN}-Q_i/2$ .

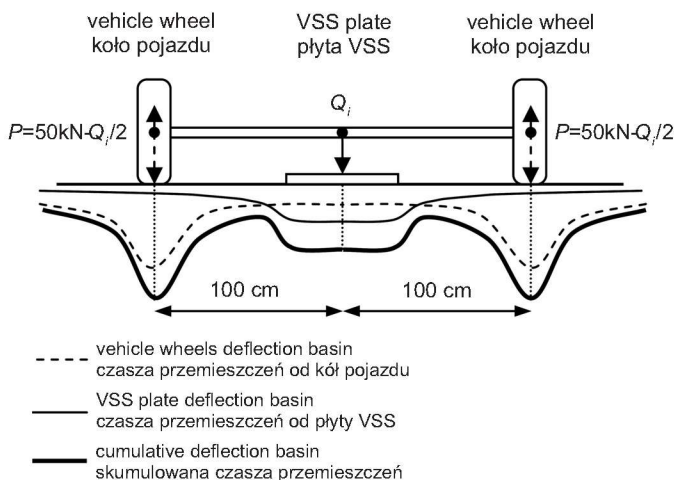


Fig. 6. Test set-up with a heavy truck used as the counterweight ( $Q_i$  - load at the  $i$  loading step,  $P$  - load imposed by heavy truck wheel)

Rys. 6. Schemat obciążenia stosowany podczas badania VSS z wykorzystaniem pojazdu ciężarowego ( $Q_i$  - obciążenie płyty dla  $i$ -tego poziomu obciążenia,  $P$  - obciążenie od koła pojazdu)

Czasza przemieszczeń - skumulowana, uzyskana przy użyciu pojazdu ciężarowego, wynika ze „złożenia” czaszy przemieszczeń od obciążenia płytą oraz od kół pojazdu (Rys. 6). W takim wypadku rejestrowane przemieszczenia pionowe pod płytą naciskową zwiększają się wraz ze wzrostem obciążenia przekazywanego przez płytę (przy kolejnych

plate (II) and two wheels (I) The loading plate is modelled as a stiff ram. Conversely, in the model using excavator bucket it was possible to consider only the load imposed by the loading plate (area II in Fig. 5) owing to a considerable distance between the excavator wheels / tracks and the loading plate, as well as hardly any effect of the excavator load on the deflection basin around the loading plate.

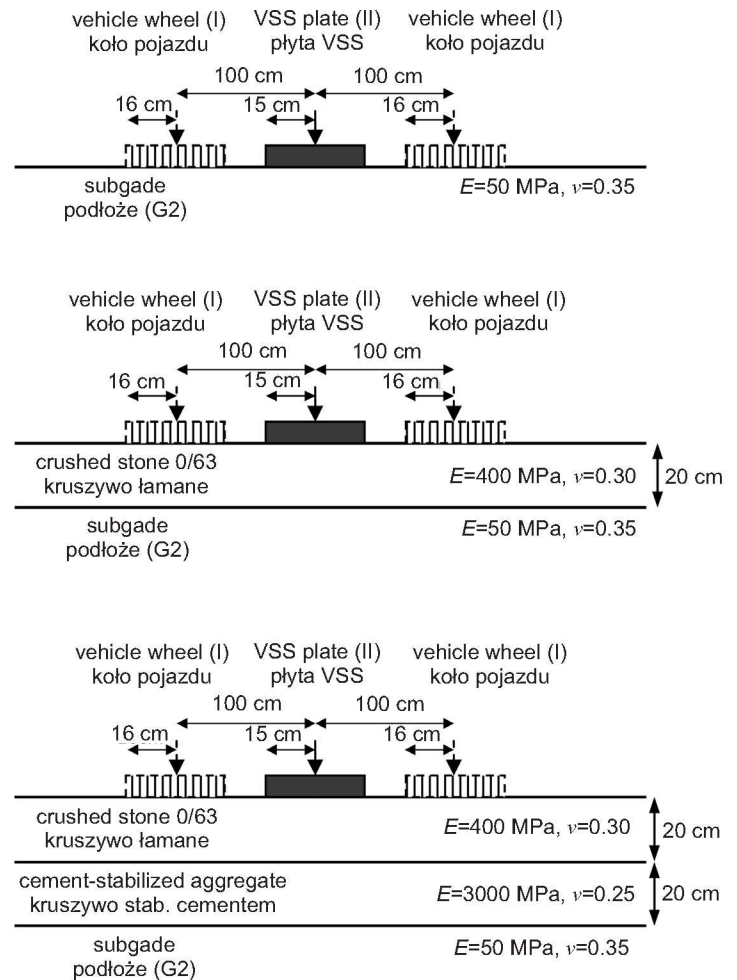


Fig. 5. Schematic diagrams and materials parameters used in calculations

Rys. 5. Schematy obliczeniowe wraz z przyjętymi parametrami materiałowymi

Axle load of 100 kN was assumed. The load from the vehicle load was decreased (Fig. 6) to account for the unloading effect of the increasing load imposed by the loading plate, which is of critical importance for determining the parameters of the tested layers, as it will be demonstrated further in this paper. With the hydraulic



poziomach obciążenia), ale też jednocześnie są redukowane z uwagi na coraz mniejszy wpływ kół pojazdu ciężarowego na czasę przemieszczeń w sąsiedztwie płyty, w wyniku odciążania tylnej osi pojazdu. W przypadku badania z wykorzystaniem koparki czasza przemieszczeń powstaje wyłącznie z obciążenia przekazywanego na płytę naciśkową VSS. Przykładowe czasze przemieszczeń, jakie obliczono dla warstwy kruszywa łamanego, przy nacisku 0,25 MPa, z wykorzystaniem koparki oraz pojazdu ciężarowego, przedstawiono na Rys. 7.

