



CEZARY KRASZEWSKI<sup>1)</sup>  
 LESZEK RAFALSKI<sup>2)</sup>  
 MICHAŁ ĆWIAKŁA<sup>3)</sup>  
 MARCIN DREGER<sup>4)</sup>

## EFFECT OF APPLIED STRESS INCREMENTS OF THE SECONDARY DEFORMATION MODULUS AND THE RATIO BETWEEN THE SECONDARY AND PRIMARY MODULI OF SANDY GRAVEL AND CRUSHED AGGREGATE IN STATIC PLATE LOAD TESTS

## WPLYW STOSOWANYCH ZAKRESÓW NAPRĘŻEŃ NA WARTOŚCI WTÓRNEGO MODUŁU ODKSZTAŁCENIA ORAZ WSKAŹNIKA ODKSZTAŁCENIA POSPÓŁKI I KRUSZYWA ŁAMANEGO W BADANIACH PŁYTOWYCH VSS

**STRESZCZENIE.** Badanie VSS jest w inżynierii komunikacyjnej metodą stosowaną powszechnie, głównie do pomiaru nośności podłoża i warstw konstrukcyjnych. Badanie to wykorzystuje się również do oceny zagęszczenia gruntów i kruszyw na podstawie oceny stosunku wtórnego modułu odkształcenia do pierwotnego modułu odkształcenia, oznaczonego jako wskaźnik odkształcenia. Wyniki badań własnych przedstawione w niniejszym artykule poprzedzono analizą stosowanych metod badań podłoża płytą VSS w różnych krajach oraz interpretacją wyników tych badań. W celu ustalenia, jak zakres naprężeń wpływa na wartość wtórnego modułu odkształcenia oraz wskaźnika odkształcenia przeprowadzono analizę wyników badań płytą VSS nośności warstw ochronnych wykonanych z pospółki i kruszywa łamanego. Stwierdzono, że w przypadku obu materiałów istnieją silne zależności liniowe pomiędzy wtórnymi modułami odkształcenia zbadanymi przy zakresach przyrostu naprężenia 0,1 MPa oraz 0,15 MPa. Ustalono, że stosowany różny zakres przyrostu naprężeń w badaniu VSS nie ma istotnego wpływu na wskaźnik odkształcenia pospółki i kruszywa łamanego. Natomiast różny zakres tych naprężeń wpływa na wartość wtórnego modułu odkształcenia.

**SŁOWA KLUCZOWE:** płyta VSS, różnica naprężeń, wskaźnik odkształcenia, wtórny moduł odkształcenia.

**ABSTRACT.** The static plate load test is widely used in transport engineering, primarily for determining the bearing capacity of the subgrade and the structural layers. It is also used for assessing the compaction of soil and aggregates on the basis of the ratio between the secondary and primary moduli. The results of the authors' own tests, presented in this article, are preceded by an analysis of the static plate load test methods used in different countries and interpretation of the results obtained from them. The data obtained in the static plate load tests of sandy gravel and crushed aggregate blanket layers were analysed in order to determine the effect of the applied stress increment of the secondary deformation modulus and the ratio of moduli. Strong linear relationships were established between the secondary moduli obtained for the stress increment ranges of 0.10 MPa and 0.15 MPa for both materials. It was established that application of different stress increment ranges in the static plate test of sandy gravel and crushed aggregate had no significant effect on the ratio between secondary and primary deformation moduli. Conversely, different stress increment values had a marked effect on the secondary modulus of deformation.

**KEYWORDS:** ratio of deformation moduli, secondary deformation modulus, static plate load test, stress increment.

<sup>1)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa, ckraszewski@ibdim.edu.pl (✉)

<sup>2)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; lrafalski@ibdim.edu.pl

<sup>3)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; mcwiakala@ibdim.edu.pl

<sup>4)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa, mdreger@ibdim.edu.pl

## 1. WPROWADZENIE

W budownictwie komunikacyjnym, zarówno drogowym i kolejowym, zagęszczenie warstw konstrukcyjnych oraz podłoża określone jest najczęściej wskaźnikiem zagęszczenia  $I_s$ , obliczonym wg zależności:

$$I_s = \rho_d / \rho_{ds}, \quad (1)$$

w której:

$\rho_d$  – gęstość objętościowa szkieletu gruntowego oznaczona w terenie, w badaniu bezpośrednim wg [1], [g/cm<sup>3</sup>],

$\rho_{ds}$  – maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego oznaczona w badaniu aparatem Proctora wg [2], [g/cm<sup>3</sup>].

Stan zagęszczenia może być również szacowany pośrednio na podstawie innych badań. Jednym ze sposobów jest porównanie wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  i pierwotnego modułu odkształcenia  $E_1$  zbadanych metodą VSS oraz obliczenie wskaźnika odkształcenia  $I_o$  jako miary zagęszczenia. Badanie VSS jest szczególnie przydatne do oceny zagęszczenia gruntów lub kruszyw gruboziarnistych i grubookruchowych, ponieważ badanie zagęszczenia tych materiałów metodą Proctora jest bardzo utrudnione i pracochłonne [3].

Celem artykułu jest ustalenie na podstawie badań własnych, jak zakres naprężeń wpływa na wartość modułu odkształcenia wtórnego  $E_2$  oraz wskaźnika odkształcenia  $I_o$  pospółki oraz kruszywa łamanego, z których były wykonane warstwy ochronne torowisk kolejowych. Badania własne poprzedzono analizą metod badań płytą VSS stosowanych w różnych krajach.

## 2. ZASADA BADANIA PŁYTĄ VSS

Omawiana metoda badania nośności warstw drogowych została opracowana w latach 50. XX wieku przez Szwajcarskie Stowarzyszenie Drogowe (*Verein Schweizer Strassenfachmänner*), skąd wzięła się nazwa tego badania – VSS. Pomiar modułu odkształcenia polega na stopniowym obciążeniu badanej warstwy naprężeniem  $\sigma$ , które wywołuje przemieszczenie  $s$  (pod okrągłą, sztywną płytą). Klasyczny moduł odkształcenia wg metody szwajcarskiej VSS określany jest na podstawie zakresu różnicy naprężeń  $\Delta\sigma$  i odpowiadającego temu zakresowi przyrostu osiadań  $\Delta s$  z zależności:

$$M_{e1,2} = (\Delta\sigma / \Delta s) \cdot D, \quad (2)$$

w której:

$\Delta\sigma$  – różnica naprężeń [MPa],

$\Delta s$  – przyrost osiadań odpowiadający przyjętej różnicy naprężeń [mm],

## 1. INTRODUCTION

In construction of transport infrastructure, including roads and railways, the level of compaction of the structural layers and of the subgrade is most often expressed by the relative compaction  $I_s$ , calculated from the following equation:

$$I_s = \rho_d / \rho_{ds}, \quad (1)$$

where:

$\rho_d$  – in-situ dry bulk density determined with a direct method according to [1], [g/cm<sup>3</sup>],

$\rho_{ds}$  – maximum dry density determined in the Proctor test according to [2], [g/cm<sup>3</sup>].

The compaction can also be estimated indirectly with other available methods. In one of these methods the secondary modulus  $E_2$  is compared to the primary modulus  $E_1$  obtained from the static load plate test and the ratio between them  $I_o$  is calculated as a measure of compaction. The static plate load test is particularly suited for assessing the compaction of soils or coarse aggregates, because testing of these materials with the Proctor method would be very difficult and laborious [3].

The purpose of this research was to establish, on the basis of own experiments, how the stress increment influences the values of the secondary modulus  $E_2$  and  $I_o$  ratio of sandy gravel and crushed aggregate used for construction of blanket layers in railway track foundation. The methods of static plate load tests applied in different countries were analysed before the own experiments.

## 2. STATIC PLATE LOAD TEST

The method of testing the bearing capacity of road pavement courses described in this article was developed in the 1950s by VSS – Association of Swiss Road Traffic Experts (*Verein Schweizer Strassenfachmänner*) and hence it is often called “VSS test”. In this test the deformation modulus is measured by gradual loading of the tested layer with a circular rigid plate, which generates stress  $\sigma$  resulting in deflection  $s$ . In the Swiss method (VSS) deformation moduli are conventionally calculated on the basis of the stress increment  $\Delta\sigma$  and the corresponding displacement  $\Delta s$ , using the following equation:

$$M_{e1,2} = (\Delta\sigma / \Delta s) \cdot D, \quad (2)$$

where:

$\Delta\sigma$  – stress increment [MPa],

$\Delta s$  – displacement corresponding to the adopted stress increment [mm],

$D$  – średnica płyty [mm],

$M_{e1,2}$  – moduł odkształcenia [MPa].,

Aby uwzględnić rozkład naprężeń występujących na podłożu sprężystym pod płytą o kształcie koła, zgodnie z teorią Boussinesq wprowadzono odpowiednie współczynniki: kształtu  $\omega$  oraz Poissona  $\nu$  [4]. Obecnie moduł odkształcenia jest oznaczany jako  $E$  lub  $E\nu$ .

W czasie pierwszego cyklu obciążenia osiadanie całkowite jest sumą osiadania trwałego i sprężystego. Osiadanie powstałe w czasie drugiego cyklu obciążenia jest zbliżone do osiadania sprężystego – zawiera wprawdzie również osiadanie trwałe, lecz o wiele mniejsze niż w czasie pierwszego cyklu (Rys. 1). Przez zastosowanie obciążenia podczas pierwszego cyklu badana warstwa zostaje dogęszczona, w rezultacie czego osiadanie w drugim cyklu jest mniejsze.

