



GRZEGORZ MAZUREK¹⁾
 PRZEMYSŁAW BUCZYŃSKI²⁾
 MAREK IWAŃSKI³⁾
 RENATA HORODECKA⁴⁾

INFLUENCE OF A THREE-COMPONENT HYDRAULIC BINDER ON THE PROPERTIES OF RECYCLED BASE COURSE WITH FOAMED BITUMEN AND BITUMINOUS EMULSION: A FIELD INVESTIGATION

WPŁYW TRÓJSKŁADNIKOWEGO SPOIWA HYDRAULICZNEGO NA WŁAŚCIWOŚCI RECYKLOWANEJ PODBUDOWY Z ASFALTEM SPIENIONYM ORAZ EMULSJĄ ASFALTOWĄ: BADANIA TERENOWE

STRESZCZENIE. W artykule zaprezentowano wyniki badań wpływu rodzaju środków wiążących hydraulicznych i asfaltowych na właściwości recyklowanej podbudowy na zimno (RCM). W składzie recyklowanej mieszanki na zimno zastosowano dwa typy środków wiążących, tj. lepiszcze asfaltowe w postaci asfaltu spienionego lub emulsji asfaltowej oraz cement portlandzki (CEM I 32,5R) lub trójskładnikowe spoiwo hydrauliczne. Spoiwo hydrauliczne zostało wytworzone poprzez wymieszanie trzech bazowych składników w następujących proporcjach: 40% CEM-I-32,5R; 20% Ca(OH)₂ oraz 40% UCPP (ubocznych cementowych produktów pylistych). Recyklowane mieszanki na zimno wytworzono w warunkach przemysłowych w ramach odcinka doświadczalnego. Gotową recyklowaną mieszankę na zimno z emulsją asfaltową (EB-RCM) oraz asfaltem spienionym (FB-RCM) pobrano z odcinka doświadczalnego i zagęszczono w warunkach laboratoryjnych. Wpływ typu technologii oraz środka wiążącego oceniono w oparciu o właściwości fizyczne i mechaniczne takie jak: zawartość wolnych przestrzeni, wytrzymałość na pośrednie rozciąganie, moduł sztywności w +5°C oraz +25°C, wytrzymałość na osiowe ściskanie oraz szybkość pełzania. Stwierdzono, że niezależnie od rodzaju zastosowanego lepiszcza asfaltowego (rodzaju technologii) zastosowanie trójskładnikowego spoiwa hydraulicznego w składzie recyklowanej podbudowy spowodowało wzrost kohezji oraz spadek sztywności w temperaturze +5°C. Ponadto spadek wytrzymałości na ściskanie mieszanki FB-RCM zawierającej trójskładnikowe spoiwo hydrauliczne nie spowodował wzrostu szybkości przyrostu deformacji. Monitoring czynników środowiskowych wskazał, że recyklowane mieszanki zachowują stałą wartość wilgotności w czasie.

SŁOWA KLUCZOWE: analiza kontrastów, asfalt spieniony, drogowe spoiwo hydrauliczne, emulsja asfaltowa, recyklowana mieszanka na zimno.

ABSTRACT. The article presents an investigation of the effect of the type of hydraulic and bituminous binders on the properties of the obtained cold-recycled base course. The cold-recycled mixtures included two types of binder components, i.e. bituminous binder (in the form of foamed bitumen or bituminous emulsion) and hydraulic binder: Portland cement (CEM I 32.5) or a three-component hydraulic binder. The three-component hydraulic binder was produced by mixing basic components in the following proportions: 40% of CEM-I-32.5R cement; 20% of Ca(OH)₂ and 40% of CBPD (cement by-pass dust). Cold-recycled mixtures were produced at the test site under industrial conditions. Ready mixtures with bituminous emulsion (EB-RCM) and foamed bitumen (FB-RCM) were sampled from the test sections and compacted in laboratory conditions. The influence of the used technology and binder types was assessed based on physical and mechanical properties, such as: air void content, indirect tensile strength, stiffness modulus at +5°C and +25°C, compressive strength and creep rate. It was observed that usage of the three-component hydraulic binder in the composition of the recycled base course mixture provided increased cohesion and reduced stiffness at +5°C, regardless of the type of bituminous binder technology used. Moreover, the noted decrease in compressive strength of the FB-RCM mixture containing the three-component hydraulic binder did not result in an increased creep rate. Monitoring of environmental factors indicated that the recycled mixtures maintained stable moisture content.

DOI: 10.7409/rabdim.022.018

KEYWORDS: bituminous emulsion, cold-recycled mixture, contrast analysis, foamed bitumen, hydraulic road binder.

¹⁾ Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce; gmazurek@tu.kielce.pl

²⁾ Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej; p.buczynski@tu.kielce.pl

³⁾ Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej; miwanski@tu.kielce.pl (✉)

⁴⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; rhorodecka@ibdim.edu.pl

1. WSTĘP

Realizowana na całym świecie polityka proekologiczna przyczynia się do rozwoju technologii zapewniających zmniejszenie zużycia energii, ograniczenie zanieczyszczeń oraz redukcję degradacji środowiska naturalnego. W drogownictwie dąży się również do stosowania jak najbardziej proekologicznych lepiszczy [1-4]. Należy zaznaczyć, że nadprodukcja materiałów ubocznych wynika z procesu technologicznego wykorzystywanego do wytwarzania materiałów i półproduktów [5]. Do takich procesów można zaliczyć między innymi budowę dróg, w ramach których występuje szereg prac związanych z rozbiórką zniszczonych nawierzchni. W celu zmniejszenia produkcji materiału odpadowego stosowane są technologie recyklingu [6, 7]. Jedną z powszechnie stosowanych technologii umożliwiających zagospodarowanie materiału odpadowego jest technologia recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spionym [8] oraz emulsją asfaltową [9, 10]. Technologie te są stosowane na szeroką skalę do przebudów dróg zarówno w Polsce [6, 11-12], jak i na całym świecie [13-16]. Zastosowanie destruktu asfaltowego (RAP) powyżej 50% (jak wskazują pozytywne wyniki badań [17]) oraz kruszywa z betonu cementowego w ilości do 50% [18] nie wpływa niekorzystnie na właściwości mieszanki mineralno-cementowej z asfaltem spionym (MCAS). Dodatkowo należy wskazać, że możliwość wykonania podbudowy zasadniczej z mieszanki MCE lub MCAS w technologii „na miejscu” [19], przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów rozbiórki i wywozu pozyskanego materiału ze zniszczonych warstw konstrukcji nawierzchni drogowej, pozwala ograniczyć koszty przebudowy drogi. Aktualnie rozwiązanie to wprowadzono w zakresie typowych układów warstw konstrukcji nawierzchni [20], natomiast – jak wykazały badania przeprowadzone w ramach projektu Techmatstrateg I [21] – możliwe jest rozszerzenie zastosowania technologii recyklingu głębokiego na zimno do kategorii ruchu KR5-7, ale z zachowaniem wymogu wykonania mieszanki MCAS w technologii „in plant” [19].

W porównaniu do mieszanek MCE wymierną korzyścią stosowania mieszanek MCAS jest możliwość zastosowania w ich składzie materiału mineralnego o uziarnieniu poniżej 0,063 mm w ilości do 20% (m/m) [22]. W przypadku mieszanek MCE jego ilość powinna wynosić do 12% (m/m) [23]. Stosowanie kruszyw drobnych i o ciągłym uziarnieniu o zapyleniu zbliżonym do 16% (m/m) w produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych wymusza ich odpylanie. Poprawa parametrów fizycznych kruszywa drobnego i o ciągłym uziarnieniu wynikająca z odpylania na WMB generuje duże ilości pyłów mineralnych zalegających w wytwórniach WMB w postaci hałd. Dlatego z ekologicznego oraz ekonomicznego punktu widzenia poszukiwanie możliwości zastosowania

1. INTRODUCTION

The pro-ecological policies that are being implemented worldwide contribute to development of technologies that reduce energy consumption, limit pollution and mitigate degradation of the natural environment. In road engineering, the aims include usage of the most ecological binders [1-4]. It should be noted that excess of by-products results from the technological processes used for manufacture of materials and semi-finished products [5]. Road construction may be qualified as one of such processes, as it encompasses various activities related to removal of distressed pavements. In order to reduce the production of waste material, recycling technologies are applied [6, 7]. One of the most common technologies that enable reuse of waste material is deep cold recycling with foamed bitumen [8] or bituminous emulsion [9, 10]. These technologies are widely applied in road reconstruction, both in Poland [6, 11-12] and internationally [13-16]. Usage of reclaimed asphalt pavement (RAP) material in quantity above 50% (as indicated by the positive research results [17]) and recycled cement concrete in quantity of up to 50% [18] does not negatively affect the properties of mineral-cement mixture with foamed bitumen (MCAS). It should also be noted that the possibility of production of MCE and MCAS base course mixtures “in place” [19], combined with simultaneous reduction in the costs of removal and transportation of the reclaimed pavement material, enable savings on the entire road reconstruction project. This solution is provided for in the scope of the current Polish catalog of typical pavement structures [20], whereas – as indicated by the research performed under the Techmatstrateg I project [21] – it is possible to apply deep cold recycling technology in a wider range of structures, including those designed for the higher KR5-7 traffic categories, provided that MCAS mixtures are produced “in plant”, as required in [19].

A quantifiable advantage of MCAS mixtures over MCE mixtures lies in the fact that it is possible to use fine mineral material with particle size below 0.063 mm at quantities reaching 20% (m/m) [22]. In the case of MCE mixtures its content should not exceed 12% (m/m) [23]. Usage of fine and continuously-graded aggregates with dust content reaching 16% (m/m) makes de-dusting a necessity in production of asphalt mixtures. While de-dusting improves physical parameters of aggregate, it also generates considerable quantities of mineral dust that are stored in heaps in asphalt mixture plants. Therefore, from the ecological and economical perspective, it is necessary to seek opportunities to utilize this material.

tego materiału jest koniecznością. Potencjał do utylizacji pyłu mineralnego w technologii recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym wynika ze składu mieszanki mineralnej określonego według krzywej dobrego uziarnienia, która umożliwia zastosowanie materiału drobnociarnistego w ilości od 5% do 20%. Zastosowanie drobnych cząstek poniżej 0,063 mm w zakresie od 5% do 20% warunkuje prawidłowe wykonanie mieszanki mineralnej z asfaltem spienionym. W przypadku zbyt małej zawartości cząstek drobnych w mieszance recyklowanej nie powstanie przestrzenna matryca wypełnierz-asfalt i tym samym mieszanka taka nie uzyska odpowiedniej kohezji. Wówczas pęcherze asfaltu spienionego przedwcześnie pękają i niemożliwe jest prawidłowe połączenie z drobnociarnistym materiałem. Lepiszczko po spienieniu i zetknięciu się z materiałem mineralnym tworzy „nitki” [19] zawierające dużą ilość frakcji piaskowej i drobnociarnistej. Duża ilość lepiszcza niezwiązanego w prawidłowy sposób z frakcją poniżej 0,063 mm przyczynia się do tworzenia skupisk asfaltu, który w mieszance MCAS pełni funkcję smaru.

Analiza literatury wskazuje, że obecnie w technologii recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym (MCAS) i emulsją asfaltową (MCE) najczęściej stosowanym spoiwem hydraulicznym jest cement portlandzki. Szczegółowe rozpoznanie wpływu ilości cementu portlandzkiego i asfaltu spienionego na właściwości recyklowanej mieszanki na zimno z asfaltem spienionym (MCAS) jest przedmiotem badań realizowanych przez Politechnikę Świętokrzyską pod kierownictwem M. Iwańskiego [24-26]. Realizowane prace badawcze wyjaśniają w sposób wyczerpujący oddziaływanie zmiennego udziału środków wiążących na właściwości recyklowanych mieszanek na zimno z asfaltem spienionym (MCAS). W pracy [27] autorzy przedstawili wyniki badań laboratoryjnych parametrów fizyko-mechanicznych recyklowanych mieszanek na zimno MCAS. Oceniono wpływ asfaltu spienionego i cementu portlandzkiego. Asfalt spieniony dozowano w ilości od 2,0% do 3,5%, a cement portlandzki od 1,0% do 2,5%, krokowo co 0,5%. Jak wskazują autorzy, zastosowanie 2,5% asfaltu spienionego i 2,0% cementu portlandzkiego umożliwiło uzyskanie optymalnych rezultatów. Efektywność stosowania środków wiążących jest różna i zależy od ich udziału procentowego w składzie mieszanki oraz ich właściwości fizycznych i mechanicznych. Realizowano również badania, w których wykazano wpływ procesu spieniania na właściwości podstawowe i reologiczne lepiszcza [28].

Jak wykazała także analiza literatury, stosowanie w składzie recyklowanej mieszanki cementu portlandzkiego powoduje nadmierny przyrost sztywności [9] i w efekcie pękanie podbudowy wynikające z jej przesztymienia [6, 27]. Nadmierna

Deep cold recycling technology shows potential for utilization of mineral dust owing to mineral mixture composition determined by the limit grading curves, which allow usage of fine material content in the range of 5% to 20%. Use of fine particles (smaller than 0.063 mm) at the quantity of 5% to 20% is prerequisite to proper production of mineral mixture with foamed bitumen. If the content of fine particles in the recycled mixture is insufficient, the spatial filler-bitumen matrix is not created, prohibiting the mixture from reaching adequate cohesion. In such case the bubbles of foamed bitumen break prematurely; they do not connect properly with fine material. Upon contact with the mineral material, the binder forms “strands” [19] that contain considerable quantities of sandy and fine fractions. Large quantity of binder that has not properly connected with fraction below 0.063 mm contributes to clustering of bitumen, which should act as a lubricant in MCAS mixtures.