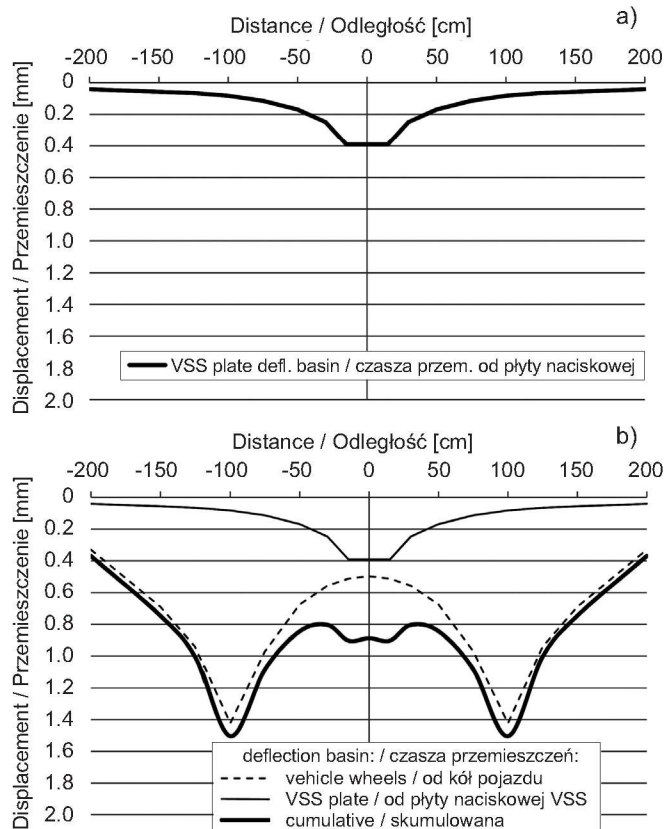


Fig. 7. Examples of deflection basins obtained in the static plate load test using: a) excavator, b) heavy truck  
Rys. 7. Przykładowe czasze przemieszczeń w badaniu VSS przy wykorzystaniu: a) koparki, b) pojazdu ciężarowego

Wyniki obliczeń (modułów) dla wszystkich trzech układów warstwowych, w zależności od zamodelowanej przeciwwagi (samochód ciężarowy lub koparka) przedstawiono w Tabl. 4-6. Na Rys. 8-10 pokazano natomiast zależności wartości przemieszczeń pionowych pod płytą VSS od poziomu obciążenia oraz wpływu rodzaju przeciwwagi. Na podstawie wyników zamieszczonych na Rys. 8-10 stwierdzić można, że przebieg ten jest liniowy (co jest oczywiste, z uwagi na charakter przyjętego modelu). Wraz ze wzrostem wywieranego nacisku przemieszczenia pod płytą

jack in place, the reaction force acts on the load bearing parts of the vehicle. As such, the load imposed on the base by the vehicle wheels decreases with the increase of the force  $Q_i$  acting on the loading plate and the wheel load is calculated as follows:  $P=50 \text{ kN}-Q_i/2$ .

The cumulative displacement basis as obtained for the heavy truck test set-up combines the deflections induced respectively by the loading plate and by the vehicle wheels (Fig. 6). In that case, the measured vertical displacements under the loading plate increase with the increase of the load transferred by the loading plate (successive load increasing steps), partly offset by a lesser influence of the vehicle wheels on the deflections around the plate due to partial unloading of the rear axle. In the test set-up using the excavator bucket the deflections are attributed solely to the loading plate. Fig. 7 presents some examples of deflection basins calculated for the crushed stone layer and 0.25 MPa loading pressure for the two test set-ups, i.e. using excavator and heavy truck respectively.

The values of moduli calculated for the three tested systems and the two counterweight types are given in Tables 4-6. The charts in Fig. 8-10 present the relationship between vertical displacements under the plate and the load value for the two types of counterweight used. As it could be expected from the adopted model linear relationships have been obtained as it can be seen in Fig. 8-10. The deflections under the plate increase with the increasing load, yet the rate of increase varies. It depends on the type of counterweight (excavator or heavy truck) and on the layered system construction. The test set-up including excavator gives a greater rate of increase of displacements, as compared to the heavy truck set-up for each of the three analysed layer systems.

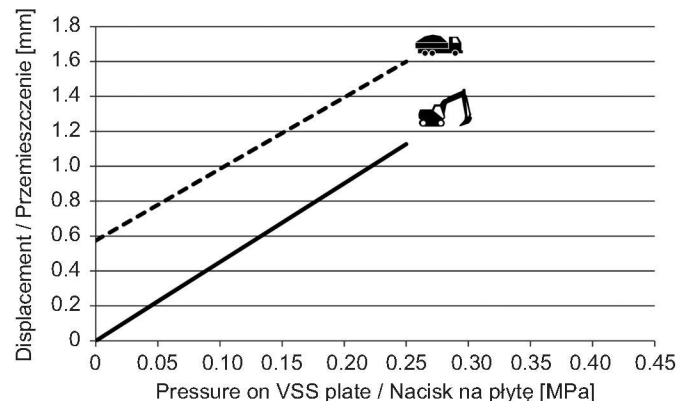


Fig. 8. Vertical displacements vs. load in static plate load test: G2 subgrade case  
Rys. 8. Przemieszczenia pionowe podłoża G2 pod płytą VSS w zależności od poziomu obciążenia

zwiększają się, jednak z różną intensywnością. Uzależnione jest to od rodzaju przeciwwagi (koparka lub pojazd ciężarowy) oraz układu warstw. Dla każdego z trzech analizowanych układów warstw prędkość wzrostu przemieszczeń wraz ze wzrostem obciążenia jest większa w przypadku stosowania koparki niż w przypadku pojazdu ciężarowego.

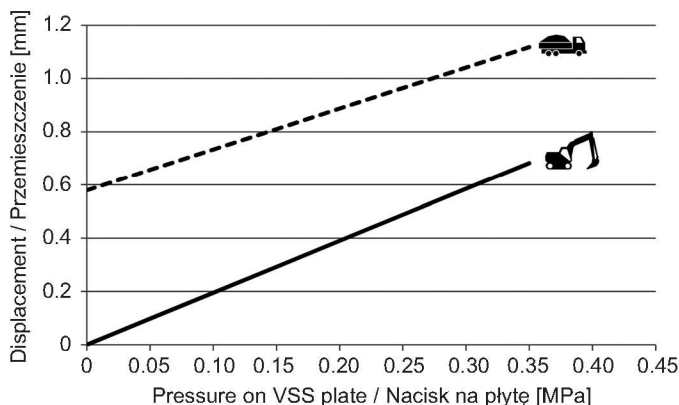


Fig. 9. Vertical displacements vs. load in static plate load test: crushed stone layer on G2 subgrade case  
Rys. 9. Przemieszczenia pionowe pod płytą VSS w zależności od poziomu obciążenia, dla kruszywa łamanego na podłożu G2