Stosowane zakresy naprężeń  $\Delta\sigma$  mogą być różne, w zależności od metodyki stosowanej w danym kraju i rodzaju badanej warstwy. Z przeprowadzonego rozpoznania stanu wiedzy wynika, że różne zakresy naprężeń stosowane do oznaczania modułów odkształcenia mogą mieć wpływ na rezultaty badań i ich interpretację.

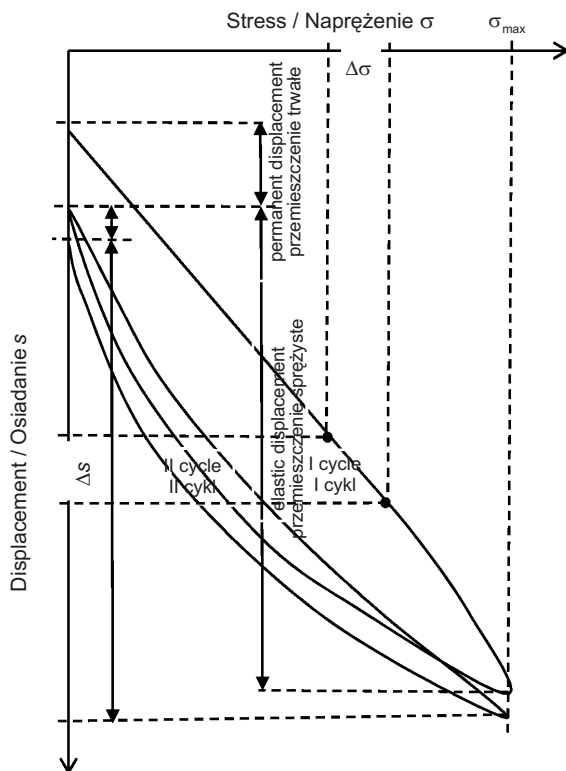


Fig. 1. Load-displacement graph in static plate load test  
Rys. 1. Przebieg obciążeń w badaniu VSS

$D$  – plate diameter [mm],

$M_{e1,2}$  – deformation modulus [MPa].

The equation to calculate  $M_e$  was modified [4] by introduction of the shape coefficient to account for the distribution of stress under a circular plate (shape coefficient  $\omega$ ) and Poisson coefficient  $\nu$  applicable to circular plates and elastic base according to Boussinesq theory. Currently, the deformation modulus is designated  $E$  or  $E\nu$ .

In the first load cycle the measured total displacement is a sum of permanent and elastic displacements. This is different in the second load cycle where the displacement, while being close to elastic, includes much smaller permanent displacement component than in the first cycle (Fig. 1). The load applied in the first cycle increases compaction of the tested layer, resulting in a smaller displacement in the second cycle.

The applied stress increments  $\Delta\sigma$  may vary depending on the test method used in a given country and the type of the tested layer. From the state-of-the-art review it transpires that different stress increments used for deformation modulus determination can affect the values of the test results and their interpretation.

### 3. ANALYSIS OF THE STATIC PLATE LOAD TEST METHODS USED FOR TESTING OF SOILS AND AGGREGATES

In Poland a 30 cm circular steel plate is used in the static plate load test performed on road structures in accordance with [5]. In the method described in the above-mentioned standard the deformation modulus of soil subgrade is determined after load has been gradually applied on the subgrade to allow stabilisation in two (initial and reload) cycles, both up to the final stress value of  $\sigma_{max} = 0.25$  MPa (Fig. 2).

Deformation moduli are calculated using the following equation:

$$E_{1,2} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\Delta\sigma}{\Delta s} \cdot D, \quad (3)$$

where:

$\Delta\sigma$  – stress increment [MPa],

$\Delta s$  – displacement corresponding to the adopted stress increment [mm],

$D$  – plate diameter [mm],

$E_1$  – primary deformation modulus after the first load cycle [MPa],

### 3. ANALIZA METOD BADANIA GRUNTÓW I KRUSZYW PŁYTA VSS

W Polsce badania VSS konstrukcji drogowych wykonuje się stalową płytą o średnicy 30 cm zgodnie z [5]. Metoda badania wg tej normy odnosi się do oznaczania modułu odkształcenia podłoża gruntowego i polega na obciążaniu podłoża stopniowo, po stabilizacji osiadania, aż do wartości końcowej naprężeń  $\sigma_{\max} = 0,25$  MPa, w dwóch cyklach obciążeń, tj. cyklu pierwotnym i wtórnym (Rys. 2).

Moduł odkształcenia oblicza się wg wzoru:

$$E_{1,2} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\Delta\sigma}{\Delta s} \cdot D, \quad (3)$$

w którym:

$\Delta\sigma$  – różnica naprężeń [MPa],

$\Delta s$  – przyrost osiadań odpowiadających przyjętej różnicy naprężeń [mm],

$D$  – średnica płyty [mm],

$E_1$  – pierwotny moduł odkształcenia (I cykl obciążenia) [MPa],

$E_2$  – wtórny moduł odkształcenia (II cykl obciążenia) [MPa].

Wskaźnik odkształcenia oblicza się z zależności:

$$I_o = \frac{E_2}{E_1}, \quad (4)$$

w której oznaczenia są identyczne jak we wzorze (3).

Metoda VSS jest przydatna również do oceny warstw lub zespołu warstw konstrukcji drogowych, takich jak podbudowy czy warstwy mrozoochronne. Dlatego stosowane są pewne modyfikacje metody normowej, które polegają na zwiększeniu końcowego naprężenia  $\sigma_{\max}$ .

Wartość naprężenia końcowego  $\sigma_{\max}$  uzależniona jest od naprężeń eksploatacyjnych przekazywanych na badaną warstwę. W przypadku badań podłoża drogowego obciążenie końcowe  $\sigma_{\max}$  doprowadza się do 0,25 MPa, a moduł oblicza się w zakresie naprężeń  $\Delta\sigma = 0,15 - 0,05$  MPa zgodnie z [5]. Brak natomiast w Polsce dokumentów normatywnych precyzujących zakresy naprężeń do oceny pozostałych warstw konstrukcji drogowych. Poniżej podano przykładowe wartości końcowego obciążenia  $\sigma_{\max}$  stosowane w IBDiM do badań warstw drogowych:

- $\sigma_{\max} = 0,25$  MPa – przy badaniu warstwy podłoża gruntowego lub nasypu,  $\Delta\sigma = 0,15 - 0,05$  MPa,
- $\sigma_{\max} = 0,35$  MPa – przy badaniu warstwy ulepszanego podłoża,  $\Delta\sigma = 0,25 - 0,15$  MPa,

$E_2$  – secondary deformation modulus after the second load cycle [MPa].

The ratio between the two moduli is calculated using the following equation:

$$I_o = \frac{E_2}{E_1}, \quad (4)$$

and here the designations are the same as in eq. (3).

The static plate load test is also suitable for assessing the respective layers or groups of layers of road structures, such as road bases and frost protection layers. For this reason, some modifications are introduced to the standard method, namely the value of the final stress  $\sigma_{\max}$  is increased.

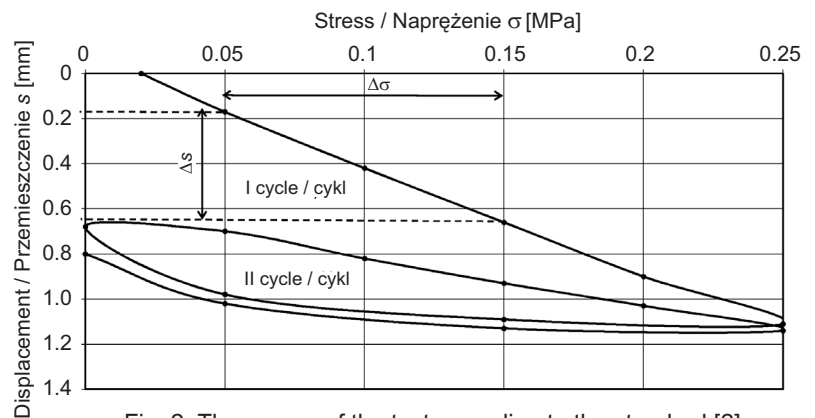


Fig. 2. The course of the test according to the standard [2]  
Rys. 2. Przebieg badania wg normy [2]

The final stress value  $\sigma_{\max}$  depends on the service loads transferred on the layer in question. In the case of road subgrades, the stress is increased up to the final stress  $\sigma_{\max}$  of 0.25 MPa and deformation moduli are calculated for the stress range of  $\Delta\sigma = 0.15 - 0.05$  MPa in accordance with [5]. However, in Poland there are no general standards or guidelines specifying the stress increment values applicable to the remaining pavement courses. Below are some examples of values of the final stress  $\sigma_{\max}$  applied by IBDiM (Polish Road and Bridge Research Institute):

- $\sigma_{\max} = 0.25$  MPa – for testing of soil subgrade or embankment layers,  $\Delta\sigma = 0.15 - 0.05$  MPa,
- $\sigma_{\max} = 0.35$  MPa – for testing of treated subgrades,  $\Delta\sigma = 0.25 - 0.15$  MPa,
- $\sigma_{\max} = 0.35$  MPa – for testing of the respective pavement courses,  $\Delta\sigma = 0.35 - 0.25$  MPa,
- $\sigma_{\max} = 0.35$  MPa – for testing of the entire pavement structure,  $\Delta\sigma = 0.45 - 0.35$  MPa.