According to the literature, Portland cement is currently the most popular hydraulic binder used in the technology of deep cold recycling with foamed bitumen (MCAS) or bituminous emulsion (MCE). Detailed analysis of the impact of quantities of Portland cement and foamed bitumen on the properties of cold recycled mixtures with foamed bitumen (MCAS) is the subject of ongoing research under the direction of M. Iwański at the Kielce University of Technology [24-26]. The performed research works exhaustively explain the effect of varying proportions of binding agents on the properties of cold-recycled mixtures with foamed bitumen (MCAS). In the work [27] the authors presented the results of laboratory tests of physical-mechanical parameters of cold-recycled mixtures MCAS. The influence of foamed bitumen and Portland cement content was evaluated. The agents were dosed in quantities ranging from 2.0% to 3.5% for foamed bitumen and from 1.0% to 2.5% for Portland cement, at steps of 0.5%. As observed by the authors, use of 2.5% of foamed bitumen and 2.0% of Portland cement provided the optimum results. The effectiveness of binder agents varies, depending on their content in the mixture and their physical and mechanical properties. Another research project indicated that the foaming process affects the basic and rheological properties of the binder [28].

Literature review indicates also that usage of Portland cement in the composition of recycled mixtures leads to an excessive increase in stiffness [9] and the consequent cracking of the overly stiff base course [6, 27]. Excessive stiffness of recycled bases and the resulting problems were the subject of works by Polish and international

sztywność podbudów recyklowanych i problemy wynikające z tego zjawiska były przedmiotem badań badaczy krajowych i zagranicznych [29-33]. Analizy wykazały jednoznacznie, że podstawową przyczyną tych problemów była duża sztywność związana z nadmierną ilością cementu.

W związku z tym celowe wydaje się zastosowanie jako spoiwa nie tylko cementu, ale opracowanego na jego bazie nowego rodzaju spoiwa drogowego zawierającego w swoim składzie rekomendowane dodatki. Zaliczyć do nich należy uboczne cementowe produkty pyłaste (UCPP) oraz wapno hydratyzowane. Idea taka opiera się na założeniu, że zastosowanie tych dodatków powinno przyczynić się do obniżenia przesztywniającego oddziaływania cementu. Pyły cementowe będą pełniły rolę stabilizatora aktywności cementu; jednocześnie ich zastosowanie w mieszance będzie stanowiło metodę ich utylizacji [5]. Natomiast wapno hydratyzowane, dzięki swoim parametrom i wykazanej pozytywnej roli wielofunkcyjnego dodatku do mieszanek mineralno-asfaltowych w zakresie poprawy ich właściwości fizyko-mechanicznych oraz adhezji, będzie nadawało opracowanemu spoiwu drogowemu nowe, bardziej uniwersalne właściwości [34-36].

Odpowiedzią na wyżej opisane problemy i potrzeby była realizacja projektu Techmatstrateg I [21], którego celem było opracowanie technologii wykorzystującej optymalizację środka wiążącego przeznaczonego do recyklingu głębokiego na zimno konstrukcji nawierzchni. W ramach tej technologii opracowano środek wiążący w postaci drogowego spoiwa hydraulicznego przeznaczony specjalnie do mieszanek mineralno-spoiwowych stosowanych do technologii recyklingu głębokiego na zimno, w których składzie zastosowane zostanie lepiszcze asfaltowe w postaci emulsji asfaltowej (MCE) i asfaltu spienionego (MCAS). Innowacyjny środek wiążący zapewni uzyskanie optymalnych właściwości recyklowanej podbudowy drogowej.

2. PRZEDMIOT BADAŃ

2.1. UWAGI OGÓLNE

Przedmiot badań stanowi recyklowana mieszanka na zimno (RCM). W badaniach dokonano oceny wpływu rodzaju środka wiążącego na właściwości recyklowanej mieszanki na zimno, w składzie której zastosowano dwa typy środków wiążących w postaci asfaltu spienionego lub emulsji asfaltowej oraz cementu portlandzkiego (CEM I 32,5R) lub trójskładnikowego spoiwa hydraulicznego. Asfalt spieniony oraz emulsja asfaltowa zostały wytworzone z asfaltu drogowego o penetracji 70/100. Spoiwo hydrauliczne zostało wytworzone poprzez wymieszanie trzech bazowych składników w następujących proporcjach: 40% CEM-I-32,5R; 20% Ca(OH)_2 oraz 40% UCPP (ubocznych cementowych

researchers [29-33]. The analyses have clearly indicated that the basic source of the problems lay in overstiffening resulting from excessive cement content.

Therefore, it seems recommendable to use hydraulic binder which is not based solely on cement; pure cement may be replaced with a new cement-based road binder that also contains recommended additives. Such additives shall include cement by-pass dust (CBPD) and hydrated lime. The idea is based on the assumption that the additives should contribute to mitigation of the overstiffening effect of cement. Cement dusts will stabilize the activity of cement; their application in the mixture will also enable their utilization [5]. Hydrated lime, owing to its parameters and the proven positive role as a multi-functional additive to asphalt mixtures (improving their physical-mechanical properties and adhesion) will give the developed hydraulic binder new, more universal properties [34-36].

In response to the abovementioned problems and needs, the Techmatstrateg I project [21] was realized in order to develop the technology based on application of optimized hydraulic binder in deep cold recycling of pavements. The developed new hydraulic binder is dedicated explicitly for mineral-binder mixtures used in deep cold recycling, which contain bituminous binder in the form of bituminous emulsion (MCE) or foamed bitumen (MCAS). The innovative binding agent will ensure optimum properties of the recycled road base.

2. SUBJECT OF THE RESEARCH

2.1. GENERAL REMARKS

The research was devoted to the subject of cold-recycled mixtures (RCM). The research encompassed assessment of the effect of binding agents on the properties of cold-recycled mixtures that contained two types of binders: bituminous binder (in the form of foamed bitumen or bituminous emulsion) and hydraulic binder (CEM I 32.5R Portland cement or the three-component hydraulic binder). Foamed bitumen and bituminous emulsion were produced from 70/100 road bitumen. The dedicated hydraulic binder was produced through mixing the three basic components in the following proportions: 40% of CEM-I-32.5R cement; 20% of Ca(OH)_2 and 40% of CBPD (cement by-pass dust) [29, 33]. Investigations under the TECHMATSTRATEG I project [21] indicated that this type of hydraulic road binder meets the requirements for HRB-N1 and HRB-N2 slow-setting binders according to PN-EN 13282-2 [37] and enables utilization of maximum quantities of CBPD waste material. Binders for

produktów pylastych) [28, 33]. W zakresie wykonanego projektu TECHMATSTRATEG I [21] wykazano, że ten rodzaj spoiwa drogowego spełnia wymagania określone dla spoiwa wolnowiążącego typu HRB-N1 oraz HRB-N2 zgodnie z PN-EN 13282-2 [37] oraz pozwala na wykorzystanie maksymalnej ilości materiału odpadowego UCPP. Środki wiążące na potrzeby odcinka doświadczalnego przygotowane zostały w skali przemysłowej. Recyklowaną mieszankę wykonano w warunkach przemysłowych w technologii „in situ” [19]. Warstwa podbudowy przeznaczona jest dla kategorii ruchu KR3-4 ($0,50 \text{ mln} < ESAL_{100} \leq 7,30 \text{ mln}$ osi standardowych 100 kN) [20].

Odcinek doświadczalny został zlokalizowany na terenie kopalni odkrywkowej w województwie świętokrzyskim w miejscowości Mosty. Lokalizacja odcinka została wybrana tak, aby w stosunkowo krótkim czasie uzyskać informację o zachowaniu recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym, emulsją asfaltową oraz specjalnie opracowanym środkiem wiążącym w warunkach podwyższonego wyteżenia.

2.2. PODZIAŁ ODCINKA DOŚWIADCZALNEGO NA SEKCJE

Odcinek doświadczalny podzielony został na cztery sekcje. Schemat odcinka przedstawiono na Rys. 1. Takie podejście pozwoliło w sposób jednoznaczny dokonać oceny jakości wytworzonej mieszanki oraz wnioskować o wpływie rodzaju i typu środków wiążących na zmianę właściwości recyklowanej mieszanki na zimno.

2.3. SCHEMAT MONTAŻU CZUJNIKÓW SYSTEMU MONITORINGU ORAZ UKŁAD WARSTW KONSTRUKCJI

W ramach budowy odcinka doświadczalnego zainstalowano system monitoringu, który miał na celu przede wszystkim obserwację zmian stanu odkształcenia w istotnych miejscach konstrukcji nawierzchni. Zestaw czujników światłowodowych został wbudowany na dwóch sekcjach, gdzie testowano wpływ trójskładnikowego spoiwa mieszanego. Uzupełnieniem danych z monitoringu była rejestracja parametrów środowiskowych, tj. temperatury i wilgotności, których wartości zostały poddane analizie. Zestaw do monitorowania firmy SHM System® składał się następujących czujników:

- liniowe światłowodowe czujniki odkształcenia (Epsilon-Rebar) o długości 8 m do pomiaru odkształceń podłużnych (LD01, LD02),
- liniowe światłowodowe czujniki odkształcenia (Epsilon-Rebar) o długości 4 m do pomiaru odkształceń poprzecznych,

usage at the test sections were produced on an industrial scale. Cold-recycled mixtures were produced “in situ” under industrial conditions [19]. The constructed base course was dedicated for KR3-4 road traffic categories ($0.50 \text{ mln} < ESAL_{100} \leq 7.30 \text{ mln}$ 100-kN standard axle loads) [20].

The test site was located in an open-pit mine in Mosty in the Świętokrzyskie Province. The location was chosen in order to collect data on performance of recycled road bases with foamed bitumen, bituminous emulsion, cement and the special three-component hydraulic binder in a relatively quick manner due to the intensive loading conditions.

2.2. DIVISION OF THE TEST SITE INTO SECTIONS

The test site was divided into four sections, as shown in Fig. 1. Such an approach enabled accurate evaluation of the quality of the produced mixture and drawing conclusions regarding the influence of the type of binding agents on the properties of the cold-recycled mixtures.

Km 0+200	
Section 4 / Sekcja 4 (FB-RCM-5C) Area of 300 m ² Powierzchnia 300 m ²	Section 2 / Sekcja 2 (FB-CM-CEM) Area of 300 m ² Powierzchnia 300 m ²
Km 0+100	
Section 3 / Sekcja 3 (EB-RCM-5C) Area of 300 m ² Powierzchnia 300 m ²	Section 1 / Sekcja 1 (EB-RCM-CEM) Area of 300 m ² Powierzchnia 300 m ²
Km 0+000	

Fig. 1. Division of the test site

Rys. 1. Schemat podziału odcinka doświadczalnego

2.3. LAYOUT OF THE MONITORING SENSORS AND PAVEMENT LAYERS

A monitoring system was installed during the construction of the test sections, primarily to enable observation of strains at critical locations in the pavement structure. Sets of fiber-optic sensors were installed on two sections where the three-component hydraulic binder was investigated. The data collected from the monitoring system was complemented by the registered environmental parameters, i.e. temperature and moisture, which were also analyzed. The monitoring set manufactured by SHM System® consisted of the following sensors:

- liniowe światłowodowe czujniki przemieszczenia (3D Sensor) o długości 4 m do pomiaru przemieszczeń pionowych,
- czujniki temperatury (pomiary środowiskowe),
- czujniki wilgotności (pomiary środowiskowe).

Schemat rozmieszczenia czujników przedstawiono na Rys. 2.

W zakresie niniejszej analizy uwzględniono pomiary temperatury z czujników P1, P2, P3 oraz wilgotności z czujników W1 oraz W2. Ponadto odcinek doświadczalny pozwalał na monitorowanie odkształceń poziomych rejestrowanych przez czujniki podłużne LD01 i LD02. Dane z pozostałych czujników przedstawionych na Rys. 2 nie były wykorzystywane w niniejszej analizie. Bardziej szczegółowe wykorzystanie ich rezultatów zamieszczono w pracy [33]. Konstrukcja nawierzchni drogowej składała się z następujących warstw:

- SMA-JENA o grubości 8 cm,
- EB-RCM/FB-RCM o grubości 20 cm,
- podłoże gruntowe (G1) z pospółki.

- linear fiber-optic strain sensors (EpsilonRebar), length of 8 m, for longitudinal deformation measurements (LD01, LD02),
- linear fiber-optic strain sensors (EpsilonRebar), length of 4 m, for transverse deformation measurements,
- linear fiber-optic displacement sensors (3D Sensor), length of 4 m, for vertical displacement measurements,
- temperature sensors (environmental measurements),
- moisture sensors (environmental measurements).

Layout of the sensors is presented in Fig. 2.

