



ANTONI SZYDŁO<sup>1)</sup>  
PIOTR MACKIEWICZ<sup>2)</sup>

## DETERMINATION OF DEFLECTIONS OF AN INNOVATIVE PAVEMENT STRUCTURE CONTAINING A THREE-COMPONENT HYDRAULIC BINDER<sup>3)</sup>

## IDENTYFIKACJA UGIĘĆ INNOWACYJNEJ KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI ZAWIERAJĄCEJ TRÓJSKŁADNIKOWE SPOIWO HYDRAULICZNE<sup>3)</sup>

**STRESZCZENIE.** Tematem artykułu są badania dynamiczne warstw innowacyjnej konstrukcji nawierzchni zbudowanej na specjalnym odcinku doświadczalnym. Na tym odcinku wbudowano dwie nowatorskie mieszanki w technologii recyklingu głębokiego na zimno z emulsją asfaltową oraz z asfaltem spienionym, stosując do nich specjalnie opracowany środek wiążący (trójskładnikowy) zwany dalej spoiwem innowacyjnym. Szczególną uwagę poświęcono analizie wyników pomiarów ugięć nawierzchni z wykorzystaniem ugięciomierza dynamicznego FWD (ang. *Falling Weight Deflectometer*). Badania przeprowadzono dla czterech sekcji nawierzchni zawierających mieszanki mineralno-cementowe z asfaltem spienionym (MCAS) oraz mieszanki mineralno-cementowe z emulsją asfaltową (MCE), przy czym dwie sekcje zawierały innowacyjne spoiwo, a w przypadku dwóch innych zastosowano tylko cement. Na podstawie badań stwierdzono, że dla warstw zawierających mieszanki ze spoiwem innowacyjnym występują większe wartości ugięć. Świadczy to o mniejszej sztywności mieszanek, co w konsekwencji pozwala na ograniczenie zmęczenia i spękań.

**SŁOWA KLUCZOWE:** asfalt spieniony, emulsja asfaltowa, mieszanki mineralno-cementowe, recykling, spoiwo hydrauliczne.

**ABSTRACT.** The article presents the results of dynamic loading tests of an innovative pavement structure constructed on a special test site. Two novel mixtures incorporating the cold-recycling technology with bituminous emulsion and foamed bitumen were used. They contained a dedicated (three-component) hydraulic binder, further referred to as the innovative binder. Particular research effort was devoted to the analysis of pavement deflection measurements obtained using a Falling Weight Deflectometer (FWD) device. The tests were performed on four test sections using mineral-cement mixtures with foamed bitumen (MCAS) and mineral-cement mixtures with bituminous emulsion (MCE), whereas two sections incorporated the innovative hydraulic binder and two sections incorporated only cement. The obtained test results indicated that mixtures containing the innovative binder displayed greater deflections. This fact reflects lower mixture stiffness, which, in consequence, is associated with mitigation of fatigue and cracking.

**KEYWORDS:** asphalt emulsion, foamed asphalt, hydraulic binder, mineral-cement mixtures, recycling.

DOI: 10.7409/rabdim.023.001

<sup>1)</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 41 50-370 Wrocław; antoni.szydlo@pwr.edu.pl  
<sup>2)</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 41; 50-370 Wrocław; piotr.mackiewicz@pwr.edu.pl (✉)  
<sup>3)</sup> article co-edited by Prof. Wojciech Bańkowski and Prof. Jorge Pais, from the series of works under the common title: "Use of RAP in Road Engineering" as part of the Ministry of Education and Science project No. RCN/SP/0569/2021/1 artykuł współredagowany przez dr. hab. inż. Wojciecha Bańkowskiego, prof. IBDiM, oraz dr. inż. Jorge Paisa, prof. Uniwersytetu w Minho, z cyklu prac pod wspólnym tytułem „Wykorzystanie destruktu asfaltowego w budownictwie drogowym” w ramach projektu MEiN Nr RCN/SP/0569/2021/1

## 1. WPROWADZENIE

Aktualnie wobec wyczerpywania się złóż materiałów oraz wprowadzania wymagań polityki proekologicznej na całym świecie niezbędne jest podjęcie prób i badań w zakresie nowych technologii w budownictwie drogowym. Nowe rozwiązania pozwolą na zmniejszenie zużycia energii oraz ograniczenie zanieczyszczeń i degradacji środowiska naturalnego. W procesach produkcyjnych wytwarzanych jest wiele materiałów ubocznych, które można z powodzeniem zastosować do budowy nawierzchni dróg. Nowo opracowane technologie pozwalają zatem ograniczyć potrzebę wbudowania nowych kruszyw mineralnych w nawierzchniach, a w szczególności w podbudowach drogowych [1-4]. W przywołanych publikacjach opracowano optymalne recepty dla kruszyw pochodzących między innymi z konstrukcji budynków, odpadów budowlanych i rozbiórkowych oraz gruzu mieszanego.

Wykonując różne testy statyczne i dynamiczne, wykazano możliwość stosowania wspomnianych materiałów w podbudowach nawierzchni spełniających wymagania w danych krajach. Wskazano jednak na niebezpieczeństwo występowania w niektórych kruszywach siarki [3], a także gipsu i soli [4]. W związku z tym zaproponowano metodę odsiewania drobnych frakcji, co poprawiło jakość mieszanek.

Kruszywa pochodzące z recyklingu są stosowane powszechnie, także w nasypach drogowych [5-6]. W tych pracach analizowano możliwość stosowania kruszywa betonowo-ceglanego do budowy nasypów autostradowych. Zwrócono uwagę na problem kontroli wilgotności i sprawnego odwodnienia nasypu, aby nie doszło do jego niekontrolowanego osiadania.

W pracy [7] zwrócono uwagę na potrzebę monitorowania gęstości, nośności i mrozoodporności w celu właściwego zastosowania kruszyw z recyklingu w poboczach nawierzchni nieutwardzonych. W górnych warstwach nawierzchni dróg nieutwardzonych stosowane są także odpady aluminiowe i stalowe [8-9]. Polepszają one wytrzymałość na ściskanie i wskaźnik CBR. Mogą być też skuteczne w samoodładzających się nawierzchniach drogowych, gdzie pożądana jest wyższa przewodność cieplna materiału.

Skuteczność stosowania odpadów z tworzyw sztucznych wykazano w pracach [10-12]. W zależności od rodzaju, stanu i posortowania tych odpadów możliwe jest ich skuteczne zastosowanie w mieszankach zawierających cement lub asfalt. Możliwe jest zaoszczędzenie na kosztach transportu (mniejsza masa mieszanki) lub polepszenie cech zmęczeniowych. Niezbędne jest jednak opracowanie wielu recept w celu znalezienia wartości optymalnych.

Tematyka zastosowania materiałów pochodzących z recyklingu w mieszankach wykonanych w technologii recyklingu

## 1. INTRODUCTION

Currently, due to the impending depletion of raw materials and the worldwide introduction of pro-ecological policies it is vital to undertake research and trials on new technologies in road construction. New solutions will enable reductions in energy consumption, pollution and environmental degradation. Production processes generate various by-products that may be successfully recycled in road construction. Therefore, new technologies reduce the need for usage of virgin mineral aggregate in pavements, especially in road base courses [1-4]. The mentioned publications present the optimum compositions of aggregate mixtures originating from construction/demolition waste and mixed rubble, among others.

Possibility of usage of the aforementioned materials in road bases fulfilling national requirements in specific countries was confirmed in various static and dynamic loading tests. However, it was pointed out that some recycled aggregates may contain sulfur [3] or gypsum and salts [4]. Therefore, a method for sieving of fine fractions was proposed, which improved the obtained mixtures.

The use of recycled aggregates is widespread, also in road embankments [5-6]. The mentioned works included analyses of the possibility of usage of crushed concrete and brick material in highway embankments. Particular emphasis was placed on the problems of moisture control and suitable drainage of the embankment in order to avoid its uncontrolled settlement.