It is worth noting that in this procedure the stress increment  $\Delta\sigma$  used to calculate deformation moduli is the same in each case, namely 0.1 MPa.

- $\sigma_{\max} = 0,45$  MPa – przy badaniu warstw konstrukcyjnych nawierzchni,  $\Delta\sigma = 0,35 - 0,25$  MPa,
- $\sigma_{\max} = 0,55$  MPa – przy badaniu całej konstrukcji nawierzchni,  $\Delta\sigma = 0,45 - 0,35$  MPa.

Należy zauważyć, że różnica naprężeń  $\Delta\sigma$ , przy której obliczane są moduły odkształceń w każdym przypadku według tej procedury, wynosi 0,1 MPa.

W budownictwie kolejowym na podstawie wytycznych [6] stosuje się wartości końcowego obciążenia  $\sigma_{\max}$  badanej warstwy podobne jak w drogownictwie, lecz zakresy naprężeń, w których oblicza się moduły, są następujące:

- $\sigma_{\max} = 0,25$  MPa – przy badaniu warstwy podłoża gruntowego lub nasypu,  $\Delta\sigma = 0,15 - 0,05$  MPa,
- $\sigma_{\max} = 0,35$  MPa – przy badaniu warstwy ulepszanego podłoża,  $\Delta\sigma = 0,25 - 0,10$  MPa,
- $\sigma_{\max} = 0,45$  MPa – przy badaniu sztywnych wzmocnień,  $\Delta\sigma = 0,30 - 0,15$  MPa.

Różnica naprężeń, w których obliczane są moduły w budownictwie kolejowym, wynosi 0,10 MPa lub 0,15 MPa w zależności od badanej warstwy.

Liczne badania potwierdzają, że wartość ilorazu modułów  $E_2/E_1$  jest tym większa, im słabsze jest zagęszczenie gruntu, co wynika z dużych osiadań trwałych słabiej zagęszczonych materiałów podczas badania VSS. Według [7], [8] oraz [9] zagęszczenie gruntu można ocenić na podstawie wartości stosunku modułów  $E_2/E_1$ . Autorzy tych publikacji uzależniają ocenę zagęszczenia od uziarnienia badanego materiału, a jest ono uznawane za wystarczające w drogownictwie, gdy:

- $E_2/E_1 < 2,5$  w przypadku gruntów gruboziarnistych,
- $E_2/E_1 < 2,0$  w przypadku gruntów drobnoziarnistych,
- $E_2/E_1 < 3,0$  w przypadku gruntów różnoziarnistych,
- $E_2/E_1 < 4,0$  w przypadku gruntów skalistych.

Podobne wartości  $E_2/E_1$  podaje norma [5], uwzględniająca następujące rodzaje gruntów:

a) dla żwirów, pospółek i piasków:

- $E_2/E_1 < 2,2$  przy wymaganej wartości  $I_s > 1$ ,
- $E_2/E_1 < 2,5$  przy wymaganej wartości  $I_s < 1$ ,

b) dla gruntów drobnoziarnistych o równomiernym uziarnieniu (pyłów, glin, glin pylastych, glin zwięzłych, iłów):  $E_2/E_1 < 3$ ,

c) dla gruntów różnoziarnistych (żwirów gliniastych, pospółek gliniastych, pyłów piaszczystych, piasków gliniastych, glin piaszczystych, glin piaszczystych zwięzłych):  $E_2/E_1 < 3$ ,

d) dla narzutów kamiennych, rumoszy:  $E_2/E_1 < 4$ ,

In railway construction the final stress values  $\sigma_{\max}$ , based on the guidelines [6], are the same as in road construction, but the stress ranges used for calculating the deformation moduli are different, as given below:

- $\sigma_{\max} = 0.25$  MPa – for testing of flexible subgrades or embankment layers,  $\Delta\sigma = 0.15 - 0.05$  MPa,
- $\sigma_{\max} = 0.35$  MPa – for testing of treated subgrades,  $\Delta\sigma = 0.25 - 0.10$  MPa,
- $\sigma_{\max} = 0.45$  MPa – for testing of rigid treatments,  $\Delta\sigma = 0.30 - 0.15$  MPa.

The stress increments used for calculating the deformation moduli in railway construction applications are 0.10 MPa or 0.15 MPa, depending on the layer being tested.

Numerous studies confirmed that the  $E_2/E_1$  ratio increases with decreasing compaction of soil, which is due to large permanent displacements of less compacted materials during the static plate load test. According to [7], [8] and [9], compaction of soil can be estimated by comparing the values of moduli  $E_2$  and  $E_1$ . The authors of these publications relate the compaction estimation to the grading of tested materials and the following values are treated as sufficient in road construction:

- $E_2/E_1 < 2.5$  for coarse-grained soils,
- $E_2/E_1 < 2.0$  for fine-grained soils,
- $E_2/E_1 < 3.0$  for non-uniform soils,
- $E_2/E_1 < 4.0$  for rocky soils.

Similar values of the  $E_2/E_1$  ratio are given in the standard [5] depending on the type of soil:

a) for gravel, sandy gravel and sand:

- $E_2/E_1 < 2.2$  at the required value of  $I_s > 1$ ,
- $E_2/E_1 < 2.5$  at the required value of  $I_s < 1$ ,

b) for fine-grained soils of uniform grading (silt, clay containing other fractions, silty clay, firm clay, clay):  $E_2/E_1 < 3$ ,

c) for non-uniform soils (gravel mixed with clay, mix of gravel, sand and clay, sandy silt, loamy sand, sandy loam, firm sandy loam):  $E_2/E_1 < 3$ ,

d) for rip-rap, screes:  $E_2/E_1 < 4$ ,

e) for man-made soils – based on field tests.

According to the manual [6], the value of relative compaction of  $I_s \geq 1$  corresponds to the value of  $E_2/E_1 < 1.75$ .

The procedure of the static plate load test used in France is described in [10]. In this procedure load is applied in two cycles by a 60 cm circular loading plate. In the first cycle load is

e) dla gruntów antropogenicznych – na podstawie badań poligonowych.

Według instrukcji [6] zagęszczeniu o wskaźniku  $I_s \geq 1$  odpowiada  $E_2/E_1 < 1,75$ .

Francuska metodyka badania VSS jest opisana w [10]. Badanie przeprowadza się płytą o średnicy 60 cm w 2 cyklach. W pierwszym cyklu, bez stopniowania, obciąża się warstwę do wartości naprężenia 0,25 MPa, natomiast w drugim cyklu do 0,2 MPa. Do obliczeń modułu odkształcenia stosuje się przemieszczenie  $\Delta s$  (Rys. 3) odpowiadające całym zakresom stosowanych naprężeń, tj. 0,25 MPa i 0,20 MPa, co istotnie odróżnia tę metodykę od polskiej. Również prędkość obciążania bez stopniowania ma wpływ na rezultaty badań, co czyni metodę francuską nieporównywalną z innymi, w których obciążenie przykłada się stopniowo i czeka do stabilizacji osiadań. Istotny wpływ czasu obciążania w badaniu VSS na wyniki badań był przeanalizowany w pracy [11].

Moduł odkształcenia oblicza się ze wzoru:

$$Ev_{1,2} = \frac{\pi}{2} \cdot (1 - \nu^2) \cdot \frac{\Delta\sigma}{\Delta s} \cdot D, \quad (5)$$

w którym:

$\Delta\sigma$  – różnica naprężeń [MPa],

$\Delta s$  – przyrost osiadań odpowiadający różnicy naprężeń [mm],

$D$  – średnica płyty [mm],

$\nu$  – współczynnik Poissona [-],

$Ev_1$  – pierwotny moduł odkształcenia (I cyklu obciążenia) [MPa],

$Ev_2$  – wtórny moduł odkształcenia (II cyklu obciążenia) [MPa].

Nie znaleziono oficjalnych dokumentów zawierających wymagania odnośnie wskaźnika  $Ev_2/Ev_1$  we Francji. Natomiast specyfikacje techniczne i poradniki dotyczące robót drogowych [12] i [13] podają następujące zalecenia:

- $Ev_2/Ev_1 < 2,0$  – materiały zawierające frakcje drobne,
- $Ev_2/Ev_1 < 2,5$  – materiały gruboziarniste bez frakcji drobnych.

W niektórych dokumentach, np. w [14], przyjmowane bywa wymaganie  $Ev_2/Ev_1 < 1,2$ . Zauważyć można, że wymagania francuskie odnośnie do  $Ev_2/Ev_1$  zawierają się w zakresie od 1,2 do 2,5. W górnym zakresie są zbliżone do wymagań polskich, lecz w dolnym zakresie są bardzo rygorystyczne ( $Ev_2 \approx Ev_1$ ). Wynika to z innej metodyki obciążania badanej warstwy, gdyż drugie obciążenie (0,2 MPa) jest mniejszej wartości niż obciążenie pierwotne (0,25 MPa) i nie można bezpośrednio porównywać tych wymagań z obowiązującymi w Polsce.

applied in one step up to the stress value of 0.25 MPa, followed by the second load cycle in which the stress level reaches 0.2 MPa. The deformation modulus is calculated on the basis of displacement  $\Delta s$  (Fig. 3) corresponding to the entire stress increments applied in the test, i.e. 0.25 MPa and 0.20 MPa, which is a major contrast to the Polish method. Another factor affecting the results is the fact that loading is performed in one step, which makes the French method incomparable to the methods in which load is applied gradually to allow for stabilisation of displacements. The significance of the loading time on the plate load test results was investigated in [11].