The analysis presented herein encompassed temperature measurements (from sensors P1, P2 and P3) and moisture measurements (from sensors W1 and W2). Moreover, the test section enabled monitoring of horizontal strains registered by longitudinal sensors LD01 and LD02. Data from other sensors shown in Fig. 2 was not used in the analysis presented in this work. They are discussed in greater detail in the work [33]. The constructed pavement structure consisted of the following layers:

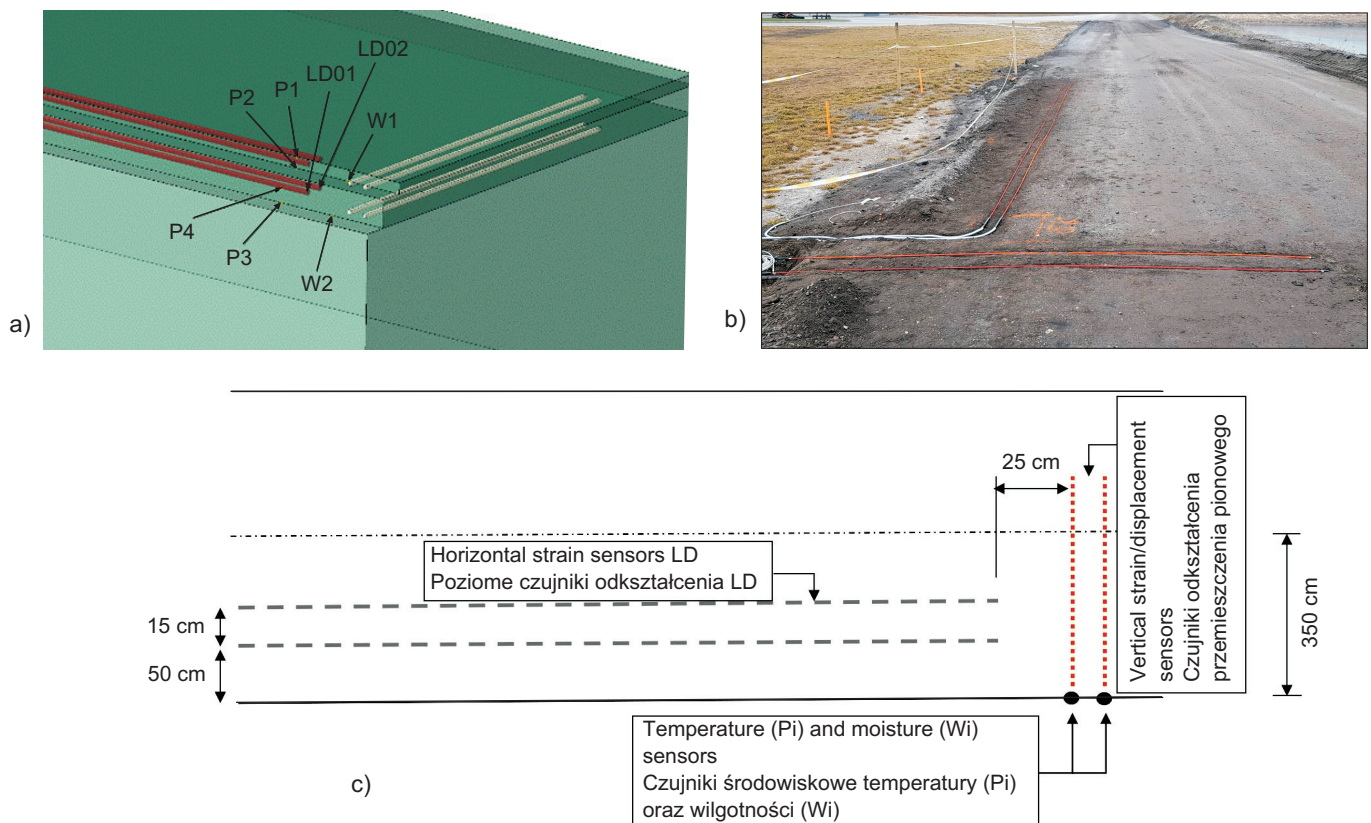


Fig. 2. Installation of the monitoring sensors: a) isometric view of sensor locations, b) placement in the pavement, c) top view of the layout of the sensors

Rys. 2. Schemat montażu czujników systemu monitoringu: a) widok izometryczny rozmieszczenia czujników, b) etap ułożenia czujników, c) widok układu czujników w planie

Pobocza zostały wykonane z tuczniwa zagęszczonego. Jednowarstwowa warstwa nawierzchni typu SMA-JENA została wykonana w temperaturze $> 5^{\circ}\text{C}$, aby zagwarantować warunki sprzyjające poprawnemu jej zagęszczeniu. Reprezentatywny przykład montażu czujników na spodzie zagęszczonej warstwy FB-RCM-5C przedstawiono na Rys. 2b. W podobny sposób układano pozostałe części systemu monitoringu. Ich lokalizacja przedstawiona została graficznie na Rys. 2a i 2c.

3. METODOLOGIA I MATERIAŁY

3.1. LEPI SZCZE ASFALTOWE I SPOIWO DROGOWE

W przypadku lepiszczy asfaltowych zastosowano asfalt spieniony oraz emulsję asfaltową. Zarówno asfalt spieniony jak i emulsja asfaltowa zostały wyprodukowane z asfaltu drogowego 70/100. Wyniki badań podstawowych właściwości asfaltu drogowego przedstawiono w Tabl. 1.

Table 1. The determined parameters of the 70/100 bituminous binder

Tablica 1. Wyniki oznaczeń właściwości lepiszcza asfaltowego 70/100

Road bitumen Asfalt drogowy	Penetration / Penetracja [0.1 mm]			Softening point / Temperatura mięknięcia T_{PIK} [$^{\circ}\text{C}$]			Fraas breaking point / Temperatura łamliwości T_{Frass} [$^{\circ}\text{C}$]		
	Mean / Średnia	CV^{**} [%]	n^{**}	Mean / Średnia	CV^{**} [%]	n^{**}	Mean / Średnia	CV^{**} [%]	n^{**}
70/100	75.80	2.7	8	45.2	0.6	4	-17.9	3.1	4

^{*}) CV – coefficient of variation / współczynnik zmienności, ^{**}) n – number of specimens / liczba próbek

Dla asfaltu spienionego określono charakterystykę spieniania asfaltu w zakresie wskaźnika ekspansji ER oraz czasu połowicznego rozpadu HL wg [19]. Wyniki przedstawiono na Rys. 3.

- 8 cm of SMA-JENA asphalt mixture,
- 20 cm of EB-RCM/FB-RCM mixture,
- subgrade (G1) of an all-in aggregate.

Shoulders were constructed from compacted crushed stone. The SMA-JENA asphalt course (the entire thickness placed in a single pass) was constructed at the temperature $> 5^{\circ}\text{C}$, in order to ensure favorable conditions for its proper compaction. A representative example of the manner in which the sensors were mounted on the compacted FB-RCM-5C layer is presented in Fig. 2b. Other elements of the monitoring system were installed similarly. Their location is visualized in Figs 2a and 2c.

3. METHODS AND MATERIALS

3.1. BITUMINOUS AND HYDRAULIC BINDERS

Bituminous binders were dosed in the form of foamed bitumen and bituminous emulsion. Both the foamed bitumen and the bituminous emulsion were prepared using 70/100 road bitumen. Its basic properties obtained from the tests are presented in Table 1.

For the foamed bitumen, foaming characteristics were determined: expansion ratio ER and half-time HL , according to [19]. The results are shown in Fig. 3.

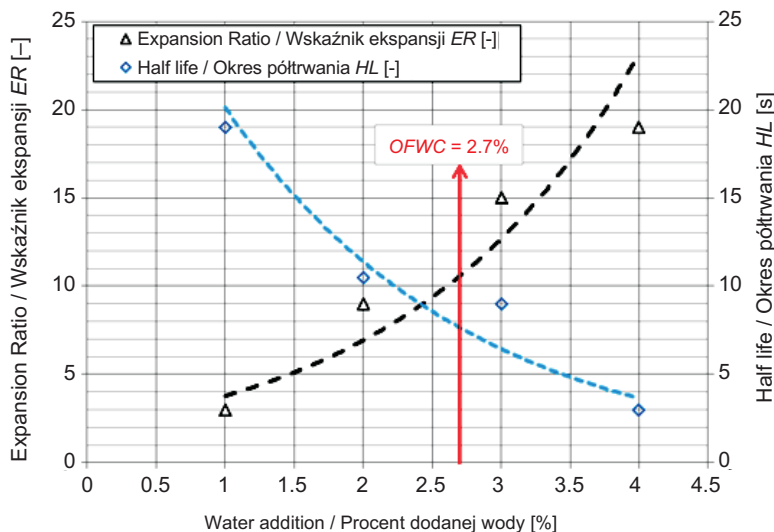


Fig. 3. Determination of the optimum water content for 70/100 bitumen foaming; (OFWC - optimum foaming water content)
Rys. 3. Wyznaczenie optymalnej zawartości wody do spieniania asfaltu 70/100; (OFWC - optymalny dodatek wody w spienionym asfalcie)

Jakość emulsji asfaltowej C60B10ZM/R oceniono w świetle wymagań krajowego załącznika do normy zharmonizowanej [38]. Wyniki przedstawiono w Tabl. 2.

Quality of the C60B10ZM/R bituminous emulsion was assessed in the light of the requirements established in the national annex to the harmonized standard [38]. The results are presented in Table 2.

Table 2. Physical properties of the emulsion
Tablica 2. Fizyczne właściwości emulsji

Parameter Parametr	Unit Jednostka	Bituminous emulsion – C60B10 ZM/R Emulsja asfaltowa – C60B10 ZM/R
Binder content / Zawartość lepiszcza	% (m/m)	60
Stability of mixing with cement / Stabilność mieszania z cementem	g	1.0
Remaining on the 0.5 mm sieve / Pozostałość na sicie 0,5 mm	% (m/m)	0.04
Outflow time, ϕ 2 mm at 40°C / Czas wypływu ϕ 2 mm w 40°C	s	32
Adhesion / Adhezja	%	85

Właściwości spoiw hydraulicznych zastosowanych w składzie recyklowanych mieszanek zaprezentowano w Tabl. 3 [5, 39].

Properties of hydraulic binders used in the recycled mixtures are presented in Table 3 [5, 39].

Table 3. Standard properties of the used cement and three-component hydraulic binder
Tablica 3. Właściwości normowe cementu oraz trójskładnikowego spoiwa drogowego

Property Właściwość	Standard Norma	Unit Jednostka	CEM I 32.5R	Three-component hydraulic binder Trójskładnikowe spoiwo drogowe (HRB)
Initial setting time / Początek wiązania spoiwa	PN-EN 196-3	min	200	265
Final setting time / Koniec wiązania spoiwa		min	265	460
Compressive strength after 7 days Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach	PN-EN 196-1	MPa	34.2	7.7
Compressive strength after 28 days Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach		MPa	46.8	13.6
Soundness / Stałość objętości	PN-EN 196-3	mm	9	17
Specific surface / Powierzchnia właściwa spoiwa	PN-EN 196-6	cm ² /g	4282	5010

3.2. KRUSZYWO

Zgodnie z zaleceniami [5, 19, 21] w składzie recyklowanej mieszanki na zimno niezbędne jest stosowanie materiału pochodzącego z istniejącego układu warstw konstrukcyjnych. Dlatego też w składzie recyklowanych mieszanek na zimno zastosowano destrukcję asfaltową (RAP) 0/31,5 mm powstałą w wyniku frezowania istniejących warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych oraz kruszywa naturalnego łamanego o ciągłym uziarnieniu 0/31,5 pochodzącego z istniejącej podbudowy. Zawartość asfaltu w destrukcji asfaltowej (RAP) wynosiła 5,1% i została określona zgodnie z wymaganiami [12, 19].

3.3. PROJEKT SKŁADU RECYKLOWANEJ MIESZANKI NA ZIMNO

Projekt recepty laboratoryjnej mieszanki recyklowanej na zimno został opracowany zgodnie z wymaganiami wytycznych dla mieszanki recyklowanej z asfaltem spienionym (oznaczonej jako FB-RCM) [19, 21] oraz z emulsją asfaltową

3.2. AGGREGATE

According to the recommendations [5, 19, 21], a cold-recycled mixture must contain material originating from pre-existing structural system. Therefore, the cold-recycled mixtures were produced using 0/31.5 mm reclaimed asphalt pavement (RAP) material obtained through milling of existing layers of asphalt mixtures and continuously graded 0/31.5 natural crushed aggregate from existing base. Bitumen content in RAP equaled 5.1% and was determined in accordance with the requirements [12, 19].

3.3. COLD-RECYCLED MIXTURE DESIGN

Laboratory composition of the cold-recycled mixture was designed in accordance with the requirements of guidelines for recycled mixtures with foamed bitumen (labeled as FB-RCM) [19, 21] and with bituminous emulsion (labeled as EB-RCM) [23]. The mixture was designed in such a manner that grading criteria were met both for cold-recycled mixture with foamed bitumen and with bituminous emulsion. The obtained grading curve is shown in Fig.4.

(oznaczonej jako EB-RCM) [23]. Projektując skład recyklowanej mieszanki, dążono do spełnienia kryterium uziarnienia zarówno dla recyklowanej mieszanki z asfaltem spienionym, jak i z emulsją asfaltową. Uzyskany przebieg krzywej uziarnienia zaprezentowano na Rys. 4.

It is noteworthy that the designed mineral mixture meets the grading criteria for both the analyzed deep recycling technologies. Percentage of mineral components and binders (hydraulic and bituminous) used in mixture composition is presented in Table 4, including a breakdown according to the technology used.