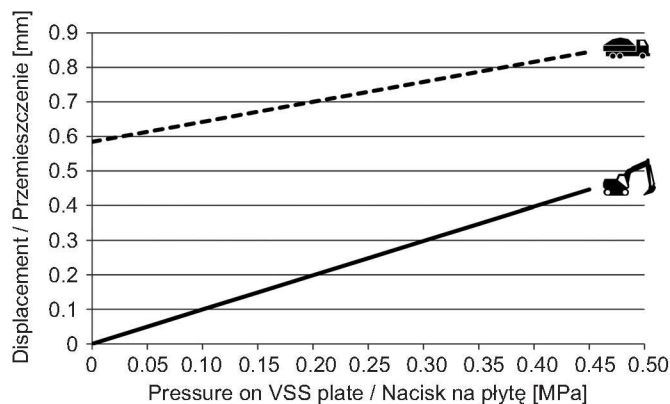


Fig. 10. Vertical displacements vs. load in static plate load test: crushed stone layer on G2 subgrade case overlain with cement-treated aggregate  
Rys. 10. Przemieszczenia pionowe pod płytą VSS w zależności od poziomu obciążenia, dla układu warstw: kruszywo łamane, stabilizacja cementowa, podłoże G2

Table 4. Results of calculations for subgrade  
Tablica 4. Wyniki obliczeń dla podłoża

Heavy vehicle / Pojazd ciężki					Difference / Różnica [%]
Pressure reading Odczyt ciśnienia $p$ [MPa]	Displacement reading Odczyt przemieszczenia $s$ [mm]	$\Delta p$ [MPa]	$\Delta s$ [mm]	$E_2$ [MPa]	
0.05	0.779	0.10	0.41	54.9	10
0.15	1.189				
Excavator / Koparka					
Contact pressure under plate Nacisk pod płytą $p$ [MPa]	Displacement reading Odczyt przemieszczenia $s$ [mm]	$\Delta p$ [MPa]	$\Delta s$ [mm]	$E_2$ [MPa]	
0.05	0.225	0.10	0.45	49.9	
0.15	0.676				

Table 5. Results of calculations for the multi-layered system: aggregate and subgrade  
Tablica 5. Wyniki obliczeń dla układu warstw: kruszywo i podłoże

Heavy vehicle / Pojazd ciężki					Difference / Różnica [%]
Pressure reading Odczyt ciśnienia $p$ [MPa]	Displacement reading Odczyt przemieszczenia $s$ [mm]	$\Delta p$ [MPa]	$\Delta s$ [mm]	$E_2$ [MPa]	
0.15	0.810	0.10	0.15	146.1	27
0.25	0.964				
Excavator / Koparka					
Contact pressure under plate Nacisk pod płytą $p$ [MPa]	Displacement reading Odczyt przemieszczenia $s$ [mm]	$\Delta p$ [MPa]	$\Delta s$ [mm]	$E_2$ [MPa]	
0.15	0.292	0.10	0.19	115.4	
0.25	0.487				



Table 6. Results of calculations for the multi-layered system: aggregate, CTB, subgrade  
 Tablica 6. Wyniki obliczeń dla układu warstw: kruszywo, stabilizacja i podłoże

Heavy vehicle / Pojazd ciężki					Difference / Różnica [%]	
Pressure reading Odczyt ciśnienia $p$ [MPa]	Displacement reading Odczyt przemieszczenia $s$ [mm]	$\Delta p$ [MPa]	$\Delta s$ [mm]	$E_2$ [MPa]		
0.25	0.729	0.20	0.12	388.5	71	
0.45	0.845					
Excavator / Koparka						
Contact pressure under plate Odczyt ciśnienia $p$ [MPa]	Displacement reading Odczyt przemieszczenia $s$ [mm]	$\Delta p$ [MPa]	$\Delta s$ [mm]	$E_2$ [MPa]		71
0.25	0.248	0.20	0.20	226.8		
0.45	0.446					

Wpływ rodzaju przeciwwagi na identyfikowane moduły warstw wyjaśniono analizując nie tylko przemieszczenia rejestrowane bezpośrednio pod płytą, ale pełne czasie przemieszczeń. Na Rys. 11-13 pokazano wyznaczone w modelu skumulowane czasie przemieszczeń (od pojazdu ciężarowego oraz płyty naciskowej VSS), przy wybranych poziomach obciążenia, dla wszystkich trzech analizowanych układów warstwowych.

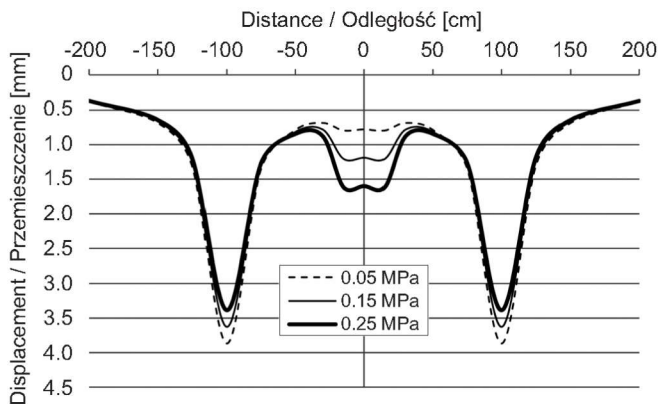


Fig. 11. Cumulative deflection basins (wheel and plate induced) on G2 subgrade case

Rys. 11. Skumulowane czasie przemieszczeń (od pojazdu ciężarowego oraz płyty naciskowej VSS) dla podłoża G2

Na podstawie analizy kształtu czasz można stwierdzić istotny wpływ sąsiadującego pojazdu ciężarowego na obszar badawczy VSS (płyta wraz z czujnikami) i przemieszczenia rejestrowane bezpośrednio pod płytą. W przypadku pomiarów bezpośrednio na podłożu wpływ ten jest niewielki (podłoże odkształca się lokalnie, a czasie od płyty i kół pojazdu „nakładają się” w niewielkim stopniu). W przypadku układów warstwowych o większej sztywności widać wyraźne „nakładanie” się czasz od płyty naciskowej i kół pojazdu ciężarowego.

The scope of analysis to explain the influence of the counterweight type on the identified moduli of the layers was extended to the whole deflection basin. Fig. 11-13 show cumulative displacement basins (resulting from combined wheel and plate loads) for selected loads and all the three analysed layer systems.