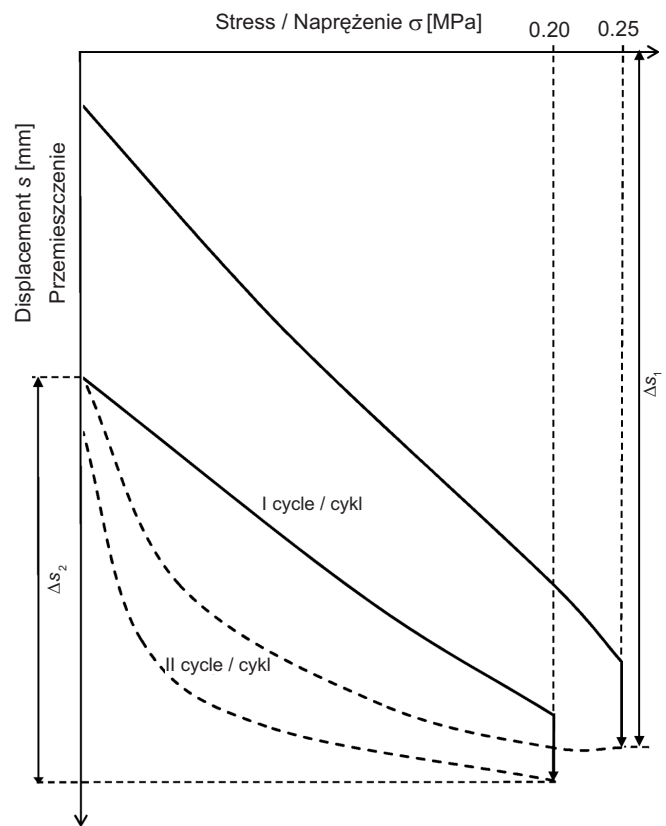


Fig. 3. The course of the test according to the French method [8]  
Rys. 3. Przebieg badania wg metodyki francuskiej [8]

Deformation moduli are calculated using the following eq.:

$$Ev_{1,2} = \frac{\pi}{2} \cdot (1 - \nu^2) \cdot \frac{\Delta\sigma}{\Delta s} \cdot D, \quad (5)$$

where:

$\Delta\sigma$  – stress increment [MPa],

$\Delta s$  – displacement corresponding to the stress increment [mm],

$D$  – plate diameter [mm],

W Belgii badanie VSS wykonuje się płytą o średnicy 30 cm lub 60 cm. Według [15] obciążenie  $\sigma_{\max}$  uzależnione jest od badanej warstwy i wynosi:

- $\sigma_{\max} = 0,25$  MPa – w przypadku podłoża gruntowego,  $\Delta\sigma = 0,15 - 0,05$  MPa,
- $\sigma_{\max} = 0,45$  MPa – w przypadku dolnych warstw drogowych,  $\Delta\sigma = 0,25 - 0,15$  MPa,
- $\sigma_{\max} = 0,55$  MPa – w przypadku górnych warstw drogowych,  $\Delta\sigma = 0,35 - 0,25$  MPa.

Moduły odkształcenia  $M_e$  oblicza się z zależności:

$$M_e = D \cdot \frac{\Delta\sigma}{\Delta s}, \quad (6)$$

w której oznaczenia są identyczne jak we wzorze (5).

Instrukcja Instytutu Belgijskiego [15] zaleca wykonanie badania w 2 cyklach i obliczenie wskaźnika  $m = M_{e2}/M_{e1}$ , nie podając jego wymaganej wartości. Instrukcja podaje jedynie informację, że interpretacja badania powinna być oparta o doświadczenia praktyczne.

W Niemczech badanie VSS przeprowadza się według normy [16] płytą o średnicy 30 cm lub 60 cm. Końcowe naprężenie  $\sigma_{\max}$  doprowadza się do wartości 0,5 MPa, a moduł oblicza się z zależności:

$$Ev = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\Delta\sigma}{\Delta s}, \quad (7)$$

w której:

$r$  – promień płyty [mm],

$\Delta\sigma = 0,7 \cdot \sigma_{\max} - 0,3 \cdot \sigma_{\max}$  [MPa],

$\Delta s = s_2 - s_1$  [mm], (odczytane pomiędzy wartościami  $s_2$  i  $s_1$  na Rys. 4).

Norma DIN wymaga obligatoryjnie obliczenia stosunku  $Ev_2/Ev_1$ , nie podaje jednak wymagań odnośnie tej wartości. Przykładowe stosowane w praktyce wymagania odnośnie  $Ev_2/Ev_1$  znaleziono w specyfikacjach technicznych [17] i [18] oraz publikacjach, np. [19]. Instrukcja [20] zawiera wymagania odnośnie stosunku  $Ev_2/Ev_1$  w zależności od wskaźnika zagęszczenia dla różnych grup gruntów, różnych warstw konstrukcji drogowej oraz różnych klas dróg. Według tych danych najbardziej wymagający warunek to  $Ev_2/Ev_1 < 2,2$  dla dróg ekspresowych i kategorii I-IV, natomiast dla pozostałych dróg kategorii V i VI:  $Ev_2/Ev_1 < 2,5$ . Rozpoznanie literaturowe niemieckich przepisów i dokumentów technicznych wykazało, że wymagania  $Ev_2/Ev_1$  oscylują pomiędzy wartościami 2,2 a 2,5. W zdecydowanej większości przyjmuje się w Niemczech stosunek  $Ev_2/Ev_1 = 2,2-2,3$  dla zagęszczenia odpowiadającego 100% zagęszczenia w aparacie Proctora.

$\nu$  – Poisson's ratio [-],

$Ev_1$  – primary modulus (the first load cycle) [MPa],

$Ev_2$  – secondary modulus (the second load cycle) [MPa].

Apparently, there are no official French codes where one could find the required values of the  $Ev_2/Ev_1$  ratio. However, the following recommendations can be found in the technical specifications and guidelines for road works [12] and [13]:

- $Ev_2/Ev_1 < 2.0$  – materials containing fine fractions,
- $Ev_2/Ev_1 < 2.5$  – coarse materials without fine fractions.

Some documents [14] give the requirement of  $Ev_2/Ev_1 < 1.2$ . Note that the French requirements regarding the value of  $Ev_2/Ev_1$  give the range of 1.2 to 2.5. While the upper limits are close to the Polish requirements, the lower limits impose a more stringent requirement ( $Ev_2 \approx Ev_1$ ). This is due to a different procedure of load application, in which the load applied in the second cycle (0.2 MPa) is smaller than the load applied in the first cycle (0.25 MPa), which precludes a direct comparison between the French and the Polish requirements.

In Belgium 30 cm or 60 cm circular plates are used in the static plate load test. According to [15], the applied value of stress  $\sigma_{\max}$  depends on the tested layer, as given below:

- $\sigma_{\max} = 0.25$  MPa – for subgrade,  $\Delta\sigma = 0.15 - 0.05$  MPa,
- $\sigma_{\max} = 0.45$  MPa – for lower courses of the pavement,  $\Delta\sigma = 0.25 - 0.15$  MPa,
- $\sigma_{\max} = 0.55$  MPa – for upper courses of the pavement,  $\Delta\sigma = 0.35 - 0.25$  MPa.

Deformation moduli  $M_e$  are calculated using the following eq.:

$$M_e = D \cdot \frac{\Delta\sigma}{\Delta s}, \quad (6)$$

where designations are the same as in eq. (5).

The guidelines of the Belgian Road Research Centre (Centre de recherche routières) [15] recommend the test procedure comprising two load cycles and calculation of the ratio  $m = M_{e2}/M_{e1}$ . However, the recommended values are not given there. The Belgian guidelines are limited to stating that the interpretation of results should be based on practical experience.

In Germany 30 cm or 60 cm circular plates are used in the static plate load test carried out according to the standard [16]. The value of the final stress  $\sigma_{\max}$  reaches 0.5 MPa and the deformation modulus is calculated using the following eq.:

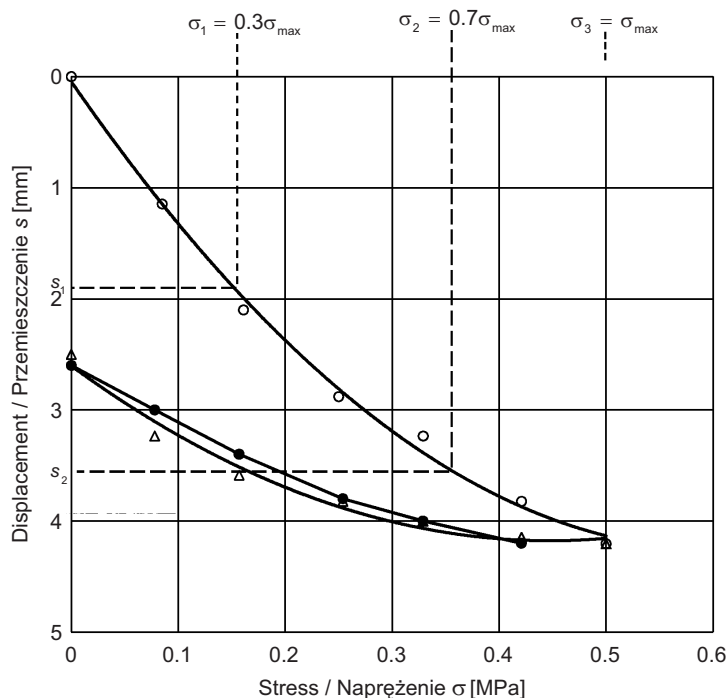


Fig. 4. Example of plate load test according to the German method [17]