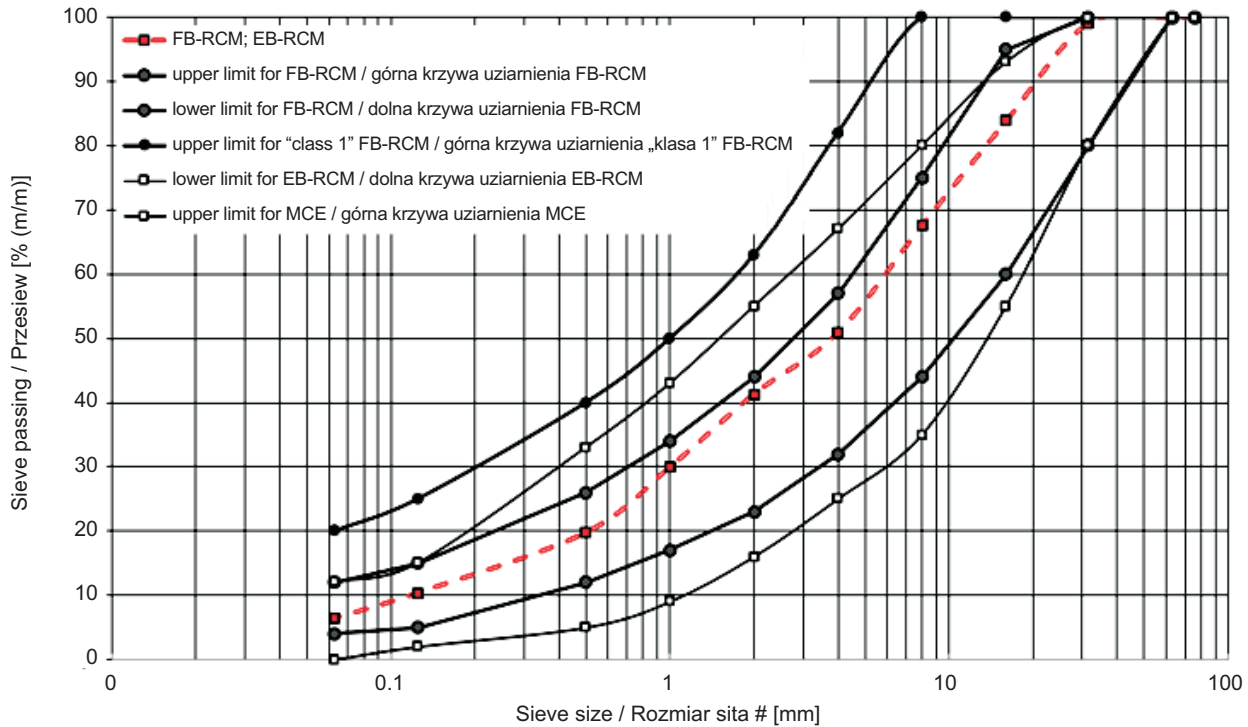


Fig. 4. Grading curve of the cold-recycled FB-RCM/EB-RCM mixture

Rys. 4. Krzywa uziarnienia recyklowanej mieszanki na zimno FB-RCM/EB-RCM

Table 4. Composition of the cold-recycled FB-RCM/EB-RCM mixtures

Tablica 4. Skład recyklowanej mieszanki na zimno FB-RCM/EB-RCM

Component Nazwa składnika	Density Gęstość ρ_a [Mg/m ³]	Proportion of components / Udział składników [%]			
		FB-RCM + cement	FB-RCM + three-component hydraulic binder FB-RCM + spoiwo trójskładnikowe	EB-RCM + cement	EB-RCM + three-component hydraulic binder EB-RCM + spoiwo trójskładnikowe
Reclaimed asphalt pavement (RAP #31.5 mm) Destrukt asfaltowy (RAP #31,5 mm)	2.547	37.6	37.6	37.6	37.6
Natural aggregate 0/31.5 mm / Kruszywo naturalne 0/31,5 mm	2.661	56.4	56.4	56.4	56.4
Portland cement CEM I 32.5R Cement portlandzki CEM I 32,5R	3.01	3.0	3.0	3.0	–
Hydraulic binder “5C” / Spoiwo hydrauliczne „5C”	2.86	–	3.0	–	3.0
Foamed bitumen 50/70 / Asfalt spieniony 50/70	1.02	3.0	–	–	–
Bituminous emulsion C60B10ZM/R ^{*)} Emulsja asfaltowa C60B10ZM/R ^{*)}	1.01	–	–	3.0 ^{*)}	3.0 ^{*)}

^{*)} bituminous emulsion C60B10ZM/R was dosed in the quantity of 5.0%; the resulting content of bitumen after emulsion break-up: 3.0% emulsji asfaltowej C60B10ZM/R dozowano 5,0%; ilość asfaltu wytrąconego z emulsji asfaltowej: 3,0%

Należy zauważyć, że zaprojektowana mieszanka mineralna spełnia kryterium uziarnienia jednocześnie dla obydwu analizowanych technologii recyklingu głębokiego. Udział procentowy składników mineralnych oraz spoiw hydraulicznych i asfaltowych zastosowanych w składzie recyklowanej mieszanki na zimno przedstawiono w Tabl. 4 z uwzględnieniem podziału według technologii.

Skład mieszanek zaprezentowany w Tabl. 4 został zastosowany na odcinku doświadczalnym zgodnie z podziałem na sekcje przedstawionym w podpunkcie 2.2.

3.4. METODY BADAWCZE

Wpływ drogowego spoiwa hydraulicznego oraz lepiszcza asfaltowego na właściwości recyklowanej mieszanki na zimno oceniono przez pryzmat właściwości fizycznych i mechanicznych. Oznaczenia właściwości fizycznych i mechanicznych zostały wykonane na próbkach:

- sporządzonych w laboratorium,
- pobranych na odcinku doświadczalnym,
- referencyjnych (zawierających 100% cementu w spoiwie) pobranych na odcinku doświadczalnym.

Próbki z odcinka doświadczalnego zostały pobrane jako rdzenie odwiertów o średnicy 150 mm i wysokości 120 mm. Natomiast próbki do badań cech $S_{m+5^{\circ}\text{C}}$, $S_{m+25^{\circ}\text{C}}$, UCS oraz f_c o średnicy 150 ± 1 mm przygotowane w laboratorium, zarówno dla serii ze spoiwem trójskładnikowym, jak i zawierające 100% cementu, zagęszczono w prasie żyrotorowej do wymaganej gęstości [22, 40, 41]. Próbki sporządzone w laboratorium (opisane „lab.” oraz „ref. 100% cem.”) przeznaczone do oznaczenia cech V_m oraz ITS_{dry} zagęszczono z zastosowaniem ubijaka Marshalla, stosując po 75 uderzeń na stronę (2×75) wg EN 12697-30 [23, 42]. Z uwagi na obecność w składzie mieszanek cementu i spoiw hydraulicznych okres dojrzewania próbek laboratoryjnych oraz rdzeni pobranych z odcinka doświadczalnego wynosił 28 dni. Zestawienie tabularyczne zbadanych cech przedstawiono w Tabl. 5.

Mixture compositions given in Table 4 were used at the test site, according to the division shown in section 2.2.

3.4. TEST METHODS

The influence of the used hydraulic binders and bituminous binders on cold-recycled mixture properties was assessed based on physical and mechanical characteristics. Physical and mechanical properties were determined using the following specimens:

- laboratory-prepared specimens,
- specimens extracted at the test site,
- reference specimens (containing 100% of cement as hydraulic binder) extracted at the test site.

Specimens from the test site were obtained as cores of 150 mm in diameter and 120 mm in height. Specimens for determination of $S_{m+5^{\circ}\text{C}}$, $S_{m+25^{\circ}\text{C}}$, UCS and f_c (of 150 ± 1 mm in diameter) – both those with the three-component hydraulic binder and those with 100% of cement – were prepared in the laboratory and compacted in a gyratory compactor to the required density [22, 40, 41]. The laboratory-prepared specimens (labeled as “lab.” and “ref. 100% cem.”) for determination of V_m and ITS_{dry} were compacted in a Marshall compactor with 75 blows per side (2×75), according to EN 12697-30 [23, 42]. Due to the presence of hydraulic binders in mixture composition, laboratory specimens and site-extracted cores were conditioned for 28 days. The obtained values of the tested parameters are compared in Table 5.

Table 5. Chosen physical-mechanical properties of the recycled base course
Tablica 5. Wybrane cechy fizyczno-mechaniczne podbudowy recyklowanej

Property / Cecha	Symbol	Unit / Jednostka	Standard / Norma
Air void content / Zawartość wolnych przestrzeni	V_m	%	PN-EN 12697-30 [42]
Indirect tensile strength after 7 days at +5°C Wytrzymałości na pośrednie rozciąganie po 7 dniach w +5°C	ITS_{dry}	kPa	PN-EN 12697-23 [43]
Dynamic modulus at +5°C (DTC-CY) Dynamiczny moduł sztywności w +5°C (DTC-CY)	$S_{m+5^{\circ}\text{C}}$	MPa	PN-EN 12697-26 Annex E / Załącznik E [44]
Dynamic modulus at +25°C (DTC-CY) Dynamiczny moduł sztywności w +25°C (DTC-CY)	$S_{m+25^{\circ}\text{C}}$	MPa	PN-EN 12697-26 Annex E / Załącznik E [44]
Compressive strength / Wytrzymałość na ściskanie osiowe	UCS	MPa	PN-EN 13286-41 [45]
Creep rate during compression with confinement Szybkość pełzania w trakcie ściskania ze skrepowaniem bocznym	f_c	$\mu\text{ε}/\text{cycle}$ $\mu\text{ε}/\text{cykl}$	PN-EN 12697-25 [46]

W przypadku badania szybkości pełzania przyjęto parametry badania na podstawie normy PN-EN 13108-20 [47]:

- temperatura kondycjonowania: +15°C,
- temperatura badania: +40°C,
- naprężenie skrępowania bocznego σ_c : 50 kPa,
- naprężenie osiowe $\sigma_a(t)$: 200 kPa,
- częstotliwość obciążenia: 3Hz,
- kształt fali: haversine.

Przyjęcie powyższych wartości wejściowych podyktowane było również faktem, że założony stan naprężeń jest zgodny ze stanem naprężeń występującym w warstwach podbudowy w analizach typowych konstrukcji drogowych przedstawionych w polskim katalogu [16]. Po kondycjonowaniu w normalnej temperaturze, walcową próbkę do badania umieszczano pomiędzy dwiema równoległymi płytkami dociskającymi.

4. REZULTATY BADAŃ

4.1. ANALIZA ROZKŁADU TEMPERATURY NA ODCINKU DOŚWIADCZALNYM

Pomiar czynników środowiskowych trwał przez jeden rok (2020-2021). Do tego celu wykorzystano zainstalowane czujniki wartości temperatury na powierzchni warstwy SMA-JENA (P1), na styku warstwy SMA-JENA i recyklowanej FB-RCM/EB-RCM (P2) oraz na styku warstwy recyklowanej FB-RCM/EB-RCM i podłoża gruntowego (P3) (Rys. 2). Rozkład temperatur rejestrowano przez okres od 17.04.2020 r. do 17.04.2021 r. Do analizy wykorzystano wartości temperatur zarejestrowane z interwałem 240 min. Graficzną interpretację zmian wartości eksperymentalnych i modelowych temperatury w punkcie P2 dla wybranego odcinka z podbudową FB-RCM-5C, przedstawiono na Rys. 5, stosując funkcję wygładzania wyników.

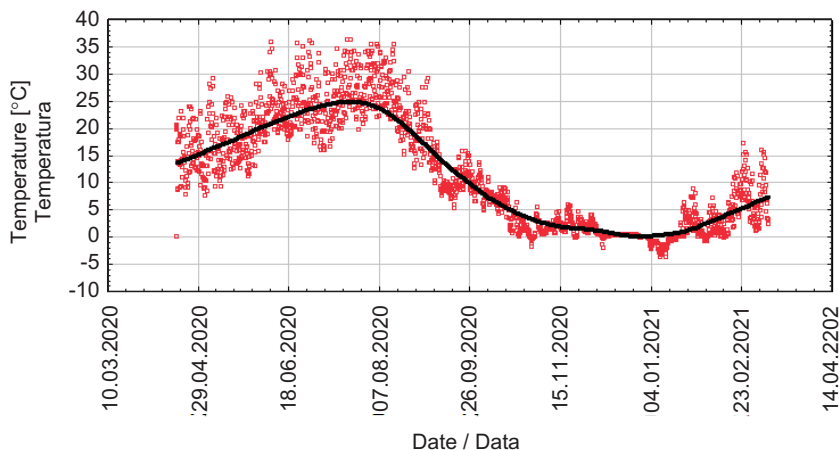


Fig. 5. Example temperature distribution at the interface between the SMA-JENA and FRCM-5C layers, registered by the P2 sensor (smoothed data)
Rys. 5. Przykładowy rozkład temperatur na styku warstwy SMA-JENA i FRCM-5C zarejestrowanych przez czujnik P2 z zastosowaniem wygładzenia danych

In the case of creep rate testing, the test parameters were assumed based on the PN-EN 13108-20 standard [47]:

- conditioning temperature: +15°C,
- test temperature: +40°C,
- confining stress σ_c : 50 kPa,
- axial stress $\sigma_a(t)$: 200 kPa,
- loading frequency: 3Hz,
- wave form: haversine.

The above parameters were also assumed due to the fact that the stress state they reflect corresponds to the stress state occurring in base courses in the analyses of typical pavement structures presented in the Polish catalog [16]. After conditioning in the standard temperature, cylindrical test specimens were placed between two parallel loading plates.

4. TEST RESULTS

4.1. ANALYSIS OF TEMPERATURE DISTRIBUTION AT THE TEST SECTIONS

Environmental factors were registered for one year (2020-2021). They were monitored using the temperature sensors installed on top of the SMA-JENA course (P1), at the interface between the SMA-JENA course and the recycled FB-RCM/EB-RCM base (P2) and at the interface between the recycled FB-RCM/EB-RCM base and the subgrade (P3) (Fig. 2). Temperature distribution was registered in the period between 17 April 2020 and 17 April 2021. The analysis was based on temperature values registered at the interval of 240 min. Graphical interpretation of changes in experimental and model values of temperature in location P2 for the chosen section with FB-RCM-5C base is presented in Fig. 5 using a smoothing function.

Należy zwrócić uwagę, że niewielka rozbieżność pomiędzy pojedynczymi wynikami a linią trendu ma miejsce od września do kwietnia, kiedy przepływ ciepła miał charakter bardziej stacjonarny.

Kolejną ważną kwestią było wskazanie zakresu temperatur, które w skali roku odznaczają się największym prawdopodobieństwem wystąpienia. Histogram rozkładu temperatury dla warstw EB-RCM i FB-RCM przedstawiono na Rys. 6.