The authors of [7] stressed the necessity of monitoring density, bearing capacity and frost resistance in usage of recycled aggregates in roadsides of unpaved roads. In the case of upper courses of unpaved roads, aluminum and steel waste may be used as well [8-9], providing improved compressive strength and *CBR* ratio. It may also be effective in self-deicing road pavements, in which greater thermal conductivity of the material is desirable.

Effectiveness of usage of plastic waste material was demonstrated in [10-12]. Successful use of such waste in mixtures containing cement or bitumen depends on its type, state and sorting. It is possible to achieve savings on transportation costs (lighter mixture) or improvement of fatigue properties; however, it is necessary to develop multiple composition designs and determine the optimum proportions of the components.

The subject of application of reclaimed materials in cold-recycled mixtures has been developed in various works, including [13-15].

głębokiego na zimno jest rozwijana w różnych pracach, np. [13-15].

Skuteczność zwiększenia trwałości zmęczeniowej mieszanek recyklowanych z zastosowaniem spoiw hydraulicznych wykazano w [16, 17]. Zwrócono jednak uwagę na mały zakres liniowej lepkości sprężystości. Zbyt duża sztywność mieszanek wpływa niekorzystnie na cechy zmęczeniowe. Potrzebę rozszerzenia zakresu lepkości sprężystości wskazano także w pracach [18, 19].

Należy mieć na uwadze, że nieoptymalne stosowanie klasycznego cementu w mieszankach recyklowanych zwiększa ich sztywność, jednak nie ogranicza kruchego pęknięcia. Podobnie jak w typowych nawierzchniach z zastosowaniem mieszanek związanych, kluczowy problem stanowi także właściwe zachowanie wilgotności przy zagęszczaniu i pielęgnacji, a na etapie eksploatacji uwzględnienie oddziaływania temperatury i procesów odkształceniowych w nawierzchni [20, 21]. Wrażliwość termiczna mieszanek recyklowanych ściśle zależy od składu, a w szczególności od dodatku spoiwa. W celu znalezienia kompromisu pomiędzy małym odkształceniem mieszanki a zachowaniem wymaganej sztywności i odporności na zmęczenie wykonano kluczowe badania pełzania [22] w mieszance zawierającej cement, wapno hydratyzowane oraz pyły z systemu odpylania. Wskazano, że istnieje optymalny dobór składników, gwarantujący wymagane zachowanie mieszanek w nawierzchni (tj. ograniczenie deformacji i zwiększenie trwałości zmęczeniowej).

W pracach [23-25] rozwinięto temat technologii z zastosowaniem nowego trójskładnikowego spoiwa otrzymywanego w wyniku ubocznej produkcji cementu. W ramach tej technologii opracowano innowacyjny środek wiążący przeznaczony do dwóch obecnie stosowanych technologii recyklingu na zimno. Udoskonalono dwa produkty: mieszankę mineralno-spoiwową z asfaltem spienionym oraz mieszankę mineralno-spoiwową z emulsją asfaltową. Innowacyjny środek wiążący zapewnił uzyskanie optymalnych właściwości w zakresie badań parametrów fizycznych i mechanicznych. W ramach dalszych prac opracowano odcinek doświadczalny w celu weryfikacji zastosowanej technologii recyklingu w nawierzchni drogowej. Jego technologia produkcji i skład stanowią temat odrębnego opracowania. W niniejszym artykule skupiono uwagę na etapie dalszych prac związanych z wykonaniem odcinka doświadczalnym, zaprezentowanym w publikacji [24].

Należy zwrócić uwagę, że istnieje wiele korzyści ze stosowania technologii recyklingu z zastosowaniem spoiw, jednak jest mało prac analizujących zachodzące w nich podczas obciążenia zjawiska reologiczne. Analizowane w publikacji

Effective improvement of fatigue life of recycled mixtures due to addition of hydraulic binders was reported in [16, 17]. However, it was pointed out that the range of linear viscoelasticity was narrow. Excessive stiffness of the mixtures negatively affects their fatigue properties. The need to widen the range of viscoelasticity was also reported in [18, 19].

One should bear in mind that non-optimal use of classic cement in recycled mixtures increases their stiffness, but does not reduce brittle cracking. Like in the case of typical pavements with cement-bound mixtures, the key problem lies in maintaining proper moisture during compaction and curing and taking into account the impact of temperature and deformation processes during service [20, 21]. Thermal sensitivity of recycled mixtures closely depends on their composition, especially on the binder content. In order to find the best trade-off between deformation, stiffness and fatigue resistance of the mixture, key creep tests [22] were performed on mixture containing cement, hydrated lime and cement by-pass dust. It was established that the optimum proportion of mixture contents does exist, guaranteeing the required performance of the mixture in the pavement structure (i.e. a reduction in deformation and an increase in fatigue life).

The subject of application of the new technology of mixture incorporating by-products of cement production was further developed in [23-25]. The works resulted in development of the innovative binder dedicated for two currently used cold-recycling technologies. Two products were improved: mineral-binder mixtures with foamed bitumen and mineral-binder mixtures with bituminous emulsion. The innovative three-component binder provided the optimum properties in terms of physical and mechanical parameters. Further research works encompassed establishment of a test site in order to verify the applied new recycling technology. Production technology and composition of the new binder were the subject of a separate paper. This article is devoted to the stage of further works associated with the established test site, whose details were presented in [24].

It should be emphasized that while there are many advantages of cold recycling technology incorporating hydraulic binders, research works devoted to their rheology are still sparse. The three-component binder analyzed herein, whose composition was optimized to account for the local field conditions, was specially designed to include the three base components in the following proportions: 40% of CEM I 32.5R; 20% of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and 40% of CBPD

trójskładnikowe spoiwo, którego skład został zoptymalizowany do warunków lokalnie występujących w terenie, zostało specjalnie zaprojektowane poprzez wymieszanie trzech bazowych składników w następujących proporcjach: 40% CEM I 32,5R; 20%  $\text{Ca(OH)}_2$  oraz 40% UCPP (ubocznych cementowych produktów pylastych). Zastosowanie w mieszance produktów pylastych jest kluczowe ze względu na zwiększenie wymaganej trwałości zmęczeniowej. W tej publikacji autorzy dokonali oceny zachowania mieszanek z recyklowanych podbudów i nawierzchni drogowych z trójskładnikowym spoiwem w warunkach rzeczywistych – w podbudowie nawierzchni drogowej pod obciążeniem dynamicznym.

## 2. KONSTRUKCJA NAWIERZCHNI

Na odcinku doświadczalnym szczegółowo opisanym w [24] wbudowano mieszanki (MCAS+5C oraz MCE+5C) z innowacyjnym spoiwem i równolegle mieszanki (MCAS+CEM oraz MCE+CEM) ze spoiwem cementowym. Na Rys. 1 przedstawiono schematycznie w planie układ czterech sekcji podbudowy nawierzchni. Szerokość jezdni wynosiła 6 m (szerokość pasa ruchu: 3 m). Na jednym pasie ruchu wbudowano mieszankę MCAS+5C (sekcja 4) oraz MCE+5C (sekcja 3). Na drugim pasie ruchu wbudowano mieszankę MCAS+CEM (sekcja 2) oraz MCE+CEM (sekcja 1).

Konstrukcja nawierzchni na poszczególnych sekcjach była następująca (grubości zostały zidentyfikowane na podstawie wykonanych odwiertów):

Sekcja 4:

- mieszanka mineralno-asfaltowa SMA 16 JENA, grubość 8 cm,
- mieszanka MCAS+5C, grubość 20,6 cm,
- podłoże gruntowe.

Sekcja 3:

- mieszanka mineralno-asfaltowa SMA 16 JENA, grubość 8,8 cm,
- mieszanka MCE+5C, grubość 19,0 cm,
- podłoże gruntowe.