Rys. 4. Przykład badania VSS wg metodyki niemieckiej [17]

W Norwegii, Szwecji i Islandii metodyka badania VSS bazuje na metodzie niemieckiej. Stosuje się następujące naprężenia końcowe:  $\sigma_{\max} = 0,5$  MPa (Szwecja, Islandia) i  $\sigma_{\max} = 0,6$  MPa (Norwegia), a moduły odkształceń  $Ev$  obliczane są w zakresie  $\Delta\sigma = 0,7 \cdot \sigma_{\max} - \Delta\sigma = 0,3 \cdot \sigma_{\max}$  ze wzoru (6). Wymagania obowiązujące w tych krajach przedstawione w [21] zawierają warunki oceny zagęszczenia materiałów niezwiązanych (gruntów i kruszyw) na podstawie stosunku modułów  $Ev_2/Ev_1$ . Wymagania te można podsumować następująco:

- w przypadku podbudowy:  $Ev_2/Ev_1 \leq 2,5-3,5$  w zależności od klasy drogi,
- w przypadku podłoża gruntowego i nasypu:  $Ev_2/Ev_1 \leq 3,5$ .

Z przeprowadzonego przeglądu metod badań płytowych można wywnioskować, że pomimo wywodzenia się ich z zależności  $M_e = D \cdot \Delta\sigma / \Delta s$ , w różnych krajach występują pewne różnice w metodyce badawczej. Oprócz rozmiaru płyty, różnice dotyczą maksymalnego naprężenia  $\sigma_{\max}$  oraz zakresu naprężenia  $\Delta\sigma$ , przy którym obliczane są moduły odkształcenia. W większości krajów moduły – pierwotny i wtórny – obliczane są przy jednakowych zakresach naprężeń  $\Delta\sigma$ . Wyjątkiem jest metodyka francuska, według której moduły odkształcenia są obliczane w różnych zakresach naprężeń, a zatem badań tych nie można porównywać z pozostałymi metodami. Ponadto stosowane są różne współczynniki we wzorze na moduł odkształcenia.

$$Ev = 1.5 \cdot r \cdot \frac{\Delta\sigma}{\Delta s}, \quad (7)$$

where:

$r$  – plate diameter [mm],

$\Delta\sigma = 0.7 \cdot \sigma_{\max} - 0.3 \cdot \sigma_{\max}$  [MPa],

$\Delta s = s_2 - s_1$  [mm], (see the graph in Fig. 4 between  $s_2$  and  $s_1$ ).

The DIN standard requires mandatory calculation of the  $Ev_2/Ev_1$  ratio, but it does not specify the requirements regarding its value. Examples of  $Ev_2/Ev_1$  values applied in practice can be found in the technical specifications [17], [18] and in different publications, such as [19]. The guidelines [20] specify the requirements regarding the value of  $Ev_2/Ev_1$ , depending on the relative compaction, for different classes of soil, pavement courses and road design classes. According to these data, the most stringent requirement of  $Ev_2/Ev_1 < 2.2$  is applied to expressways and roads of traffic class I-IV. For the remaining traffic classes this requirement is  $Ev_2/Ev_1 < 2.5$ . The literature review of the German codes and technical documents showed that the requirements regarding the value of  $Ev_2/Ev_1$  ratio are in the range of 2.2–2.5. That said, the range of  $Ev_2/Ev_1 = 2.2-2.3$  is adopted in most cases for compaction corresponding to 100% Proctor density.

The method of static plate load test used in Norway, Sweden and Iceland is based on the German method. The following final stress values are applied:  $\sigma_{\max} = 0.5$  MPa (Sweden, Iceland) and  $\sigma_{\max} = 0.6$  MPa (Norway), whereas the deformation moduli  $Ev$  are calculated in the range of  $\Delta\sigma = 0.7 \cdot \sigma_{\max} - \Delta\sigma = 0.3 \cdot \sigma_{\max}$  using eq. (6). The requirements applied in these countries, described in [21], specify the compaction assessment criteria for non-cohesive materials (soils and aggregates) on the basis of the  $Ev_2/Ev_1$  ratio. The criteria can be summarised as follows:

- for base layers:  $Ev_2/Ev_1 \leq 2.5-3.5$  depending on the road class,
- for subgrade and embankments:  $Ev_2/Ev_1 \leq 3.5$ .

The review of the static plate load test methods used in different countries revealed that despite the same equation used, i.e.  $M_e = D \cdot \Delta\sigma / \Delta s$ , there are some differences regarding the test details. These differences, besides the plate diameter, concern the maximum stress  $\sigma_{\max}$  and the stress increment  $\Delta\sigma$  for which the deformation moduli are calculated. In most countries the two moduli – primary and secondary – are calculated for the same stress increments  $\Delta\sigma$ . The exception is the French method, in which the deformation moduli are calculated for different stress increments, and for this reason, it may not be compared to



## 4. METODYKA BADAŃ WŁASNYCH

Przedmiotem badań były warstwy ochronne o grubości 30 cm wykonane z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm i pospółki o uziarnieniu 0/22,4 mm, których wykresy uziarnienia pokazano na Rys. 5. Obliczone wskaźniki jednorodności uziarnienia (jako  $C_u = d_{60}/d_{10}$ ), objaśniające kształt krzywej uziarnienia i zdolność do zagęszczenia kruszyw, wynosiły odpowiednio:  $C_{u(\text{pospółka})} = 4,8$  oraz  $C_{u(\text{kruszywo})} = 60$ . Jest to różnica skrajnie duża,  $C_u < 6$  świadczy o równomiernym uziarnieniu i słabej zagęszczalności kruszywa, natomiast  $C_u = 60$  – o zróżnicowanym uziarnieniu i bardzo dobrej podatności na zagęszczenie. Badania modułów odkształcenia pierwotnego i wtórnego wykonano płytą VSS o średnicy 30 cm, stosując dwa cykle obciążeń w zakresie od 0 do 0,35 MPa. Na tej podstawie obliczono moduły odkształcenia: pierwotny  $E_1$  i wtórny  $E_2$  ze wzoru (3), jak również wskaźniki odkształcenia  $I_o$  ze wzoru (4). Obliczenia te wykonano dwiema metodami, tj. przy różnych zakresach i różnicach naprężeń odpowiadających wymaganiom podanym w [2] i [4]:

- metoda 1: zakres i różnica naprężeń  $\Delta\sigma(1) = 0,25\text{--}0,10$  MPa = 0,15 MPa [4],
- metoda 2: zakres i różnica naprężeń  $\Delta\sigma(2) = 0,25\text{--}0,15$  MPa = 0,10 MPa [2].

W wyniku badań i obliczeń uzyskano dwa zbiory danych zawierające 128 zestawów danych z badań kruszywa łamanego i 93 zestawy danych z badań pospółki. Moduły odkształcenia pierwotnego  $E_1$  i wtórnego  $E_2$  oraz wskaźnik odkształcenia  $I_o$  oznaczono odpowiednio do przyjętej w artykule metody obliczeń, a mianowicie:

- $E_1(1), E_2(1), I_o(1)$  – obliczone metodą 1,
- $E_1(2), E_2(2), I_o(2)$  – obliczone metodą 2.

the methods used in other countries. In addition, different factors are applied in the equation to calculate the deformation modulus.

## 4. ORIGINAL TEST METHOD

The study concerned 30-cm-thick blanket layers made of 0/31.5 mm crushed aggregate and 0/22.4 mm sandy gravel, whose grading curves are depicted in Fig. 5. The calculated values of the coefficient of uniformity, which is defined as  $C_u = d_{60}/d_{10}$  and describes the shape of the grading curve and compaction capacity of aggregates, were:  $C_{u(\text{sandy gravel})} = 4.8$  and  $C_{u(\text{aggregate})} = 60$ . This difference is extremely high,  $C_u < 6$  indicating uniform grading and poor compaction capacity, while the value of  $C_u = 60$  indicates non-uniform grading and very good compaction capacity. The primary and secondary moduli were tested by applying the load from 0 MPa to 0.35 MPa in two cycles by means of a 30 cm circular loading plate. This was the basis for calculating the primary modulus  $E_1$  and the secondary modulus  $E_2$  from eq. (3) and the  $I_o$  ratio from eq. (4). The calculations were carried out with two methods, i.e. at different stress ranges and increments, according to the requirements of [2] and [4]:

- method 1:  $\Delta\sigma(1) = 0.25\text{--}0.10$  MPa = 0.15 MPa [4],
- method 2:  $\Delta\sigma(2) = 0.25\text{--}0.15$  MPa = 0.10 MPa [2].

These tests and calculations yielded two groups of data including 128 data sets from the tests of crushed aggregate and 93 data sets from the tests of sandy gravel. The values of  $E_1, E_2$  and  $I_o$  were determined in accordance with the adopted method of calculation, namely:

- $E_1(1), E_2(1), I_o(1)$  – calculation method 1,
- $E_1(2), E_2(2), I_o(2)$  – calculation method 2.