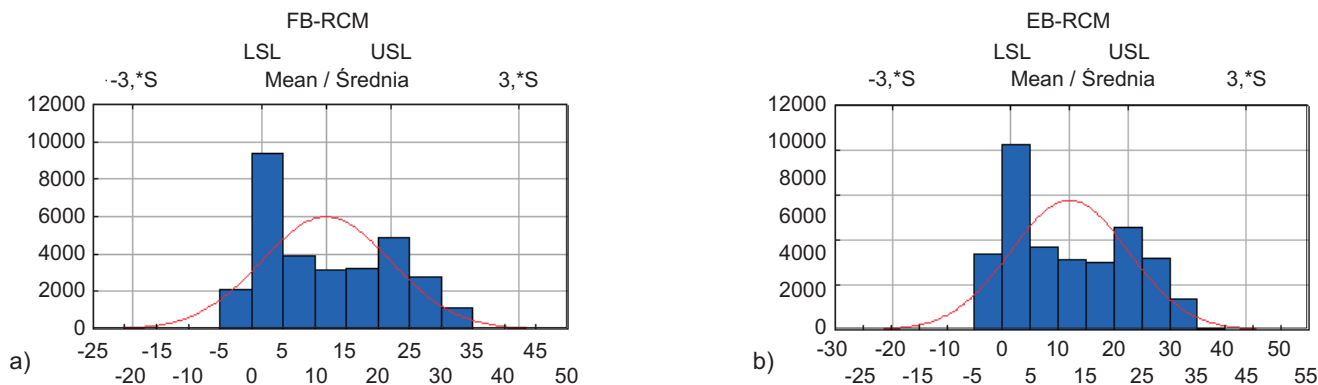


Fig. 6. Histogram of temperatures within the layers: a) FB-RCM; b) EB-RCM

Rys. 6. Histogram zmian temperatury w środku warstwy: a) FB-RCM; b) EB-RCM

Z prawdopodobieństwem 95% średnia temperatura (Rys. 6) dla warstwy FB-RCM wynosiła $\mu T_{\text{FB-RCM}} = 11,81^{\circ}\text{C} \pm 2 \times 0,09^{\circ}\text{C}$, natomiast dla EB-RCM: $\mu T_{\text{EB-RCM}} = 11,62^{\circ}\text{C} \pm 2 \times 0,12^{\circ}\text{C}$. Jest to wartość zbliżona do wartości ekwiwalentnej przyjmowanej w Polsce do projektowania, wynoszącej $+13^{\circ}\text{C}$. Zatem temperatura przeciętna na poziomie podbudowy jest o około 1°C niższa od temperatury ekwiwalentnej. Różnica ta wynika głównie ze specyfiki strefy klimatycznej – temperatura może odbiegać od wartości ekwiwalentnej w różnych rejonach Polski. Niemniej jednak uzyskana wartość potwierdza słuszność przyjętego poziomu temperatury ekwiwalentnej w polskim katalogu. Na podstawie obserwacji rozkładu prawdopodobieństwa i histogramu (Rys. 6) okazało się, że temperatura ekwiwalentna nie była temperaturą najbardziej prawdopodobną. W przypadku uwzględnienia statystyki odpornościowej takiej jak mediana, wartość przeciętna wynosiłaby odpowiednio $Me(T_{\text{EB-RCM}}) = 9,18^{\circ}\text{C}$ oraz $Me(T_{\text{FB-RCM}}) = 9,65^{\circ}\text{C}$. Analizując wykresy na Rys. 6 należy zwrócić uwagę, że najbardziej prawdopodobną temperaturą, z punktu widzenia ilości wystąpień, były temperatury w przedziałach $0-5^{\circ}\text{C}$ oraz $20-25^{\circ}\text{C}$. W związku z tym dla takich wartości temperatury – czyli 5°C oraz 25°C – oznaczono moduły dynamiczne. Wykorzystano je do porównań pomiędzy próbkami pozyskanymi na odcinku doświadczalnym a sporządzonymi w laboratorium. Należy również podkreślić, że przyjęcie temperatury 5°C do badań podbudowy jest spójne z niemieckim i polskim wymaganiami zawartymi w [23, 48].

It should be noted that the slight discrepancy between individual results and the trend line is visible between April and September, that is in the period in which the heat flow was steadier.

Another important matter was to identify temperature ranges characterized by the greatest probability of occurrence within the year. Histograms of temperature for the EB-RCM and FB-RCM courses are presented in Fig. 6.

At the probability of 95%, the mean temperature (Fig. 6) equaled $\mu T_{\text{FB-RCM}} = 11.81^{\circ}\text{C} \pm 2 \times 0.09^{\circ}\text{C}$ for the FB-RCM layer and $\mu T_{\text{EB-RCM}} = 11.62^{\circ}\text{C} \pm 2 \times 0.12^{\circ}\text{C}$ for the EB-RCM layer. The obtained values are similar to the equivalent temperature adopted in Poland for design, which equals $+13^{\circ}\text{C}$. Therefore, the mean temperature of the base is approximately 1°C lower than the equivalent temperature. This difference results mainly from the specificity of the climatic zone – the actual temperature may differ from the equivalent temperature in various regions of Poland. Nevertheless, the obtained value confirms that the level of the equivalent temperature assumed in the Polish catalog is sound. Based on the observations of probability distributions and histograms (Fig. 6), it was noted that the equivalent temperature was not the most probable value. If robust statistics, such as the median, were taken into account, the respective temperature values would equal $Me(T_{\text{EB-RCM}}) = 9.18^{\circ}\text{C}$ and $Me(T_{\text{FB-RCM}}) = 9.65^{\circ}\text{C}$. In the charts presented in Fig 6 it is noteworthy that the most probable temperatures, in terms of the number of occurrences, were the temperatures in the ranges of $0-5^{\circ}\text{C}$ and $20-25^{\circ}\text{C}$. Therefore, the dynamic moduli were determined for corresponding temperatures: 5°C and 25°C . The results were used for comparisons between specimens obtained at the test site and prepared in the laboratory. It should be emphasized that the temperature of 5°C adopted for base course testing is in agreement with the Polish and German requirements included in [23, 48].

Na uwagę zasługuje również zbiór danych różnicy wilgotności pomiędzy dolną (czujnik W2) i górną powierzchnią (czujnik W1) warstw FB-RCM/EB-RCM w miejscu zainstalowanego systemu monitoringu cech środowiskowych. Zmianę wilgotności pomiędzy wspomnianymi powierzchniami przedstawiono na Rys. 7.

The dataset pertaining to the difference in moisture between the bottom (W2 sensor) and the top (W1 sensor) of the FB-RCM/EB-RCM bases in locations where the environmental parameter monitoring system had been installed is also of considerable interest. The change in moisture content between the upper and lower surfaces of the base is presented in Fig. 7.

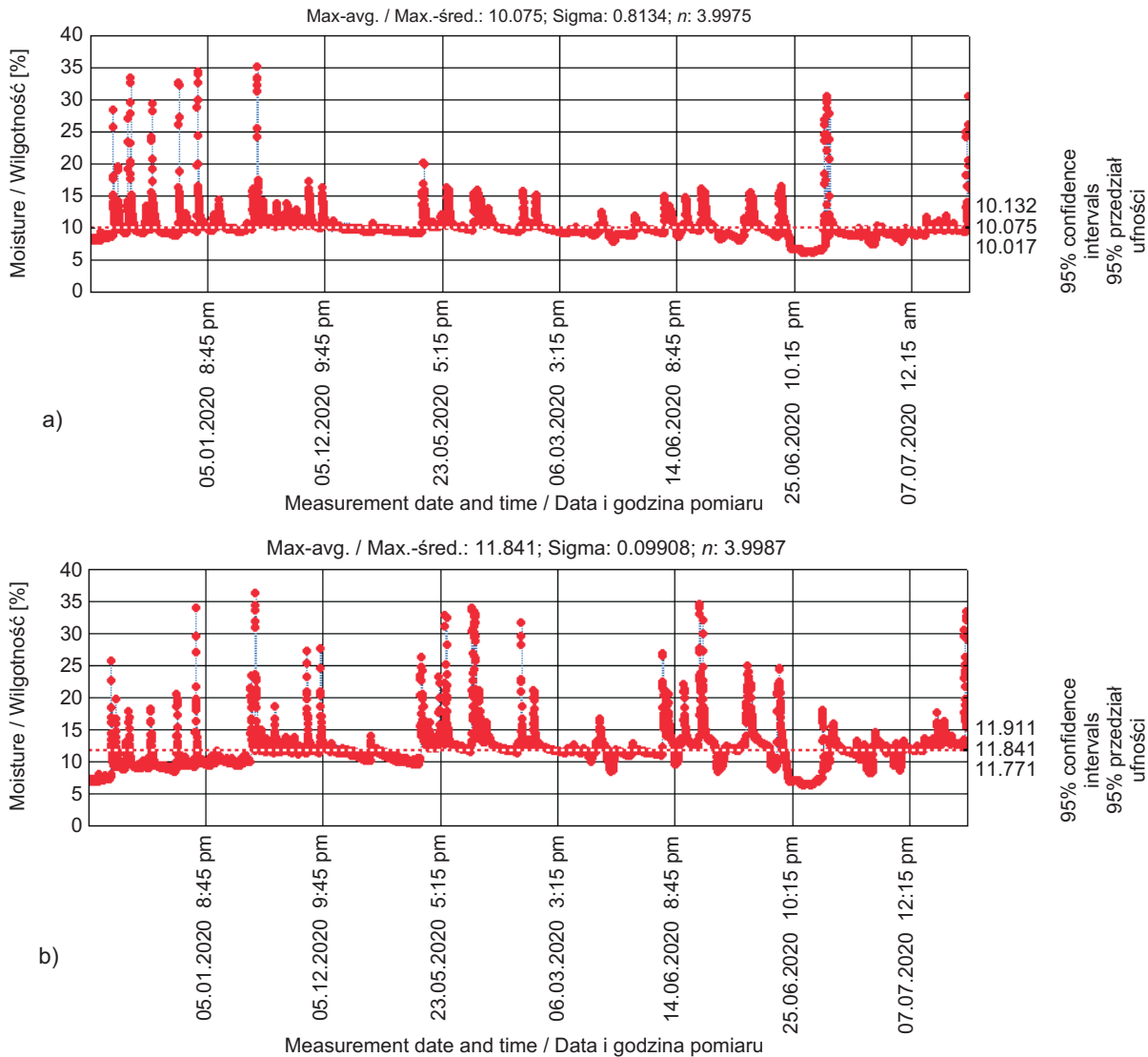


Fig. 7. Distribution of the average moisture content [%] difference between the top and bottom of the recycled base course at 4 h intervals: a) FB-RCM; b) EB-RCM

Rys. 7. Dystrybucja wartości średniej różnicy wilgotności [%] w interwałach 4 h pomiędzy górną i dolną powierzchnią podbudowy recyklowanej: a) FB-RCM; b) EB-RCM

Należy zwrócić uwagę, że – wbrew uproszczeniom wielokrotnie przyjmowanym w projektowaniu – wartość wilgotności pomiędzy warstwami nie była stała. Permanentne utrzymanie wysokiej wilgotności w podbudowie ma swoje określone skutki. Może spowodować zmniejszenie kohezji dolnej części podbudowy względem górnej. W okresie od kwietnia do lipca

It should be noted that – despite the commonly adopted design simplifications – the value of moisture content between layers was not constant. Permanently high values of moisture in the base course have specific consequences, including a possible reduction in cohesion between the lower and upper parts of the recycled base. In the period

średnia wartość różnicy wilgotności pomiędzy górną i dolną warstwą podbudowy recyklowanej (Rys. 7) mogła przekraczać nawet 20% i była związana z porą wzmożonych opadów atmosferycznych. W okresie zimy wartość przeciętnej różnicy wilgotności pomiędzy górną i dolną powierzchnią warstwy podbudowy recyklowanej wynosiła poniżej 5%, sugerując najbardziej stabilne warunki pracy podbudowy recyklowanej. Na uwagę zasługuje rozkład przeciętny wyniku wilgotności. Dla warstwy FB-RCM wynosił 10,1%, natomiast dla EB-RCM 11,8% z przedziałem ufności $\pm 0,16\%$. Był on porównywalny ze średnią wilgotnością optymalną podbudowy recyklowanej, wynoszącą około 9%. Uwzględniając wyniki raportu [21] należy uznać, że mieszanki recyklowane utrzymują stabilne warunki pracy względem początkowych założeń oraz zabezpieczają warstwy SMA-JENA przed infiltracją wody. Tym samym można się spodziewać, że jej właściwości mechaniczne (w szczególności moduł dynamiczny) będą zgodne z projektowanymi i stabilne w czasie.

4.2. WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE I MECHANICZNE

W celu weryfikacji i porównania charakterystyk fizycznych i mechanicznych zostały wykonane wybrane badania próbek sporządzonych w laboratorium oraz pobranych z warstwy FB-RCM/EB-RCM na odcinku doświadczalnym. Celem określania wartości średniej, dla każdego analizowanego parametru wykonano po 6 replikacji mających normalny rozkład prawdopodobieństwa. Mieszanki oznaczone „ref (100% cem)” zawierały 100% cementu w spoiwie hydraulicznym. Natomiast „lab.” (sporządzone w laboratorium) oraz „trial sec.” (pobrane z odcinka doświadczalnego) zawierały trójskładnikowe spoiwo drogowe. Do szczegółowej analizy występowania kontrastów właściwości mieszanek recyklowanych wykorzystano test post-hoc HSD Tukeya [49]. W przypadku uzyskania co najmniej dwóch różnych statystycznie grup można uznać, że również test ANOVA był istotny. Jako poziom istotności przyjęto wartość $\alpha = 0,05$. Przed rozpoczęciem analiz wykonano testowanie jednorodności wariancji w grupach za pomocą testu Barletta. Takie postępowanie było kluczowe z punktu widzenia uzyskania nieobciążonych estymatorów zmienności w grupach. Pierwszą analizowaną cechą była zawartość wolnych przestrzeni V_m . Graficzna reprezentacja wyników została przedstawiona na Rys. 8.