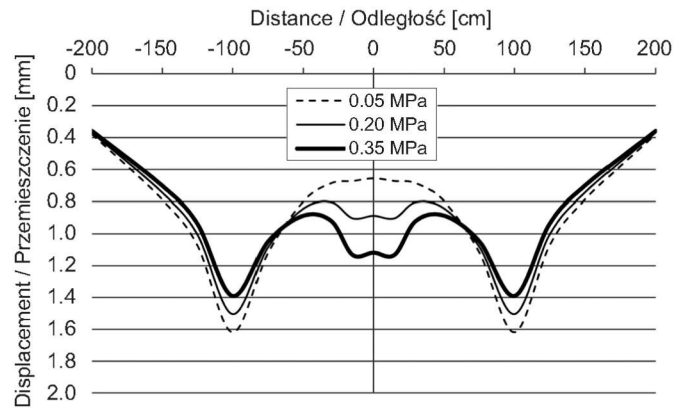


Fig. 12. Cumulative deflection basins (wheel and plate induced) on crushed stone layer laid on subgrade  
 Rys. 12. Skumulowane czasie przemieszczeń (od pojazdu ciężarowego oraz płyty naciskowej VSS) dla warstwy kruszywa łamanego na podłożu

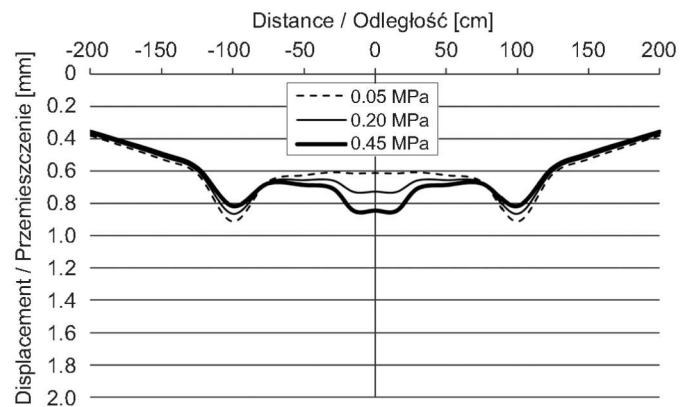


Fig. 13. Cumulative deflection basins (wheel and plate induced) on multi-layered system: crushed stone, CTB, subgrade  
 Rys. 13. Skumulowane czasie przemieszczeń (od pojazdu ciężarowego oraz płyty naciskowej VSS) dla układu warstw: kruszywo łamane, stabilizacja cementowa, podłoże

Na Rys. 14-16 pokazano wyznaczone w modelu czasie przemieszczeń od płyty naciskowej VSS z wykorzystaniem koparki, przy wybranych trzech poziomach obciążenia, dla wszystkich trzech analizowanych układów warstwowych. Natomiast na Rys. 17-19 zestawiono czasie przemieszczeń dla modelu z wykorzystaniem pojazdu ciężarowego oraz koparki. Porównanie przeprowadzono dla maksymalnego i minimalnego poziomu obciążenia stosowanego dla danego układu warstwowego.

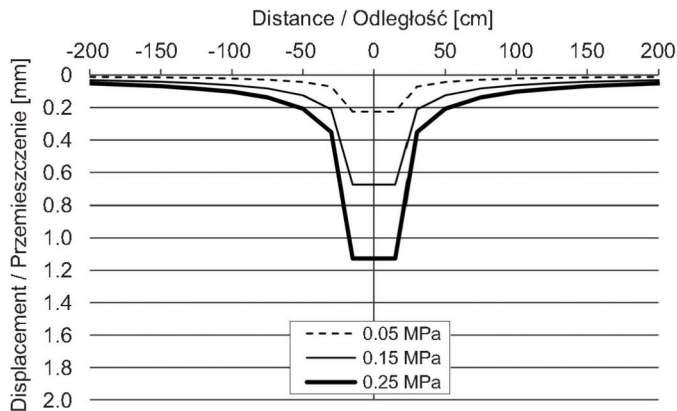


Fig. 14. Deflection basins in static plate load test carried out using excavator for G2 subgrade case

Rys. 14. Czasze przemieszczeń przy badaniu VSS z wykorzystaniem koparki dla podłoża G2

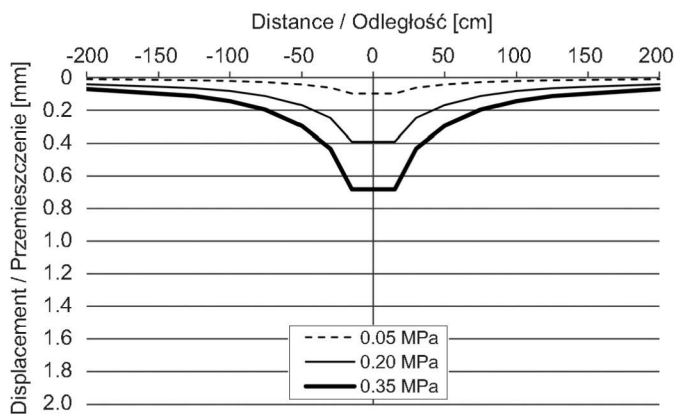


Fig. 15. Deflection basins obtained in static plate load test carried out using excavator: crushed stone layer on subgrade

Rys. 15. Czasze przemieszczeń przy badaniu VSS z wykorzystaniem koparki dla warstwy kruszywa łamanego na podłożu

Fig. 17. Comparison of deflection basins obtained in static plate load tests carried out using excavator and heavy truck for G2 subgrade case

Rys. 17. Porównanie czas przemieszczeń przy badaniu VSS z wykorzystaniem koparki oraz pojazdu ciężarowego dla podłoża G2

The deflection basin shape can be analysed to find out whether or not the truck positioned nearby has had a considerable influence on the deflections in the test area (area around the plate and sensors) and right under the loading plate. This influence is small when subgrade is tested alone (it deforms locally with little overlapping between the plate and wheel induced deflection basins). Such overlapping is to be seen clearly in the case of more rigid multi-layered systems.

Fig. 14-16 show cumulative displacement basins obtained in the model for the test set-up including excavator bucket as the counterweight for three load levels and all the three analysed layer systems. The displacement basins obtained in the models using heavy truck and excavator are presented in Fig. 17-19. The displacement basins are compared at the maximum and minimum load applied for the respective layer systems.