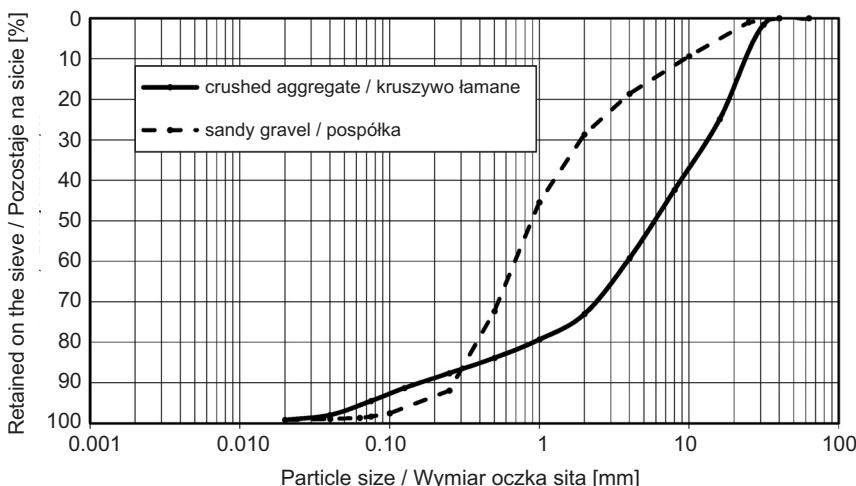


Fig. 5. Grading curves of the tested materials  
Rys. 5. Wykresy uziarnienia badanych materiałów

## 5. WYNIKI BADAŃ I ANALIZA

W Tabl. 1 przedstawiono średnie wartości modułów  $E_1$  i  $E_2$  oraz wskaźnika odkształcenia  $I_o$  uzyskane z badań kruszywa łamanego i pospółki.

Table 1. Average values of  $E_1$ ,  $E_2$  and  $I_o$  for crushed aggregate and sandy gravel

Tablica 1. Średnie wartości modułów  $E_1$  i  $E_2$  oraz wskaźnika odkształcenia  $I_o$  uzyskane w wyniku badań kruszywa łamanego i pospółki

Material type Rodzaj materiału	Method 1 / Metoda 1 $\Delta\sigma(1) = 0.25 - 0.10$ MPa			Method 2 / Metoda 2 $\Delta\sigma(2) = 0.25 - 0.15$ MP		
	$E_1(1)$ [MPa]	$E_2(1)$ [MPa]	$I_o$	$E_1(2)$ [MPa]	$E_2(2)$ [MPa]	$I_o$
Crushed aggregate / Kruszywo łamane						
N [-]	109			109		
Average $x_{av}$ / Średnia $x_{sr}$	90.8	176.3	1.95	97.6	187.1	1.94
min [MPa]	53.6	99.3	1.56	59.2	102.3	1.50
max [MPa]	199.0	338.0	2.32	250.0	375.0	2.44
$\sigma$ [MPa]	26.03	46.10	0.1661	29.11	50.64	0.2251
$v$ [%]	28.67	26.15	8.5	29.84	27.06	11.62
Sandy gravel / Pospółka						
N [-]	76			76		
Average $x_{av}$ / Średnia $x_{sr}$	69.8	137.7	2.00	72.7	145.9	2.03
min [MPa]	33.1	73.4	1.50	32.1	60.8	1.50
max [MPa]	147.0	281.0	2.50	173.1	375.0	2.50
$\sigma$ [MPa]	24.32	41.71	0.1973	27.35	52.96	0.2164
$v$ [%]	34.83	30.29	9.84	37.63	36.3	10.67
$\sigma$ – standard deviation / odchylenie standardowe						
$v$ – coefficient of variation / współczynnik zmienności						
N – number of variables / liczba zmiennych						

Analizując wartości modułów  $E_1$  i  $E_2$  oraz wskaźnika  $I_o$  (Tabl. 1) obliczone metodami 1 i 2 można zauważyć, że w przypadku wskaźnika odkształcenia zastosowana metodyka badania nie ma istotnego wpływu, a średnie wskaźniki  $I_o$  są zbliżone w przypadku obu materiałów (Rys. 6 i 7). Wykorzystując otrzymane wyniki  $I_o$  przeprowadzono analizę wariancji ANOVA. Przed przystąpieniem do analizy zbadano zgodność wyników z rozkładem normalnym. Analiza rozkładu normalnego pozwoliła wyeliminować nietypowe wartości i w rezultacie ograniczono analizę wskaźnika  $I_o$  do zakresu wartości 1,5-2,5, w którym wyniki badań spełniły założenie o normalności rozkładu. Następnie przeprowadzono analizę wariancji dwuczynnikowej ANOVA przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Analiza miała wskazać, czy rodzaj materiału i metoda obliczeń modułów mają wpływ na wartości  $I_o$ . Przeprowadzona analiza ANOVA potwierdziła, że wybór metody obliczeń 1 lub 2 nie jest istotny, jeśli chodzi o rozrzut wyników  $I_o$  ( $p$ -value = 0,47785), natomiast bardziej istotny wpływ na uzyskane

## 5. PRESENTATION AND ANALYSIS OF TEST RESULTS

Table 1 gives the average values of  $E_1$ ,  $E_2$  and  $I_o$  for crushed aggregate and sandy gravel.

Analysing the values of  $E_1$ ,  $E_2$  and the  $I_o$  ratio (Table 1) calculated with the methods 1 and 2, one can see the choice of the test method has no significant effect on the values of  $I_o$ . The average values of  $I_o$  are close in the case of the two tested materials (Figs 6 and 7). Using the obtained  $I_o$  values, an analysis of variance (ANOVA) was carried out. Normality test was carried out before the analysis. Thus, it was possible to eliminate outliers and, as a result, reduce the range of  $I_o$  values to 1.5-2.5, in which the test results satisfy the normality requirement. Next a two-way ANOVA was carried out at the significance level of  $\alpha = 0.05$ . The purpose of the analysis was to determine whether the type of material and the method of moduli calculation affect the values of  $I_o$ . ANOVA confirmed that the choice of method 1 or 2 is not a factor significantly differentiating the values of  $I_o$  ( $p$ -value = 0.47785) and the type of material has a more significant influence on the values of  $I_o$  ( $p$ -value = 0.00123). With no

wartości  $I_o$  ma rodzaj zastosowanego materiału ( $p$ -value = 0,00123). Stwierdzono brak znaczącej różnicy w średnich wartościach  $I_o$  obliczonych metodą 1 i 2, jednak w metodzie 2 obserwuje się szerszy rozstęp kwartylowy (zawierający 50% wyników), wskazujący na większy rozrzut wartości  $I_o$  (Rys. 6 i 7).

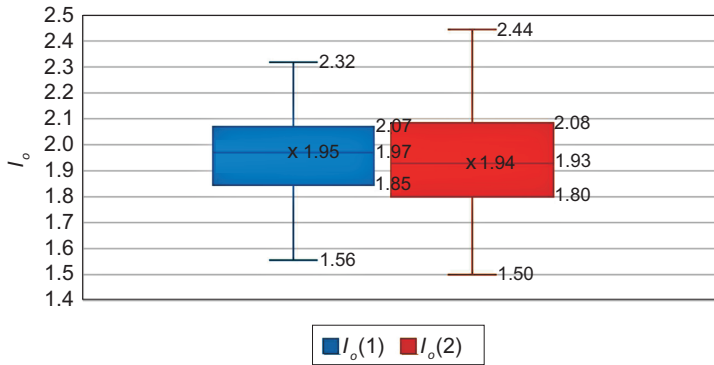


Fig. 6. Values of  $I_o$  ratio calculated for crushed aggregate with the stress ranges used in method 1 and method 2

Rys. 6. Wskaźnik odkształcenia  $I_o$  w zakresach naprężeń obliczony odpowiednio dla metody 1 i 2 w przypadku kruszywa łamanego

Stwierdzono natomiast znaczące różnice w średnich wartościach wtórnego modułu odkształcenia  $E_2$  w zależności od przyjętej metody obliczeń. Stosując metodę 2 uzyskuje się wartości modułu  $E_2(2)$  większe od wartości  $E_2(1)$  obliczonych według metody 1 średnio o 6.13% w przypadku kruszywa łamanego i o 5.95% w przypadku pospółki. Z uwagi na zaobserwowane różnice w wartościach modułu wtórnego  $E_2$  w zależności od zakresu naprężenia, skorelowano ze sobą wartości tego modułu obliczone metodami 1 i 2 dla obu materiałów. Wyniki przedstawiono na Rys. 8 i 9.

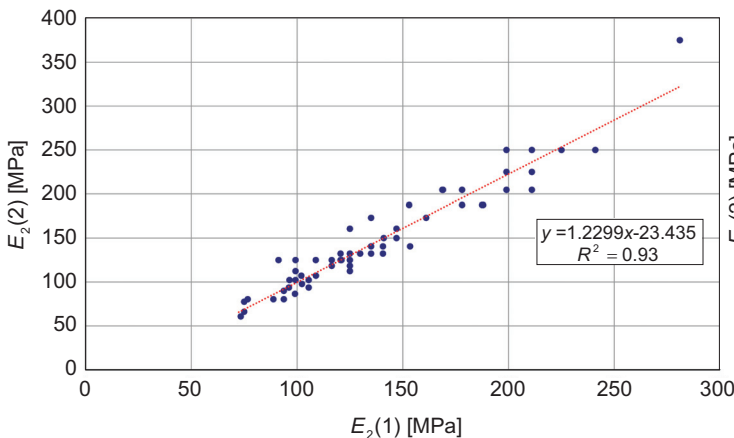


Fig. 8. Relationship between  $E_2(1)$  and  $E_2(2)$  for sandy gravel  
Rys. 8. Zależność pomiędzy  $E_2(1)$  i  $E_2(2)$  w przypadku pospółki

significant differences between the average values of  $I_o$  calculated with method 1 and method 2, a wider interquartile range (encompassing 50% of the results) was observed for method 2, which indicates a greater variability of the  $I_o$  values obtained with method 2 (Figs 6 and 7).