Sekcja 2:

- mieszanka mineralno-asfaltowa SMA 16 JENA, grubość 8,9 cm,
- mieszanka MCAS+CEM, grubość 19,3 cm,
- podłoże gruntowe.

Sekcja 1:

- mieszanka mineralno-asfaltowa SMA 16 JENA, grubość 9 cm,

(cement by-pass dust). Use of dusts in the mixture is a key factor affecting the increase in fatigue life. This work encompasses assessment of performance of mixtures containing reclaimed road pavements and bases with the three-component binder in real field conditions – in road base course subjected to dynamic loading.

## 2. PAVEMENT STRUCTURE

Four mixtures were placed at the test site, which was described in detail in [24]: two mixtures with the innovative hydraulic binder (MCAS+5C and MCE+5C) and two mixtures with cement (MCAS+CEM and MCE+CEM). A schematic layout of the four sections with different base courses is shown in Fig. 1. Width of the roadway equaled 6 m (lane width: 3 m). Mixtures MCAS+5C (section 4) and MCE+5C (section 3) were placed on one lane. Mixtures MCAS+CEM (section 2) and MCE+CEM (section 1) were placed on the other lane.

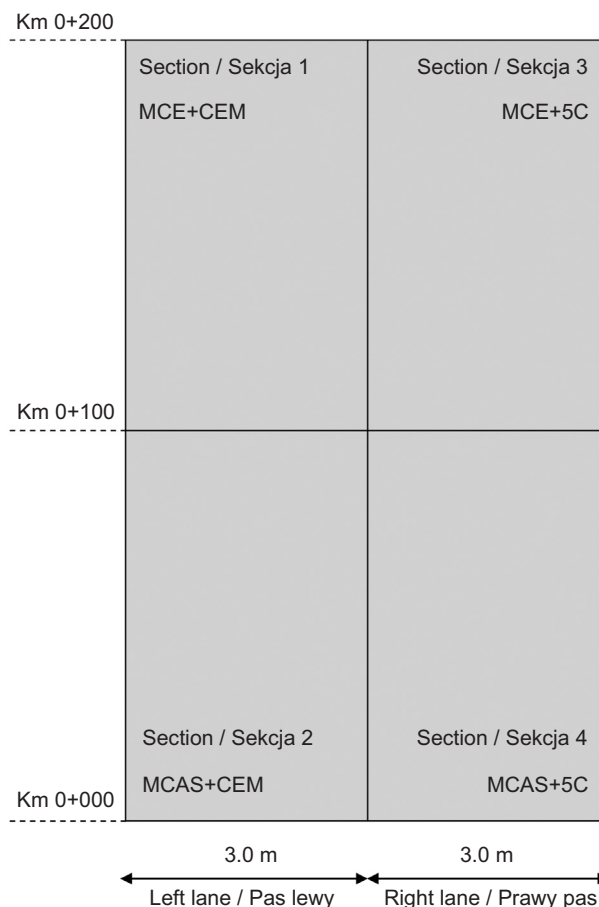


Fig.1. Layout of sections with different mixtures on the test site  
Rys.1. Schemat lokalizacji wbudowanych mieszanek na odcinku doświadczalnym

- mieszanka MCE+CEM, grubość 19,1 cm,
- podłoże gruntowe.

W składzie mieszanek stosowano dwa typy środków wiążących: bitumiczny w postaci asfaltu spienionego (do MCAS) lub emulsji asfaltowej (do MCE) oraz hydrauliczny w postaci cementu portlandzkiego (CEM I 32,5R) lub innowacyjnego spoiwa trójskładnikowego. Asfalt drogowy D70/100 zastosowano do wytworzenia asfaltu spienionego oraz emulsji asfaltowej. Na innowacyjne spoiwo hydrauliczne składały się trzy składniki: 40% CEM I 32,5R; 20%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oraz 40% UCPP (uboczne cementowe produkty pylaste). Poniżej przedstawiono szczegółowy udział procentowy zastosowanych składników w mieszankach MCAS i MCE:

- asfalt spieniony 70/100 lub asfalt z emulsji asfaltowej – 3.0%,
- spoiwo trójskładnikowe – 3.0%,
- kruszywo naturalne z istniejącej podbudowy 0/31,5 – 56.4%,
- RAP 0/31,5 kruszywo sztuczne (destrukta asfaltowy) – 37.6%.

Na przedmiotowym odcinku zainstalowano także system monitorowania mający na celu obserwację zmian naprężeń i odkształceń wykonanej nawierzchni. Rejestrowano także parametry środowiskowe, takie jak temperatura i wilgotność. Te analizy są przedmiotem innych opracowań.

### 3. WYNIKI POMIARÓW UGIĘĆ NAWIERZCHNI

W czerwcu 2020 r. wykonano pomiary ugięć na powierzchni warstwy ścieralnej (SMA 16 JENA) za pomocą ugięciomierza typu FWD (ang. *Falling Weight Deflectometer*). Jest to urządzenie wywołujące impuls siłowy za pomocą ciężaru spadającego na płytę pomiarową (poprzez specjalnie zaprojektowany układ sprężyn). Płyta pomiarowa o średnicy 0,3 m spoczywała na nawierzchni. Impuls obciążenia trwał 20-25 milisekund. Wartość maksymalnej siły przekazywanej na nawierzchnię to około 57,5 kN, nacisk jednostkowy wynosił około 0,815 MPa. Podczas impulsu mierzone były ugięcia nawierzchni w osi obciążenia oraz w wybranych odległościach od osi obciążenia (max. 1,8 m). Zbiór takich ugięć wyznaczony na danym stanowisku pomiarowym tworzy tzw. „czasę ugięć”, która następnie wykorzystywana jest do identyfikacji modułów warstw i podłoża. Podczas badań nawierzchni w punktach pomiarowych ugięcia mierzone w następujących odległościach od osi obciążenia:  $d_1 = 0,0$  m;  $d_2 = 0,2$  m;  $d_3 = 0,3$  m;  $d_4 = 0,45$  m;  $d_5 = 0,6$  m;  $d_6 = 0,9$  m;  $d_7 = 1,2$  m;  $d_8 = 1,5$  m;  $d_9 = 1,8$  m. Badania przeprowadzono przy tempe-

Pavement structures on individual sections were as follows (thickness of the layers was determined afterwards based on cored samples):

Section 4:

- 8 cm of SMA 16 JENA asphalt mixture,
- 20.6 cm of MCAS+5C mixture,
- subgrade.

Section 3:

- 8.8 cm of SMA 16 JENA asphalt mixture,
- 19.0 cm of MCE+5C,
- subgrade.

Section 2:

- 8.9 cm of SMA 16 JENA asphalt mixture,
- 19.3 cm of MCAS+CEM mixture,
- subgrade.

Section 1:

- 9 cm of SMA 16 JENA asphalt mixture,
- 19.1 cm of MCE+CEM mixture,
- subgrade.

Two types of binders were used: bituminous binder in the form of foamed bitumen (in MCAS) or bituminous emulsion (in MCE) and hydraulic binder in the form of Portland cement (CEM I 32.5R) or the innovative three-component binder. Foamed bitumen and bituminous emulsion were produced using D70/100 road bitumen. The innovative hydraulic binder consisted of three components: 40% of CEM I 32.5R; 20% of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and 40% of CBPD (cement by-pass dust). The detailed proportions of the components used in the MCAS and MCE mixtures were as follows:

- foamed bitumen 70/100 or bitumen from bituminous emulsion – 3.0%,
- three-component hydraulic binder – 3.0%,
- natural aggregate from the existing base course 0/31.5 – 56.4%,
- recycled aggregate (reclaimed asphalt pavement) RAP 0/31.5 – 37.6%.