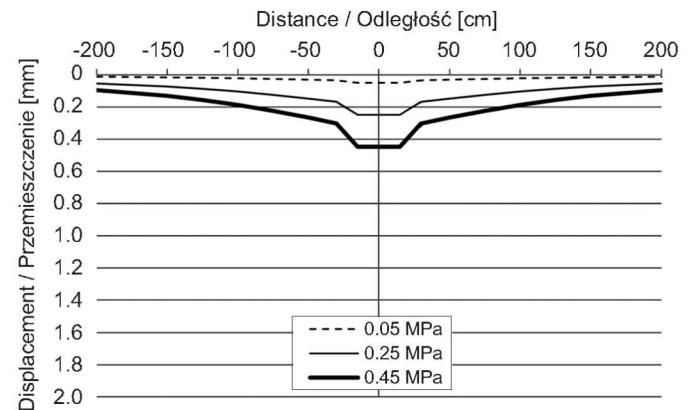
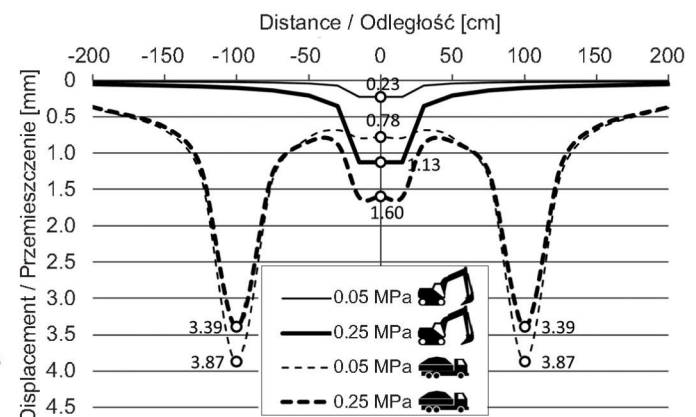
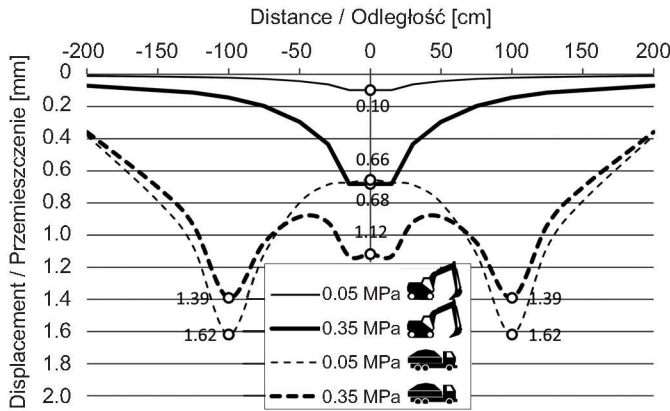


Fig. 16. Deflection basins obtained in static plate load test carried out using excavator on multi-layered system: crushed stone, CTB, subgrade

Rys. 16. Czasze przemieszczeń przy badaniu VSS z wykorzystaniem koparki dla układu warstw: kruszywo łamane, stabilizacja cementowa, podłożo







Rys. 18. Comparison of deflection basins obtained in static plate load test carried out using excavator and truck: crushed stone layer on subgrade

Fig. 18. Porównanie czasz przemieszczeń przy badaniu VSS z wykorzystaniem koparki oraz pojazdu ciężarowego dla warstwy kruszywa łamanego na podłożu

Jakkolwiek maksymalne przemieszczenia rejestrowane pod płytą (dla wszystkich układów warstwowych) z wykorzystaniem pojazdu ciężarowego są większe niż w przypadku koparki (Rys.17-19), to jednak różnica między przemieszczeniami maksymalnymi i minimalnymi jest mniejsza. Przed rozpoczęciem badania VSS warstwa jest już wstępnie sprężona za sprawą kół pojazdu ciężarowego oddziałującego na czaszę przemieszczeń w sąsiedztwie płyty naciskowej. Mniejszy przyrost przemieszczeń pod płytą, wraz ze wzrostem obciążenia (mniejsza prędkość), skutkuje większymi modułami odkształcenia badanej warstwy w przypadku pomiaru z wykorzystaniem pojazdu ciężarowego, mimo iż rejestrowane są w takim wypadku pod płytą większe przemieszczenia bezwzględne.

Ponadto zauważyć warto, że w przypadku stosowania jako przeciwwagi pojazdu ciężarowego, globalnie maksymalne przemieszczenia nie zawsze występują pod kołami pojazdu. W przypadku dużej sztywności układu warstw i dużych nacisków (Rys.13 i 19) przemieszczenia rejestrowane pod płytą przekraczają przemieszczenia występujące pod kołami pojazdu, z uwagi na nakładanie się w takim przypadku czasz przemieszczeń od kół pojazdu oraz płyty naciskowej.

#### 4. PORÓWNANIE WYNIKÓW

W badaniach terenowych, na wszystkich trzech układach warstwowych, otrzymano wyższe wyniki wtórnego modułu odkształcenia w przypadku badania VSS z wykorzystaniem pojazdu ciężarowego, a niższe – w przypadku koparki.

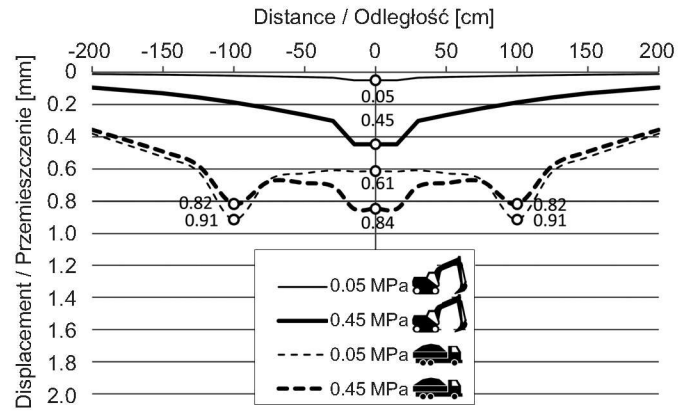


Fig. 19. Comparison of deflection basins obtained in static plate load test carried out using excavator and truck on multi-layered system: crushed stone, CTB, subgrade

Rys. 19. Porównanie czasz przemieszczeń przy badaniu VSS z wykorzystaniem koparki oraz pojazdu ciężarowego dla układu warstw: kruszywo łamane, stabilizacja cementowa, podłożu

With greater maximum displacements under the plate (for all the tested layer systems) in the case of test set-up using heavy truck there is less difference between the maximum and minimum deflections as compared to the excavator set-up (Fig. 17-19). At the time of starting the test the layer had already been pre-loaded by the vehicle wheels, influencing the deflection basin around the loading plate. Smaller rates of increase of displacements with increasing load, as measured with the truck-based test set-up, gave higher deformation moduli of the tested layer notwithstanding higher absolute displacements under the plate.