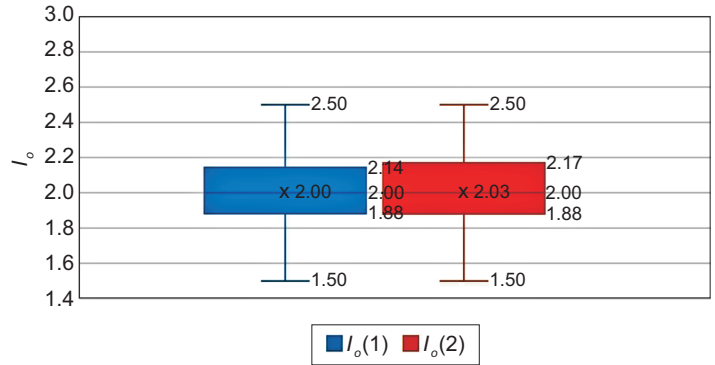


Fig. 7. Values of  $I_o$  ratio calculated for sandy gravel with the stress increments used in method 1 and method 2

Rys. 7. Wskaźnik odkształcenia  $I_o$  w zakresach naprężeń obliczony odpowiednio dla metody 1 i 2 w przypadku pospółki

On the other hand, significant differences between the average values obtained with the two calculation methods were observed in the case of  $E_2$ . The values of  $E_2(2)$  obtained with method 2 were greater than the  $E_2(1)$  values obtained with method 1, on average by 6.13% in the case of crushed aggregate and by 5.95% in the case of sandy gravel. Considering the observed differences in the values of  $E_2$  depending on the stress range, the values obtained with method 1 were correlated with those obtained with method 2 for both materials. The results are presented in Figs 8 and 9.

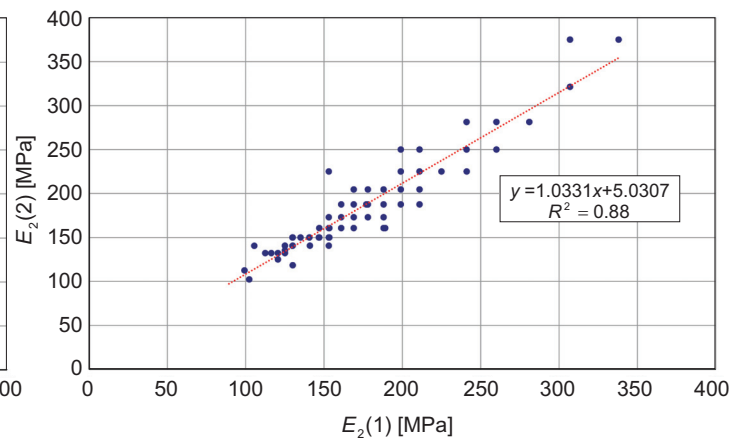


Fig. 9. Relationship between  $E_2(1)$  and  $E_2(2)$  for crushed aggregate  
Rys. 9. Zależność pomiędzy  $E_2(1)$  i  $E_2(2)$  w przypadku kruszywa łamanego

Z powyższych korelacji wynika, że istnieje silna zależność liniowa pomiędzy modułami  $E_2$  obliczonymi metodami 1 oraz 2, gdzie współczynnik determinacji wynosi odpowiednio: w przypadku kruszywa łamanego  $R^2 = 0,88$  oraz w przypadku pospółki  $R^2 = 0,93$ . W celu weryfikacji wcześniej zaobserwowanej relacji że średnia wartość  $E_2(2) > E_2(1)$ , zbadano różnicę wtórnych modułów obliczonych odpowiednio metodą 2 oraz 1 w funkcji zmienności modułu  $E_2(1)$ . Wyniki obliczeń przedstawiono w Tabl. 2 i na Rys. 10, wyznaczając iloraz modułów  $E_2(2)/E_2(1)$ , tj. określonego według metody 2 do obliczonego według metody 1. Na osi rzędnych Rys. 10 przedstawiono stosunek modułu  $E_2(2)$  tj. obliczonego według metody 2 do  $E_2(1)$  czyli obliczonego metodą 1, natomiast na osi odciętych jako zmienna występuje moduł  $E_2(1)$ .

Table 2. Values of  $E_2(2)/E_2(1)$  ratio calculated on the basis of the correlations displayed in Figs 6 and 7  
Tablica 2. Ilorazy  $E_2(2)/E_2(1)$  obliczone na podstawie korelacji z Rys. 6 i 7

$E_2(1)$ [MPa]	Crushed aggregate Kruszywo łamane		Sandy gravel Pospółka	
	$E_2(2)$ [MPa]	$E_2(2)/E_2(1)$	$E_2(2)$ [MPa]	$E_2(2)/E_2(1)$
100	108.3	1.083	99.6	0.996
110	118.7	1.079	111.9	1.017
120	129	1.075	124.2	1.035
130	139.3	1.072	136.5	1.05
140	149.7	1.069	148.8	1.063
150	160	1.067	161.1	1.074
170	180.7	1.063	185.6	1.092
200	211.7	1.059	222.5	1.113
220	232.3	1.056	247.1	1.123
250	263.3	1.053	284	1.136
300	315	1.05	345.5	1.152

Przedstawione na Rys. 10 zależności pokazują, że wartości wtórnego modułu odkształcenia  $E_2(2)$  obliczone metodą 2 ( $\Delta\sigma = 0,10$  MPa) są większe od modułów  $E_2(1)$  obliczonych metodą 1 ( $\Delta\sigma = 0,15$  MPa), a różnica między tymi wartościami jest zmienna. Można zauważyć, że w przypadku pospółki iloraz  $E_2(2)/E_2(1)$  wyrażony procentowo wraz ze wzrostem wartości modułu  $E_2(1)$  ma tendencję wzrostową w zakresie od 101% do 115%. W przypadku kruszywa łamanego obserwuje się trend odwrotny: wraz ze wzrostem modułu  $E_2(1)$  różnica pomiędzy wartościami  $E_2$  obliczonymi metodami 1 i 2, określona przez iloraz  $E_2(2)/E_2(1)$  wyrażony w %, maleje od 108% do 105%. Odmienność zaobserwowanych trendów może być związana z właściwościami badanych kruszyw. Pospółka jest kruszywem o ziarnach okrągłych, natomiast kruszywo łamane miało

From the above correlations it transpires that there is a strong linear relationship between the  $E_2$  values obtained with method 1 and method 2, with the coefficient of determination of  $R^2 = 0.88$  for crushed aggregate and  $R^2 = 0.93$  for sandy gravel. In order to verify the established relationship that the average value of  $E_2(2)$ , i.e. secondary modulus obtained with method 2, is higher than  $E_2(1)$  obtained with method 1, the changes in this difference with the varying value of  $E_2(1)$  were investigated. The calculation results are given in Table 2 and displayed in Fig. 10. The y-axis in Fig. 10 represents the ratio between  $E_2(2)$  and  $E_2(1)$ , i.e. the values obtained with method 2 and method 1, respectively, and the x-axis represents the value of  $E_2(1)$ .

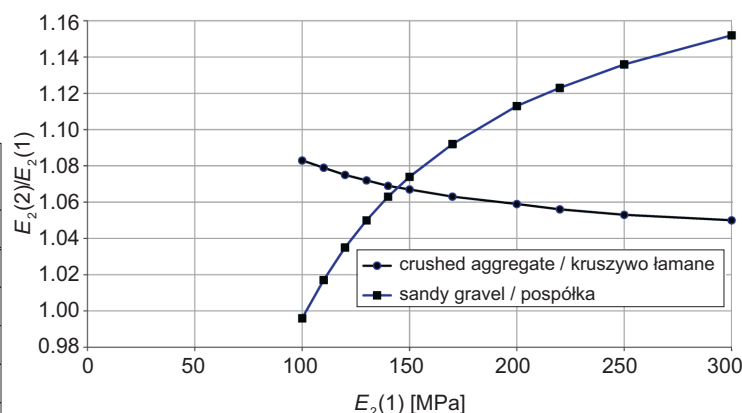


Fig. 10. Relationship between  $E_2(1)$  and  $E_2(2)/E_2(1)$  ratio for crushed aggregate and sandy gravel

Rys. 10. Zależność pomiędzy modułem  $E_2(1)$  a ilorazem  $E_2(2)/E_2(1)$  w przypadku zastosowania kruszywa łamanego oraz pospółki

From the relationships displayed in Fig. 10 it transpires that the values of  $E_2(2)$  obtained with method 2 ( $\Delta\sigma = 0.10$  MPa) are higher than the values of  $E_2(1)$  obtained with method 1 ( $\Delta\sigma = 0.15$  MPa) and the differences between them vary. It is worth noting that in the case of sandy gravel the percent value of  $E_2(2)/E_2(1)$  follows a growing trend from 101% to 115% with the increasing value of  $E_2(1)$ . An opposite trend is observed in the case of crushed aggregate: with the increasing value of  $E_2(1)$  the difference between the values of  $E_2$  calculated with method 1 and method 2, expressed by the  $E_2(2)/E_2(1)$  ratio in percent decreases from 108% to 105%. This opposite direction of the trend can be related to the properties of the tested aggregates. Sandy gravel is comprised of round particles, while in crushed aggregate all grains are broken. Furthermore, the grading curve shapes were entirely different, with  $C_{u(\text{sandy gravel})} = 4.8$  and  $C_{u(\text{crushed aggregate})} = 60$ .

strukturę całkowicie przełamanych ziaren. Ponadto kształt krzywej uziarnienia w przypadku badanych kruszyw był diametralnie różny:  $C_u$  (pospółka) = 4,8 i  $C_u$  (kruszywo łamane) = 60.