A monitoring system was also installed at the test site in order to observe changes in stresses and strains of the constructed pavements. Environmental parameters, such as temperature and humidity, were registered as well. Their analyses are described in separate papers.

raturze powietrza około 18°C. Temperatura warstwy nawierzchniowej z SMA wynosiła około 18°C, natomiast temperatura warstwy podbudowy wynosiła około 23°C. Na Rys. 2 przedstawiono schemat badania ugięć za pomocą ugięciomierza FWD. Na Rys. 3 pokazano urządzenie pomiarowe.

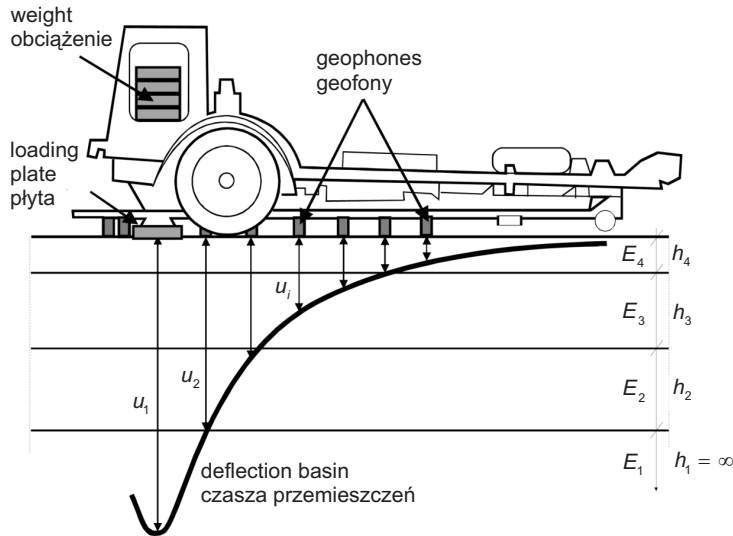


Fig. 2. Scheme of FWD deflection measurement  
Rys. 2. Schemat pomiaru za pomocą ugięciomierza FWD



Fig. 3. The FWD test device during measurements  
Rys. 3. Widok urządzenia pomiarowego FWD podczas badań

Pomiary czaszy ugięć rejestrowano przy pierwszym i drugim cyklu obciążenia. Pierwszy cykl obciążenia był cyklem stabilizującym. Do dalszych analiz przyjmowano pomiary z drugiego cyklu obciążenia. W Tabl. 1-4 zestawiono wyniki wykonanych na różnych sekcjach pomiarów ugięć nawierzchni pod obciążeniem FWD wraz z ich analizą statystyczną. Na Rys. 4-7 przedstawiono graficzną interpretację ugięć zarejestrowanych pośrodku płyty obciążającej (geofon 0,00) oraz pod geofonem ostatnim (w odległości 1,8 m od obciążenia).

### 3. PAVEMENT DEFLECTION MEASUREMENTS

Deflections at the surface of the wearing course were measured in June 2020 using a Falling Weight Deflectometer (FWD) device. The test device subjects the pavement to a load pulse produced by a weight dropped on a loading plate (using a specially designed system of springs). The circular load plate, with the diameter of 0.3 m, rests on the pavement surface. Duration of the load pulse was 20-25 milliseconds. The maximum force transferred onto the surface equaled approx. 57.5 kN, producing the pressure of approx. 0.815 MPa. Pavement surface deflections during the load pulse are measured by a set of sensors located at various distances along the same axis (max. 1.8 m). A set of deflection values determined for a single loading comprises a so-called “deflection basin”, which is subsequently used in determination of the moduli of pavement courses and subgrade. During the described tests, deflections caused by each pulse were determined at the following distances from the center of the loading plate:  $d_1 = 0$  m;  $d_2 = 0.2$  m;  $d_3 = 0.3$  m;  $d_4 = 0.45$  m;  $d_5 = 0.6$  m;  $d_6 = 0.9$  m;  $d_7 = 1.2$  m;  $d_8 = 1.5$  m;  $d_9 = 1.8$  m. Measurements were performed at the air temperature of approx. 18°C. Temperature of the SMA wearing course equaled approx. 18°C. Temperature of the base course equaled approx. 23°C. A scheme of FWD deflection measurement is shown in Fig. 2. The device itself is shown in Fig. 3.

Deflection basins were registered during the first and second loading cycles. The first loading cycle was treated as a stabilizing cycle. Further analyses were based on values obtained in the second loading cycle. Tables 1-4 show a comparison and statistical analysis of deflections obtained on different test sections using the FWD device. Figures 4-7 show graphical interpretation of deflections registered under the center of the loading plate (geophone 0.00) and under the most distant geophone (1.8 m from loading).

Table 1. Deflection values on section 4 with the MCAS+5C mixture  
 Tablica 1. Wyniki pomiarów ugięć na sekcji 4 z mieszanką MCAS+5C

Distance / Odległość [km]	Deflection measured by geophones / Ugięcie zmierzone przez geofony [mm]										
	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800	-200	-300
0.090	344.1	289.8	241.2	187.8	151.2	99.9	70	50.8	38.6	275.5	228.5
0.100	267.5	214	171.2	128.9	103.7	69.2	48.8	36.5	28	213.8	169.2
0.111	288	223.9	176.3	132.7	106.4	70.3	49.9	37.5	30.2	219.9	173.1
0.120	317.2	245	196.1	148.2	120.7	80.3	54.3	38.8	30	235.4	187
0.130	315.8	255.8	212.4	162.7	132.3	85.3	57.9	42.4	33.5	250.8	206.8
0.140	365.1	290.8	236.9	180.1	147	94.6	64	46.8	36.3	285.5	229.1
0.150	366.2	279.6	220.9	162.2	128.4	82.2	55.6	39.9	30.4	272.9	216.7
0.160	461	359.5	286.1	209.1	166.3	102.9	66.5	46.3	35.4	352.8	282.3
0.170	307.5	250.1	204.6	155.7	127.6	89.9	64.7	47.6	36.7	232.7	188
0.174	387.1	316.1	260.3	200.8	163.6	109.3	75.6	52.4	38.8	307.6	248.5
min	267.5	214.0	171.2	128.9	103.7	69.2	48.8	36.5	28.0	213.8	169.2
max	461.0	359.5	286.1	209.1	166.3	109.3	75.6	52.4	38.8	352.8	282.3
Mean / Średnia	342.0	272.5	220.6	166.8	134.7	88.4	60.7	43.9	33.8	264.7	212.9
Standard deviation Odchylenie standardowe	56.1	44.1	36.3	27.2	21.9	13.5	8.8	5.7	3.9	43.3	35.6
50th percentile / Percentyl 50%	330.7	267.7	216.7	162.5	130.4	87.6	61.0	44.4	34.5	261.9	211.8
75th percentile / Percentyl 75%	365.9	290.6	240.1	185.9	150.2	98.6	66.1	47.4	36.6	283.0	229.0
80th percentile / Percentyl 80%	370.4	295.9	245.0	190.4	153.7	100.5	67.2	48.2	37.1	289.9	233.0
90th percentile / Percentyl 90%	394.5	320.4	262.9	201.6	163.9	103.5	70.6	51.0	38.6	312.1	251.9
95th percentile / Percentyl 95%	427.8	340.0	274.5	205.4	165.1	106.4	73.1	51.7	38.7	332.5	267.1
Coefficient of variation Współczynnik zmienności	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2