Na podstawie wykonanego testu post-hoc HSD Tukeya wyodrębniono dwie istotne grupy wyników. W przypadku cechy V_m istotne różnice występują ze względu na typ mieszanki. Mieszanka FB-RCM uzyskała niższą wartość parametru V_m niż EB-RCM. Najniższą przeciętną wartość wolnych przestrzeni uzyskała mieszanka FB-RCM pobrana z odcinka doświadczalnego (10,6%). W rezultacie mieszanka FB-RCM

between April and July the average difference in moisture content between the top and bottom surface of the recycled base course (Fig. 7) could have exceeded 20% and was related to the season of increased precipitation. In winter the average difference in moisture content between the top and bottom surface of the base course remained below 5%, suggesting the most stable service conditions for the recycled base. Distribution of the average moisture value provides noteworthy information. It equaled 10.1% for the FB-RCM base and 11.8% for the EB-RCM base, with a confidence interval of $\pm 0.16\%$. It was comparable to the average optimum moisture of a recycled base course, which equals approximately 9%. Considering the results of the report [21], it should be concluded that recycled mixtures maintain stable service conditions corresponding to the original assumptions and protect the SMA-JENA asphalt course from water infiltration. Therefore, it may be expected that their mechanical properties (especially the dynamic modulus) will be stable and in agreement with the design values.

4.2. PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

In order to verify and compare the physical and mechanical characteristics, chosen tests were performed, both on specimens prepared in the laboratory and extracted from the FB-RCM/EB-RCM courses at the test site. In order to calculate the mean value, each parameter was determined 6 times, with normal probability distribution. Mixtures labeled as “ref (100% cem)” contained 100% of cement in the hydraulic binder. Mixtures “lab.” (laboratory-prepared) and “trial sec.” (obtained at the test sections) contained the three-component hydraulic binder. Detailed contrast analysis of recycled mixture properties was based on the Tukey HSD post-hoc test [49]. If at least two statistically different groups are obtained, the ANOVA test may be considered significant as well. The adopted significance level was $\alpha = 0.05$. The analyses were preceded by testing of homogeneity of variance across the groups using the Barlett test. Such a procedure was crucial in terms of obtaining unbiased estimators in the groups. The first analyzed property was the air void content V_m . Graphical representation of its results is shown in Fig. 8.

Based on the performed Tukey HSD post-hoc test, two significant groups of results were identified. In the case of the V_m parameter, significant differences are observed due to the type of the mixture. The FB-RCM mixture displayed lower value of V_m than the EB-RCM mixture. The lowest average air void content was observed for the FB-RCM mixture extracted from the test section (10.6%).

uzyskała na odcinku doświadczalnym bardziej zamkniętą strukturę. W przypadku EB-RCM wynik wolnej przestrzeni jest na poziomie mediany wewnątrzgrupowej. Kolejną cechą była wytrzymałość na pośrednie rozciąganie ITS_{dry} . Zmienność wyników przedstawiono na Rys. 9.

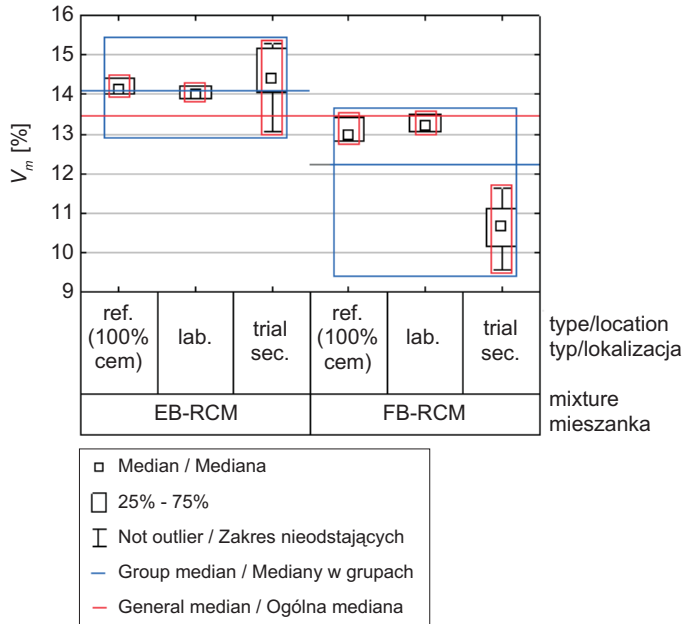


Fig. 8. Scatter of the V_m parameter
Rys. 8. Wykres zmienności cechy V_m

Tak jak w przypadku poprzedniej cechy V_m , również podczas analizy ITS_{dry} na podstawie testu Tukeya ze względu na rodzaj mieszanki powstały dwie zdecydowanie różniące się grupy wyników. Recyklowane mieszanki FB-RCM uzyskały wyższą wytrzymałość na pośrednie rozciąganie (mediana $ITS_{dry} = 796$ kPa) niż EB-RCM, w których wynik mediana wynosił 479 kPa. Niemniej jednak we wszystkich typach mieszanki wartość ITS_{dry} na odcinku doświadczalnym („trial sec.”) była wyższa niż uzyskana dla próbek sporządzonych w laboratorium.

Cechą, która charakteryzuje właściwości mechaniczne materiałów drogowych jest sztywność. Jest ona kluczowa z punktu widzenia relacji pomiędzy przyłożonym naprężeniem a uzyskanym odkształceniem i ma zastosowanie w projektowaniu konstrukcji nawierzchni metodą mechanistyczną. Podczas analiz czynników środowiskowych (temperatura, wilgotność) wskazano, że najczęściej pojawiającą się temperaturą jest $+5^\circ\text{C}$ oraz $+25^\circ\text{C}$. W związku z tym ocenę modułu sztywności S_m przeprowadzono dla tych dwóch wartości temperatury. Wyniki przedstawiono na Rys. 10.

Consequently, the FB-RCM mixture from the test site was characterized by a tighter internal structure. In the case of the EB-RCM mixture, the result of air voids is at the level of the in-group median. Another analyzed characteristic was the indirect tensile strength ITS_{dry} . Variability of the obtained results is visualized in Fig. 9.

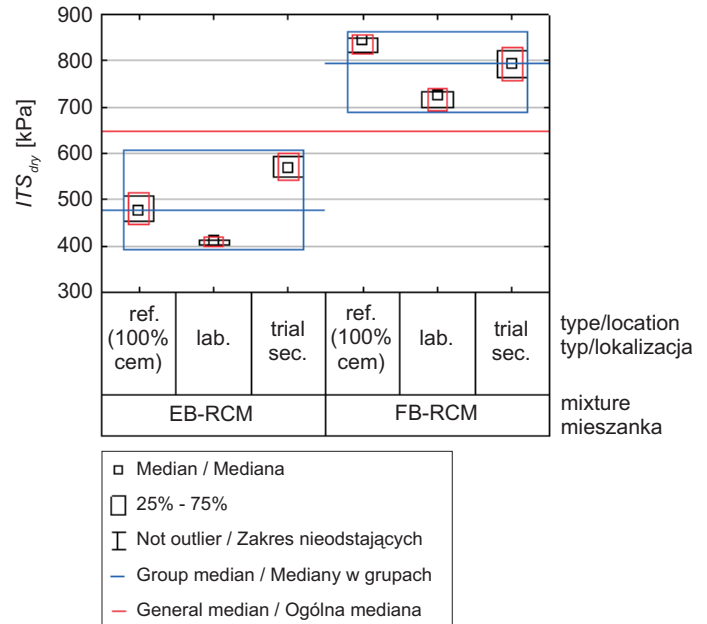
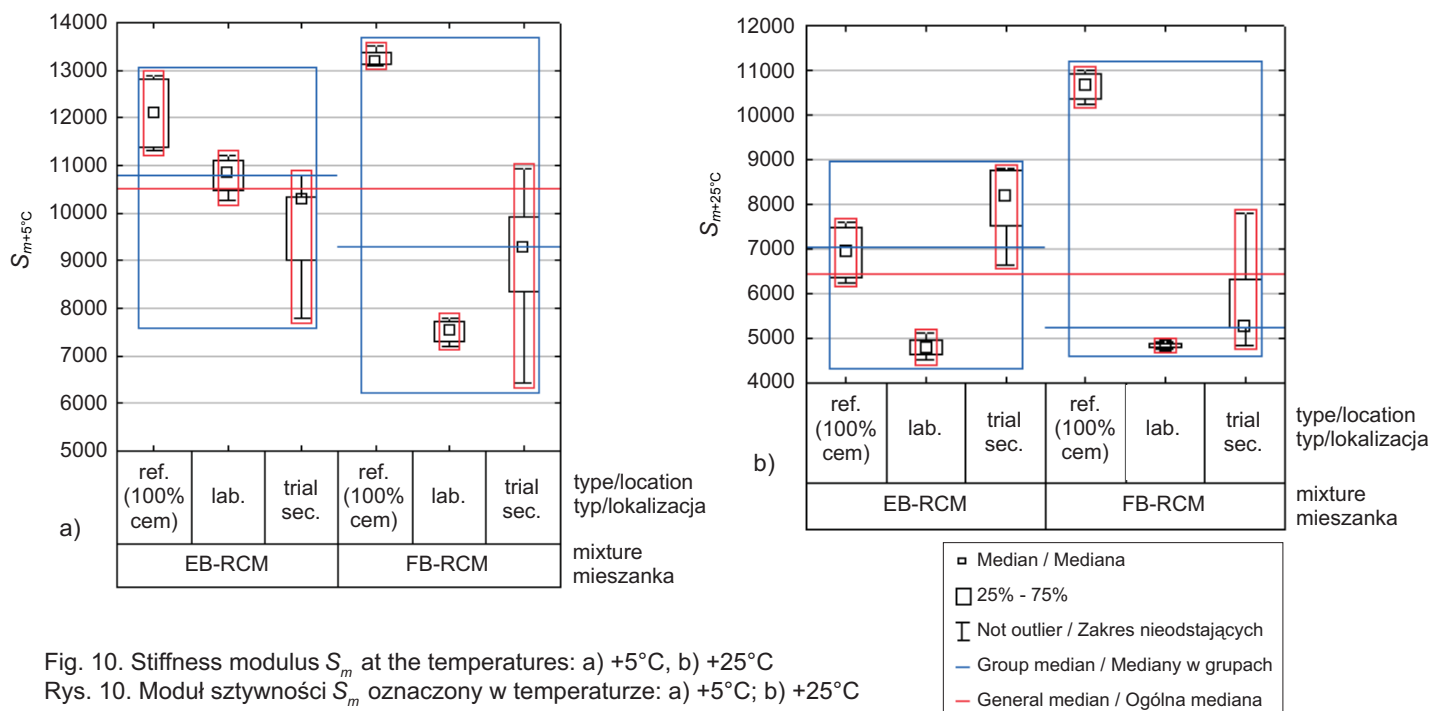


Fig. 9. Scatter of the ITS_{dry} parameter
Rys. 9. Wykres zmienności cechy ITS_{dry}

As with the previous parameter, during the analysis of ITS_{dry} two significantly different groups were identified in the Tukey test due to mixture type. Recycled FB-RCM mixtures displayed greater indirect tensile strength (median of $ITS_{dry} = 796$ kPa) than EB-RCM, whose median equaled 479 kPa. Nevertheless, across all mixture types the values of ITS_{dry} at the test sections („trial sec.”) were greater than those obtained for specimens prepared in the laboratory.

Stiffness belongs to parameters that characterize mechanical properties of road materials. As the key characteristic in terms of relationship between the applied loading and the observed strain, it is used in mechanistic pavement design. The environmental analyses (temperature, moisture) indicated that the most frequently occurring temperatures were $+5^\circ\text{C}$ and $+25^\circ\text{C}$. Therefore, stiffness modulus S_m was assessed for the two temperature values. The results are presented in Fig. 10.



Analizując wyniki modułu sztywności $S_{m+5^\circ\text{C}}$ (Rys. 10a), można je podzielić na dwie grupy. Pierwsza grupa o najmniejszych wartościach sztywności S_m to mieszanki oznaczone jako „FB-RCM_lab.”, „FB-RCM_trial sec.” oraz „EB-RCM_trial sec.”. Pozostałe mieszanki reprezentują grupę o zdecydowanie wyższej wartości modułu sztywności. Wśród nich najwyższą sztywność uzyskały mieszanki zawierające 100% cementu. Uzyskane rezultaty świadczą o korzystnym wpływie spoiwa trójskładnikowego na obniżenie nadmiernej sztywności, szczególnie w niskiej temperaturze. Tym samym zastosowanie spoiwa trójskładnikowego minimalizuje prawdopodobieństwo pojawienia się spękań niskotemperaturowych w mieszankach FB-RCM. W przypadku sztywności oznaczonej w temperaturze $+25^\circ\text{C}$ (Rys. 10b) podział na grupy był podobny do uzyskanego, gdy moduł oznaczano w temperaturze $+5^\circ\text{C}$. Mieszanki grupy pierwszej („FB-RCM_lab.”, „FB-RCM_trial sec.” oraz „EB-RCM_trial sec.”) uzyskały sztywności w przedziale od 4081 MPa do 5728 MPa. Jest to wynik poniżej mediany całego eksperymentu i zdecydowanie poniżej sztywności, jaką uzyskały mieszanki zawierające 100% cementu. Najbardziej niekorzystną informacją jest fakt, że mieszanka EB-RCM na odcinku doświadczalnym uzyskała zaskakująco wysoką sztywność w porównaniu do wyniku, jaki odnotowano w laboratorium. Należy pamiętać, że mieszanki recyklowane przygotowane z asfaltem spienionym oznaczają się zdecydowanie wyższą jednorodnością niż mieszanki z emulsją asfaltową. W związku z tym imperfekcje

When the $S_{m+5^\circ\text{C}}$ stiffness values are analyzed (Fig. 10a), the results may be divided into two groups. The first group, with the lowest S_m values, includes the mixtures marked as “FB-RCM_lab.”, “FB-RCM_trial sec.” and “EB-RCM_trial sec.”. The remaining mixtures represent the group with considerably greater values of stiffness. Among them, the greatest stiffness was displayed by the mixtures with hydraulic binder composed of 100% of cement. The obtained results indicate an advantageous effect of the three-component hydraulic binder, consisting in reduction of excessive stiffness, especially at low temperatures. Therefore, use of the three-component binder minimizes the probability of occurrence of low-temperature cracks in FB-RCM mixtures. In the case of stiffness determined at $+25^\circ\text{C}$ (Fig. 10b), division of results into groups was similar to that observed at $+5^\circ\text{C}$. Mixtures from the first group (“FB-RCM_lab.”, “FB-RCM_trial sec.” and “EB-RCM_trial sec.”) displayed stiffness values ranging from 4081 MPa to 5728 MPa. These results are lower than the median of the entire experiment and considerably lower than stiffness values displayed by the mixtures with hydraulic binder composed of 100% of cement. The most disadvantageous information is the fact that the EB-RCM mixture at the test site displayed surprisingly high stiffness in comparison to the stiffness of the same mixture prepared in the laboratory. One should bear in mind that recycled mixtures with foamed bitumen are characterized by considerably greater homogeneity

wynikające z nierównomiernej dystrybucji emulsji asfaltowej oraz drogowego spoiwa hydraulicznego mogły przyczynić się do zaobserwowanego wzrostu modułu sztywności mieszanki recyklowanej.