Moreover, it is worthwhile noting that in the truck-based test set-up the maximum displacements do not always occur under the truck wheels. In the case of more rigid systems and greater pressure values (Fig. 13 and Fig. 19) the displacements measured under the plate are greater than the displacements under the truck wheels due to overlapping between the wheel and plate induced basins.

#### 4. COMPARISON OF RESULTS

The field tests gave higher values of deformation modulus (measured after second loading) in the case of truck-based test set-up as compared to the excavator bucket set-up. The differences range from 13% for subgrade tested alone up to as much as 54% for the most rigid of the tested systems. These differences are presented in Fig. 20 as ratios between moduli obtained with the two test set-ups:  $E_{truck} / E_{excavator}$ . The ratios are greater

Różnice te wahają się od 13% w przypadku badań na podłożu, do nawet 54% w przypadku układów warstw o dużej sztywności. Przedstawiono je w postaci stosunków odpowiednich modułów  $E_{\text{poj. cięż.}} / E_{\text{koparka}}$  na Rys. 20. Wartości tych stosunków są każdorazowo większe od jedności, co dobitnie wskazuje na istotny i regularny wpływ rodzaju przeciwwagi w badaniu VSS na identyfikowane wartości modułów.

Należy także pamiętać, że w przypadku badań VSS bezpośrednio na podłożu istotny wpływ na identyfikowane parametry będą miały zjawiska nieliniowe (lepkie i plastyczne), co autorzy wykazali w [1]. Natomiast w przypadku badań powszechnie stosowanych konstrukcji o dużej sztywności (na stabilizacji cementowej) przyjęcie uproszczonego modelu sprężystego jest jak najbardziej poprawne, co również zostało potwierdzone przez autorów w [1] i [8].

## 5. MINIMALNA ODLEGŁOŚĆ PRZECIWWAGI OD PŁYTY NACISKOWEJ

Autorzy podjęli próbę ustalenia do celów praktycznych minimalnych odległości, w jakich powinna znajdować się przeciwwaga podczas badania VSS, w zależności od rodzaju badanej warstwy. Przeanalizowano trzy układy warstwowe (Rys.1). Na Rys. 21 przedstawiono zasięgi czasz przemieszczeń od koła pojazdu ciężarowego (Rys. 21a) oraz płyty naciskowej VSS (Rys. 21b). Uwzględniono przy tym opisany wcześniej efekt odciążania kół pojazdu ciężarowego na skutek zwiększania nacisku na płytę. Czasze na Rys.21b przedstawiają maksymalne przemieszczenia uzyskane przy nacisku na płytę 0,25 MPa – w przypadku podłoża; 0,35 MPa – w przypadku warstwy kruszywa łamanego na podłożu i 0,45 MPa w przypadku układu warstw o największej sztywności (na stabilizacji cementowej).

Na Rys. 22 przedstawiono procentowy udział przemieszczenia rejestrowanego na skutek wpływu koła, w zależności od odległości koła od płyty, do przemieszczenia rejestrowanego pod płytą, na skutek obciążania samej płyty. Widać wyraźnie, że udział ten rośnie wraz ze wzrostem sztywności układu warstw (co potwierdza wcześniejsze analizy i wyniki badań autorów) i maleje wraz z odległością przeciwwagi od płyty. Istotny wpływ ciężaru przeciwwagi na przemieszczenia rejestrowane pod płytą, w przypadku badań podłoża, obserwuje się w odległości do 1,2 m od płyty naciskowej, natomiast w przypadku warstwy kruszywa łamanego na podłożu do 1,5 m. W tych odległościach rejestruje się stosunek przemieszczenia rejestrowanego na skutek wpływu

than 1 in all cases, proving that the influence of the counterweight type on the moduli obtained in the static plate test is both considerable and regular.

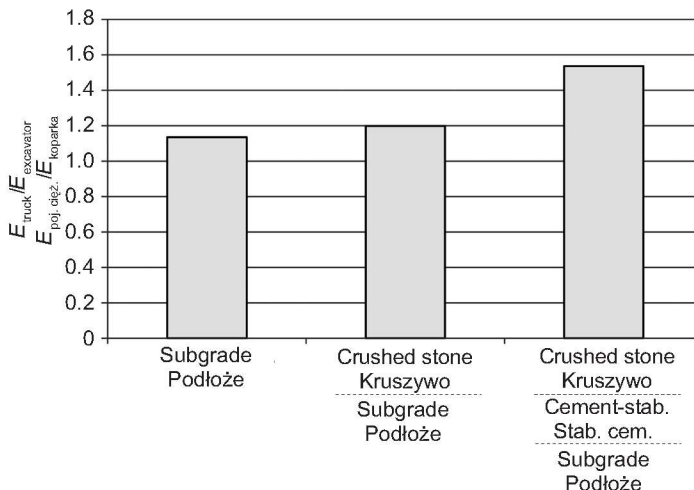


Fig. 20. Ratios between deformation moduli (after second loading) obtained with the truck and excavator based test set-ups  
Rys. 20. Stosunki wtórnych modułów odkształcenia uzyskanych z wykorzystaniem pojazdu ciężarowego oraz koparki

It should be noted that in the case of static plate load test carried out for subgrade alone the identified values will be strongly influenced by non-linear (viscous and plastic) effects, as the authors managed to demonstrate in [1]. This said, application of a simplified elastic model for typically used rigid constructions (including CTB) is by all means correct, as was demonstrated by the authors in [1] and [8].

## 5. MINIMUM COUNTERWEIGHT / LOADING PLATE DISTANCE

A part of this research was also dedicated to determine the minimum recommended distance for placing the counterweight, depending on the type of tested construction. For this purpose three different layer systems were analysed (Fig. 1). Fig. 21 presents the range of deflection basins induced by the truck wheel (Fig. 21a) and by the loading plate (Fig. 21b). The above described effect of unloading the wheels by the plate was taken into consideration. The basins in Fig. 21 represent the maximum deflections obtained at different load values depending on the tested system: 0.25 MPa for subgrade, 0.25 MPa for crushed stone placed on subgrade and 0.45 MPa for the most rigid structures (including CTB).