## 6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Analiza metod badań płytą VSS stosowanych w różnych krajach wykazała, że do badania używane są płyty o średnicach 30 cm lub 60 cm, a do określania modułów odkształcenia przyjmowane są różne zakresy naprężeń. Ponadto moduły odkształcenia obliczane są na podstawie wzorów, które różnią się, a różnice te wynikają z przyjmowanych współczynników. Jako kryterium odpowiednio dużego zagęszczenia, tj. odpowiadającego wskaźnikowi zagęszczenia  $I_s = 1,0$  najczęściej przyjmuje się wskaźnik odkształcenia  $I_o = 2,0-2,5$ , w zależności od uziarnienia badanego materiału.

W Polsce stosowane są dwie metody badania VSS, określone jako 1 i 2, które różnią się zakresami naprężenia, odpowiednio:  $\Delta\sigma(1) = 0,15$  MPa i  $\Delta\sigma(2) = 0,1$  MPa. Przeprowadzone według tych metod badania i ich analiza pozwalają na stwierdzenie, że przy zakresie naprężenia  $\Delta\sigma(2)$  średnia wartość wtórnego modułu odkształcenia kruszywa łamanego jest większa o 6,13%, a pospółki o 5,95%, od średnich wartości modułów tych materiałów określonych przy zakresie naprężenia  $\Delta\sigma(1)$ . W przypadku obu badanych materiałów istnieją silne zależności liniowe pomiędzy modułami odkształcenia wtórnego  $E_2(1)$  i  $E_2(2)$  wyznaczanymi przy zakresach naprężenia odpowiednio  $\Delta\sigma(1)$  i  $\Delta\sigma(2)$ . Zauważono, że stosowany różny zakres naprężenia  $\Delta\sigma(1)$  lub  $\Delta\sigma(2)$  w badaniu VSS nie ma istotnego wpływu na wynik wartości wskaźnika odkształcenia  $I_o$  pospółki oraz kruszywa łamanego, natomiast znaczący wpływ na wartości modułów odkształcenia wtórnego tych materiałów.

Wartości modułów wtórnych obliczone metodą 2 ( $\Delta\sigma(2) = 0,10$  MPa) są większe od modułów wtórnych określonych metodą 1 ( $\Delta\sigma(1) = 0,15$  MPa), a różnice między tymi wartościami są zmienne w przypadku obu zbadanych materiałów. Stwierdzono, że w przypadku pospółki iloraz  $E_2(2)/E_2(1)$  wyrażony procentowo wraz ze wzrostem wartości modułu  $E_2(1)$  ma tendencję wzrostową mieszczącą się w przedziale od 101% do 115%. W przypadku natomiast kruszywa łamanego obserwuje się trend odwrotny: wraz ze wzrostem modułu  $E_2(1)$  iloraz ten maleje w zakresie od 108% do 105%. Tak istotne różnice w zaobserwowanych trendach wynikają z odmiennych właściwości badanych kruszyw: tj. pospółki – kruszywa okrągłego o słabej zagęszczalności  $C_u = 4,8$  oraz kruszywa łamanego – o bardzo dobrej zagęszczalności  $C_u = 60$ .

## 6. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The analysis of the various static plate load test methods used in different countries revealed that two plate diameters are used, viz. 30 cm or 60 cm, and different stress increments are applied for moduli determination. Furthermore, the equations used to calculate the deformation moduli differ in terms of the applied factors. The criterion for sufficient compaction is most often the value of the modulus ratio in the range of  $I_o = 2.0-2.5$ , depending on grading of the material concerned, corresponding to the relative compaction value of  $I_s = 1.0$ .

In Poland two static plate load test methods are used, designated as method 1 and method 2, differing in terms of the applied stress increment, viz.  $\Delta\sigma(1) = 0.15$  MPa and  $\Delta\sigma(2) = 0.1$  MPa. The tests were carried out according to these two methods and analysis of their results leads to the conclusion that for the stress increment  $\Delta\sigma(2)$  the average values of the secondary modulus are greater than the values obtained for the stress increment  $\Delta\sigma(1)$  by 6.13% and 5.95% for the crushed aggregate and sandy gravel, respectively. For both materials tested in this research there are strong linear relationships between the secondary moduli  $E_2(1)$  and  $E_2(2)$  obtained for stress increments  $\Delta\sigma(1)$  and  $\Delta\sigma(2)$ . It was established that use of different stress increments  $\Delta\sigma(1)$  or  $\Delta\sigma(2)$  in the static plate test had no significant effect on the values of  $I_o$  ratio of sandy gravel and crushed aggregate. Conversely, different stress increments did have a bearing on the values of the secondary modulus of these materials.

The values of the secondary modulus calculated with method 2 ( $\Delta\sigma(2) = 0.10$  MPa) are higher than the values obtained with method 1 ( $\Delta\sigma(1) = 0.15$  MPa) and the differences between them vary for both the tested materials. It was established that in the case of sandy gravel the percent value of  $E_2(2)/E_2(1)$  follows a growing trend from 101% to 115% with the increasing value of  $E_2(1)$ . An opposite trend is observed in the case of crushed aggregate: with the increasing value of  $E_2(1)$  the value of this ratio decreases from 108% to 105%. This difference in the observed trends should be attributed to different properties of the tested aggregates, i.e.: rounded or crushed particles, with poor or very good compaction potential, indicated by the values of  $C_u = 4.8$  and  $C_u = 60$ , respectively.

**BIBLIOGRAFIA / REFERENCES**

- [1] BN-77-8931-12 Oznaczenie wskaźnika zagęszczenia gruntu
- [2] PN-EN 13286-2:2010 Mieszanki niezwiązane i związane hydraulicznie - Część 2: Metody badań laboratoryjnych gęstości i zawartości wody - Zagęszczanie metodą Proctora
- [3] *Rafalski L., Wilczek J.*: Warstwy mrozoochronne ze słabych kruszyw grubookruchowych w nawierzchniach drogowych. IBDiM, Studia i materiały, zeszyt 57, Warszawa 2006
- [4] *Wegliński S.*: Determination of load action ranges in static and dynamic tests of subgrades by applying rigid plates. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **17**, 1, 2018, 73-88, DOI: 10.7409/rabdim.018.005.
- [5] PN-S-02205:1998 Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania
- [6] Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego, Id-3. Załącznik do Zarządzenia nr 9 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 4 maja 2009 r.
- [7] *Arquie G.*: Zagęszczanie. Drogi i pasy startowe. WKŁ, Warszawa 1980
- [8] *Kukielka J., Szydło A.*: Projektowanie i budowa dróg. WKŁ, Warszawa 1986
- [9] *Pisarczyk S.*: Zagęszczalność gruntów gruboziarnistych i kamienistych. Rozprawa habilitacyjna, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Warszawa 1997 r.
- [10] NF P94-117-1. Sols : Reconnaissance et essais – Portance des plates-formes – Partie 1: Module sous chargement statique à la plaque (EV2)
- [11] *Mackiewicz P., Krawczyk B.*: Influence of loading time on subgrade parameters derived from VSS static plate test. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **14**, 1, 2015, 19-29, DOI: 10.7409/rabdim.015.002
- [12] Specyfikacja techniczna. Ville de TEMPLEUVE. Reconstruction de la rue du PARADIS. Cahier des Clauses Techniques Particulières (C.C.T.P.). Opracowanie Strate Amenagement Urbain, 2010
- [13] Specyfikacja techniczna. Aménagement de la ZAC Louvois à Phalsbourg. Maîtrise d’Oeuvre. Dossier de Consultation des Entreprises Cahier des Clauses Techniques Particulières. Ed. Arcadis, Strasbourg, 2013
- [14] *Monnet J.*: Les essais in situ engéotechnique. ISTE Edition. Ed. Génie Civil et Géomécanique, Grenoble, 2016
- [15] Mode opératoire MF 40/78: Essai de chargement à la plaque pour le contrôle du compactage. Méthode de Mesure C.R.R. Centre de Recherches routieres, Bruxelles, 1978
- [16] DIN 18134:2001 Determination the deformation and strength characteristics of soil by the plate loading test
- [17] ZTVE-StB 94 Supplementary Technical Terms and Conditions of Contract and Guidelines for Earthworks in Road Construction, Issue 1994
- [18] Soil Treatment. Base Layers with Hydraulic Binders. Wirtgen Group Company, Germany, 2018
- [19] ZTV-E-StB-09 Additional technical conditions of contract and directives for earthworks in road construction. Road and Transportation Research Association, Cologne, Germany, 2013
- [20] Merkblatt Plattendruckversuch DIN 18134. IGEWA GmbH, 2006
- [21] *Andresdottir H.*: Plate load testing. Effects of in situ conditions, test procedure and calculation method. Master’s thesis, NTNU Norwegian University of Science and Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, 2019