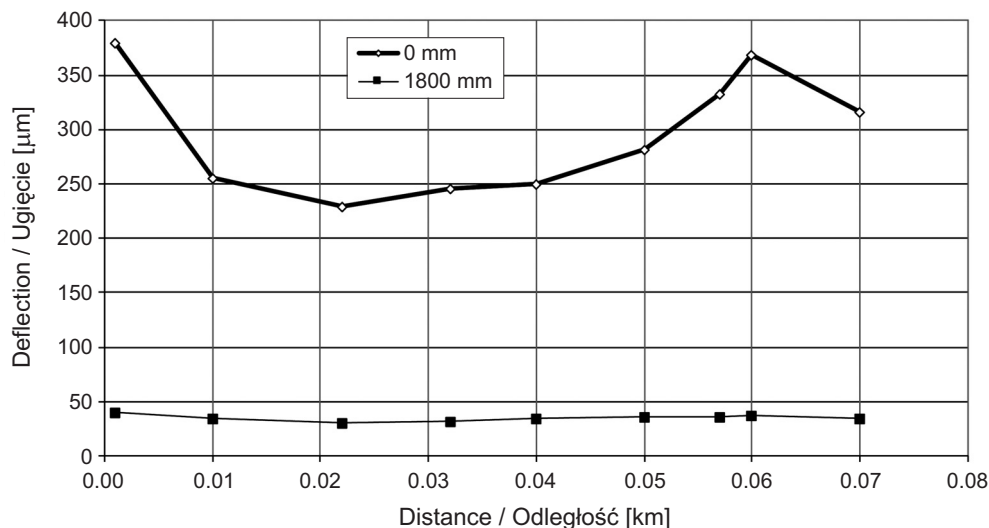


Fig. 4. Graphical illustration of pavement deflections under the “zero” geophone (under the center of the plate) and at 1.8 m from the center of the plate, section 4 with the MCAS+5C mixture

Rys. 4. Ilustracja graficzna ugięć nawierzchni pod geofonem zerowym (pośrodku płyty) oraz w odległości 1,8 m od środka płyty, sekcja 4 z mieszanką MCAS+5C

Table 2. Deflection values on section 3 with the MCE+5C mixture  
 Tablica 2. Wyniki pomiarów ugięć na sekcji 3 z mieszanką MCE+5C

Distance / Odległość [km]	Deflection measured by geophones / Ugięcie zmierzone przez geofony [mm]										
	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800	-200	-300
0.090	344.1	289.8	241.2	187.8	151.2	99.9	70	50.8	38.6	275.5	228.5
0.100	267.5	214	171.2	128.9	103.7	69.2	48.8	36.5	28	213.8	169.2
0.111	288	223.9	176.3	132.7	106.4	70.3	49.9	37.5	30.2	219.9	173.1
0.120	317.2	245	196.1	148.2	120.7	80.3	54.3	38.8	30	235.4	187
0.130	315.8	255.8	212.4	162.7	132.3	85.3	57.9	42.4	33.5	250.8	206.8
0.140	365.1	290.8	236.9	180.1	147	94.6	64	46.8	36.3	285.5	229.1
0.150	366.2	279.6	220.9	162.2	128.4	82.2	55.6	39.9	30.4	272.9	216.7
0.160	461	359.5	286.1	209.1	166.3	102.9	66.5	46.3	35.4	352.8	282.3
0.170	307.5	250.1	204.6	155.7	127.6	89.9	64.7	47.6	36.7	232.7	188
0.174	387.1	316.1	260.3	200.8	163.6	109.3	75.6	52.4	38.8	307.6	248.5
min	267.5	214.0	171.2	128.9	103.7	69.2	48.8	36.5	28.0	213.8	169.2
max	461.0	359.5	286.1	209.1	166.3	109.3	75.6	52.4	38.8	352.8	282.3
Mean / Średnia	342.0	272.5	220.6	166.8	134.7	88.4	60.7	43.9	33.8	264.7	212.9
Standard deviation Odchylenie standardowe	56.1	44.1	36.3	27.2	21.9	13.5	8.8	5.7	3.9	43.3	35.6
50th percentile / Percentyl 50%	330.7	267.7	216.7	162.5	130.4	87.6	61.0	44.4	34.5	261.9	211.8
75th percentile / Percentyl 75%	365.9	290.6	240.1	185.9	150.2	98.6	66.1	47.4	36.6	283.0	229.0
80th percentile / Percentyl 80%	370.4	295.9	245.0	190.4	153.7	100.5	67.2	48.2	37.1	289.9	233.0
90th percentile / Percentyl 90%	394.5	320.4	262.9	201.6	163.9	103.5	70.6	51.0	38.6	312.1	251.9
95th percentile / Percentyl 95%	427.8	340.0	274.5	205.4	165.1	106.4	73.1	51.7	38.7	332.5	267.1
Coefficient of variation Współczynnik zmienności	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2

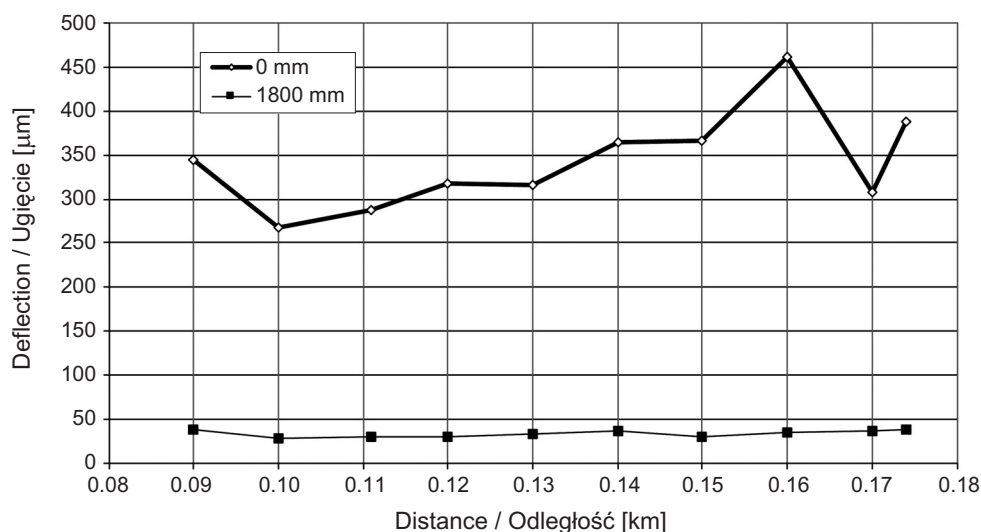


Fig. 5. Graphical illustration of pavement deflections under the “zero” geophone (under the center of the plate) and at 1.8 m from the center of the plate, section 3 with the MCE+5C mixture

Rys. 5. Ilustracja graficzna ugięć nawierzchni pod geofonem zerowym (pośrodku płyty) oraz w odległości 1,8 m od środka płyty, sekcja 3 z mieszanką MCE+5C



Table 3. Deflection values on section 2 with the MCAS+CEM mixture  
 Tablica 3. Wyniki pomiarów ugięć na sekcji 2 z mieszanką MCAS+CEM

Distance / Odległość [km]	Deflection measured by geophones / Ugięcie zmierzone przez geofony [mm]										
	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800	-200	-300
0.001	380.9	280.4	226.6	180.4	147.5	103.4	71.6	51.9	38.5	308	235.7
0.01	254	219.1	192.7	158.2	136.1	96	67.8	50.4	39.5	220.7	196.2
0.02	184.6	155	133.1	107.2	92.9	66.9	50.2	39.1	31.1	150.3	129
0.03	233.9	186.5	152.4	117.1	96.4	65.8	48	36.9	29.7	182.1	149
0.04	235.5	198.2	168.9	134.2	111.6	74.8	53.1	40.7	32.1	186.6	158.5
0.05	218.1	181.8	156.9	126.5	107.2	75.6	55.2	42.7	34.1	178.8	153.6
0.057	207.1	176.2	151.4	123.2	103.8	72.8	52.8	40.3	32.5	174.5	146.9
0.06	231	188	157.7	122.6	103.5	73.5	54.3	42.2	33.6	187.2	155.2
0.07	220	176.6	144.5	110.9	90.2	63.5	46.9	37	30	172.9	141.9
0.077	244.9	194.9	158.9	121.1	99.2	68.4	50.4	39.3	31.5	191.6	153.9
min	184.6	155.0	133.1	107.2	90.2	63.5	46.9	36.9	29.7	150.3	129.0
max	380.9	280.4	226.6	180.4	147.5	103.4	71.6	51.9	39.5	308.0	235.7
Mean / Średnia	241.0	195.7	164.3	130.1	108.8	76.1	55.0	42.1	33.3	195.3	162.0
Standard deviation Odchylenie standardowe	53.0	34.1	26.9	22.6	18.7	13.2	8.2	5.2	3.3	43.3	31.1
50th percentile / Percentyl 50%	232.5	187.3	157.3	122.9	103.7	73.2	53.0	40.5	32.3	184.4	153.8
75th percentile / Percentyl 75%	242.6	197.4	166.4	132.3	110.5	75.4	55.0	42.6	34.0	190.5	157.7
80th percentile / Percentyl 80%	246.7	202.4	173.7	139.0	116.5	79.7	57.7	44.2	35.0	197.4	166.0
90th percentile / Percentyl 90%	266.7	225.2	196.1	160.4	137.2	96.7	68.2	50.6	38.6	229.4	200.2
95th percentile / Percentyl 95%	323.8	252.8	211.4	170.4	142.4	100.1	69.9	51.2	39.1	268.7	217.9
Coefficient of variation Współczynnik zmienności	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2