Fig. 22 presents the percentage of the wheel induced displacement in relation to the plate induced displacement



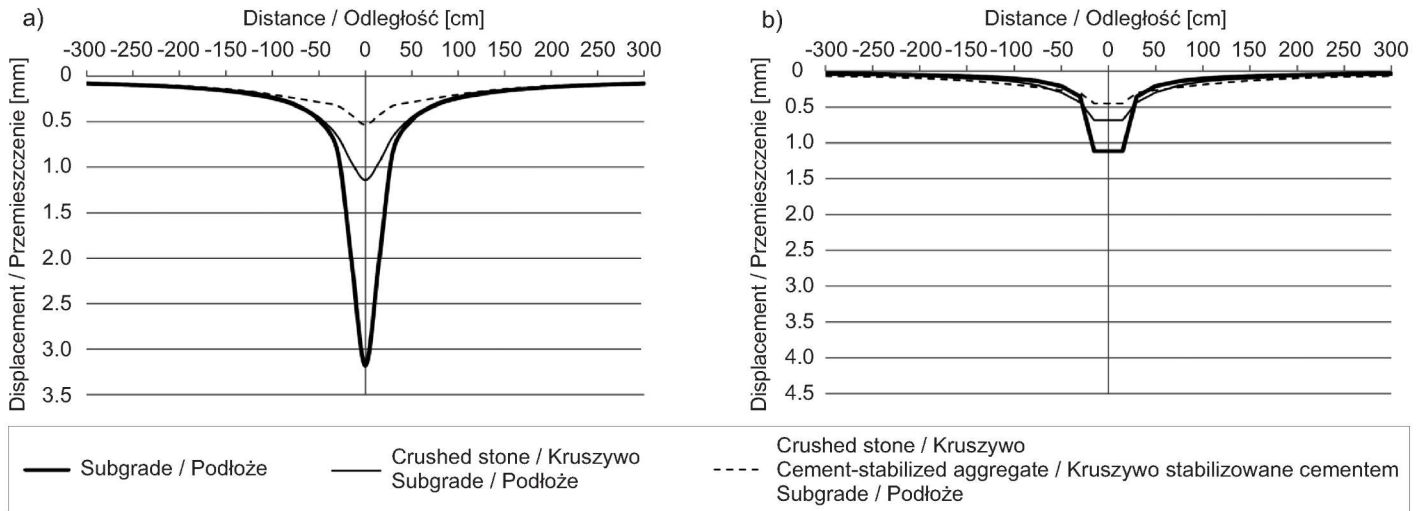


Fig. 21. Deflection basins induced by vehicle wheels (a) and under the loading plate (b)  
Rys. 21. Czasze przemieszczeń od koła pojazdu (a) oraz pod płytą naciskową (b)

przeciwwagi do przemieszczenia rejestrowanego pod płytą o wartości poniżej 10 %, co zdaniem autorów nie przekłada się na istotną różnicę w identyfikowanych modułach i szacowaną trwałość analizowanego układu warstw. W przypadku konstrukcji o dużej sztywności (na stabilizacji cementowej) nawet w odległości 2,2 m obserwuje się istotny wpływ ciężaru przeciwwagi na przemieszczenia rejestrowane pod płytą. Przy lokalizowaniu kół pojazdów podczas badania VSS w odległościach mniejszych, jak podano powyżej, sugeruje się używanie jako przeciwwagi wyłącznie koparek gąsienicowych o dużym wysięgu (jak w badaniach autorów), pod którymi występuje równomiernie rozłożone obciążenie warstwy, inaczej niż w koparkach kołowych.

measured under the plate depending on the distance between the plate and the wheel. This percentage clearly increases with increasing stiffness of the layer system (which confirms authors' previous analytical and experimental findings) to decrease with the counterweight being moved away from the loading plate. The influence of counterweight on the readings under the plate is considered significant at distances up to 1.2 m for testing subgrade alone and up to 1.5 m for testing the subgrade overlain with crushed stone. Within this range the ratio of displacement influenced by the counterweight to the reading under the plate is below 10%, and this, as the authors believe, does not considerably affect the values of the identified moduli and service life predictions. In the case of rigid structures (including CTB layer) the readings under the plate are considerably influenced by the counterweight even when they are spaced by 2.2 m. When it is not possible to ensure the above-specified distances use of a long-range crawler (as in the present research) rather than wheel-type excavator can be recommended to avoid non-uniform loading of the tested layer.

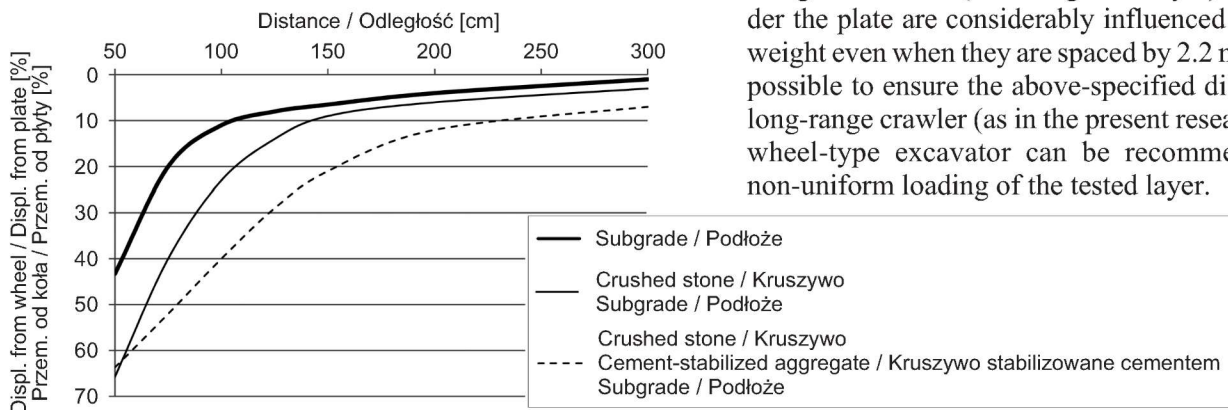


Fig. 22. Wheel induced displacement as a percentage of plate induced displacement depending on the wheel location  
Rys. 22. Udział procentowy przemieszczenia od koła pojazdu w stosunku do przemieszczenia od płyty w zależności od położenia koła pojazdu