Dwie ostatnie cechy podbudowy recyklowanej dotyczyły wytrzymałości na ściskanie osiowe UCS oraz szybkości przyrostu deformacji z uwzględnieniem skrepowania bocznego f_c zgodnie z EN-12679-25 [46]. Obie cechy są ważne z punktu widzenia trwałości eksploatacyjnej podbudowy. Uzyskane rezultaty przedstawiono na Rys. 11.

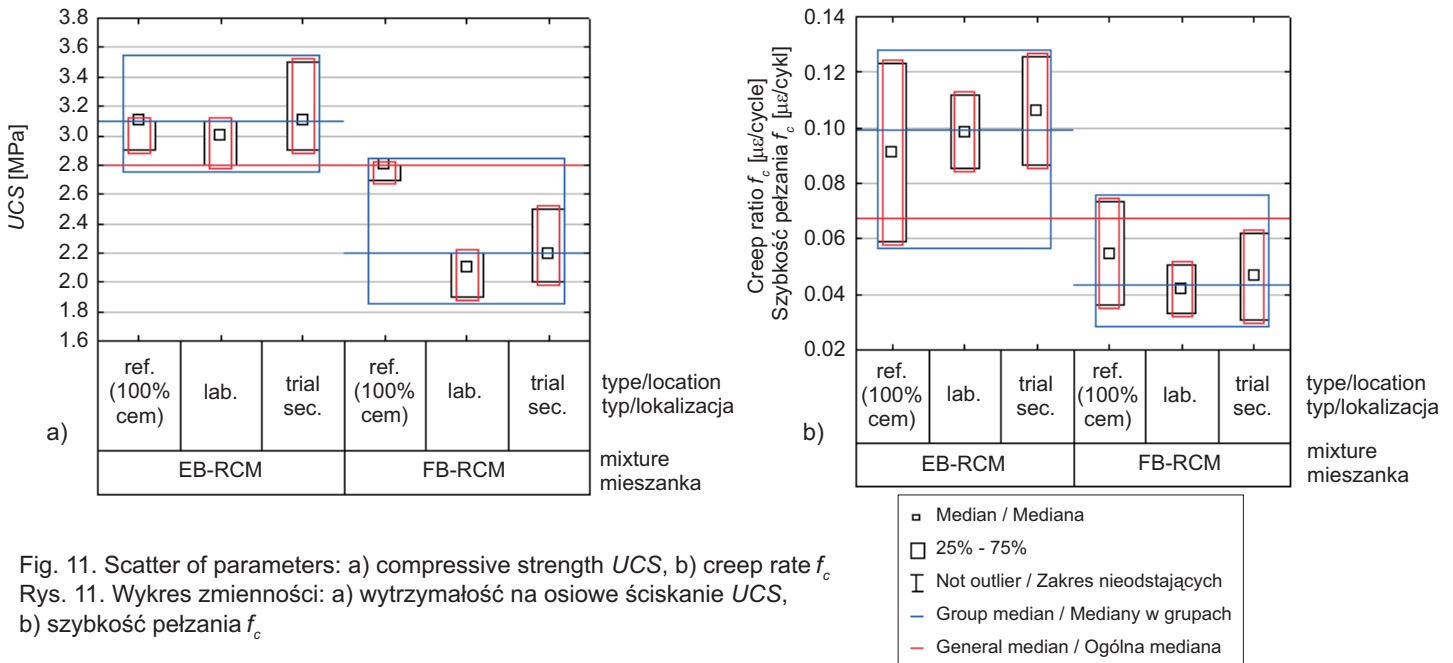


Fig. 11. Scatter of parameters: a) compressive strength UCS , b) creep rate f_c .
Rys. 11. Wykres zmienności: a) wytrzymałość na osiowe ściskanie UCS , b) szybkość pełzania f_c

Analiza wyników cechy UCS sugeruje istnienie dwóch grup. Pierwsza, która uzyskała istotnie najniższą wytrzymałość na ściskanie, to próbki FB-RCM pochodzące z odcinka doświadczalnego („trial sec.”) oraz sporządzone w laboratorium („lab.”). Ich wytrzymałość na ściskanie mieściła się w przedziale 2,05-2,1 MPa. Pozostałe uzyskały wartości istotnie wyższe, z przedziału 2,8-3,0 MPa. Obserwując wyniki na Rys. 11a można stwierdzić, że wytrzymałość na ściskanie jest wyższa dla mieszanek recyklowanych z emulsją niż dla wykonanych z asfaltem spienionym. Pomimo niższej wytrzymałości na osiowe ściskanie próbki FB-RCM odznaczały się niższym tempem przyrostu deformacji (Rys. 11b). Wartość mediany w grupie FB-RCM wynosiła 0,043 $\mu\epsilon$ /cykl, natomiast w grupie mieszanek wykonanych z emulsją asfaltową mediana wyników wynosiła $f_c = 0,1 \mu\epsilon$ /cykl. Niemniej jednak, uwzględniając rozrzut wyników, nie udało się przy prawdopodobieństwie 95% wyodrębnić istotnych dwóch różnych grup.

than recycled mixtures with bituminous emulsion. Therefore, imperfections resulting from non-uniform distribution of emulsion and hydraulic road binder might have contributed to the observed increase in stiffness modulus of the recycled mixture.

The last two analyzed properties of the recycled base course were the compressive strength UCS and the creep rate with confinement f_c , according to EN-12679-25 [46]. Both characteristics are important in terms of the base course service life. The obtained results are presented in Fig. 11.

The analysis of the obtained UCS values suggests existence of two groups. The first group, which displayed significantly lowest compressive strength, consists of specimens FB-RCM obtained at the test site (“al sec.”) and prepared in the laboratory (“lab.”). Their compressive strength was in the range of 2.05-2.1 MPa. The remaining specimens displayed significantly greater values, in the range of 2.8-3.0 MPa. As may be observed in Fig. 11a, compressive strength of recycled mixtures with emulsion is greater than compressive strength of recycled mixtures with foamed bitumen. Despite their lower UCS strength, the FB-RCM specimens were characterized by lower creep rate (Fig. 11b). The median in the FB-RCM group equaled 0.043 $\mu\epsilon$ /cycle, while the median in the group of recycled mixtures with bituminous emulsion was $f_c = 0.1 \mu\epsilon$ /cycle. Nevertheless, taking into account the scatter of the results, it proved impossible to identify

W związku z tym z punktu widzenia prawdopodobieństwa uzyskana wartość zróżnicowania pomiędzy cechami jest w zakresie błędu pomiaru. Tym samym można przyjąć, że przeciętny wynik szybkości deformacji w całej populacji był na poziomie $f_c = 0,07 \mu\epsilon/\text{cykl}$.

Podsumowując, pomimo niższej wytrzymałości na ściskanie mieszanki recyklowane z asfaltem spienionym (FB-RCM) nie ulegały pełzaniu w szybszym tempie niż mieszanki EB-RCM. Biorąc pod uwagę, że recyklowane mieszanki FB-RCM uzyskały niższą sztywność oraz wyższą kohezję ITS_{dry} , należy się spodziewać ich wyższej trwałości eksploatacyjnej, uwzględniając czynniki temperaturowe i potencjalnie występujące odkształcenie rozciągające na spodzie podbudowy. Ponadto mieszanka FB-RCM zawierająca innowacyjne spoiwo drogowe spełniła założony cel projektu TECHMATSTRATEG I [21], który polegał na uzyskaniu kompozytu o zwiększonej ciągliwości przy ograniczonej sztywności. Ten rezultat był bezpośrednim skutkiem oddziaływania spoiwa drogowego. Zaobserwowano go z zestawienia rezultatów wspomnianych cech mechanicznych próbek mieszanki recyklowanej sporządzonej ze spoiwa zawierającego 100% cementu oraz próbek recyklowanej mieszanki zawierającej drogowe spoiwo hydrauliczne o proporcjach składników: 40% CEM-I-32,5R; 20% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oraz 40% UCPP.

5. WNIOSKI

Na podstawie wykonanych badań w zakresie wpływu kompozycji środka wiążącego na właściwości recyklowanej mieszanki na zimno możliwe jest sformułowanie następujących wniosków:

1. Zastosowane drogowe spoiwo hydrauliczne (trójskładnikowe) pozwoliło na zmniejszenie sztywności mieszanki recyklowanej przy zachowaniu wysokiej wytrzymałości na pośrednie rozciągnię w porównaniu do klasycznego spoiwa cementowego. Ponadto trójskładnikowe spoiwo pozwoliło na zachowanie niskiej szybkości pełzania, porównywalnej z szybkością pełzania mieszanki recyklowanej zawierającej 100% cementu w spoiwie drogowym.
2. Analiza zmian temperatury na podstawie zbioru wyników obejmujących jeden rok wskazała, że najbardziej prawdopodobnymi wartościami temperatury są $+5^\circ\text{C}$ oraz $+25^\circ\text{C}$. Natomiast wartość przeciętna temperatury w skali roku wyniosła – w zależności od rodzaju technologii – pomiędzy $11,81^\circ\text{C}$ a $11,62^\circ\text{C}$ i była bliska temperaturze ekwiwalentnej przyjmowanej w polskim katalogu. Tym samym potwierdzona została słuszność przyjętej w Polsce temperatury ekwiwalentnej $+13^\circ\text{C}$.

two significantly different groups at the probability of 95%. Therefore, in terms of the adopted probability, the obtained differences between the measured parameters were within the range of observational error and it may only be stated that the average creep rate across the entire population equaled $f_c = 0,07 \mu\epsilon/\text{cycle}$.

In summary, despite their lower compressive strength, recycled mixtures with foamed bitumen (FB-RCM) did not exhibit greater creep rate than EB-RCM. Taking into account the lower stiffness and greater cohesion ITS_{dry} of the FB-RCM mixtures, greater service life of FB-RCM may be expected at the analyzed temperatures and the potential tensile strains at the bottom of the base. Moreover, the FB-RCM mixture with the innovative three-component hydraulic binder fulfilled the aim adopted in the TECHMATSTRATEG I project [21], which consisted in obtaining a composite with increased tensile strain capacity and limited stiffness. The obtained result was the direct effect of the used hydraulic binder, as observed from comparisons of the aforementioned mechanical characteristics of specimens of cold-recycled mixtures with hydraulic binder composed of 100% cement and specimens with the three-component hydraulic binder consisting of 40% of CEM-I-32.5R cement, 20% of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and 40% of CBPD.

5. CONCLUSIONS

Based on the performed research concerning the effect of hydraulic binder composition on the properties of cold-recycled mixtures, it is possible to formulate the following conclusions:

1. In comparison to a typical hydraulic road binder, the used three-component hydraulic binder enabled a reduction in stiffness of the recycled mixtures, while withstanding high indirect tensile strain. Moreover, the three-component hydraulic binder enabled maintenance of low creep rate, comparable to the creep rate of recycled mixture with hydraulic binder consisting of 100% of cement.
2. Analysis of temperature changes over a one-year period indicated that the most probable temperature values were $+5^\circ\text{C}$ and $+25^\circ\text{C}$. The mean temperature of the base course across the entire year equaled between 11.81°C and 11.62°C (depending on the technology used) and was similar to the equivalent temperature adopted in the Polish catalog. Therefore, validity of the Polish equivalent temperature of $+13^\circ\text{C}$ was confirmed.

3. Wilgotność warstwy recyklowanej podbudowy dla obydwu technologii na odcinku, gdzie zastosowano drogowe spoiwo hydrauliczne (trójskładnikowe), wynosiła pomiędzy 10,1% a 11,8%, z przeciętnym rozrzutem wyników $\pm 0,16\%$. Była to wartość bliska wilgotności optymalnej, co gwarantuje stabilne warunki pracy w czasie eksploatacji.
4. Wyniki zawartości wolnych przestrzeni sugerują, że mieszanka recyklowana z asfaltem spienionym FB-RCM uzyskała bardziej zamkniętą strukturę niż recyklowana mieszanka z emulsją asfaltową.
5. Mieszanka FB-RCM uzyskała niższą sztywność niż EB-RCM. Mieszanka FB-RCM zachowała natomiast istotnie wyższą kohezję (mediana $ITS_{dry} = 796$ kPa) niż EB-RCM (mediana $ITS_{dry} = 479$ kPa).
6. Mieszanka FB-RCM zawierająca drogowe spoiwo hydrauliczne (trójskładnikowe) osiągnęła niższy moduł sztywności niż mieszanka EB-RCM. W związku z tym, uwzględniając wyniki ITS_{dry} , recyklowana mieszanka FB-RCM będzie prawdopodobnie mniej podatna na spękania niskotemperaturowe.
7. Mieszanka FB-RCM uzyskała niższą wytrzymałość na ściskanie niż mieszanka EB-RCM. Natomiast w przypadku szybkości pełzania pomiędzy obiema typami mieszanek recyklowanych nie odnotowano istotnej różnicy.