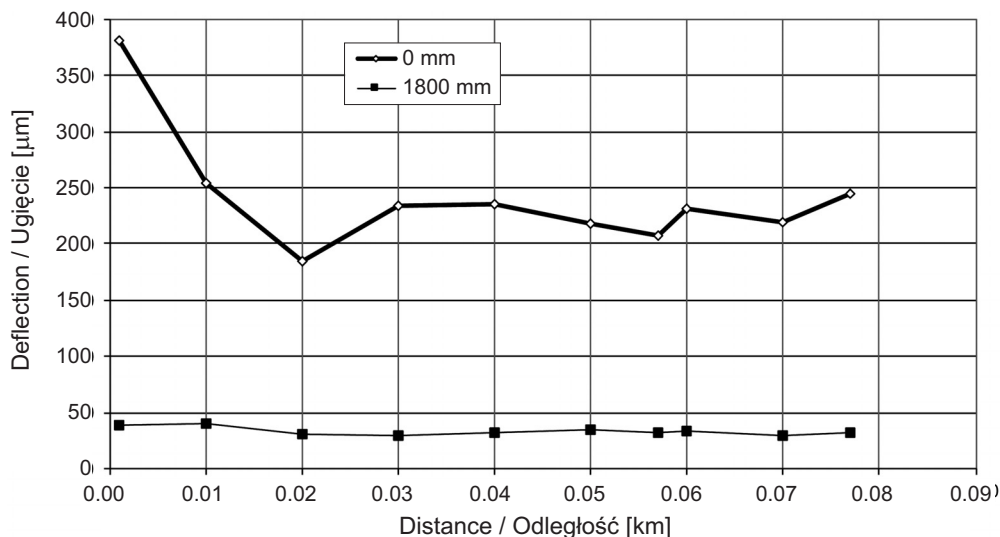


Fig. 6. Graphical illustration of pavement deflections under the “zero” geophone (under the center of the plate) and at 1.8 m from the center of the plate, section 2 with the MCAS+CEM mixture

Rys. 6. Ilustracja graficzna ugięć nawierzchni pod geofonem zerowym (pośrodku płyty) oraz w odległości 1,8 m od środka płyty, sekcja 2 z mieszanką MCAS+CEM

Table 4. Deflection values on section 1 with the MCE+CEM mixture  
 Tablica 4. Wyniki pomiarów ugięć na sekcji 1 z mieszanką MCE+CEM

Distance / Odległość [km]	Deflection measured by geophones / Ugięcie zmierzone przez geofony [mm]										
	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800	-200	-300
0.084	259.7	200	155.2	117.7	95.4	64.8	47.6	37.6	30	192.4	150.1
0.09	312.4	242.4	194	144.9	112	74.2	52.8	40.2	31.8	238.5	184.1
0.1	262.9	199.3	152	109.4	88.5	59.5	44.1	34.3	27.9	194.5	149.5
0.111	177.2	134.7	108.9	83.2	71	50.6	37.9	30.3	24.1	130	104.1
0.121	166.8	133.1	110.6	89.1	74.8	52.3	38.6	30.5	24.7	128.4	106.6
0.131	217.9	170.9	143.5	114.5	96.4	67.1	48.1	35.5	27.9	169.6	141.2
0.14	205.9	161.4	133.2	107.2	89.5	61.9	44.8	33.8	27.4	155.3	130.3
0.15	242.6	196	161.3	128	106.3	72	49.9	37	28.7	188.7	155.8
0.16	278.1	216.3	174.8	135	113.5	78.7	55.6	40.4	31	211.9	172.8
0.17	282.1	216.6	172.1	130.4	106.9	73.6	51.7	37.9	29.2	209.6	164.3
0.178	304.6	225.9	170.1	124	100.4	71.2	53.6	41.7	32.3	218.9	170.2
min	166.8	133.1	108.9	83.2	71.0	50.6	37.9	30.3	24.1	128.4	104.1
max	312.4	242.4	194.0	144.9	113.5	78.7	55.6	41.7	32.3	238.5	184.1
Mean / Średnia	246.4	190.6	152.3	116.7	95.9	66.0	47.7	36.3	28.6	185.3	148.1
Standard deviation Odchylenie standardowe	49.1	36.2	26.7	18.8	14.1	9.1	5.9	3.8	2.6	35.8	26.0
50th percentile / Percentyl 50%	259.7	199.3	155.2	117.7	96.4	67.1	48.1	37.0	28.7	192.4	150.1
75th percentile / Percentyl 75%	280.1	216.5	171.1	129.2	106.6	72.8	52.3	39.1	30.5	210.8	167.3
80th percentile / Percentyl 80%	282.1	216.6	172.1	130.4	106.9	73.6	52.8	40.2	31.0	211.9	170.2
90th percentile / Percentyl 90%	304.6	225.9	174.8	135.0	112.0	74.2	53.6	40.4	31.8	218.9	172.8
95th percentile / Percentyl 95%	308.5	234.2	184.4	140.0	112.8	76.5	54.6	41.1	32.1	228.7	178.5
Coefficient of variation Współczynnik zmienności	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2

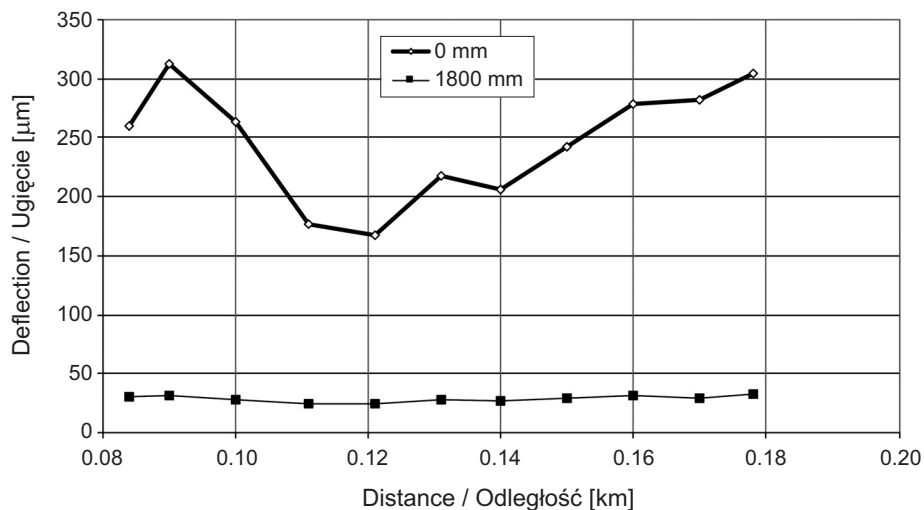


Fig. 7. Graphical illustration of pavement deflections under the “zero” geophone (under the center of the plate) and at 1.8 m from the center of the plate, section 1 with the MCE+CEM mixture

Rys. 7. Ilustracja graficzna ugięć nawierzchni pod geofonem zerowym (pośrodku płyty) oraz w odległości 1,8 m od środka płyty, sekcja 1 z mieszanką MCE+CEM

Na Rys. 8 pokazano porównanie wartości średnich ugięć uzyskanych w osi obciążenia dla badanych sekcji nawierzchni.