## 6. WNIOSKI

Przeprowadzając badania terenowe autorzy wykazali, jak istotny wpływ na identyfikowane parametry warstw ma rodzaj przeciwwagi użytej w badaniu VSS (pojazd ciężarowy albo łyżka koparki). Jako przypadek „wzorcowy”, w którym obciążenie przeciwwagą nie wpływa na kształt czaszy przemieszczeń w sąsiedztwie płyty naciskowej, zastosowano obciążenie przekazywane z wykorzystaniem łyżki koparki (brak wpływu kół lub gąsienic na czaszę przemieszczeń). W badaniach terenowych stwierdzono istotne różnice w parametrach (modułach) identyfikowanych w badaniu VSS przy użyciu koparki i pojazdu ciężarowego, zależnie od sztywności badanego układu warstw. W przypadku stosowania innych urządzeń jako przeciwwagi np. walca (o stosunkowo małym rozstawie osi) można się spodziewać jeszcze większych różnic.

Analizując kształty czaszy przemieszczeń na różnych układach warstwowych, w dwóch przypadkach obciążenia, wyjaśniono mechanizm nakładania się czaszy przemieszczeń, który wpływa na zawyżanie uzyskiwanych wyników modułów warstw podczas badania VSS z wykorzystaniem pojazdu ciężarowego. Różnice między modułami wyznaczonymi w badaniach przy użyciu koparki i pojazdu ciężarowego rosną wraz ze sztywnością badanego układu warstw i wahają się od 13% na podłożu do 54% na sztywnej konstrukcji z warstwą stabilizacji cementowej. Różnica ta wpływa niekorzystnie na ocenę nośności konstrukcji nawierzchni. Sugeruje się, żeby w badaniach in situ koła pojazdu jako przeciwwagi były zlokalizowane od płyty w odległości około 1,2 m w przypadku badania podłoża, dla kruszywa na podłożu w odległości minimum 1,5 m, natomiast dla układów o dużej sztywności minimum 2,2 m. Pewniejszym sposobem na uzyskanie poprawnych wyników jest stosowanie jako przeciwwagi łyżki koparki na wysięgu zapewniającym odległość łyżki od kół lub gąsienic około 2,2 m. W przypadku układów o dużej sztywności zaleca się również zwiększenie do 2,2 m odległości statywu od płyty naciskowej. Model sprężysty opisywany jest przez podstawowy i dość „wygodny” parametr w postaci modułu sprężystości. Z uwagi jednak na ograniczoną stosowalność modelu sprężystego w niektórych układach warstwowych, w których występują w znacznym stopniu nieliniowe zjawiska plastyczne i lepkie (ujawniające się zwłaszcza w badaniach płytą VSS), autorzy przeanalizują w przyszłych pracach inne algorytmy i modele nieliniowe, co zostało już zainicjowane w [1].

## 6. CONCLUSIONS

The field tests carried out under this research have enabled the authors to demonstrate how much does the type of counterweight (truck or excavator bucket) affect the layer parameters determined in the static loading plate test. The test configuration with the counterweight provided by excavator bucket was used as a reference, since in this set-up the weight of the counterweight does not influence the displacements around the loading plate, as it would in the case of the load imposed by a vehicle wheel or track. The parameters (moduli) determined on the basis of the static plate load test were found to vary considerably between the truck and excavator based test set-up and to depend on the stiffness of the tested layer system. Even greater differences can be expected when other types of counterweight are used such as road roller (having a relatively small wheel base).

The shapes of deflection basis obtained for different layer systems at two load levels were analysed to investigate the mechanism of overlapping of the basins which has resulted in overrated readings in the static plate load tests using the heavy truck as the counterweight. The differences between moduli obtained with the excavator and truck-based test set-ups increase with a rise in the stiffness of the tested system ranging from 13% for subgrade alone up to as much as 54% for the most rigid system including CTB layer. Such differences affect the pavement service life predictions. Thus it is recommended to maintain the following distances between the vehicle wheel and the test plate: circa 1.2 m for subgrade alone, 1.5 m for subgrade overlain with aggregate and minimum 2.2 m for stiffer multi-layer systems. As a more certain way to ensure correct results the authors recommend using extended excavator bucket as the counterweight providing circa 2.2 m spacing from the excavator wheel / track. Moreover, for highly rigid systems it is recommended to maintain the 2.2 m distance between the test support frame and the loading plate. Modulus of elasticity, which is used to describe an elastic model, is a basic and quite convenient parameter. As an attempt to address limited applicability of elastic models for some multi-layered systems featuring major non-linear effects related to plastic and viscous behaviour (appearing in particular during static plate load test) the authors plan to continue the research by analysing other algorithms and non-linear models, the task which has already been initiated in [1].



**BIBLIOGRAFIA / REFERENCES**

- [1] *Mackiewicz P., Krawczyk B.*: Wpływ czasu oddziaływania obciążenia w badaniu VSS na identyfikowane parametry podłoża. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **14**, 1, 2015, 5-17
- [2] *Szpikowski M. i inni*: Badanie i ustalenie zależności korelacyjnych dla oceny stanu zagęszczenia i nośności gruntów niespoistych płytą dynamiczną. IBDiM, Warszawa, 2009
- [3] *Kumor M.K., Farmas J., Kumor Ł.A.*: Wybrane związki korelacyjne parametrów zagęszczenia określone metodami VSS i LFG. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, **4**, 4, 2013, 271-279
- [4] PN-S-02205:1998 Roboty ziemne
- [5] Instrukcja badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych. GDDP, Warszawa, 1998
- [6] Sprawozdanie Dyrekcji Okręgowej Dróg Publicznych we Wrocławiu w sprawie metodyki badań nośności i zagęszczenia przez obciążenie płytą naciskową, metod obliczania wyników badań oraz obowiązujących wymagań. Wrocław, 1998
- [7] *Szydło A.*: Statyczna identyfikacja parametrów modeli nawierzchni lotniskowych. *Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław, 1995
- [8] *Krawczyk B., Mackiewicz P.*: Wpływ cyklicznych obciążeń w badaniu lekką płytą dynamiczną na identyfikowane parametry podłoża. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **14**, 1, 2015, 19-29