Na kolejnym etapie prac autorzy będą rozwijać tematykę zastosowania drogowego spoiwa hydraulicznego (trójskładnikowego) w aspekcie dłuższego monitoringu eksploatowanej nawierzchni z podbudową wykonaną w technologii recyklingu głębokiego, wykorzystując rzeczywistą odpowiedź nawierzchni z uwzględnieniem jej stanu odkształcenia.

INFORMACJE DODATKOWE

Badania zostały przeprowadzone jako część projektu „Innowacyjna technologia wykorzystująca optymalizację środka wiążącego przeznaczonego do recyklingu głębokiego na zimno konstrukcji nawierzchni zapewniająca jej trwałość eksploatacyjną” (TECHMATSTRATEG1/349326/9/NCBR/2017) w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Nowoczesne Technologie Materiałowe” (TECHMATSTRATEG I) finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Jenkins K.J.: Mix Design Considerations for Cold and Half-Warm Bituminous Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen. PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Stellenbosch: Stellenbosch, South Africa, 2000

3. Moisture content in the recycled base course for both bitumen technologies at the sections with the three-component hydraulic binder ranged from 10.1% to 11.8%, with an average confidence interval of $\pm 0.16\%$. The values were similar to the optimum moisture, which guarantees stable service conditions.
4. Air void content results suggest that the recycled mixture with foamed bitumen FB-RCM obtained a tighter internal structure than the recycled mixture with bituminous emulsion.
5. The FB-RCM mixture displayed lower stiffness than the EB-RCM mixture; however, FB-RCM maintained significantly greater cohesion (median of $ITS_{dry} = 796$ kPa) than EB-RCM (median of $ITS_{dry} = 479$ kPa).
6. The FB-RCM mixture with the three-component hydraulic binder displayed lower stiffness modulus than the EB-RCM mixture. Therefore, taking into account the ITS_{dry} results, the cold-recycled FB-RCM mixture will probably be less susceptible to low-temperature cracking.
7. The FB-RCM mixture displayed lower compressive strength than the EB-RCM mixture. As for the creep rate, no significant differences between the two mixture types were identified.

At further stages of the research the authors will analyze the issues of usage of the three-component hydraulic binder in the aspect of longer monitoring periods of in-service pavements with cold-recycled base courses, taking into account the actual pavement response, including its state of strain.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research results were developed as part of the project entitled “An innovative technology using binding agent optimization that provides long service life of recycled base courses” (TECHMATSTRATEG1/349326/9/NCBR/2017) within the scientific undertaking of Strategic Research and Development Program entitled “Modern Materials Technology” (TECHMATSTRATEG I), which is financed by the National Center for Research and Development (Poland).

- [2] Chomicz-Kowalska A., Maciejewski K.: Performance and Viscoelastic Assessment of High-Recycle Rate Cold Foamed Bitumen Mixtures Produced with Different Penetration Binders for Rehabilitation of Deteriorated Pavements. Journal of Cleaner Production, **258**, 2020, ID article 120517, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120517

- [3] *Mallick R.B., Hendrix G.*: Use of Foamed Asphalt in Recycling Incinerator Ash for Construction of Stabilized Base Course. *Resources, Conservation and Recycling*, **42**, 2004, 239-248, DOI: 10.1016/j.resconrec.2004.04.007
- [4] *Iwański M.M.*: Synergistic Effect of F-T Synthetic Wax and Surface-Active Agent Content on the Properties and Foaming Characteristics of Bitumen 50/70. *Materials*, **14**, 2021, 300, DOI:10.3390/ma14020300
- [5] *Czapik P., Zapala-Sławeta J., Owsiak Z., Stępień P.*: Hydration of Cement By-Pass Dust. *Construction and Building Materials*, **231**, 2020, ID article 117139, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117139
- [6] *Dołżycki B.*: Polish Experience with Cold In-Place Recycling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **236**, 2017, ID article 012089, DOI: 10.1088/1757-899X/236/1/012089
- [7] *Skotnicki L., Kuźniewski J., Szydło A.*: Stiffness Identification of Foamed Asphalt Mixtures with Cement, Evaluated in Laboratory and In Situ in Road Pavements. *Materials*, **13**, 5, 2020, 1128, DOI: 10.3390/ma13051128
- [8] *Iwański M., Mazurek G., Buczyński P.*: Bitumen Foaming Optimisation Process on the Basis of Rheological Properties. *Materials*, **11**, 10, 2018, 1854, DOI: 10.3390/ma11101854
- [9] *Niazi Y., Jalili M.*: Effect of Portland Cement and Lime Additives on Properties of Cold In-Place Recycled Mixtures with Asphalt Emulsion. *Construction and Building Materials*, **23**, 3, 2009, 1338-1343, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.07.020
- [10] *Kukielka J., Bańkowski W.*: The Experimental Study of Mineral-Cement-Emulsion Mixtures with Rubber Powder Addition. *Construction and Building Materials*, **226**, 2019, 759-766, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.276
- [11] *Buczyński P.*: Rehabilitation Reliability of the Road Pavement Structure with Recycled Base Course with Foamed Bitumen. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **356**, 2018, ID article 012016, DOI: 10.1088/1757-899X/356/1/012016
- [12] *Iwański M., Chomicz-Kowalska A.*: Evaluation of the Pavement Performance. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, **63**, 1, 2015, 97-105, DOI: 10.1515/bpasts-2015-0011
- [13] *Bocci M., Grilli A., Cardone F., Ferrotti G.*: Full-Depth Reclamation for the Rehabilitation of Local Roads: A Case Study. *International Journal of Pavement Engineering*, **15**, 3, 2014, 191-201, DOI: 10.1080/10298436.2012.657196
- [14] *Dal Ben M., Jenkins K.J.*: Performance of Cold Recycling Materials with Foamed Bitumen and Increasing Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement. *Road Materials and Pavement Design*, **15**, 2, 2014, 348-371, DOI: 10.1080/14680629.2013.872051
- [15] *Bocci E., Graziani A., Bocci M.*: Cold In-Place Recycling for a Base Layer of an Italian High-Traffic Highway, in: Pasetto M., Partl M.N., Tebaldi G. (eds.): *Proceedings of the 5th International Symposium on Asphalt Pavements & Environment (APE)* Springer International Publishing, Cham, 2020, 313-322, DOI: 10.1007/978-3-030-29779-4_31
- [16] *Berthelot C., Gerbrandt R.*: Cold In-Place Recycling and Full-Depth Strengthening of Clay-Till Subgrade Soils Results with Cementitious Waste Products in Northern Climates. *Transportation Research Record*, **1787**, 1, 2002, 3-12, DOI: 10.3141/1787-01
- [17] *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
- [18] *Buczyński P., Iwański M.*: Characteristics of the Complex Modulus of Recycled Cold Mix with Foamed Bitumen and Recycled Concrete Aggregate. *MATEC Web of Conferences*, **262**, 2019, 05002, DOI: 10.1051/mateconf/201926205002
- [19] *Wirtgen Cold Recycling Technology*, Wirtgen, Windhagen, 2012
- [20] *Judycki J., Jaskuła P., Pszczola M., Alenowicz J., Dołżycki B., Jaczewski M., Ryś D., Stienss M.*: *Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych*, GDDKiA, Warszawa, 2014
- [21] *Raport z Projektu Badawczego – Nowoczesne Technologie Materiałowe TECHMATSTRATEG I „Innowacyjna technologia wykorzystująca optymalizację środka wiążącego przeznaczonego do recyklingu głębokiego na zimno konstrukcji nawierzchni zapewniająca jej trwałość eksploatacyjną” / “An innovative technology using binding agent optimization that provides long service life of recycled base courses”, (TECHMATSTRATEG1/349326/9/NCBR/2017)*, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, 2017-2020
- [22] *Iwański M., Chomicz-Kowalska A., Buczyński P., Mazurek G., Cholewińska M., Iwański M.M., Ramiączek P., Maciejewski K.*: *Procedury projektowania oraz wytyczne stosowania materiałów odpadowych i z recyklingu do technologii wytwarzania mieszank metodą na zimno z asfaltem spienionym (MCAS)*, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, 2018
- [23] *Dołżycki B.*: *Instrukcja projektowania i wbudowania mieszank mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE)*, 2019
- [24] *Iwański M., Chomicz-Kowalska A.*: Application of the Foamed Bitumen and Bitumen Emulsion to the Road Base Mixes in the Deep Cold Recycling Technology. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, **11**, 4, 2016, 291-301, DOI: 10.3846/bjrbe.2016.34
- [25] *Iwański M.*: *Podbudowa z asfaltem spienionym*. *Drogownictwo*, **59**, 3, 2006, 97-106
- [26] *Iwański M., Chomicz-Kowalska A.*: *Właściwości recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym*. *Drogownictwo*, **64**, 9, 2011, 271-277

- [27] *Iwański M., Chomicz-Kowalska A.*: Laboratory Study on Mechanical Parameters of Foamed Bitumen Mixtures in the Cold Recycling Technology. *Procedia Engineering*, **57**, 2013, 433-442, DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.056
- [28] *Iwański M., Chomicz-Kowalska A., Mazurek G., Buczyński P., Cholewińska M., Iwański M.M., Maciejewski K., Ramiączek P.*: Effects of the Water-Based Foaming Process on the Basic and Rheological Properties of Bitumen 70/100. *Materials*, **14**, 2021, 2803, DOI: 10.3390/ma14112803
- [29] *Mazurek G., Iwański M.*: Optimisation of the Innovative Hydraulic Binder Composition for Its Versatile Use in Recycled Road Base Layer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **603**, 3, 2019, 032044, DOI: 10.1088/1757-899X/603/3/032044
- [30] *Dolżycki B.*: Spękania nawierzchni z podbudową mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej na przykładzie Drogi Krajowej nr 7. *Drognictwo*, **62**, 12, 2009, 411-417
- [31] *Baghini M.S., Ismail A., Bin Karim M.R.*: Evaluation of Cement-Treated Mixtures with Slow Setting Bitumen Emulsion as Base Course Material for Road Pavements. *Construction and Building Materials*, **94**, 2015, 323-336, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.057
- [32] *Kavussi A., Modarres A.*: Laboratory Fatigue Models for Recycled Mixes with Bitumen Emulsion and Cement. *Construction and Building Materials*, **24**, 10, 2010, 1920-1927, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.009
- [33] *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
- [34] *Lesueur D., Petit J., Ritter H.J.*: The Mechanisms of Hydrated Lime Modification of Asphalt Mixtures: A State-of-the-Art Review. *Road Materials and Pavement Design*, **14**, 2013, 1-16, DOI: 10.1080/14680629.2012.743669
- [35] *Iwański M.M.*: Effect of Hydrated Lime on Indirect Tensile Stiffness Modulus of Asphalt Concrete Produced in Half-Warm Mix Technology. *Materials*, **13**, 2020, 4731, DOI:10.3390/ma13214731
- [36] *Stroup-Gardinder M., Epps J.A.*: Four Variables That Affect the Performance of Lime in Asphalt Aggregate Mixtures. *Transportation Research Record*, 1987, 12-22, <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1987/1115/1115-002.pdf> (22.12.2022)
- [37] PN-EN 13282-2:2015-06 Hydrauliczne spoiwa drogowe – Część 2: Hydrauliczne spoiwa drogowe normalnie wiążące – Skład, wymagania i kryteria zgodności
- [38] PN-EN 13808:2013 Bitumen and Bituminous Binders – Framework for Specifying Cationic Bituminous Emulsions
- [39] *Iwański M.; Mazurek G.; Buczyński P.*: Optymalizacja składu środka wiążącego o uniwersalnym charakterze zastosowania w recyklowanych podbudowach. Raport częściowy z Projektu Badawczego TECHMATSTRATEG I, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, 2019
- [40] PN-EN 12697-1:2020-08 Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 1: Soluble Binder Content
- [41] PN-EN 12697-31:2019-03 Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 31: Specimen Preparation Gyrratory Compactor
- [42] EN 12697-30:2018 Bituminous Mixtures – Test Methods – Part 30: Specimen Preparation by Impact Compactor
- [43] PN-EN 12697-23:2017 Bituminous Mixtures – Test Methods – Part 23: Determination of the Indirect Tensile Strength of Bituminous Specimens
- [44] PN-EN 12697-26:2018 Bituminous Mixtures – Test Methods – Part 26: Stiffness
- [45] PN-EN 13286-41:2021 Unbound and Hydraulically Bound Mixtures – Part 41: Test Method for Determination of the Compressive Strength of Hydraulically Bound Mixtures
- [46] PN-EN 12697-25:2016 Bituminous Mixtures – Test Methods – Part 25: Cyclic Compression Test
- [47] PN-EN 13108-20:2008 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Wymagania – Część 20: Badanie Typu
- [48] *Tanyu B.F., Ullah S., Akmaz E.*: Optimizing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Content in Unbound Base Aggregate. Virginia Transportation Research Council, Technical Report, 2021, DOI: 10.13140/RG.2.2.10713.85605
- [49] *Montgomery D.C.*: Design and Analysis of Experiments. Eighth edition, John Wiley & Sons, Hoboken, 2013