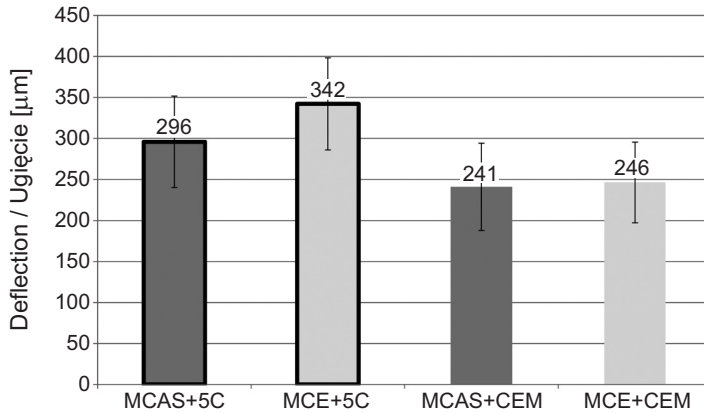


Fig. 8. Comparison of mean deflections obtained for the tested pavement sections

Rys. 8. Zestawienie wartości średnich ugięć uzyskanych dla badanych sekcji nawierzchni

Należy zauważyć, że największe ugięcia uzyskano dla mieszanki MCE+5C. Wartość ta jest o ponad 41% większa niż wartość ugięć MCAS+CEM oraz 38% większa niż wartość ugięć MCE+CEM. Wartości ugięć są większe dla mieszanek ze spoiwem. Nieco większa podatność tych mieszanek może być korzystna w ograniczeniu procesów spękania, które często zachodzą w mieszankach związanych spoiwami hydraulicznymi. Dokładniejsza analiza czasz ugięć (Rys. 9) pozwoli na zweryfikowanie przydatności spoiwa w perspektywie trwałości zmęczeniowej podbudowy.

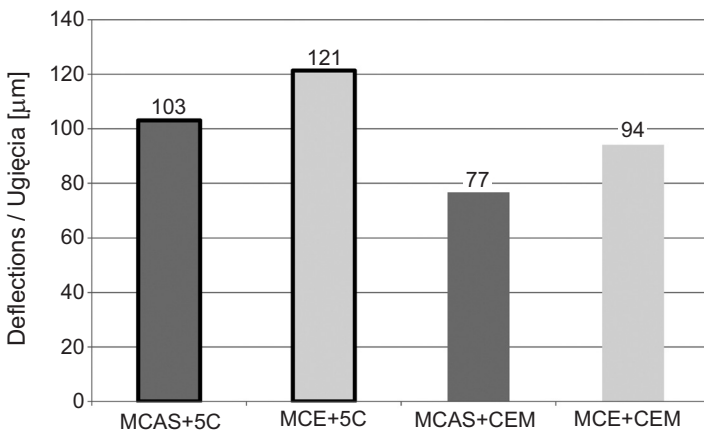


Fig. 10. Comparison of  $SCI_{300}$  index values obtained for the analyzed test sections

Rys. 10. Zestawienie wskaźnika krzywizny ugięcia  $SCI_{300}$  uzyskanego dla badanych sekcji nawierzchni

Analiza wskaźnika krzywizny ugięcia  $SCI_{300}$  (Rys. 10), tj. różnicy ugięć w centrum obciążenia 0 mm  $d_1$  i 300 mm od

Fig. 8 shows a comparison of mean deflections obtained in the axis of loading for individual pavement sections.

It should be noted that the greatest deflections were displayed by the MCE+5C mixture. In comparison with MCAS+CEM and MCE+CEM, the observed value is greater by 41% and 38%, respectively. Deflections are greater for the mixtures with the three-component hydraulic binder. Slightly higher flexibility of these mixtures may contribute to mitigation of cracking processes that frequently occur in hydraulically-bound mixtures. A more detailed analysis of deflection basins (Fig. 9) will enable verification of suitability of the binder in terms of fatigue life of the base course.

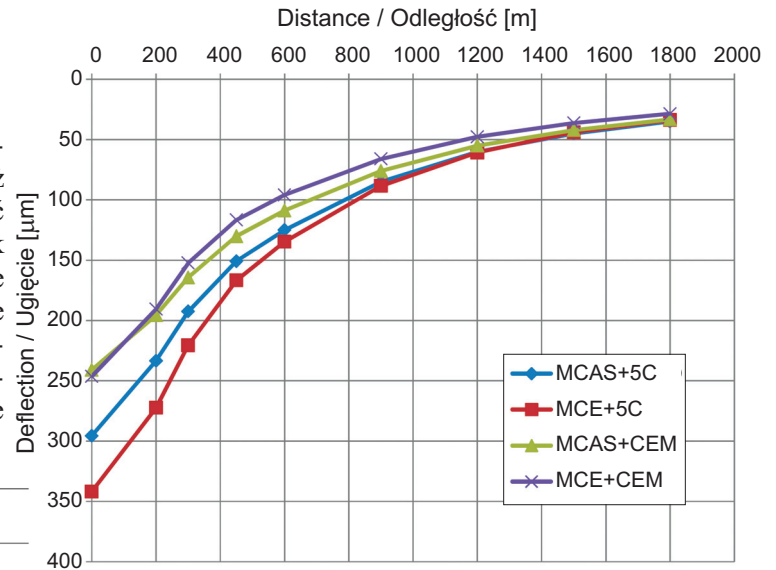


Fig. 9. Comparison of mean deflection basins obtained for the analyzed test sections

Rys. 9. Zestawienie średnich czasz ugięć uzyskanych dla badanych sekcji nawierzchni

Analysis of the surface curvature index  $SCI_{300}$  (Fig. 10), i.e. the difference between deflections in the center of the plate  $d_1$  and at 300 mm from the center  $d_3$ , shows that mixtures with the innovative hydraulic binder display values greater by about 30%. Higher values of the  $SCI_{300}$  index indicate a more flexible pavement structure, i.e. a less rigid base course. Lower stiffness of the base course will mitigate shrinkage cracking and, in consequence, may prevent reflective cracking in the asphalt mixtures.

środku przyłożenia obciążenia  $d_3$ , wskazuje dla mieszanek zawierających innowacyjne spoiwo na wartości większe o około 30%. Większe wartości wskaźnika  $SCI_{300}$  wskazują na bardziej podatną konstrukcję nawierzchni, tj. mniejszą sztywność podbudowy. Mniejsza sztywność podbudowy zapewni ograniczenie spękań skurczowych, a tym samym może zapobiec pojawieniu się spękań odbitych w warstwach z mieszanek mineralno-asfaltowych.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W niniejszym artykule przedstawiono możliwości wykorzystania innowacyjnego spoiwa w podbudowach nawierzchni drogowych. Uzyskane wyniki pomiarów ugięć mierzonych ugięciomierzem FWD na konstrukcjach nawierzchni wybudowanych na doświadczalnym odcinku wykazują różnicowanie na czterech sekcjach zawierających mieszanki mineralne z różnymi spoiwami: innowacyjnym spoiwem trójskładnikowym oraz cementem. Różnicowanie występuje także w zakresie technologii asfaltu spienionego i emulsji asfaltowej. Dla mieszanek ze spoiwem innowacyjnym stwierdzono większe wartości ugięć (o około 40%) oraz wskaźnika  $SCI_{300}$  (o około 30%) w stosunku do mieszanek z cementem, co świadczy o mniejszej sztywności warstwy. Dzięki temu mieszanki te będą lepiej ograniczały procesy spękania niż sztywne podbudowy na bazie cementu. Autorzy planują przeprowadzenie podobnych badań w 2023 roku celem dokonania oceny zmian sztywności warstw w czasie. W dalszych publikacjach autorzy rozwiną tę tematykę w zakresie identyfikacji modułów sztywności warstw oraz oceny trwałości podbudów z innowacyjnym środkiem wiążącym.

#### INFORMACJE DODATKOWE

Niniejsza publikacja została opracowana w ramach projektu TECHMATSTRATEG1/349326/9/NCBR/2017.

#### BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Leek C., Jameson G.: Review of Foamed Bitumen Stabilisation Mix Design Methods. Austroads, Sydney, 2011
- [2] Azam A.M., Cameron D.A.: Geotechnical properties of blends of recycled clay masonry and recycled concrete aggregates in unbound pavement construction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **25**, 6, 2013, 788-798, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000634
- [3] Jiménez J.R., Agrela F., Ayuso J., López M.: A comparative study of recycled aggregates from concrete and mixed debris as material for unbound road sub-base. *Materiales de Construcción*, **61**, 302, 2011, 289-302, DOI: 10.3989/mc.2010.54009
- [4] Vegas I., Ibañez J.A., Lisbona A., de Cortazar A.S., Frías M.: Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections. *Construction and Building Materials*, **25**, 5, 2011, 2674-2682, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.12.018

#### 4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

This article presents the potential of use of an innovative hydraulic binder in road base courses. The deflection values measured with an FWD device on pavements constructed at the test site indicate differences between the four test sections incorporating two different hydraulic binders: cement and the innovative three-component binder. Differences were also observed between mixtures using the foamed bitumen and bituminous emulsion technologies. It was noted that mixtures containing the innovative hydraulic binder displayed greater values of deflections (by about 40%) and  $SCI_{300}$  index (by about 30%) than mixtures containing cement, which indicates lower stiffness. Due to this fact, mixtures with the innovative three-component binder will reduce cracking processes more effectively than rigid cement-based mixtures. The authors plan to perform similar research in 2023 in order to assess the changes in stiffness over time. In future publications the authors will further develop the subject matter in the scope of determination of layer stiffness moduli and evaluation of service life of base courses containing the innovative hydraulic binder.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

This publication was developed as part of the project TECHMATSTRATEG1/349326/9/NCBR/2017.

- [5] Liu L., Li Z., Congress S.S.C., Liu X., Dai B.: Evaluating the influence of moisture on settling velocity of road embankment constructed with recycled construction wastes. *Construction and Building Materials*, **241**, 2020, 117988, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117988
- [6] Soleimanbeigi A., Edil T.B.: Compressibility of recycled materials for use as highway embankment fill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **141**, 5, 2015, ID article: 04015011, DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001285
- [7] Huber S., Henzinger C., Heyer D.: Influence of water and frost on the performance of natural and recycled materials used in unpaved roads and road shoulders. *Transportation Geotechnics*, **22**, 2020, 100305, DOI: 10.1016/j.trgeo.2019.100305
- [8] López-Alonso M., Martínez-Echevarria M.J., Garach L., Galán A., Ordoñez J., Agrela F.: Feasible use of recycled alumina combined with recycled aggregates in road construction. *Construction and Building Materials*, **195**, 2019, 249-257, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.084
- [9] Norambuena-Contreras J., Quilodran J., Gonzalez-Torre I., Chavez M., Borinaga-Treviño R.: Electrical and thermal characterization of cement-based mortars containing recycled metallic waste. *Journal of Cleaner Production*, **190**, 2018, 737-751, DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.176

- [10] Mackiewicz P., Krawczyk B., Dobrucki D.: Use of plastic waste in materials for road pavement construction and improved subgrade. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **21**, 3, 2022, 203-216, DOI: 10.7409/rabdim.022.012
- [11] Moghaddam T.B., Karim M.R., Soltani M.: Utilization of waste plastic bottles in asphalt mixture. *Journal of Engineering Science and Technology*, **8**, 3, 2013, 264-271
- [12] Abdullah M.E., Abd Kader S.A., Putra Jaya R., Yaacob H., Abdul Hassan N., Che Wan C.N.: Effect of Waste Plastic as Bitumen Modified in Asphalt Mixture. *MATEC Web of Conferences*, **103**, 2017, 09018, DOI: 10.1051/mateconf/201710309018
- [13] Skotnicki Ł., Kuźniewski J., Szydło A.: Research on the Properties of Mineral-Cement Emulsion Mixtures Using Recycled Road Pavement Materials. *Materials*, **14**, 3, 2021, 563, DOI: 10.3390/ma14030563
- [14] Halles F.A., Thenoux G.Z.: Degree of Influence of Active Fillers on Properties of Recycled Mixes with Foamed Asphalt. *Transportation Research Record*, **2095**, 1, 2009, 127-135, DOI: 10.3141/2095-13
- [15] Buczyński P., Iwański M.: The Influence of Hydrated Lime, Portland Cement and Cement Dust on Rheological Properties of Recycled Cold Mixes with Foamed Bitumen. in: *Proceedings of the 10th International Conference "Environmental Engineering"*, Vilnius Gediminas Technical University Press "Technika", Vilnius, 2017, DOI: 10.3846/enviro.2017.135
- [16] Yan J., Ni F., Yang M., Li J.: An experimental study on fatigue properties of emulsion and foam cold recycled mixes. *Construction and Building Materials*, **24**, 11, 2010, 2151-2156, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.044
- [17] Modarres A., Nejad F.M., Kavussi A., Hassani A., Shabanzadeh E.: A parametric study on the laboratory fatigue characteristics of recycled mixes. *Construction and Building Materials*, **25**, 4, 2011, 2085-2093, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.030
- [18] Godenzoni C., Graziani A., Perraton D.: Complex modulus characterisation of cold-recycled mixtures with foamed bitumen and different contents of reclaimed asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, **18**, 1, 2017, 130-150, DOI: 10.1080/14680629.2016.1142467
- [19] Buczyński P., Iwański M.: Complex modulus change within the linear viscoelastic region of the mineral-cement mixture with foamed bitumen. *Construction and Building Materials*, **172**, 2018, 52-62, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.214
- [20] Godenzoni C., Graziani A., Bocci E., Bocci M.: The evolution of the mechanical behaviour of cold recycled mixtures stabilised with cement and bitumen: field and laboratory study. *Road Materials and Pavement Design*, **19**, 4, 2018, 856-877, DOI: 10.1080/14680629.2017.1279073
- [21] Dołycki B., Jaczewski M., Szydłowski C.: The Impact of Long-Time Chemical Bonds in Mineral-Cement-Emulsion Mixtures on Stiffness Modulus. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, **13**, 2, 2018, 121-126, DOI: 10.7250/bjrbe.2018-13.406
- [22] Mazurek G., Iwański M., Buczyński P., Horodecka R.: Influence of innovative three-element binder on permanent deformations in recycled mixtures with emulsion and foamed bitumen. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **21**, 2, 2021, 55, DOI: 10.1007/s43452-021-00192-9
- [23] Kuźniewski J., Skotnicki Ł.: Properties of mineral-cement emulsion mixtures based on concrete aggregates from recycling. *Case Studies in Construction Materials*, **12**, 2020, ID article: e00309, DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00309
- [24] Mazurek G., Buczyński P., Iwański M., Podsiadło M.: Thermal Analysis-Based Field Validation of the Deformation of a Recycled Base Course Made with Innovative Road Binder. *Materials*, **14**, 20, 2021, 5925, DOI: 10.3390/ma14205925
- [25] Mazurek G., Buczyński P., Iwański M., Horodecka R.: Influence of a three-component hydraulic binder on the properties of recycled base course with foamed bitumen and bituminous emulsion: a field investigation. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **21**, 4, 2022, 309-329, DOI: 10.7409/rabdim.022.018